

ISSN 2307-5732

DOI 10.31891/2307-5732

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

3.2023

ВІСНИК

**Хмельницького
національного
університету**

Технічні науки

Technical sciences

SCIENTIFIC JOURNAL

HERALD OF KHMELNYTSKYI NATIONAL UNIVERSITY

2023, Issue 3, Volume 321

Хмельницький

**ВІСНИК
ХМЕЛЬНИЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
серія: Технічні науки**

Затверджений як фахове видання категорії «Б»,
РІШЕННЯ АТЕСТАЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ № 1643 ВІД 28.12.2019 та №409 від 17.03.2020

Засновано в липні 1997 р.

Виходить 6 разів на рік

Хмельницький, 2023, № 3(321)

**Засновник і видавець: Хмельницький національний університет
(до 2005 р. – Технологічний університет Поділля, м. Хмельницький)**

Наукова бібліотека України ім. В.І. Вернадського http://nbuv.gov.ua/j-tit/Vchnu_tekh

Включено до науково-метричних баз:

| | |
|--------------------------------------|---|
| Google Scholar | http://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=aIUP9OYAAAAAJ |
| Index Copernicus | http://jml2012.indexcopernicus.com/passport.php?id=4538&id_lang=3 |
| Polish Scholarly Bibliography | https://pbn.nauka.gov.pl/journals/46221 |
| CrossRef | http://doi.org/10.31891/2307-5732 |

| | |
|--------------------------------------|--|
| Головний редактор | Скиба М. Є. , д.т.н., професор, заслужений працівник народної освіти України, член-кореспондент Національної академії педагогічних наук України, професор кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету |
| Заступник головного редактора | Синюк О. М. , д.т.н., професор кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету |
| Відповідальний секретар | Горященко С. Л. , к.т.н., доцент кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету |

Ч л е н и р е д к о л е г і ї
Технічні науки

Березненко С.М., д.т.н., Бойко Ю.М., д.т.н., Говорущенко Т.О., д.т.н., Гордєєв А.І., д.т.н., Горященко С. Л., к.т.н., Грабко В.В., д.т.н., Диха О.В., д.т.н., Защепкіна Н.М., д.т.н., Рубаненко О. О., д.с.н., Захаркевич О.В., д.т.н., Злотенко Б.М., д.т.н., Зубков А.М., д.т.н., Каплун П.В., д.т.н., Карташов В.М., д.т.н., Кичак В.М., д.т.н., Любош Хес, д.т.н., (Чехія), Мазур М.П., д.т.н., Мандзюк І.А., д.т.н., Мартинюк В.В., д.т.н., Мельничук П.П., д.т.н., Місяць В.П., д.т.н., Мясіщев О.А., д.т.н., Нелін Є.А., д.т.н., Павлов С.В., д.т.н., Параска О.А., д.т.н., Рогатинський Р.М., д.т.н., Горошко А.В., д.т.н., Сарібекова Ю.Г., д.т.н., Семенко А.І., д.т.н., Славінська А.Л., д.т.н., Харжевський В.О., д.т.н., Шинкарук О.М., д.т.н., Шклярський В.І., д.т.н., Щербань Ю.Ю., д.т.н., Бубулєс Альгімантас, доктор наук (Литва), Елсаєд Ахмед Ельнашар, доктор наук (Єгипет), Кальчиньскі Томаш, доктор наук (Польща), Лунтовський Андрій, д.т.н. (Німеччина), Матушевський Мацей, доктор наук (Польща), Мушлевський Лукаш, доктор наук (Польща), Мушял Януш, доктор наук (Польща), Натріашвілі Тамаз Мамієвич, д.т.н., (Грузія), Попов Валентин, доктор природничих наук (Німеччина)

| | |
|---------------------------|-------------------------|
| <i>Технічний редактор</i> | Горященко К. Л., к.т.н. |
| <i>Редактор-коректор</i> | Броженко В. О. |

**Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету,
протокол № 14 від 29.06.2023 р.**

Адреса редакції: редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету"
Хмельницький національний університет
вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, Україна, 29016

| | | | |
|----------------|--|-------------|---|
| ☎ | (038-2) 67-51-08 | web: | http://journals.khnu.km.ua/vestnik |
| e-mail: | visnyk.khnu@khmnu.edu.ua visnyk.khnu@gmail.com | | http://lib.khnu.km.ua/visnyk_tup.htm |

Зареєстровано Міністерством України у справах преси та інформації.
Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
Серія КВ № 24922-14862ПР від 12 липня 2021 року

© Хмельницький національний університет, 2023
© Редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету", 2023

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| КАЗІОНОВ МАКСИМ, СКРИПНИК ТЕТЯНА, БАРМАК ОЛЕКСАНДР КВАНТОВИЙ МЕТОД ОПОРНИХ ВЕКТОРІВ: РОЗРОБКА ВАРІАЦІЙНИХ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ КЛАСИФІКАЦІЇ ДАНИХ У ТЕХНІЧНИХ, ПРИРОДНИЧИХ І СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНИХ СИСТЕМАХ | 11 |
| МАРЧУК ДМОТРО АНАЛІЗ СУЧАСНИХ АЛГОРИТМІВ ВИЯВЛЕННЯ І РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ З ВІДЕОПОТОКУ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ПАРКУВАННЯМ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ | 17 |
| ЩЕРБАНЬ ВОЛОДИМИР, КОЛИСКО О ОКСАНА, МЕЛЬНИК ГЕННАДІЙ, КОЛИСКО МАР'ЯНА, ЩЕРБАНЬ ЮРІЙ КОМП'ЮТЕРНИЙ МОДУЛЬ ПРОГРАМИ КДАМ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ШАТУННО-ПОВЗУНКОВОЇ ГРУПИ | 24 |
| КОТЕЛЕНЕЦЬ ЮЛІЯ, БОНДАРЕНКО НАТАЛІЯ, БОНДАРЕНКО ВІКТОР СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ЧАСУ З ДОДАТКОВИМИ МОЖЛИВОСТЯМИ | 29 |
| МАНУКОВ ІГОР, БОНДАРЕНКО НАТАЛІЯ, БОНДАРЕНКО ВІКТОР РОБОТИЗОВАНА ТЕСТОВА ПЛАТФОРМА | 33 |
| БЕЛОУС РОМАН, КРИЛОВ ЄВГЕН ОПТИМІЗАЦІЯ ЧАСУ ПРОЦЕСУ УЗГОДЖЕНОСТІ ДАНИХ В NOSQL | 37 |
| МИЛЬКО ВОЛОДИМИР, СОКОЛАН ЮЛІЯ, САВИЦЬКИЙ ЮРІЙ, РОМАНШИНА ОЛЬГА МОДЕЛЮВАННЯ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ДЛЯ ІНСТРУМЕНТУ В УМОВАХ НАРОСТОУТВОРЕННЯ | 43 |
| ЗАЛЮБОВСЬКИЙ МАРК, ПАНАСЮК ІГОР, БЛАЖЕНКО МАРІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ГАЛУТВАЛЬНОЇ МАШИНИ НА РЕАЛІЗАЦІЮ РЕЖИМІВ РУХУ МАСИВУ В СЕРЕДИНІ РОБОЧОЇ ЄМКОСТІ ЗІ СКЛАДНИМ ПРОСТОРОВИМ РУХОМ | 48 |
| КУПЧУК ІГОР, БИСТРИЦЬКИЙ ОЛЕКСАНДР ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ТВЕРДОГО БІОПАЛИВА | 55 |
| КЮРЧЕВ ВОЛОДИМИР ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ КОМБІНОВАНОГО ҐРУНТООБРОБНОГО АГРЕГАТУ ЗАЛЕЖНО ВІД РІЗНИХ ТИПІВ ҐРУНТУ | 60 |
| ЛЕМЕШКО АНДРІЙ, АНТОНЕНКО АРТЕМ, ЦВИК ОЛЕКСАНДР АНАЛІЗ І ОСОБЛИВОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТРАФІКУ | 64 |
| МЕЛЬНИК ВІТАЛІЙ, БАГРІЙ РУСЛАН, ПЕТРОВСЬКИЙ СЕРГІЙ ВИКОРИСТАННЯ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ КОМУНІКАЦІЇ ЛЮДЕЙ З ОСОБЛИВИМИ ПОТРЕБАМИ | 69 |
| НЕСКОРОДСЬКА ТЕТЯНА, ФЕДОРОВ ЄВГЕН, АНТОНОВ ЮРІЙ, НЕСКОРОДСЬКА АНАСТАСІЯ МЕТАЕВРИСТИЧНІ МЕТОДИ НА ОСНОВІ ПОВЕДІНКИ СОЦІАЛЬНИХ ПАВУКІВ ДЛЯ ЗАДАЧ ВНУТРІШНЬОГО АУДИТУ | 74 |
| ПАВЛІЧКО ВЛАДІСЛАВ, МЕЛЬНИКОВА НАТАЛІЯ ПЕРЕДБАЧЕННЯ ЦІНИ АВТОМОБІЛЯ МЕТОДАМИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ | 83 |
| РОМАНЕЦЬ ТАРАС, НЕЙМАК ВІТАЛІЙ, МАЙДАН ПАВЛО, СМУТКО СВІТЛАНА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВАКУУМНИХ ЗАХВАТНИХ ПРИСТРОЇВ У ЛЕГКІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ | 87 |

| | |
|---|-----|
| САПОЖНИК ДМИТРО СУЧАСНІ АСПЕКТИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ КОНТРАФАКТНОЇ ПРОДУКЦІЇ | 91 |
| СМАЧИЛО ОКСАНА, ЛЯШОК ІРИНА УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ВОЛОКНИСТИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ | 95 |
| МАТВІЙЧУК ЯРОСЛАВ, ЯЦИШИН ВОЛОДИМИР РОЗРОБЛЕННЯ АРХІТЕКТУРИ ЗГОРТКОВОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ НА ОБМЕЖЕНОМУ НАБОРІ ДАНИХ | 100 |
| ГОМЕЛЯ МИКОЛА, ТРУС ІННА, ВАКУЛЕНКО АННА, ФАТЄЄВ ДАНИЛО ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ВІД НІТРАТІВ МЕТОДОМ ЗВОРОТНОГО ОСМОСУ | 104 |
| КРИЛИК ЛЮДМИЛА ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕГРЕСІЙНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ФАКТОРІВ НА ЧУТЛИВІСТЬ ЄМНІСНОГО СЕНСОРА ВОЛОГОСТІ ДВОШАРОВОЇ СТРУКТУРИ | 109 |
| ДУМИН АНДРІЙ СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО ОЗВУЧУВАННЯ З ЕЛЕМЕНТАМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ... | 115 |
| ЛЕМЕШКО АНДРІЙ, АНТОНЕНКО АРТЕМ, КУВІК НАЗАР, ГНЯДИЙ ВЛАДИСЛАВ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕРЕЖЕВИХ ЗАГРОЗ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНОГО ЗАХИСТУ ДАНИХ ТА ІНФРАСТРУКТУРИ | 120 |
| МЕТЕЛИЦЯ АРТЕМ, КОВАЛЕНКО ВІКТОР, ТРОМСЮК ВОЛОДИМИР, ФОРМАНЧУК МИКОЛА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИМЕТРИЧНОГО ВІБРАТОРА | 128 |
| ОСАДЧУК ЯРОСЛАВ МІКРОЕЛЕКТРОННІ АВТОГЕНЕРАТОРНІ ОПТИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ | 135 |
| ОДЕГОВ МИКОЛА , ГАДЖИСЬВ МАТІН , ГЛАЗУНОВА ЛЮДМИЛА , БУКАТА ЛЮДМИЛА , КОЧЕТКОВА МАРИНА МЕТОДИКА СТРУКТУРНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ МОДЕЛЕЙ НЕСТАЦІОНАРНИХ КВАЗІПЕРІОДИЧНИХ ПРОЦЕСІВ | 145 |
| ПОЛЩУК АНДРІЙ, ПОЛЩУК ОЛЕГ, ЛІСЕВИЧ СВІТЛАНА, ГОРЯЩЕНКО СЕРГІЙ, УРБАНОК ЄВГЕН ТЕХНОЛОГІЯ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ ШВЕЙНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ У ВИТРАТНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ 3D-ДРУКУ | 158 |
| ПІЦУН ОЛЕГ, ПРИШЛЯК КАТЕРИНА, КАЛІНОВСЬКИЙ РОМАН, ПОВОРОЗНИК ВІТАЛІЙ МІКРОСЕРВІСНА АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ ОПРАЦЮВАННЯ ІМУНОГІСТОХІМІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ | 166 |
| РОМАНЕНКО АНТОН, КОРОТКИЙ ЄВГЕН КОНТРОЛЕР ВУЗЛА APRS МЕРЕЖІ | 175 |
| ТОМУСЯК АНДРІЙ МЕТОД ТА ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНИЙ ЗАСІБ ГЕНЕРУВАННЯ КЛЮЧІВ АУТЕНТИФІКАЦІЇ | 183 |
| ТОРОШАНКО ОЛЕКСАНДР, АФАНАСЬЄВ ПАВЛО, ПЩУК ІГОР, ТОРОШАНКО ЯРОСЛАВ БЕЗПЕКА ФУНКЦІОНУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ НЕЙРОННОЇ МОДЕЛІ КОНТРОЛЮ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ | 188 |
| ХРУЛЬОВ МИКОЛА, КРИВОУС ГЕННАДІЙ СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ ЛІНІЙНОЇ ШВИДКОСТІ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЗАГОТОВКИ ЗА ДОПОМОГОЮ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТИПУ ІНДУКТОСИН | 195 |

| | |
|---|-----|
| РУТКЕВИЧ ВОЛОДИМИР, ШАПОВАЛЮК СЕРГІЙ АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В АДАПТИВНОМУ ГІДРАВЛІЧНОМУ ПРИВОДІ ВИВАНТАЖУВАЧА СТЕБЛОВИХ КОРМІВ | 199 |
| ФЕДУШКО СОЛОМІЯ СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ДОСЛІДЖЕННЯ КІБЕРБЕЗПЕКИ ТА КІБЕРГІГІЄНИ В УМОВАХ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ СУСПІЛЬСТВА | 210 |
| ЛЕЖНЮК ПЕТРО, КОЗАЧУК ОЛЕГ, ГАЛУЗІНСЬКИЙ ОЛЕКСАНДР ВИКОРИСТАННЯ АКТИВНИХ СПОЖИВАЧІВ ДЛЯ БАЛАНСУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ | 214 |
| ПАСІЧНЮК АНТОН, ТИХОХОД ВОЛОДИМИР МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПРЕДМЕТНО-ОРІЄНТОВАНОГО ПРОЄКТУВАННЯ СКЛАДНИХ ПРОГРАМНИХ СИСТЕМ НА ПЛАТФОРМІ .NET CORE | 222 |
| ХРОКАЛО ЛЮДМИЛА ВИПРОБОВУВАННЯ БАКТЕРІАЛЬНИХ ФІЛЬТРІВ ТА КОНСЕРВАНТІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ЛІОФІЛІЗОВАНОГО СЛИЗУ РАВЛИКА КОСМЕТИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ | 229 |
| КРАВЧЕНКО ІГОР, МАМУТА МАРИНА КОЕФІЦІЄНТ ВИПРОМІНЕННЯ ЛАМП РОЗЖАРЮВАННЯ | 234 |
| СУББОТА ІРИНА ЗАСТОСУВАННЯ КРЕМНЕЗЕМИСТИХ ПОРІД ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ ВИРОБІВ БУДІВЕЛЬНОЇ КЕРАМІКИ | 240 |
| БАГРІЙ ОЛЕНА ВИКОРИСТАННЯ СКІНЧЕНО-ЕЛЕМЕНТНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ БОКОВОГО ТИСНЕННЯ МАСИВУ СИПКОГО СЕРЕДОВИЩА НА ПІДПІРНУ СТІНКУ ПРИ ЇЇ ЗМІЩЕННІ | 245 |
| БОБРОВНИКОВА КІРА, ГУРМАН ІВАН, ПОПОВ ЮРІЙ, БОЙЧУК ЯРОСЛАВ, КАЧУР ВОЛОДИМИР ВИЯВЛЕННЯ КІБЕРАТАК В ІНФРАСТРУКТУРІ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ НА ОСНОВІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ | 251 |
| ВАЩИШАК СЕРГІЙ, СТИСЛО ТАРАС, СТИСЛО ОКСАНА, ДЕМЧИНА МИКОЛА, ШКАТУЛЯК ВАСИЛЬ АДАПТИВНА МОДЕЛЬ ГЕЙМІФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ НАВЧАННЯ У ЗАКЛАДІ ВИЩОЇ ОСВІТИ | 258 |
| КЛИМЕНКО АНЖЕЛКА, СОКОЛЬСЬКИЙ ГЕОГРІЙ, КАМЕНЬСЬКА ТЕТЯНА ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ ВИПКАННЯ ХЛІБОБУЛОЧНОГО ВИРОБУ З ЕКСТРАКТОМ ШИПШИНИ | 265 |
| КОСТИРКО ВАСИЛЬ, АНІЛОВСЬКА ГАННА, ПЛЕША ВАСИЛЬ ПРОЄКТУВАННЯ БІБЛІОТЕКИ ДЛЯ СПРОЩЕННЯ УМОВ ВЕРИФІКАЦІЇ ПРОГРАМ | 273 |
| ЗУБКО ОЛЬГА, ШВЕЦЬ ГАЛИНА, КУЛЕШОВА СВІТЛАНА., СЕЛЕЗНЕВА АННА DIGITAL ТЕХНОЛОГІЇ РОЗРОБКИ ІМІДЖУ СПОЖИВАЧА | 280 |
| МОЛЧАНОВА КАТЕРИНА, АНДРЕЄВА ОЛЬГА, ПЕРВАЯ НАТАЛІЯ ЗАСТОСУВАННЯ ПЕПТИДІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ КОСМЕТИЧНИХ КРЕМІВ | 288 |
| НІЧЕПОРУК АНДРІЙ, НІЧЕПОРУК АНАСТАСІЯ, ДАНЧУК СЕРГІЙ, КОРОТКОВ ЮРІЙ, ЦАВОЛИК ТАРАС СИСТЕМА ЗБОРУ ДАНИХ ТА ВИЯВЛЕННЯ РОЗПОДІЛЕНИХ АТАК ВІДМОВА В ОБСЛУГОВУВАННІ У МЕРЕЖАХ НА ОСНОВІ ПРОТОКОЛУ RPL | 296 |

| | |
|--|-----|
| ПРАВОРСЬКА НАТАЛІЯ, ЯШИНА ОКСАНА, НЕТРЕБА ІГОР, ДОМІНА АНАСТАСІЯ КИРИЧЕНКО ОЛЕКСАНДР МЕТОД КОНСТРУЮВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗГІДНО АНАЛІЗУ ПОМИЛОК SQL-ЗАПИТІВ | 302 |
| РОЗЛОМІЙ ІННА, НАУМЕНКО СЕРГІЙ ШИФРУВАННЯ ТА СТИСНЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ АВТОРСЬКИХ ШАБЛОНІВ, КЕРОВАНИХ МАТРИЦЕЮ | 308 |
| ФАНТ МИКОЛА АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ПАРАЛЕЛЬНИХ ДВОМОВНИХ КОРПУСІВ ТЕКСТІВ | 314 |
| ЗАХАРКЕВИЧ ОКСАНА, КОШЕВКО ЮЛІЯ, ЕЛЬНАШАР ЕЛЬСАЄД, ШВЕЦЬ ГАЛИНА, СЕЛЕЗНЬОВА АННА ВПРОВАДЖЕННЯ ВІЗУАЛЬНОГО СЛОВНИКА З ТЕКСТИЛЮ ТА МОДИ У МОБІЛЬНИЙ ДОДАТОК | 320 |
| БОРТНИК ГЕННАДІЙ, КИРИЛОК СЕРГІЙ, БРИЛЬ МИХАЙЛО ШВИДКОДІЙНИЙ АНАЛОГО-ЦИФРОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ З КОРИГУВАННЯМ ЧАСОВИХ ЗСУВІВ ІМПУЛЬСІВ ДИСКРЕТИЗАЦІЇ | 329 |
| ГОРЯЩЕНКО СЕРГІЙ, СИНЮК ОЛЕГ, ДРАПАК ГЕОРГІЙ, ГОРЯЩЕНКО КОСТЯНТИН, РОМАНЕЦЬ ТАРАС АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ НАНЕСЕННЯ ПОЛІМЕРНОГО ПОКРИТТЯ НА ДЕТАЛІ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ..... | 334 |
| КРАСИЛЕНКО ВОЛОДИМИР, ПІДЛУБНИЙ ВЛАДИСЛАВ, НІКІТОВИЧ ДІАНА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДУ ГЕНЕРУВАННЯ ПОТОКУ МАТРИЧНИХ КЛЮЧІВ ПЕРЕСТАНОВОК ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ЗАШИФРУВАННЯ-МАСКУВАННЯ ВІДЕОКАДРІВ..... | 339 |
| МИХАЙЛОВСЬКА ОКСАНА, НАДОПТА ТЕТЯНА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ДЛЯ СПЕЦІАЛЬНОГО ВЗУТТЯ ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ | 348 |
| ПАВЛОВСЬКИЙ ПАВЛО, ПРИСЯЖНИЙ ДМИТРО, АБРАМЧУК ІГОР, САВРАЦЬКИЙ В., БІЛОУС В. ПІДВИЩЕННЯ ЗАХИСТУ ВІД НЕСАНКЦІОНОВАНОГО ДОСТУПУ ПІД ЧАС ГОЛОСУВАННЯ В ОРГАНАХ ДЕРЖАВНОЇ ВЛАДИ НА ОСНОВІ АПАРАТНОЇ БІОМЕТРИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ГОЛОСУЮЧОГО | 355 |
| ОЛІЙНИК ГАЛИНА, КОРНИЦЬКА ЛАРИСА, ДАНЧЕНКО ЮЛІЯ, РАСТОРГУЄВА МАРІЯ, ЄВТУШЕНКО ВАЛЕНТИНА КЛАСИФІКАЦІЯ МЕБЛЕВО-ДЕКОРАТИВНИХ ТКАНИН | 360 |
| МАКАРЕНКО ВАЛЕРІЙ, МЄШКОВ ЮРІЙ, СЕЛІВЕРСТОВ ІГОР, ЛАЗОРИК ВЛАДИСЛАВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ КОРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ ТРУБОПРОВОДІВ | 367 |

CONTENT

| | |
|---|----|
| KAZIONOV MAKSYM, SKRYPNYK TETYANA, BARMAK OLEXSANDER QUANTUM SUPPORT VECTOR MACHINES: DEVELOPING VARIATIONAL ALGORITHMS FOR DATA CLASSIFICATION IN TECHNICAL, NATURAL, AND SOCIO-ECONOMIC SYSTEMS | 11 |
| DMYTRO MARCHUK ANALYSIS OF MODERN ALGORITHMS FOR DETECTING AND RECOGNIZING OBJECTS FROM A VIDEO STREAM FOR REAL-TIME PARKING MANAGEMENT SYSTEMS | 17 |
| SHCHERBAN VOLODYMYR, KOLISKO OKSANA, MELNIK GENADIJ, KOLISKO MARJANA, SHCHERBAN YURIJ COMPUTER MODULE OF THE K DAM PROGRAM FOR DETERMINATION OF KINEMATIC AND DYNAMIC PARAMETERS OF THE CONNECTING ROD GROUP | 24 |
| KOTELENETS YULIIA, BONDARENKO VIKTOR, BONDARENKO NATALIIA TIME CONTROL SYSTEM WITH ADDITIONAL FEATURES | 29 |
| MANUKOV IHOR, BONDARENKO NATALIIA, BONDARENKO VIKTOR ROBOTIC TEST PLATFORM | 33 |
| BELOUS ROMAN TIME OPTIMIZATION OF PROCESS OF DATA CONSISTENCY IN NOSQL | 37 |
| MYLKO VOLODYMYR, SOKOLAN IULIIA, SAVYTSKYI YURIY, ROMANISHINA OLGA MODELLING OF CONTACT INTERACTION FOR A TOOL IN THE CONDITIONS OF OUTGROWTH | 43 |
| ZALYUBOVSKYI MARK, PANASYUK IGOR, BLAZHENKO MARIIA INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE DESIGN FEATURES OF THE TURNING MACHINE ON THE IMPLEMENTATION OF THE MOVEMENT MODES OF THE ARRAY IN THE MIDDLE OF THE WORKING CAPACITY WITH COMPLEX SPATIAL MOVEMENT | 48 |
| KUPCHUK IHOR, BYSTRYTSKYI OLEXANDER RESEARCH OF SOLID BIOFUEL PRODUCTION TECHNOLOGY | 55 |
| KYURCHEV VOLODYMYR EFFICIENCY OF USING THE COMBINED SOIL PROCESSING UNIT DEPENDING ON DIFFERENT TYPES SOIL | 60 |
| LEMESHKO ANDRII, ANTONENKO ARTEM, TSVIK OLEKSANDR ANALYSIS AND FEATURES OF TRAFFIC MONITORING SOFTWARE | 64 |
| MELNYK VITALII, BAHRII RUSLAN, PETROVSKYI SERHII USING AUGMENTED REALITY TO IMPROVE COMMUNICATION FOR PEOPLE WITH SPECIAL NEEDS | 69 |
| NESKORODIEVA TETIANA, FEDOROV EUGENE, ANTONOV YURIY, NESKORODIEVA ANASTASIIA METAHEURISTIC METHODS BASED ON THE BEHAVIOUR OF SOCIAL SPIDERS FOR INTERNAL AUDIT TASKS | 74 |
| PAVLICHKO VLADYSLAV, MELNYKOVA NATALIIA CAR PRICE PREDICTION USING ML METHODS | 83 |
| ROMANETS TARAS, NEIMAK VITALII, MAIDAN PAVLO, SMUTKO SVITLANA PROSPECTS FOR THE USE OF VACUUM CAPTURE DEVICES IN LIGHT INDUSTRY | 87 |
| SAPOZHNYK DMYTRO MODERN ASPECTS OF IDENTIFICATION OF COUNTERFEIT PRODUCTS | 91 |

| | |
|---|-----|
| SMACHYLO OKSANA, LIASHOK IRINA IMPROVEMENT OF THE MANUFACTURING TECHNOLOGY OF FIBROUS COMPOSITE MATERIALS | 95 |
| MATVIYTCHUK YAROSLAV, YACISHYN VOLODYMYR DEVELOPMENT OF A CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK ARCHITECTURE FOR MILITARY EQUIPMENT IMAGE CLASSIFICATION ON A LIMITED DATASET | 100 |
| GOMELYA MUKOLA, TRUS INNA, VAKULENKO ANNA, FATIEIEV DANYLO DEFINITION OF THE EFFICIENCY OF NITRATE REMOVAL FROM WATER USING THE REVERSE OSMOSIS METHOD | 104 |
| KRYLIK LYUDMILA PRACTICAL APPLICATION OF REGRESSION ANALYSIS FOR INFLUENCE ASSESSMENT OF FACTORS ON THE SENSITIVITY OF THE CAPACITIVE HUMIDITY SENSOR OF THE TWO-LAYER STRUCTURE | 109 |
| DUMYN ANDRII THE AUTOMATED VOICING SYSTEM WITH ELEMENTS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE | 115 |
| LEMESHKO ANDRIY, ANTONENKO ARTEM, KUVIK NAZAR, HNIADYI VLADYSLAV INVESTIGATING NETWORK THREATS TO ENSURE MAXIMUM PROTECTION OF DATA AND INFRASTRUCTURE | 120 |
| METELYTSYA ARTEM, KOVALENKO VIKTOR, TROMSIUK VOLODYMYR, FORMANCHUK MYKOLA MATHEMATICAL MODEL OF SYMMETRIC VIBRATOR | 128 |
| OSADCHUK IAROSLAV MICROELECTRONIC SELF-OSCILLATING OPTICAL POWER TRANSDUCERS | 135 |
| ODEGOV NICK, HADZHYIEV MATIN, GLAZUNOVA LYUDMILA, BUKATA LYUDMILA, KOCHETKOVA MARINA STRUCTURAL IDENTIFICATION METHODS OF NON-STATIONARY QUASI-PERIODIC PROCESSES MODELS | 145 |
| POLISHCHUK ANDRII, POLISHCHUK OLEH, LISEVICH SVITLANA, HORIASHCHENKO SERHIY, URBANIUK YEVHEN TECHNOLOGY OF WASTE PROCESSING OF THE CLOTHING INDUSTRY INTO CONSUMABLE MATERIALS FOR 3D PRINTING | 158 |
| PITSUN OLEH, PRYSHLIAK KATERYNA, KALINOVSKYI ROMAN, POVOROZNYK VITALIY MICROSERVICE ARCHITECTURE OF THE IMMUNOHISTOCHEMICAL IMAGE PROCESSING SYSTEM | 166 |
| ROMANENKO ANTON, KOROTKYI IEVGEN TERMINAL NODE CONTROLLER FOR APRS NETWORK | 175 |
| TOMUSYAK ANDRII METHOD AND SOFTWARE TOOLS FOR AUTHENTICATION KEY GENERATION | 183 |
| TOROSHANKO OLEKSANDR, AFANASIEV PAVLO, ISHCHUK IHOR, TOROSHANKO YAROSLAV SECURITY OF COMPUTER NETWORK FUNCTIONING BASED ON A NEURON MODEL OF OVERLOAD CONTROL | 188 |
| KHRULOV MYKOLA, KRYVOUS HENNADII THE LINEAR SPEED OF THE WORKPIECE MOVEMENT MEASURING METHOD THAT AN INDUCTOSYN-TYPE MEASURING TRANSDUCER USING | 195 |

| | |
|---|-----|
| RUTKEVYCH VOLODYMYR, SHAPOVALUK SERHIY ANALYSIS OF TRANSIENT PROCESSES IN THE ADAPTIVE HYDRAULIC DRIVE OF THE STEM FORAGE UNLOADER | 199 |
| FEDUSHKO SOLOMIIA MODERN APPROACHES TO THE STUDY OF CYBERSECURITY AND CYBER HYGIENE IN THE FRAMEWORK OF DIGITAL TRANSFORMATION OF SOCIETY | 210 |
| LEZHNIUK PETRO, KOZACHUK OLEG, GALUZINSKIY OLEKSANDER USE OF ACTIVE CONSUMERS FOR BALANCE OF ELECTRICITY IN THE ELECTRIC GRID | 214 |
| PASICHNIUK ANTON, TYKHOKHOD VOLODYMYR METHODS AND TOOLS OF DOMAIN-DRIVEN DESIGN OF COMPLEX SOFTWARE SYSTEMS ON THE .NET CORE PLATFORM | 222 |
| KHROKALO LIUDMYLA TESTING OF BACTERIAL FILTERS AND PRESERVATIVES FOR QUALITY ASSURANCE OF LYOPHILIZED SNAIL MUCUS AS A COSMETIC COMPONENT | 229 |
| KRAVCHENKO IGOR, MAMUTA MARYNA EMISSIVITY OF FILAMENT LAMPS | 234 |
| SUBBOTA IRYNA THE USE OF SILICEOUS ROCKS TO INCREASE THE STRENGTH OF CONSTRUCTION CERAMICS | 240 |
| BAHRII OLENA USING A FINITE ELEMENT MODEL TO DETERMINE LATERAL PRESSURE OF A GRANULAR MEDIUM ON A RETAINING WALL UNDER DISPLACEMENT | 245 |
| HURMAN IVAN, BOBROVNIKOVA KIRA, POPOV YURY, BOYCHUK YAROSLAV, KACHUR VOLODYMYR MACHINE LEARNING BASED METHODS FOR CYBERATACS DETECTION IN THE INTERNET OF THINGS INFRASTRUCTURE | 251 |
| VAHSCHYSHAK SERHII , STYSLO TARAS, STYSLO OKSANA, DEMCHYNA MYKOLA, SHKATULIAK VASYL ADAPTIVE MODEL OF GAMIFICATION FOR HIGHER EDUCATION LEARNING PROCESS | 258 |
| KLIMENKO ANZHELIKA, SOKOLSKY GEORGII, KAMENSKA TETIANA THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS OF BAKING BREAD PRODUCTS WITH ROSE HIP EXTRACT | 265 |
| KOSTYRKO VASYL, ANILOVSKA HANNA, PLESHA VASYL DESIGNING A LIBRARY TO SIMPLIFY PROGRAM VERIFICATION CONDITIONS | 273 |
| ZUBKO OLGA, SHVETS GALINA, SVITLANA KULESHOVA, SELEZNEVA ANNA DIGITAL TECHNOLOGIES OF CONSUMER IMAGE DEVELOPMENT | 280 |
| MOLCHANOVA KATERINA , ANDREYEVA OLGA, PERVAIA NATALIYA APPLICATION OF PEPTIDES FOR THE MANUFACTURE OF COSMETIC CREAMS | 288 |
| NICHEPORUK ANDRII, NICHEPORUK ANASTASIIA, DANCHUK SERHII, KOROTKOV YURII, TSAVOLYK TARAS SYSTEM FOR DATA COLLECTION AND DETECTION OF DISTRIBUTED DENIAL OF SERVICE ATTACKS IN THE RPL-BASED NETWORKS | 296 |
| PRAVORSKA NATALIYA, YASHYNA OKSANA, NETREBA IHOR, DOMINA ANASTASIYA KYRYCHENKO OLEXANDER A METHOD OF SOFTWARE DESIGN ACCORDING TO THE ANALYSIS OF SQL QUERY ERRORS | 302 |

| | |
|--|-----|
| ROZLOMII INNA, NAUMENKO SERHII METHOD OF BUILDING PROPRIETARY TEMPLATES FOR INFORMATION ENCRYPTION AND COMPRESSION TASKS | 308 |
| FANT MYKOLA ARCHITECTURE OF A MACHINE LEARNING SYSTEM FOR TEXT ALIGNMENT | 314 |
| ZAKHARKEVICH OKSANA, KOSHEVKO JULIA, ELSAYED ELNASHAR, SHVETS GALINA, SELEZNEVA ANNA IMPLEMENTATION OF THE VISUAL DICTIONARY ON TEXTILE AND FASHION INTO THE MOBILE APPLICATION | 320 |
| BORTNYK GENNADIY, KYRYLYUK SERGIY, BRYL MYKHAILO HIGH-SPEED ANALOG-DIGITAL CONVERTER WITH ADJUSTMENT OF TIME SHIFT OF SAMPLING PULSE | 329 |
| HORIASHCHENKO SERHIY, SYNUYK OLEH, HORIASHCHENKO KOSTYANTIN, DRAPAK GEORGIY, ROMANETS TARAS AUTOMATING THE PROCESS OF APPLYING POLYMER COATING ON PARTS OF THE LIGHT INDUSTRY | 334 |
| KRASILENKO VLADIMIR, PIDLUBNYI VLADISLAV, NIKITOVICH DIANA RESEARCH AND SIMULATION OF THE METHOD OF GENERATION OF THE FLOW OF MATRIX KEYS OF PERMUTATIONS AND THEIR CHARACTERISTICS FOR ENCRYPTION-MASKING OF VIDEO FRAMES | 339 |
| MYKHAILOVSKA OKSANA, NADOPTA TETYANA QUALITY INDICATORS FOR SPECIAL MILITARY SHOES..... | 348 |
| PAVLOVSKIY PAVLO, PRUSIAZHNYI DMITRO, ABRAMCHYK IGOR, SAVRATSKIY V., BILOUS V. INCREASING PROTECTION AGAINST UNAUTHORIZED ACCESS DURING VOTING IN STATE AUTHORITIES BASED ON HARDWARE BIOMETRIC IDENTIFICATION OF THE VOTER | 355 |
| OLIJNYK HALINA, KORNYTSKA LARYSA, DANCHENKO YULIYA, RASTORHUIEVA MARIIA, YEVTUSHENKO VALENTYNA CLASSIFICATION OF FURNITURE AND DECORATIVE FABRICS | 360 |
| MAKARENKO VALERIY, MESSHKOV YURII, SELIVERSTOV IGOR, LAZORIK VLADISLAV EXPERIMENTAL STUDIES OF THE WAYS OF INCREASING THE CORROSION RESISTANCE OF STEEL PIPELINES | 367 |

КАЗИОНОВ МАКСИМ

Хмельницький національний університет

ORCID ID: [0009-0004-0177-3336](https://orcid.org/0009-0004-0177-3336)e-mail: mr.kazonov@gmail.com**СКРИПНИК ТЕТЯНА**

Хмельницький національний університет

ORCID ID: [0000-0002-8531-5348](https://orcid.org/0000-0002-8531-5348)e-mail: tkskripnik1970@gmail.com**БАРМАК ОЛЕКСАНДР**

Хмельницький національний університет

ORCID ID: [0000-0003-0739-9678](https://orcid.org/0000-0003-0739-9678)e-mail: alexander.barmak@gmail.com

КВАНТОВИЙ МЕТОД ОПОРНИХ ВЕКТОРІВ: РОЗРОБКА ВАРІАЦІЙНИХ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ КЛАСИФІКАЦІЇ ДАНИХ У ТЕХНІЧНИХ, ПРИРОДНИЧИХ І СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНИХ СИСТЕМАХ

У роботі наведені результати дослідження застосування квантового методу опорних векторів у різних сферах, зокрема в технічних, природничих і соціально-економічних системах. Для висвітлення способів застосування квантового підходу у технічних інформаційних системах було використано проблему класифікації зловмисного трафіку, для природничих систем – проблему класифікації якості води, для економічних систем – проблему класифікації відтоку клієнтів. У випадку класифікації зловмисного трафіку, квантова модель продемонструвала кращу ефективність порівняно з класичними методами, хоча час навчання був трохи більшим через обмежену доступність квантових комп'ютерів. Враховуючи потенціал квантового обчислення для обробки великого обсягу даних та складних аналітичних завдань, його застосування в кібербезпеці може сприяти виявленню та прогнозуванню кібератак, захисту мереж та систем від загроз, а також виявленню вразливостей і встановленню механізмів їх усунення.

У випадку екологічних досліджень, класичні методи та квантовий класифікатор продемонстрували приблизно однакову якість класифікації, але результати не досягали еталонного рівня. Для поліпшення моделей можна використовувати кращі методи класифікації або комбінувати класичні методи з квантовими для отримання більш точних результатів.

У випадку прогнозування відтоку клієнтів у фінансових задачах, квантовий метод опорних векторів перевершив класичні методи, що свідчить про його великий потенціал, який може бути реалізований у якісні результати у майбутньому. Для подальшого розвитку таких застосувань необхідно вдосконалювати алгоритми, збільшувати кількість квантових ресурсів та активно використовувати нові підходи до навчання та оптимізації моделей.

Ключові слова: штучний інтелект, машинне навчання, квантові обчислення, квантовий метод опорних векторів, технічні інформаційні системи.

KAZIONOV MAKSYM, SKRYPNYK TETYANA, BARMAK OLEXSANDER

Khmelnitskyi National University

QUANTUM SUPPORT VECTOR MACHINES: DEVELOPING VARIATIONAL ALGORITHMS FOR DATA CLASSIFICATION IN TECHNICAL, NATURAL, AND SOCIO-ECONOMIC SYSTEMS

The paper presents research results on the application of the quantum support vector machine method in various domains, including technical, natural, and socio-economic systems. To explore the utilization of the quantum approach in technical information systems, the problem of malicious traffic classification was investigated. For natural systems, the classification of water quality was addressed, while customer churn classification was tackled in economic systems.

In the case of malicious traffic classification, the quantum model demonstrated superior effectiveness compared to classical methods, albeit with slightly longer training times due to limited availability of quantum computers. Considering the potential of quantum computing in processing large volumes of data and complex analytical tasks, its application in cybersecurity can contribute to the detection and prediction of cyber-attacks, network and system protection against threats, as well as the identification of vulnerabilities and the establishment of mitigation mechanisms.

Regarding ecological research, classical methods and the quantum classifier showcased similar classification quality, but the results did not reach the benchmark level. To enhance the models, one can leverage improved classification methods or combine classical and quantum approaches to achieve more precise results. In the context of customer churn prediction in financial tasks, the quantum support vector machine method outperformed classical methods, highlighting its significant potential for yielding high-quality results in the future. To further develop such applications, algorithm refinement, increased availability of quantum resources, and the active utilization of new approaches for training and model optimization are necessary.

Keywords: artificial intelligence, machine learning, quantum computing, quantum support vector machines, technical information systems.

Вступ та постановка проблеми

Машинне навчання є потужним інструментом для використання у різних галузях. Застосування методів машинного навчання кардинально змінюють галузі та поглиблюють розуміння складних структур даних. Стрімке зростання машинного навчання можна пояснити кількома ключовими факторами. По-перше, бурхливе зростання об'єму цифрових даних надало величезні обсяги інформації для аналізу, що призвело до

революційних відкриттів та ідей. По-друге, розвиток обчислювальних потужностей і апаратних можливостей уможливив розробку складних моделей і алгоритмів, які можуть обробляти і витягувати значущі закономірності з величезних масивів даних. Класичні машини опорних векторів (SVM) відіграли одну з вирішальних ролей у цій революції машинного навчання, надаючи ефективні алгоритми для задач класифікації та регресії. У дослідженні [1] було встановлено, що класичні SVM, хоч і проявляють високу ефективність у багатьох застосуваннях, мають свої обмеження. Зі зростанням об'єму та складності наборів даних, класичні SVM зазнають викликів у питанні обчислювальної ефективності. Час навчання значно зростає, а вимоги до пам'яті стають все більш вагомими. Крім того, використання класичних методів опорних векторів може ускладнити їх ефективність у завданнях, які виявляють квантові властивості. Ці обмеження спонукали до дослідження альтернативних підходів, таких як квантові обчислення, з метою подолання цих проблем і відкриття нових можливостей для машинного навчання. Отже, головною метою цієї статті є дослідження квантового методу опорних векторів у контексті задач класифікації для різних галузей.

Аналіз останніх джерел

Квантові обчислення відкривають нові можливості для вирішення складних завдань у багатьох сферах науки, технологій та соціально-економічного розвитку. Квантові комп'ютери забезпечують значно швидші та потужніші обчислювальні можливості, які можна використовувати для обробки та аналізу великих обсягів даних у різних галузях, включаючи науку про дані, медицину, фінанси, квантову хімію, чисту енергетику, безпечні комунікації тощо. У інформаційних технічних системах існує потреба аналізувати великі обсяги даних щодо роботи машин та обладнання, з метою виявлення проблем та зниження витрат на обслуговування. У дослідженні [2] було розглянуто використання квантового алгоритму для класифікації пошкоджень деталей за фотозображеннями. Висновок авторів статті підкреслює, що квантове машинне навчання має перспективи при розв'язанні реальних проблем, зокрема в галузі комп'ютерного зору.

У природничих науках, таких як біологія та екологія, виникає потреба у класифікації значних обсягів даних для проведення наукових досліджень та вивчення природних процесів. Використання квантового методу опорних векторів в природничих науках може бути цінним для класифікації даних та аналізу природних процесів. У дослідженні [3] буде досліджено застосування квантового методу опорних векторів для класифікації молекулярних властивостей.

Квантові алгоритми також знаходять своє застосування у соціально-економічних системах для аналізу обширних обсягів даних про споживачів, їх поведінку та інші фактори, які впливають на бізнес-рішення. Один із прикладів використання квантових алгоритмів у цій галузі наведений у дослідженні [4], де застосовувався квантовий метод опорних векторів для класифікації шахрайських платежів. Це дозволяє організаціям попереджати можливі проблеми та приймати своєчасні рішення. Крім того, квантовий метод опорних векторів може допомогти керувати кредитним ризиком, знаходячи оптимальний баланс між ризиком та доходом. Усі ці застосування дозволяють фінансовим установам знизити ризики та максимізувати прибуток, забезпечуючи стійке та ефективне функціонування на ринку.

Мета даної роботи полягає у дослідженні застосування ще відносно нового і невідомого квантового підходу (на прикладі методу опорних векторів) для технічних, природничих та соціально-економічних інформаційних систем, які потребують класифікації та мають великі обсяги даних..

Теоретичний матеріал

Метод опорних векторів (SVM) – це алгоритм навчання з учителем, що використовується для класифікації, регресії та виявлення викидів [5]. Основна ідея SVM базується на концепції гіперплощини максимальної ширини (ГМПШ), яка є лінійною границею рішень і відокремлює дані на різні класи з максимальною шириною між границею рішень і найближчими точками даних. Завдяки трюку ядра, який дозволяє відображати вхідні дані в більш багато-вимірний простір, SVM може вирішувати як лінійні, так і нелінійні задачі класифікації. Розглянемо задачу бінарної класифікації, в якій $X = \mathbb{R}^d$ – простір об'єктів, $Y = \{-1, +1\}$ – множина допустимих відповідей (цільова ознака), X – навчальна вибірка.

$$X = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^l. \quad (1)$$

Будемо клас $+1$ називати позитивним, а клас -1 – негативним. Тут d – розмірність ознакового простору, l – кількість прикладів у навчальній вибірці.

Лінійна модель класифікації визначається таким чином:

$$a(x) = \text{sign}(w, x + b) = \text{sign}\left(\sum_{j=1}^d w_j x_j + b\right), \quad (2)$$

де $w \in \mathbb{R}^d$ – вектор вагів, $b \in \mathbb{R}$ – зсув, sign^* – функція "сигнум", що повертає знак свого аргументу, $a(x)$ – відповідь класифікатора на прикладі x . Часто вважають, що серед ознак є константа, $x_{d+1} = 1$. У цьому випадку немає необхідності вводити зсув b , і лінійний класифікатор можна задавати так:

$$a(x) = \text{sign}\langle w, x \rangle \quad (3)$$

Геометрично лінійний класифікатор відповідає гіперплощині з вектором нормалі w , яка задається рівнянням $w, x = 0$. Величина скалярного добутку w, x пропорційна відстані від гіперплощини до точки x , а його знак показує, з якого боку від гіперплощини розташована ця точка. Якщо бути точним, відстань від точки з радіус-вектором x_A до площини $w, x = 0$:

$$p(x_A, w, x = 0) = \frac{w, x}{||w||} \quad (4)$$

Таким чином, лінійний класифікатор розділяє простір на дві частини за допомогою гіперплощини, і при цьому один напівпростір відносить до позитивного класу, а інший – до негативного. Задачу методу опорних векторів можна звести до задачі безумовної оптимізації функціоналу, який має вигляд верхньої оцінки на частку неправильних відповідей. Якщо подати цю задачу за допомогою такої умови:

$$\begin{aligned} \square \xi_i &\geq 1 - y_i(w, x_i + b) \\ \square \xi_i &\geq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Оскільки при цьому у функціоналі потрібно, щоб штрафи ξ_i були якомога меншими, то можна отримати таку явну формулу для них:

$$\xi_i = \max(0, 1 - y_i(w, x_i + b)). \quad (6)$$

Цей вираз для ξ уже враховує в собі всі обмеження задачі, описаної вище. Отже, виходячи з цього ми отримаємо безумовну задачу оптимізації:

$$\frac{1}{2} ||w||^2 + p \sum_{i=1}^l \max(0, 1 - y_i(w, x_i + b)) \rightarrow \min_{w, b} \quad (7)$$

У методі опорних векторів для розв'язання нелінійних задач класифікації необхідне використання ядер [6]. Ядро представляє собою функцію, яка визначається наступним способом:

$$K(x, y) = (\phi(x), \phi(y)), \quad (8)$$

де $\phi(x)$ – вектор вагів, перетворення, яке здійснює перехід з простору R^d в простір H , x, y – вектори.

Квантовий метод опорних векторів (Quantum Support Vector Machine) є розширенням класичного методу опорних векторів (SVM) на основі принципів квантових обчислень. Він використовує квантові алгоритми та квантові властивості для розв'язання задач класифікації і регресії.

Основними компонентами QSVM є квантові біти та квантові гейти, які використовуються для здійснення певних операцій з даними. Подібно до класичної бітової інформації, квантова бітова інформація позначається як кубіт і зазвичай представляється за допомогою нотації Дірака:

$$|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

та

$$|1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

Розглядаючи квантову критерію суперпозиції:

$$|\varphi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}, \quad (11)$$

де α, β тр і $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$; з цього рівняння слідує що $|\varphi$ може перебувати як у стані $|0\rangle$, так і у стані $|1\rangle$ з ймовірністю $|\alpha|^2$ і $|\beta|^2$, відповідно.

Квантові гейти є основними будівельними блоками для будь-яких квантових схем, зокрема й тих, що застосовуються для машинного навчання. Можна сказати, що це своєрідний алфавіт квантових обчислень.

До елементарних однокубітних квантових гейтів належать Полі-Х (Pauli-X), Полі-У (Pauli-Y), Полі-З (Pauli-Z), Гадамар (Hadamard) та Зсув фази (Phase Shift). Нижче приведені формули для цих квантових гейтів:

$$X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} : \text{він перемикає } |0 \text{ на } |1 \text{ і } |1 \text{ на } |0;$$

$$Y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} : \text{він перемикає } |0 \text{ на } i|1 \text{ і } |1 \text{ на } -i|0;$$

$$z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} : \text{він залишає } |0 \text{ незмінним і перемикає } |1 \text{ на } -|1;$$

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} : \text{він створює суперпозицію двох станів, та перемикає } |0 \text{ на } \frac{|0+|1}{\sqrt{2}} \text{ та}$$

$$\text{перемикає } |1 \text{ на } \frac{|0-|1}{\sqrt{2}};$$

$$\hat{U}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-i\sigma} \end{pmatrix} : \text{він залишає } |0 \text{ незмінним і перемикає } |1 \text{ на } e^{-i\sigma}|1;$$

Для двокубітної конфігурації гейтів використовуються Controlled NOT (CNOT) та SWAP.

$$CNOT = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} : \text{він використовується для 2 кубітів і виконує операцію NOT, коли}$$

керуючий кубіт дорівнює $|1$. Це призводить до перемикання між двома останніми рядками матриці

$$\text{тотожності. } SWAP = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} : \text{призводить до переходу з рядка 2 до рядка 3 у матриці тотожності.}$$

Квантова варіаційна схема – це квантова схема, яка може налаштовуватись за допомогою параметричних вентилів, щоб досягти оптимальних результатів. Для здійснення класифікації спочатку потрібно розробити варіаційний алгоритм, який може використовувати Гільбертів простір квантового процесора, щоб знайти оптимальну роздільну гіперплощину, як це робить метод опорних векторів.

Квантова оцінка ядра – це метод, який використовується для розв'язання задачі класифікації шляхом використання квантових обчислень. Задача по-лягає в знаходженні границі прийняття рішень на основі відомих даних. Ядро в цьому випадку відображає взаємодію між даними, які використовуються для розв'язання задачі класифікації.

Квантова оцінка ядра використовує квантові вимірювання, щоб знайти відстань між векторами даних в квантовому просторі, яка може бути використана для розрахунку ядра. Цей метод дозволяє знаходити коефіцієнти ядра, які можуть бути використані для класифікації нових даних. Ядро обраховується наступним чином:

$$K(x, y) = |\langle \Phi(x) | \Phi(y) \rangle|^2, \tag{12}$$

де $\Phi(x)$ – функція, яка переводить з одного простору в інший; x, y – вектори.

Після створення ядра, ми можемо використовувати звичайний класичний метод опорних векторів. Щоб визначити мітку для іншої точки, потрібно обчислити ядро на квантовому комп'ютері і використати результат обчислення для присвоєння нової мітки.

Результати та дискусія

Для порівняння та демонстрації ефективності класичного методу опорних векторів і його квантової реалізації, було використано три різні задачі: класифікацію зловмисного трафіку, оцінку якості води та прогнозування відтоку клієнтів. Джерелами даних були використані публічні набори даних: SDN для класифікації зловмисного трафіку [6], Water Quality для оцінки якості води [7] та Churn Modelling для прогнозування відтоку клієнтів [8]. Схему реалізації класичного методу опорних векторів та його квантової версії можна побачити на рис. 1.

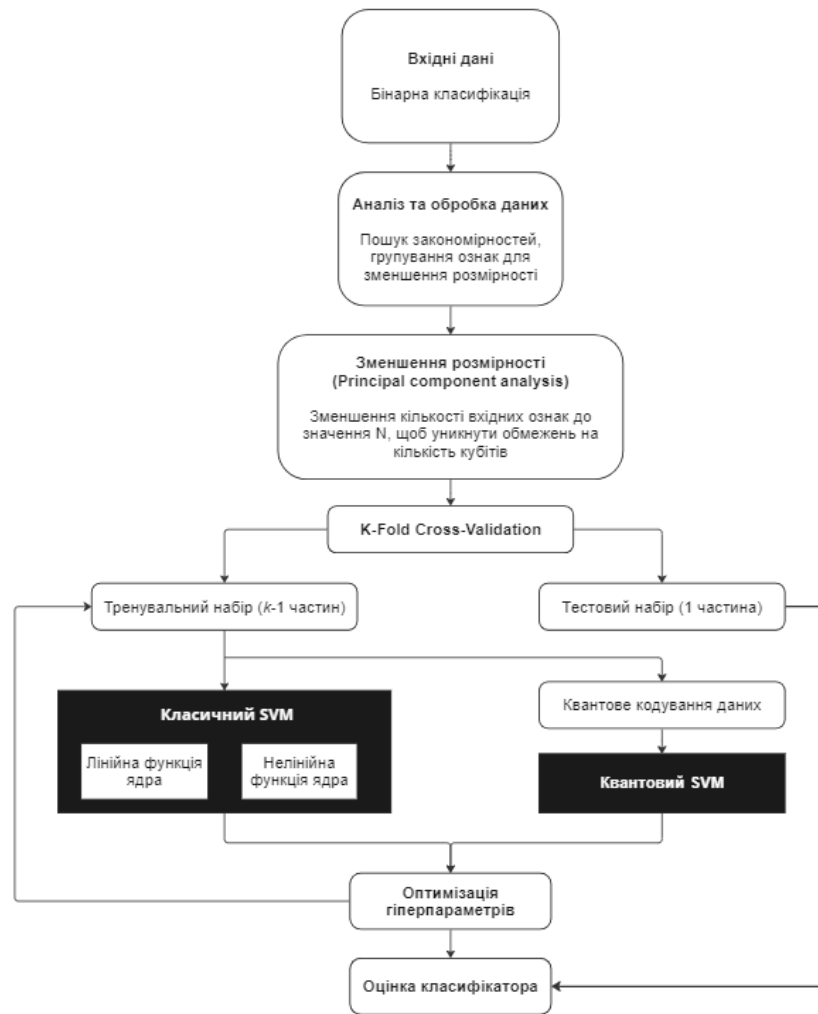


Рис. 1. Схема алгоритму класифікації класичний методом опорних векторів та квантовим

В задачі класифікації зловмисного трафіку квантова модель продемонструвала кращу ефективність порівняно з класичними методами, хоча час навчання був трохи більшим через обмежену доступність квантових комп'ютерів.

Таблиця 1

Результати класифікації зловмисного трафіку

| Модель | Точність | Влучність | Повнота |
|-----------------------------|----------|-----------|---------|
| Лінійний класифікатор | 0.7162 | 0.6409 | 0.5458 |
| Поліноміальний класифікатор | 0.8974 | 0.8796 | 0.8410 |
| Квантовий класифікатор | 0.9255 | 0.8972 | 0.9043 |

В задачі класифікації якості води класичні методи та квантовий класифікатор продемонстрували приблизно однакову якість класифікації, але результати не досягали еталонного рівня.

Таблиця 2

Результати класифікації якості води

| Модель | Точність | Влучність | Повнота |
|-----------------------------|----------|-----------|---------|
| Лінійний класифікатор | 0.6098 | 0.0000 | 0.0000 |
| Поліноміальний класифікатор | 0.5952 | 0.4844 | 0.1280 |
| Квантовий класифікатор | 0.5863 | 0.4452 | 0.2029 |

В задачі класифікації відтоку квантовий метод опорних векторів перевершив класичні методи, що свідчить про його великий потенціал, який може бути реалізований у якісні результати у майбутньому.

Результати класифікації відтоку клієнтів

| Модель | Точність | Влучність | Повнота |
|-----------------------------|----------|-----------|---------|
| Лінійний класифікатор | 0.7984 | 1.000 | 0.01 |
| Поліноміальний класифікатор | 0.840 | 0.692 | 0.41 |
| Квантовий класифікатор | 0.843 | 0.695 | 0.41 |

Висновки

Квантовий метод опорних векторів є перспективним напрямком у сфері машинного навчання, що поєднує класичну модель опорних векторів з квантовими обчисленнями. Він пропонує новий підхід до розв'язання задач класифікації, який базується на використанні квантових алгоритмів та квантових бітів.

Одним з головних переваг квантового методу опорних векторів є його потенціал для обробки великих обсягів даних швидше, ніж класичні методи. Квантові системи дозволяють виконувати обчислення паралельно та ефективно, що відкриває можливості для прискорення обробки і аналізу даних. Крім того, квантовий метод опорних векторів зберігає властивості класичного методу опорних векторів, зокрема, здатність до розрізнення складних класів та роботи з багатовимірними наборами даних.

Проте, існують певні виклики та недоліки, пов'язані з квантовим методом опорних векторів. Перш за все, для успішного застосування необхідно мати належну кількість квантових бітів, а це може бути вимогливо для реалізації в реальних системах. Також оптимізація та налаштування квантових моделей є складним завданням, оскільки вимагає розробки ефективних алгоритмів оптимізації та управління ресурсами.

У майбутньому квантовий метод опорних векторів може стати потужним інструментом для розв'язання складних задач класифікації та аналізу даних. Подальші дослідження в галузі квантового машинного навчання та розвиток квантових обчислювальних платформ допоможуть розкрити повний потенціал цього методу і покращити його.

Література

1. Auria Laura, Moro Rouslan (2008). Support Vector Machines (SVM) as a Technique for Solvency Analysis. SSRN Electronic Journal. 1. 10.2139/ssrn.1424949.
2. Guijo D., Onofre V., Bimbo G.D., Mugel S., Estepa D., ... Orús R. (2022). Quantum artificial vision for defect detection in manufacturing. ArXiv, 2208.04988.
3. Flöther Frederik (2023). The state of quantum computing applications in health and medicine. 10.48550/arXiv.2301.09106.
4. Pistoia M., Ahmad S.F., Ajagekar A., Buts A., Chakrabarti S., ... Yalovetzky R. (2021). Quantum Machine Learning for Finance. 10.48550/arXiv.2109.04298.
5. SVM Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Support_vector_machine
6. SDN Dataset. URL: <https://data.mendeley.com/datasets/jxpfjc64kr/1>
7. Water Quality dataset. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/adityakadiwal/water-potability>
8. Churn modeling dataset. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/shrutimechlearn/churn-modelling>

МАРЧУК ДМИТРО

Державний університет «Житомирська політехніка»

ORCID ID: [0000-0001-8675-8047](https://orcid.org/0000-0001-8675-8047)e-mail: kipz_mdk@ztu.edu.ua

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ АЛГОРИТМІВ ВИЯВЛЕННЯ І РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ З ВІДЕОПОТОКУ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ПАРКУВАННЯМ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

Одною зі сфер штучного інтелекту є комп'ютерний зір, який використовує глибоке навчання для виявлення, розпізнавання, класифікації об'єктів на зображеннях та відео. Для більш ефективного застосування таких систем часто використовуються методи, засновані на нейронних мережах. Розвиток технологій глибокого навчання дозволив створювати більш точні та складні моделі комп'ютерного зору. Методи глибокого навчання, які використовуються для розпізнавання об'єктів на відео, можуть включати пропозицію регіону як частину системи або використовувати нерегіональні методи, які базуються на пропозиціях детектору. У статті розглядаються сучасні, найбільш відомі алгоритми розпізнавання об'єктів на відео. Наводиться опис особливостей різних архітектурних рішень нейронних мереж. Дослідження публікацій, присвячених проблемам аналізу відеоданих, вказав на пріоритет застосування алгоритмів на основі архітектури згорткової нейронної мережі. В роботі більше уваги приділяється таким архітектурним рішенням як YOLO і Mask R-CNN. Порівнюються продуктивність, швидкість обробки і точність. Результати проведеного дослідження показують, що YOLO одна з найсучасніших систем виявлення об'єктів у реальному часі, яка обробляє зображення зі швидкістю від 45 до 150 кадрів в секунду і має mAP 63,4% на тестовому наборі MS-COCO, а наприклад, Mini-YOLOv3 досягає mAP 52,1% зі швидкістю 67 кадрів в секунду. Але, якщо порівнювати різні версії і модифікації YOLO з іншими системами, то можна з впевненістю сказати, що YOLO допускає більше помилок локалізації. Mask R-CNN є розширенням Faster R-CNN, де паралельно проходить прогнозування маски об'єкта і розпізнавання обмежувальної рамки. Таким чином було виявлено, що для системи управління паркуванням, яка може відстежувати вільні місця на парковці з відеопотоку камери, найкраще підходить Mask R-CNN. Дана нейронна мережа має ряд переваг в порівнянні з такими, як R-CNN, Fast R-CNN та YOLO. Основною з її переваг є продуктивність та точність.

Ключові слова: нейронна мережа, архітектура, YOLO, CNN, R-CNN, Mask R-CNN.

MARCHUK DMYTRO

Zhytomyr Polytechnic State University

ANALYSIS OF MODERN ALGORITHMS FOR DETECTING AND RECOGNIZING OBJECTS FROM A VIDEO STREAM FOR REAL-TIME PARKING MANAGEMENT SYSTEMS

One of the areas of artificial intelligence is computer vision, which uses deep learning to detect, recognize, and classify objects in images and videos. To make such systems more efficient, methods based on neural networks are often used. The development of deep learning technologies has made it possible to create more accurate and complex computer vision models. Deep learning methods used to recognize objects in video can include a region proposal as part of the system or use non-regional methods based on detector proposals. The article discusses modern, best-known algorithms for object recognition in video. The features of different architectural solutions of neural networks are described. A study of publications on the problems of video data analysis has indicated the priority of using algorithms based on the convolutional neural network architecture. The paper pays more attention to such architectural solutions as YOLO and Mask R-CNN. Performance, processing speed, and accuracy are compared. The results of the study show that YOLO is one of the most advanced real-time object detection systems that processes images at a speed of 45 to 150 frames per second and has an mAP of 63.4% on the MS-COCO test set, and, for example, Mini-YOLOv3 reaches an mAP of 52.1% at 67 frames per second. However, if we compare different versions and modifications of YOLO with other systems, we can say with certainty that YOLO makes more localization errors. Mask R-CNN is an extension of Faster R-CNN, where the object mask prediction and bounding box recognition are performed in parallel. Thus, it was found that Mask R-CNN is best suited for a parking management system that can track free parking spaces from a camera video stream. This neural network has a number of advantages compared to R-CNN, Fast R-CNN, and YOLO. The main advantages of Mask R-CNN are performance and accuracy.

Keywords: neural network, architecture, YOLO, CNN, R-CNN, Mask R-CNN.

Постановка проблеми

На сьогоднішній день широко і успішно використовуються різні системи працюючі на основі комп'ютерного зору, які дозволяють отримувати інформацію з цифрових зображень, відео та інших візуальних вхідних даних і вживати дії або давати рекомендації на основі отриманої інформації. Такі системи використовуються в різних галузях промисловості, від енергетики та комунальних послуг до виробництва та автомобілебудування, торгівлі, охороні здоров'я, для побудови траєкторії між двома заданими точками призначення з можливістю обходу перешкод [1] і ринок застосування продовжує постійно зростати.

За останні роки досягнення в алгоритмах комп'ютерного зору на базі глибокого навчання показали багатообіцяючі результати в різноманітних завданнях. Подібні методи можна використовувати для вирішення проблеми виявлення вільного місця на автостоянках або зонах для паркування. Проблема знаходження місць для паркування є досить поширеною в сучасному світі, особливо в великих містах. Це може мати різні причини, серед яких:

- Недостатня кількість місць для паркування на автостоянці. Існує дисбаланс між попитом на паркування та пропозицією. Це можуть бути старі норми планування міста, кварталу, вулиці, де було непередбачено великої кількості машин у містян.
- Невідповідність розміру автомобілів та розміру місць для паркування. Деякі місця можуть бути занадто маленькими для сучасних автомобілів, що ускладнює паркування і може призводити до пошкоджень автомобілів.
- Недостатня організація місць для паркування. Місця можуть бути погано позначені, розташовані у незручних місцях або не підтримуються в належному стані, що ускладнює пошук вільного місця для паркування.
- Висока вартість паркування. В такому випадку водієві приходиться шукати місце на безкоштовній стоянці або у сусідньому дворі, що приводить до дисбалансу місць для паркування.
- Недостатній контроль за паркуванням. Автомобіль може бути припарковано неправильно, що може ускладнювати рух іншого автотранспорту.

На сьогодні система управління паркуванням, яка може відстежувати вільні місця, стала необхідністю для майже всіх великих міст. Система надасть можливість користувачу легко та швидко визначити, чи має конкретна зона для паркування вільне місце та зорієнтуватися в якій частині це місце розташоване.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останнім часом технології пов'язані з комп'ютерним баченням привернули значну увагу дослідників. Традиційні методи виявлення об'єктів, які базувалися на створених вручну функціях та неглибоких архітектурах, вже застаріли і не задовольняють поточним вимогам. Дослідження [2] містить детальний огляд фреймворків виявлення об'єктів на основі глибокого навчання, які вирішують різні проблеми, такі як оклюзія, перешкоди та низька роздільна здатність, з різними ступенями модифікацій на R-CNN (Region Based Convolutional Neural Networks).

Шляхом внесення численних змін алгоритми виявлення об'єктів були покращені з точки зору швидкості і точності. Завдяки невпинним зусиллям великої кількості дослідників алгоритми глибокого навчання швидко розвиваються, пропонуючи вдосконалену продуктивність у сфері виявлення об'єктів. Програми, такі як розпізнавання пішоходів, медична візуалізація, робототехніка, безпілотні автомобілі, розпізнавання обличчя та інші, допомагають економити людські ресурси у багатьох галузях. Стаття [3] представляє фундаментальний огляд методів виявлення об'єктів, включаючи два класи детекторів об'єктів. У двоступеневому детекторі розглядаються алгоритми R-CNN, Fast R-CNN і Faster R-CNN, тоді як в одноступінчастому детекторі - YOLO v1, v2, v3 і SSD. Двоступеневі детектори більше зосереджені на точності, тоді як головною перевагою одноступеневих детекторів є швидкість. Автори статті представляють вдосконалену версію YOLO під назвою YOLO v3-Tiny і порівнюють її з попередніми версіями.

Процес виявлення об'єктів в реальному часі на відеозаписі, запущеного на вбудованому пристрої, дуже складний через обмежену пам'ять і обчислювальну потужність вбудованих пристроїв. Щоб впоратися з цими проблемами, автори статті [4] вдосконалили спрощену мережу без значного зниження точності виявлення об'єктів. Ці-Чао Мао та інші пропонують модель виявлення об'єктів під назвою Mini-YOLOv3, яка має менший розмір моделі та менше параметрів, які використовуються при навчанні порівняно з YOLOv3. Модель навчається на базі даних MS-COCO. Розмір параметра Mini-YOLOv3 становить лише 23% від YOLOv3 і забезпечує майже таку точність виявлення як і YOLOv3. Зокрема, Mini-YOLOv3 досягає mAP-50 52,1 зі швидкістю 67 кадрів в секунду.

Автори статті [5] представляють вдосконалену версію YOLOv3 під назвою F1% Light-YOLOv3. Коли робот збирає зелений плід при природному освітленні, колір фрукта схожий на колір фону; нерівномірне освітлення та оклюзія плодів і листя часто впливають на продуктивність методу виявлення. Дослідниками пропонується допоміжний алгоритм покращення зображення зеленого манго (CLANE-Mango), який підходить для середовищ виявлення низької яскравості та покращує точність методу виявлення зеленого манго. Результати експерименту показують, що F1% Light-YOLOv3 у тестовому наборі становить 97,7%. Порівняно з YOLOv3, F1% Light-YOLOv3 збільшено на 4,5%, а швидкість обробки збільшена в 5 разів, що може відповідати вимогам до роботи в режимі реального часу на вбудованій платформі.

У статті [6] розроблено та впроваджено техніку відкидання для алгоритмів на основі YOLOv3 для підвищення швидкості та підтримки точності. Після застосування техніки відкидання YOLOv3 може досягти 22% покращення швидкості. Більше того, результати цієї нової техніки відкидання було протестовано на Tiny-YOLOv3 з трьома вихідними шарами на автономному транспортному засобі для виявлення пішоходів, і вона досягла покращення швидкості на 48,7%.

Джозеф Редмон та інші [7] представили новий підхід до виявлення об'єктів на основі мережі YOLO. Уніфікована архітектура, що була розроблена науковцями, надзвичайно швидка. Fast YOLO, обробляє приголомшливі 155 кадрів на секунду, при цьому досягаючи вдвічі більшої mAP, ніж інші детектори реального часу. Порівняно з іншими системами виявлення, YOLO допускає більше помилок локалізації, але з набагато меншою ймовірністю передбачає помилкові виявлення там, де нічого не існує.

Розпізнавання зображень за кількома мітками набуло значення в останні роки через збільшення використання в багатьох областях. У проекті [8] автори пропонують гібридний метод, який реалізує підхід,

заснований на навчанні, з використанням чотирьох різних моделей, а саме Single-shot Detector (SSD), You Only Look Once (YOLO), RetinaNet і Faster R-CNN.

Для виявлення об'єктів часто використовуються методи на основі нейронних мереж з використанням регіональної загорткової нейронної мережі, де для зразків високої якості вибирається великий поріг перетину через об'єднання (IoU). Однак ефективність виявлення таких методів погіршується, коли кількість зразків зменшується, що представлено в роботі [9]. Щоб вирішити цю проблему, автори пропонують вдосконалений метод на основі Mask R-CNN: ResNet Group Cascade (RGC) Mask R-CNN. Автори запропонували алгоритм виявлення об'єктів на основі Mask R-CNN з використанням каскадного навчання. Робота базується на двох схемах: попередня обробка даних через GN та каскадне навчання на основі різних порогових значень IoU. RGC Mask R-CNN вирішує проблему низької точності обмежувальної рамки та маски.

В останні роки паркування стало серйозною проблемою через збільшення приватного транспорту і пошук місця для паркування інколи забирає багато часу. У статті [10] описано застосування мережі Mask R-CNN для вирішення проблеми розпізнавання автомобілів і вільних місць для паркування, отриманому з відео потоку. Автори статті довели, що основною перевагою мережі Mask R-CNN є продуктивність та більша точність порівняння з іншими. В додаток дослідникам вдалося отримати оптимальний баланс між продуктивністю та точністю за рахунок правильного підбору налаштувань мережі.

Головна мета розробки програмної системи полягає в скороченні часу, необхідного для пошуку вільного місця для паркування і наданні оперативної інформації про наявність та розташування таких місць. Для досягнення цієї мети використовуються кадри з відео потоку, отримані з встановлених на парковці камер відеоспостереження. Система обробляє ці кадри і видає зображення, на яких позначені вільні місця, якщо вони були виявлені. Ці зображення можуть допомогти водіям зорієнтуватися та швидко знайти вільне місце для паркування свого транспортного засобу. Важливо відзначити, що система повинна бути адаптована до конкретних умов кожної зони для паркування та забезпечувати надійну та точну інформацію про наявність вільних місць.

Особливістю систем для виявлення та розпізнавання різних об'єктів є застосування в них штучних нейронних мереж, а також алгоритмів і методів, що працюють на їх основі. Тому **метою даного дослідження** є проведення аналізу сучасних алгоритмів розпізнавання в системі відеозображень.

Виклад основного матеріалу

Існує безліч подібних алгоритмів, що вирішують широкий спектр завдань у галузі розпізнавання. Для комп'ютерного зору було розроблено багато різних архітектурних рішень нейронних мереж, але згорткова нейронна мережа (convolutional neural network (CNN)) є ключовою у багатьох моделях.

Вибір моделі для виявлення об'єктів, яка відповідає вимогам як за швидкістю, так і за точністю стає важливим. Одною з таких моделей є YOLO (You Only Look Once) – це одноступінчастий детектор об'єктів, який задовольняє обом цілям (швидко і точно). Це нейронна мережа для об'єктного детектування, яка здатна швидко і точно визначати об'єкти на зображеннях та відео. Модель може обробляти зображення та відео в реальному часі (30 кадрів в секунду або більше). Така швидкість досягається за рахунок того, що YOLO пропускає крок виділення об'єктів на різних шарах зображення, які зазвичай присутні в інших видах архітектури об'єктного детектування.

YOLO (рис. 1б) використовує CNN-архітектуру (рис. 1а), яка має декілька блоків під назвою Convolutional Layer, в яких виконуються операції згортки та підсумовування. Модель також включає Fully Connected Layers та Detection Layers, які використовуються для визначення об'єктів на зображенні та виділення їх координат.

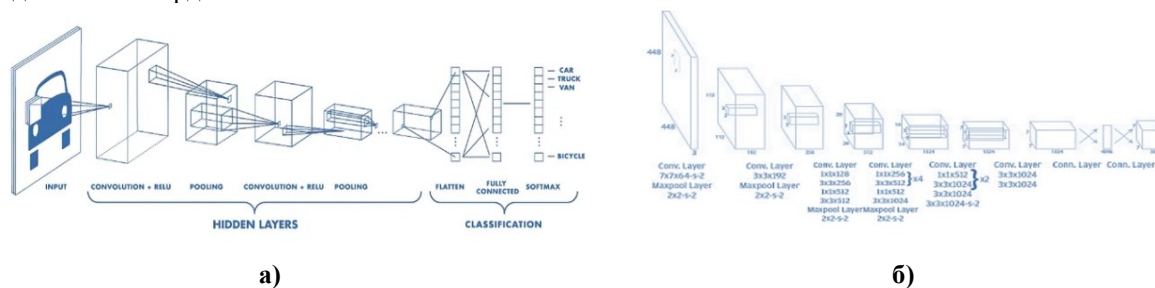


Рис. 1. Схематичне зображення архітектури: а) CNN; б) YOLO

Архітектура YOLO складається з декількох блоків, які працюють послідовно та дозволяють здійснювати об'єктне детектування на зображенні або відео в реальному часі.

Основні блоки архітектури YOLO:

- Блок згорткового шару (Convolutional Layer): призначений для зменшення розміру зображення та вилучення рис об'єктів з нього.
- Блок максимального пулінгу (Max-Pooling Layer): призначений для зменшення розміру зображення та підвищення інваріантності до зміщень.
- Блок згорткового шару + пакетна нормалізація (Convolutional Layer + Batch Normalization): призначений для подальшого вилучення рис об'єктів та стабілізації градієнтів під час навчання.

– Блок згорткового шару + пакетна нормалізація + функція активації (Convolutional Layer + Batch Normalization + Leaky ReLU): призначений для додавання нелінійності та підсилення розпізнавання об'єктів.

– Повнозв'язний шар (Fully Connected Layer): призначений для зведення вихідних значень з попередніх шарів до фінального розміру та отримання вектору ознак.

– Блок векторної розмітки (Vectorization Layer): призначений для перетворення вектора ознак в вектор розмітки, який містить інформацію про розташування та клас об'єкта.

– Блок об'єднання результируючих векторів (Anchors Layer): призначений для об'єднання результируючих векторів розмітки в один вектор, який містить інформацію про всі об'єкти на зображенні.

– Далі йде п'ять повторювальних блоків, кожен з яких складається зі свого власного детектора об'єктів, який працює на основі вихідних даних з передньої частини мережі. Кожен детектор об'єктів використовує фільтри-якорі для прогнозування координат обмежувачої рамки і ймовірності класів для кожної рамки. Якщо ймовірність перевищує поріг, то рамка пов'язується з даними класу.

YOLO використовує функцію втрати суми квадратів помилок, яку легко оптимізувати. Однак ця функція надає однакову вагу завданням класифікації та локалізації.

$$\begin{aligned} & \lambda_{coord} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B I_{ij}^{obj} \left[(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2 \right] \\ & + \lambda_{coord} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B I_{ij}^{obj} \left[\left(\sqrt{w_i} - \sqrt{\hat{w}_i} \right)^2 + \left(\sqrt{h_i} - \sqrt{\hat{h}_i} \right)^2 \right] \\ & + \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B I_{ij}^{obj} (C_i - \hat{C}_i)^2 \\ & + \lambda_{noobj} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B I_{ij}^{noobj} (C_i - \hat{C}_i)^2 \\ & + \sum_{i=0}^{S^2} I_i^{obj} \sum_{c \in classes} (p_i(c) - \hat{p}_i(c))^2 \end{aligned} \tag{1}$$

де I_{ij}^{obj} - позначає, чи присутній об'єкт у клітинці i ,

I_{ij}^{noobj} - позначає j_{th} обмежувальну рамку, відповідальну за передбачення об'єкта в клітинці i ,

λ_{coord} і λ_{noobj} - це параметри регуляризації, які необхідні для балансування функції втрат.

Основна ідея YOLO полягає в тому, щоб розділити зображення на сітку, складаючи її з комірок, які

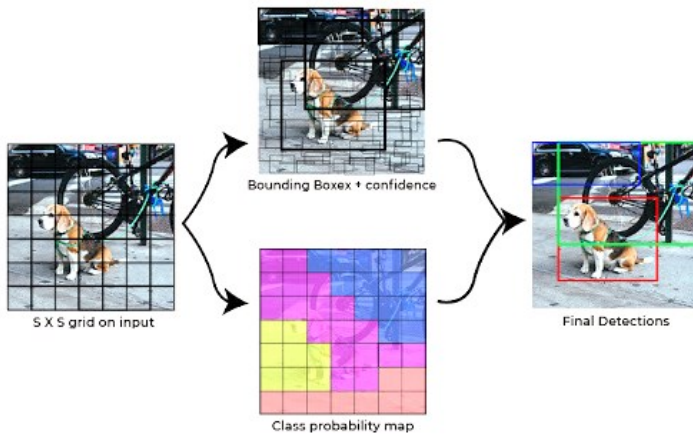


Рис. 2. Приклад накладання сітки на зображення

об'єкт. Можна передбачити лише один набір ймовірностей класу на клітинку сітки, незалежно від кількості блоків сітки.

Оцінку надійності для кожного класу можна визначити наступним чином [7]:

$$P_r(Class_i | Object) * P_r(Object) * IOU_{pred}^{truth} = P_r(Object) * IOU_{pred}^{truth} \tag{2}$$

Для визначення bounding box та класів об'єктів, YOLO використовує останній блок CNN, який з'єднує розміри зображення з вимірами сітки та використовує цю інформацію для прогнозування характеристик bounding box та класів об'єктів. Завдяки цій архітектурі YOLO здатна визначити об'єкти на зображеннях та відео в реальному часі, з високою точністю та відносно невисокими обчислювальними

витратами. Однак, через те, що YOLO розділяє зображення на сітку комірок, вона може мати деяку схильність до помилок в обробці деяких об'єктів, а також відносно невеликої кількості об'єктів, розташованих дуже близько один до одного (рис. 2).

Для навчання YOLO використовують функцію втрат, яка обчислює різницю між прогнозованими та дійсними значеннями. Ця функція включає в себе складові, які стимулюють мережу прогнозувати об'єкти різних розмірів та забезпечувати більш точне позиціонування обмежувачих рамок.

Переваги:

- Обробляє кадри зі швидкістю від 45 кадрів/с до 150 кадрів/с.

- Краще знаходить рамки зображення.

Недоліки:

- Досить низький рівень запам'ятовування відокремлених об'єктів.

- Багато помилок локалізації порівняно з Faster R-CNN.

- Важко виявити близькі об'єкти, оскільки кожна сітка може запропонувати лише дві обмежувальні рамки.

- Погано виявляє дрібні предмети.

YOLO є ефективною для задачі об'єктного детектування, оскільки вона дозволяє швидко та точно прогнозувати обмежувачі рамки та класи об'єктів на зображеннях і відео. Вона також має високу швидкість роботи та низькі вимоги до обчислювальних ресурсів порівняно з деякими видами моделей.

Один із підходів до виявлення і розпізнавання об'єктів є об'єднання регіонів зі згортковими нейронними мережами (Регіональна згорткова нейронна мережа, Region-based Convolutional Neural Networks (R-CNN)). R-CNN – це двоетапний алгоритм виявлення об'єктів. Перший етап визначає підмножину областей зображення, які можуть містити об'єкт розпізнавання. Наприклад, взяти вхідне зображення та створити набір обмежувальних рамок як вихід, де кожна обмежувальна рамка містить об'єкт, а також категорію об'єкта (наприклад, автомобіль чи людина). Другий етап класифікує об'єкт у кожному регіоні.

Модель R-CNN була створена щоб обійти проблему вибору величезної кількості регіонів. Росс Гіршик та ін. [11] запропонували метод, за допомогою якого можна використати вибіркового пошуку (selective search), щоб виділити лише 2000 регіонів із зображення. Тому тепер замість того, щоб намагатися класифікувати величезну кількість регіонів, можна просто працювати з 2000 регіонами (рис. 4).

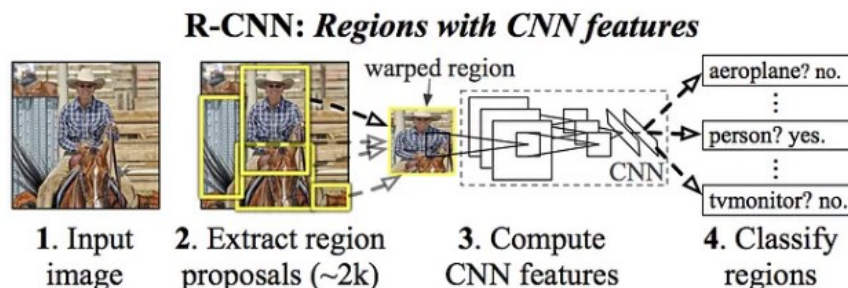


Рис. 4. Модель R-CNN

Пропозиції регіонів створюються за допомогою алгоритму вибіркового пошуку наступним чином:

1. Створюється початкова сегментація. Генерується багато регіонів-кандидатів на основі кольору, текстури, розміру і форми.

2. Використовується жадібний алгоритм для рекурсивного об'єднання подібних регіонів.

3. Регіони, які були згенеровано, використовуються для створення остаточних пропозицій регіонів-кандидатів.

Вилучення ознак кожного отриманого регіону здійснюється за допомогою згорткової нейронної мережі, а класифікація опрацьованих ознак за допомогою методу опорних векторів (Вилучення ознак кожного отриманого регіону за допомогою згорткових нейронних мереж. Класифікація опрацьованих ознак за допомогою методу опорних векторів (SVM, Support Vector Machine) та уточнення меж регіонів за допомогою лінійної регресії.), а уточнення рамок регіонів за допомогою лінійної регресії.

Але ця модель має більше недоліків чим переваг. Навчання мережі займає величезну кількість часу, оскільки доводиться класифікувати 2000 регіонів на зображенні. Неможливість реалізації у реальному часі, оскільки для кожного тестового зображення потрібно близько 47 секунд. Алгоритм вибіркового пошуку є фіксованим алгоритмом. Тому навчання на деякому етапі припиняється. Це може призвести до створення поганих пропозицій регіонів-кандидатів, які в подальшому повинні бути класифіковані. Тому R-CNN було розширено для виконання завдань комп'ютерного зору.

Архітектура Faster R-CNN складається з RPN як алгоритму пропозиції регіону та Fast R-CNN як мережі детектора. Faster R-CNN, модель розроблена групою дослідників Microsoft[12], і представляє собою

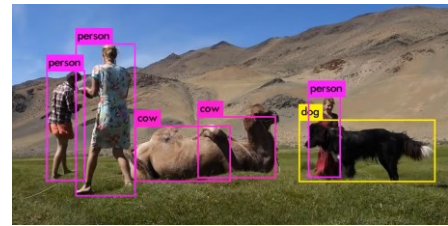


Рис. 3. Помилки YOLO в обробці ділянок відео зображення

глибоку згорткову нейронну мережу, яка використовується для виявлення об'єктів. Мережа може точно і швидко передбачити розташування різних об'єктів. Швидкість досягається завдяки регіональній мережі пропозицій (RPN „Region Proposal Network”). RPN і Faster R-CNN можна об'єднати в єдину мережу, скориставшись їхніми функціями згортки, RPN буде повідомляти об'єднаній мережі, де шукати об'єкт.

Як вхідні дані RPN приймає карту об'єктів згортки і виводить прив'язки, згенеровані згорткою ковзного вікна, застосованою до карти вхідних об'єктів. Для кожного ковзного вікна мережа генерує максимальну кількість k-прив'язок. За замовчуванням значення k=9 (3 масштаби (128*128, 256*256 і 512*512) і 3 співвідношення сторін (1:1, 1:2 і 2:1)) для кожного з різних положень об'єкта на зображенні. Отже, для карти згортки W * H можна отримати N = W * H * k опорних блоків. Ці пропозиції областей потім передаються на проміжний рівень згортки 3*3 і 1 заповнення та 256 вихідних каналів. Вихідні дані, отримані з цього шару, передаються на два шари згортки 1*1, рівень класифікації та рівень регресії. Рівень регресії має 4*N (W * H * (4*k)) вихідних параметрів (що позначають координати обмежувальних рамок), а рівень класифікації має 2*N (W * H * (2*k)) вихідних параметрів (позначаючи ймовірність об'єкта чи не об'єкта) (рис. 5).

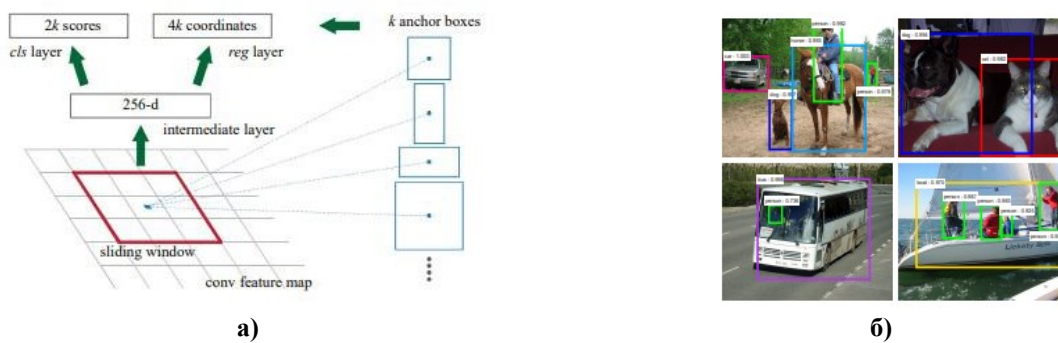


Рис. 5. а) Мережа регіональних пропозицій (RPN) б) Приклад виявлення за допомогою RPN

Подібно до Fast R-CNN, зображення надається вхідні дані для згорткової мережі, яка забезпечує карту згорткових функцій. Замість використання алгоритму вибіркового пошуку на карті функцій для визначення пропозицій регіону використовується окрема мережа. Прогнозовані області потім змінюються і використовується для класифікації зображення в межах запропонованої області та прогнозування значень зсуву для обмежувальних рамок.

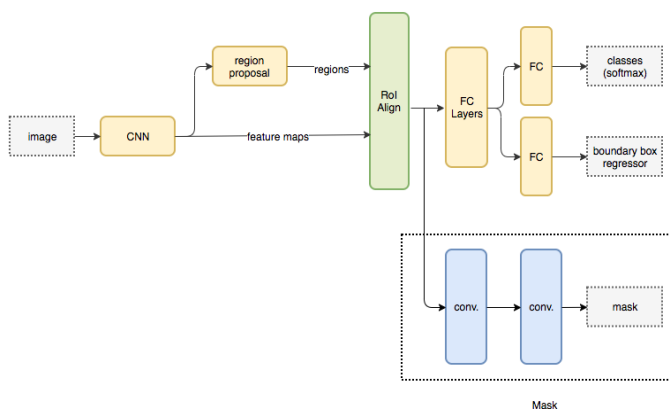


Рис. 6. Архітектура Mask R-CNN

Faster R-CNN набагато швидший за своїх попередників (R-CNN, Fast R-CNN). Тому алгоритм можна використовувати для виявлення об'єктів у реальному часі.

Однією з покращених версій R-CNN є Mask R-CNN. У той час як деякі версії R-CNN були зосереджені на виявленні об'єктів, Mask R-CNN додає сегментацію екземплярів. Автори роботи [13] представили концептуально просту, гнучку структуру для сегментації об'єктів. Метод під назвою Mask R-CNN розширює Faster R-CNN шляхом додавання гілки для прогнозування маски об'єкту паралельно з існуючою гілкою для розпізнавання обмежувальної рамки. Підхід, який представили розробники, дозволяє ефективно виявляти об'єкти на зображенні,

одночасно генеруючи високоякісну маску сегментації для кожного екземпляра.

Mask R-CNN являє собою двоетапну структуру: на першому етапі сканується зображення і генеруються області, які можуть містити об'єкт. На другому етапі пропозиції класифікуються та створюються обмежувальні рамки та маски. На рисунку 6 представлена архітектура Mask R-CNN.

Опис роботи мережі:

- Зображення проходить через згорткову мережу.
- Вихідні дані передаються до мережі регіональних пропозицій (RPN), яка створює різні блоки прив'язки (регіони або карти функцій, які містять певний об'єкт), що підлягають виявленню.
- Блоки прив'язки відправляються на етап вирівнювання області інтересу, який перетворює ці області до розміру, який потрібно для подальшої обробки.
- Вихідні дані після формування області інтересу переходять до формування (вирівнювання)

рамки, що обмежує об'єкт.

– Вихідні дані етапу вирівнювання області інтересу паралельно відправляються до Convolutional Networks для створення маски пікселів об'єкту.

Mask R-CNN генерує маску сегментації. Для цього спочатку обчислюється область інтересу, щоб можна було скоротити час обчислення. Після чого для всіх передбачуваних регіонів обчислюється перетин через об'єднання (IoU) :

$$IoU = \frac{\text{Площа перетину}}{\text{Площа об'єднання}} \quad (3)$$

Якщо $IoU \geq 0.5$, будемо вважати регіон регіоном інтересу. В іншому випадку нехтуємо регіоном. Це робиться для всіх регіонів. Далі вибираємо лише набір регіонів, для яких $IoU \geq 0.5$.

У статті [14] наведено детальний опис регіональної згорткової нейронної мережі та Fast R-CNN, Faster R-CNN, Region-Based Fully Convolutional Networks. Автори представляють огляд останніх оновлень у цій галузі та їх практичне застосування та класифікацію. Також порівнюють продуктивність і труднощі методів з точки зору швидкості, точності або простоти. В статті наведено, що швидкість роботи YOLO становить приблизно 21 ~ 155 кадрів в секунду, що є найшвидшим, але середня точність Mask R-CNN становить ~47,3, що перевершує всі інші методи.

Висновки

Таким чином можна зробити висновок, що використання нейронної мережі Mask R-CNN найкраще підходить для вирішення проблеми розпізнавання вільного місця на парковці з відеопотоку камери в реальному часі. Дана нейронна мережа має ряд переваг в порівнянні з такими як R-CNN, Fast R-CNN та YOLO. Опіраючись на різні дослідження даної нейронної мережі, можна з впевненістю сказати, що основною з її переваг є продуктивність та більша точність. В додаток до цього можна отримати оптимальний баланс між продуктивністю та точністю за рахунок правильного підбору налаштувань мережі.

References

1. Kvasnikov V., Ornatskyi D., Graf M., Shelukha M. Designing a computerized information processing system to build a movement trajectory of an unmanned aircraft vehicle. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. №1/9(109). P. 33–42.
2. Zhao Z., Zheng P., Xu S., Wu S. Object detection with deep learning: A review. Computer Vision and Pattern Recognition. 2019. №1. P. 1–21.
3. Adarsh P., Rathi P., Kumar M. YOLO v3-Tiny: Object Detection and Recognition using one stage improved model. 6th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS). 2020. P. 687–694.
4. Mao Q., Sun H., Liu Y., Jia R. Mini-YOLOv3: Real-Time Object Detector for Embedded Applications. IEEE Access. 2019. № 7. P. 133529–133538.
5. Xu Z., Jia R., Sun H. et al. Light-YOLOv3: fast method for detecting green mangoes in complex scenes using picking robots. Appl Intell. 2020. № 50. P. 4670–4687.
6. Martinez-Alpiste I., Golcarenenji G., Wang Q., Alcaraz-Calero J. A dynamic discarding technique to increase speed and preserve accuracy for YOLOv3. Neural Comput & Applic. 2021. № 33. P. 9961–9973.
7. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA. 2016. P. 779–788.
8. Meena S., Lasya N. et al. Hybrid Neural Network Architecture for Multi-Label Object Recognition using Feature Fusion. Procedia Computer Science. 2022. № 215. P. 78–90.
9. Wu M., Yue H., Wang J. Object detection based on RGC mask R-CNN. IET Image Processing. 2020. № 14. P. 1502–1508.
10. Levkivskyi V., Marchuk D., Lobanchykova N. Available parking places recognition system. CEUR Workshop Proceedings 4th Workshop for Young Scientists in Computer Science & Software Engineering Volume. 2022. № 3077. P. 123–134.
11. Girshick R., Donahue J., Darrell T., Malik J. Rich Feature Hierarchies for Accurate Object Detection and Semantic Segmentation. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Columbus, OH, USA. 2014. P. 580–587.
12. Ren S., He K., Girshick R., Sun R. Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region offer networks. Computer Vision and Pattern Recognition. 2016. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.01497>.
13. He K., Gkioxari G., Dollár P., Girshick R. IEEE International Conference on Computer Vision, ICCV. 2017. P. 2980–2988.
14. Bharati P., Pramanik A. Deep learning techniques—r-cnn to mask r-cnn: a survey. Computational Intelligence in Pattern Recognition, CIPR, Springer: Singapore. 2020. P. 657–668.

ЩЕРБАНЬ ВОЛОДИМИР

Київський фаховий коледж прикладних наук
ORCID ID: [0000-0002-4274-4425](https://orcid.org/0000-0002-4274-4425)
scherbanvu@ukr.net

КОЛИСКО ОКСАНА

Київський фаховий коледж прикладних наук
ORCID ID: [0000-0003-4043-1238](https://orcid.org/0000-0003-4043-1238)
kipt@i.com.ua

МЕЛЬНИК ГЕННАДІЙ

Київський фаховий коледж прикладних наук
ORCID ID: [0000-0002-0002-7663](https://orcid.org/0000-0002-0002-7663)
melnik.gv@knutd.com.ua

КОЛИСКО МАР'ЯНА

Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID ID: [0000-0002-9982-7264](https://orcid.org/0000-0002-9982-7264)
Sholudko.mi@knutd.edu.ua

ЩЕРБАНЬ ЮРІЙ

Київський фаховий коледж прикладних наук
ORCID ID: [0000-0001-5024-8387](https://orcid.org/0000-0001-5024-8387)
scherban@i.ua

КОМП'ЮТЕРНИЙ МОДУЛЬ ПРОГРАМИ K DAM ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ШАТУННО-ПОВЗУНКОВОЇ ГРУПИ

Комп'ютерний модуль програми K DAM для визначення кінематичних та динамічних параметрів шатунно-повзункової групи механізмів машин легкої промисловості дозволяє визначити координати, проекції швидкостей та прискорень центру мас шатуна, повзуна та точки приєднання ланок груп Асура на шатуні. При динамічному аналізі роботи шатунно-повзункової групи визначаються проекції повної реакції в шарнірах між кривошипом та шатуном, між шатуном та повзуном, між повзуном та нерухомою напрямною. Отримані результати використовуються в програмі для оцінки напруженості технологічних процесів легкої та текстильної промисловості при визначенні зміни відносного натягу нитки по зонам заправки на технологічному обладнанні.

Ключові слова: комп'ютерний модуль, кінематичні параметри, динамічні параметри, шатунно-повзункова група.

SHCHERBAN VOLODYMYR, KOLISKO OKSANA, MELNIK GENADIJ, KOLISKO MARJANA.
Kyiv National University of Technologies and Design
SHCHERBAN YURYJ
Kyiv Professional College of Applied Sciences

COMPUTER MODULE OF THE K DAM PROGRAM FOR DETERMINATION OF KINEMATIC AND DYNAMIC PARAMETERS OF THE CONNECTING ROD GROUP

The K DAM program is a structural element of a computer software complex for assessing the intensity of technological processes in the light and textile industry when determining the change in the relative tension of the thread in the filling zones of the technological equipment. Kinematic and dynamic analysis of flat mechanisms plays a significant role in the design of new mechanisms and modernization of existing ones. The results of these studies can be used to calculate the strength of individual links, their inertial characteristics, optimization of structural parameters of mechanisms, and minimization of consumed energy. The computer module of the K DAM program for determining the kinematic and dynamic parameters of the connecting rod-slider group of mechanisms of light industry machines allows you to determine the coordinates, velocity projections and accelerations of the center of mass of the connecting rod, the slider and the point of attachment of the links of the Asura groups on the connecting rod. During the dynamic analysis of the operation of the connecting rod-slider group, the projections of the full reaction in the joints between the crank and the connecting rod, between the connecting rod and the slider, and between the slider and the fixed guide are determined.

Asura connecting rod-slider groups are widely used in light and textile industry machines. The output link of the connecting rod-slider group performs the function of the working body of the technological machine. The working body of the technological machine interacts with the threads. The trajectory of the movement of the working body affects the value of the angle of coverage of the guide surface by the thread. A change in the value of the coverage angle leads to a change in the tension of the threads. When the coverage angle increases to critical values, the thread may break and the technological equipment may stop. The tension of the thread increases when passing through the refueling zones of the thread feeding system on technological machines. The increase in tension is due to the crumpling of the thread in the area of contact with the guides. The maximum value of tension will be in front of the working area. A sharp increase in tension leads to a violation of the normal course of the technological process of thread processing.

The development of new schemes of the thread feeding system requires an operational assessment of the value of the tension in front of the working zone. The objective function in the tasks of optimization of technological processes is the minimum necessary tension. The development of special computer programs for determining the tension in the working area makes it possible to determine the necessary technological parameters. The variable parameter in the objective function is the sum of the angles of coverage of the working bodies by the thread. The use of a computer program allows you to determine the tension and change in relative tension in the filling zones of technological machines, which allows you to optimize the shape of the thread supply line even at the stage of designing the technological process.

Keywords: computer module, kinematic parameters, dynamic parameters, connecting rod-slider group.

Постановка проблеми

Програма KDAM представляє собою структурний елемент комп'ютерного програмного комплексу для оцінки напруженості технологічних процесів легкої та текстильної промисловості при визначенні зміни відносного натягу нитки по зонах заправки на технологічному обладнанні. Кінематичний та динамічний аналіз плоских механізмів виграє значну роль при проектуванні нових механізмів та модернізації існуючих. Результати, які отримуються при проведенні даних досліджень, можна використовувати при розрахунку міцності окремих ланок, їх інерційних характеристик, оптимізації конструктивних параметрів механізмів, мінімізації споживаної енергії. Комп'ютерний модуль програми KDAM для визначення кінематичних та динамічних параметрів шатунно-повзункової групи механізмів машин легкої промисловості дозволяє визначати координати, проекції швидкостей та прискорень центру мас шатуна, повзуна та точки приєднання ланок груп Асура на шатуні. При динамічному аналізі роботи шатунно-повзункової групи визначаються проекції повної реакції в шарнірах між кривошипом та шатуном, між шатуном та повзуном, між повзуном та нерухомою напрямною.

Шатунно-повзункові групи Асура знаходять широке використання в машинах легкої та текстильної промисловості. Вихідна ланка шатунно-повзункової групи виконує функцію робочого органу технологічної машини. Робочий орган технологічної машини взаємодіє з нитками. Траєкторія руху робочого органу впливає на значення кута охоплення ниткою напрямної поверхні. Зміна величини кута охоплення призводить до зміни натягу ниток. При зростанні кута охоплення до критичних величин може відбутися обрив нитки та зупинка технологічного обладнання. Натяг нитки збільшується при переході по зонах заправки системи подачі нитки на технологічних машинах. Збільшення натягу обумовлено змінанням нитки в зоні контакту з напрямними. Максимального значення натягу буде перед робочою зоною. Різке збільшення натягу призводить до порушення нормального проходження технологічного процесу переробки нитки.

Розробка нових схем системи подачі нитки потребує оперативної оцінки значення натягу перед робочою зоною. Цільовою функцією в задачах оптимізації технологічних процесів виступає мінімально необхідний натяг. Розробка спеціальних комп'ютерних програм для визначення натягу в робочій зоні дозволяє визначати необхідні технологічні параметри. Змінним параметром в цільовій функції виступає сума кутів охоплення ниткою робочих органів. Використання комп'ютерної програми дозволяє визначати напруженість та зміну відносного натягу по зонах заправки технологічних машин, що дозволяє ще на стадії проектування технологічного процесу оптимізувати форму лінії подачі нитки.

Таким чином, тема даної статті є актуальною, яка має важливе значення для мінімізації натягу ниток на технологічному обладнанні та зменшенню кількості обривів, що дозволить підвищити його продуктивність.

Аналіз джерел

Натяг нитки збільшується при переході по зонах заправки системи подачі нитки на технологічному обладнанні [1, 2]. Це збільшення обумовлено взаємодією нитки з напрямними та пристроями для натягу [3]. Максимального значення натягу буде перед робочою зоною [2, 4]. Мінімізація натягу перед робочою зоною має важливе значення для удосконалення технологічних процесів текстильної та швейної промисловості з позиції підвищення продуктивності технологічного устаткування та якості продукції що випускається [5]. Дослідження впливу конструкції пристрою натягу нитки на умови його взаємодії з ниткою з урахуванням її нерівномірності по діаметру поперечного перетину мають важливе значення при визначенні натягу нитки [6, 7]. Основним параметром оптимізації системи подачі ниток на технологічному обладнанні текстильної та трикотажної промисловості є мінімально необхідний натяг в робочій зоні [2]. Збільшення натягу в робочій зоні призводить до обриву ниток і, як наслідок, до зупинки технологічного обладнання [8].

Розробка прикладних пакетів комп'ютерних програм дозволяє максимально скоротити час на проектування технологічних процесів в легкій та текстильній промисловості [1, 9]. Це пов'язано з модернізацією лінії заправки ниток на технологічному обладнанні, що дозволяє мінімізувати натяг нитки в робочій зоні. Комп'ютерне визначення кінематичних та динамічних параметрів плоских механізмів дозволяє визначати параметри, які використовуються при визначенні напруженості технологічних процесів [2]. Простої устаткування, пов'язані з ліквідацією обриву, складають в даний час 75-80% від загального часу простоїв [2-4].

Метою роботи є розробка комп'ютерного модуля програми KDAM для визначення кінематичних та динамічних параметрів шатунно-повзункової групи механізмів машин легкої та текстильної промисловості.

Виклад основного матеріалу

Форма `TPMForm2 = class(TForm)` є основною формою комп'ютерного модуля KDAM і представлена на рис. 1а. На формі `TPMForm2 = class(TForm)` розташовані наступні компоненти `Button1: TButton`, `Button2: TButton`, `Button3: TButton`, `Memo1: TMemo`, `Label1: TLabel`, `Button4: TButton`, `Button5: TButton`, `Button6: TButton`, `Chart1: TChart`, `Button7: TButton`, `Series1: TPointSeries`, `Button8: TButton`, `Button9: TButton`, `Button10: TButton`, `Button11: TButton`, `Button12: TButton`. Компонент `Button3: TButton` ініціює виконання процедури `procedure Button3Click(Sender: TObject)` переходу до модуля `unit po0` додавання шатунно-повзункової групи Асура до механізму.

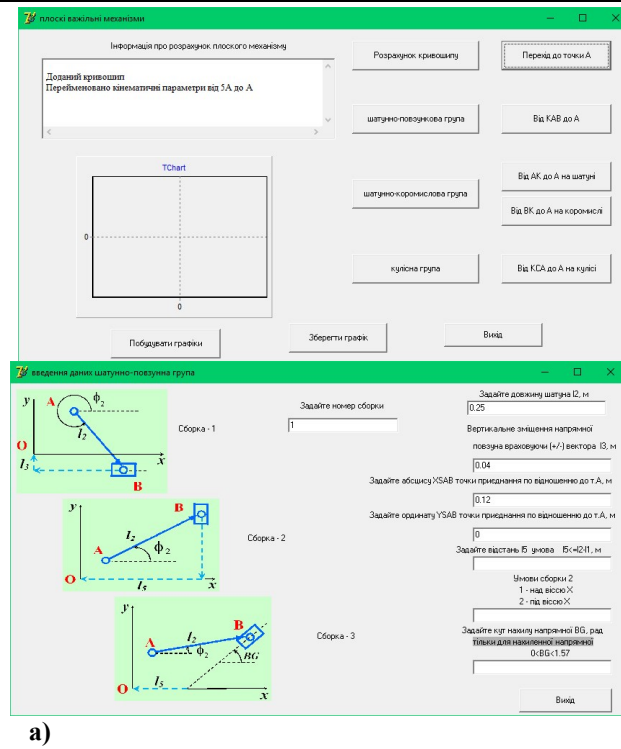


Рис. 1. Форми комп'ютерної програми KDM для шатунно-повзункової групи при кінематичному та динамічному дослідженні: а) форма TForm2 = class(TForm) комп'ютерного модуля unit Unit2PM; б) форма TFormPo0 = class(TForm) комп'ютерного модуля unit po0 для шатунно-повзункової групи

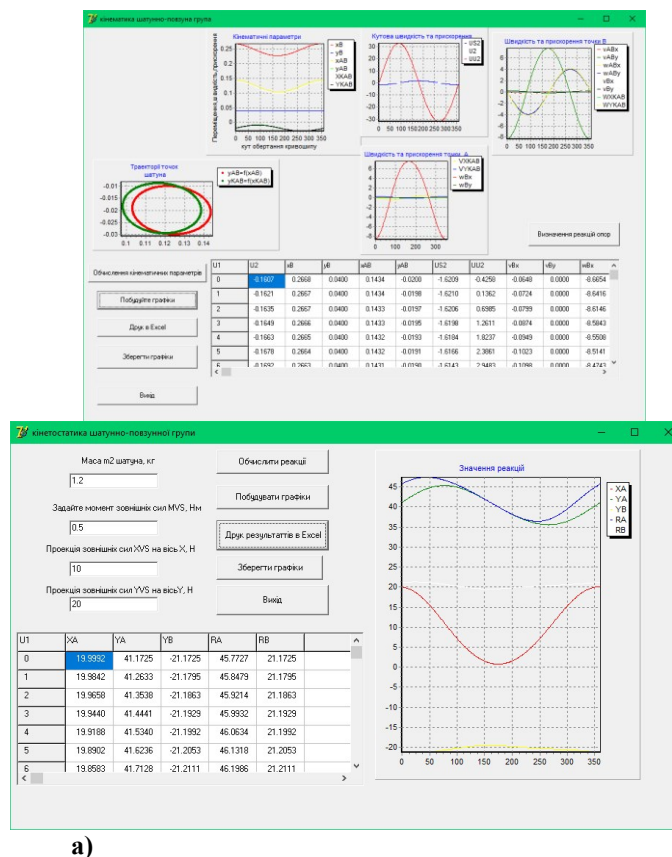


Рис. 2. Форми комп'ютерної програми KDM для шатунно-повзункової групи: а) форма TFormPo1 = class(TForm) модуля unit po1; б) форма TFormPo2 = class(TForm) модуля unit po2

На TFormPo0 = class(TForm) (рис. 16) розташовані наступні компоненти TFormPo0 = class(TForm), Button1: Tbutton, Edit1: Tedit, Edit2: Tedit, Edit3: Tedit, Edit4: Tedit, Label1: TLabel, Label2: TLabel, Label3: TLabel, Label4: TLabel, Edit5: Tedit, Label5: TLabel, Edit6: Tedit, Label6: TLabel, Edit7: Tedit, Label7: TLabel, Image1: Timage, Label8: TLabel, Label12: TLabel, Image2: Timage, Image3: Timage, Label9: TLabel, Label13: TLabel, Label14: TLabel, Edit8: Tedit, Label15: TLabel, Label10: TLabel, Label11: TLabel, Label16: TLabel.

Компоненти Image2: Timage, Image3: Timage та Image1: Timage призначені для розміщення схем шатунно-повзункової групи для 3 варіантів розташування повзуна відносно координатної системи Оху.

Компонент Button1: Tbutton ініціює виконання процедури procedure Button1Click(Sender: TObject) переходу з форми TFormPo0 = class(TForm) до модуля unit po1 з формою TFormPo1 = class(TForm) для кінематичного розрахунку шатунної повзункової групи механізму. На рис.2а представлена форма TFormPo1 = class(TForm) для кінематичного розрахунку шатунної повзункової групи механізму. Компонент Button2: Tbutton викликає процедуру procedure Button2Click(Sender: TObject) для друку результатів розрахунку даних переміщення точок, кутової швидкості та прискорення ланок шатунно-повзункової групи з використанням компоненту StringGrid.

Компонент Button1: Tbutton ініціює процедуру procedure Button1ksClick(Sender: TObject) згорання форми TFormPo1 = class(TForm) та активації форми TFormPo2 = class(TForm) для проведення кінетостатичного дослідження для визначення реакцій в шарнірах шатунно-повзункової групи з використанням принципу Даламбера (рис. 2б). Компонент Button4: Tbutton викликає процедуру procedure Button4Click(Sender: TObject) для друку результатів розрахунку проєкцій головних векторів шарнірів А, В шатунно-повзункової групи механізму в проєкції на координатні осі х та у та модулі головних векторів реакцій в шарнірах А, В в залежності від кута обертання ведучої ланки навколо опори з таблиці, з використанням компоненту StringGrid.

В табл. 1 представлені результати розрахунку для шатунно-повзункової групи механізму для п'яти положень кривошипу: 0° ; 90° ; 180° ; 270° ; 360° .

Таблиця 1

Кінематичні та динамічні параметри для точок шатунно-повзункової групи

| U1 | xAB | yAB | vABx | vABу | wABx | XA | YA | YB | RA |
|-----|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|
| 0 | 0.1434 | -0.0200 | -0.0324 | 0.2000 | -8.3327 | 19.9992 | 41.1725 | -21.1725 | 45.7727 |
| 90 | 0.1213 | -0.0100 | -0.4000 | 0.0000 | 0.9889 | 9.1498 | 45.2753 | -20.4782 | 46.1906 |
| 180 | 0.1034 | -0.0200 | 0.0324 | -0.2000 | 7.6673 | 0.7775 | 39.7708 | -19.6033 | 39.7784 |
| 270 | 0.1246 | -0.0300 | 0.4000 | 0.0000 | -0.3210 | 10.0507 | 35.5882 | -20.3852 | 36.9802 |
| 360 | 0.1434 | -0.0200 | -0.0324 | 0.2000 | -8.3327 | 19.9992 | 41.1725 | -21.1725 | 45.7727 |

При виконанні розрахунків кутова швидкість кривошипа дорівнювала 20 c^{-1} , довжина кривошипа дорівнювала 0.020 м, довжина шатуна дорівнювала 0.25 м, вертикальне зміщення дорівнювало 0.04 м, маса вхідної ланки дорівнювала 0.565 кг, маса шатуна дорівнювала 1.2 кг, проєкції на осі X та Y результуючої зовнішніх сил, які діють на шатун, дорівнювали 10 Н та 20 Н відповідно, момент зовнішніх сил дорівнював 0.5 Нм. При розрахунках враховували, що вхідна шатунно-повзункова група розташована у вертикальній площині.

Висновки

Розроблений комп'ютерний модуль програми K DAM для визначення кінематичних та динамічних параметрів шатунно-повзункової групи механізмів машин легкої промисловості. Це дозволяє визначати координати, проєкції швидкостей та прискорень центру мас шатуна, повзуна та точки приєднання ланок груп Асура на шатуні. При динамічному аналізі роботи шатунно-повзункової групи визначаються проєкції повної реакції в шарнірах між кривошипом та шатуном, між шатуном та повзуном, між повзуном та нерухомою напрямною.

Література

1. Scherban V. Yu., Kolisko O. Z., Sholudko M. I., Kalashnik V. Yu. Algorithmic, software and mathematical components of CAD in the fashion industry. K.: Education of Ukraine, 2017. 745 p.
2. Scherban V. Yu. Mechanics of Threads. K.: Formation of Ukraine, 2018. 533 p.
3. Щербань В. Ю., Волков О. И., Щербань Ю. Ю. САПР оборудования и технологических процессов легкой и текстильной промышленности. К.: Бумсервис, 2004. 519 с.
4. Shcherban V. Y., Kolisko O. Z., Melnyk G. V., Sholudko M. I., Kalashnik V. Y. Computer systems design: software and algorithmic components. K.: Education of Ukraine, 2019. 902 p.
5. Scherban V. Yu., Krasnitsky S. M., Rezanov V. G. Mathematical Models in CAD. Selected sections and examples of application. K.: KNUTD, 2011. 220 p.
6. Щербань В. Ю., Щербань Ю. Ю., Колиско О. З., Мельник Г. В., Шолудько М. І., Калашник В. Ю. Базове проектує забезпечення САПР в індустрії моди. К.: Освіта України, 2018. 902 с.
7. Щербань В. Ю., Калашник В. Ю., Колиско О. З., Шолудько М. І. Дослідження впливу матеріалу нитки і анізотропії тертя на її натяг і форму осі. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2015. 223(2). С. 25–29.
8. Shcherban V., Melnyk G., Sholudko M., Kalashnyk V. Warp yarn tension during fabric formation. Fibres and Textiles. 2018. volume 25. №2. P. 97-104.

9. Yakubitskaya I. A., Chugin V. V., Shcherban V. Yu. Differential equations of the relative motion of the filament element on the end sections of the coil of the winding drum. *Technology of the textile industry*. 1997. № 6. P. 50-54.

References

1. Scherban V. Yu., Kolisko O. Z., Sholudko M. I., Kalashnik V. Yu. Algorithmic, software and mathematical components of CAD in the fashion industry. K.: Education of Ukraine, 2017. 745 p.
2. Scherban V. Yu. *Mechanics of Threads*. K.: Formation of Ukraine, 2018. 533 p.
3. Scherban V. Yu., Volkov O. I., Shcherban Yu. Yu. CAD equipment and technological processes for light and textile industries. K.: Boomservice, 2004. 519 p.
4. Shcherban V. Y., Kolisko O. Z., Melnyk G. V., Sholudko M. I., Kalashnik V. Y. Computer systems design: software and algorithmic components. K.: Education of Ukraine, 2019. 902 p.
5. Scherban V. Yu., Krasnitsky S. M., Rezanov V. G. *Mathematical Models in CAD. Selected sections and examples of application*. K.: KNUTD, 2011. 220 p.
6. Shcherban V. Yu., Shcherban Y. Y., Kolisko O. Z., Melnik G. V., Sholudko M. I., Kalashnik V. Y. Basic design support of CAD in the fashion industry. Kyiv: Education of Ukraine, 2018. 902 p.
7. Scherban V. Yu., Kalashnik V. Yu., Kolisko O. Z., Sholudko M. I. Investigation of the influence of the thread material and the anisotropy of friction on its tension and the shape of the axis. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2015. Volume 223. Issue 2. p. 25-29.
8. Shcherban V., Melnyk G., Sholudko M., Kalashnyk V. Warp yarn tension during fabric formation. *Fibres and Textiles*. 2018. volume 25. №2. P. 97-104.
9. Yakubitskaya I. A., Chugin V. V., Shcherban V. Yu. Differential equations of the relative motion of the filament element on the end sections of the coil of the winding drum. *Technology of the textile industry*. 1997. № 6. P. 50-54.

КОТЕЛЕНЕЦЬ ЮЛІЯ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-4011-1221>knopkaz566@gmail.com

БОНДАРЕНКО НАТАЛІЯ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9237-8187>nalbondarenko@gmail.com

БОНДАРЕНКО ВІКТОР

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1663-4799>

СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ЧАСУ З ДОДАТКОВИМИ МОЖЛИВОСТЯМИ

Системи контролю часу стали невід'ємним елементом у багатьох сферах людської діяльності, таких як транспорт, електроніка, телекомунікації та ін. Однак створення функціональних систем управління часу з додатковими можливостями стає все більш важливим завданням. Наприклад, сучасні мобільні пристрої, що використовуються в різних сферах, потребують точних систем контролю часу для забезпечення роботи різних функцій, таких як геолокація, фотозйомка і відеозйомка, а також для реалізації інших додаткових функцій.

Запропоновано систему контролю часу з додатковими функціями на основі кварцового резонатора. Система має розширені можливості, які можуть бути використані для виконання різних функцій, таких як виведення даних на екран, обробка даних з датчиків температури та вологості, що використовуються для моніторингу кліматичних умов в приміщенні. Система використовує високоякісні компоненти, такі як кристал з інтерфейсом I2C для взаємодії та РК-дисплей. Пристрій забезпечує точну синхронізацію часу відповідно до використання Wi-Fi модуля. Система живиться через USB-порт і тому може бути легко підключена до комп'ютера або ноутбука. Має компактні розміри та може бути використана в різних пристроях, які потребують точного відстеження часу. Завдяки відносно низькій вартості компонентів і простоті виготовлення, система може бути використана для створення прототипів і невеликих партій обладнання в різних промислових і наукових галузях.

Ключові слова: система контролю часу, годинник, мікроконтролер, РК-дисплей, інтерфейс I2C.

KOTELENETS YULIYA, BONDARENKO NATALIYA, BONDARENKO VIKTOR

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

TIME CONTROL SYSTEM WITH ADDITIONAL FEATURES

Time management systems have become an integral element in many areas of human activity, such as transportation, electronics, telecommunications etc. However, creating functional time management systems with additional features is becoming an increasingly important task. For example, modern mobile devices used in various fields require accurate time control systems to ensure the operation of various functions, such as geolocation, photography, and video, as well as to implement other additional functions.

A time control system with additional functions based on a quartz resonator has been developed. The system has advanced features that can be used to perform various functions such as displaying data on the screen, processing data from temperature and humidity sensors used to monitor indoor climate conditions. The system uses high quality components such as a crystal with an I2C interface for communication and an LCD display. The device provides accurate time synchronization according to the use of the Wi-Fi module. The system is powered via a USB port and can therefore be easily connected to a computer or laptop. It has a compact size and can be used in a variety of devices that require accurate time tracking. Due to the relatively low cost of components and ease of manufacture, the system can be used to create prototypes and small batches of equipment in various industrial and scientific fields.

Keywords: time control system, clock, microcontroller, LCD display, I2C interface.

Вступ

Зважаючи на важливість точного відліку часу в багатьох галузях, розробка систем контролю часу стає все більш актуальною, а забезпечення додаткових можливостей таких систем розширяє області їх застосування. У цій статті розглянемо процес розробки системи контролю часу на базі мікроконтролера. Система дає змогу точно відслідковувати час та може бути застосована у різних сферах, таких як автоматизація промислових процесів, розумні будинки та багатьох інших.

Теоретичні відомості

Система контролю часу з додатковими можливостями, або електронний годинник – це пристрій, що використовується для точного вимірювання часу та має додаткові функції, такі як будильник, таймер, годинник зворотного відліку тощо. Електронні годинники з плином часу стали важливим елементом нашого життя, адже вони не лише показують час, але й повідомляють про надходження повідомлень, дзвінків, контролюють фізичний стан людини під час занять спортом та багато іншого.

Кварцовий резонатор системи генерує коливання з частотою 32 768 Гц, які перетворюються на імпульси для підрахунку часу. Досить висока точність електронного годинника в порівнянні з механічним та подальший розвиток мікроелектроніки призвели до майже повного витіснення механічних стрілкових годинників з життя людини до кінця ХХ століття. Поступово електронний годинник-будильник став вбудовуватися в різні побутові прилади та пристрої, дозволяючи керувати ними (вмикати, перемикаєти

режими роботи, вимикати) [1].

Основними компонентами електронного годинника є мікроконтролер або мікросхема, кристалічний резонатор, дисплей і кнопки керування. Мікроконтролер відповідає за відлік часу та керування функціями годинника. Кварцовий резонатор генерує стійкі коливання для відліку часу. На дисплеї відображається час та інша додаткова інформація, а кнопки керування використовуються для налаштування та керування функціями годинника.

Аналіз існуючих рішень

Перед початком розробки власної системи контролю часу, необхідно проаналізувати існуючі рішення на ринку. На сьогоднішній день на ринку існує велика кількість різних електронних годинників, які можна розподілити на кілька типів:

- Звичайні електронні годинники з додатковими функціями (наприклад, будильник, календар тощо).
- Електронні годинники з радіочастотним приймачем для синхронізації часу з сигналом міжнародного стандарту часу (наприклад, WWVB, DCF77, MSF).
- Електронні годинники з GPS-приймачем для синхронізації часу та відображення географічних координат.
- Електронні годинники з WI-FI модулем для синхронізації.

Кожен з наведених типів електронних годинників має свої переваги та недоліки. Наприклад, звичайні електронні годинники з додатковими функціями є доступнішими за ціною, проте їхня точність може бути меншою порівняно з годинниками з радіочастотним приймачем або GPS-приймачем.

Годинники з радіочастотним приймачем забезпечують високу точність, оскільки вони отримують сигнал із зовнішнього джерела, проте вони можуть бути вразливі до перешкод, наприклад, відстань до джерела сигналу може бути критичним параметром.

GPS-приймачі у складі годинника також забезпечують високу точність, проте необхідно забезпечити наявність сигналу GPS для отримання точного часу та координат.

Електронний годинник з Wi-Fi синхронізацією може автоматично оновлювати час, використовуючи Wi-Fi з'єднання з Інтернетом. Зазвичай, ці годинники підключаються до мережі Wi-Fi у вашому домі або офісі і отримують точний час від сервера часу Інтернету. Це дає змогу годиннику завжди показувати точний час, без необхідності вручну оновлювати його на основі показів інших годинників.

Існує багато варіантів реалізації подібного пристрою. Декілька популярних рішень: Мікроконтролери (мікропроцесори) дають змогу створити повнофункціональний електронний годинник, який може бути налаштований на певний перелік функцій. Зазвичай, такі годинники мають такі функції, як відображення часу, дати, таймер, будильник і т. д. Мікроконтролер (мікропроцесор) дає змогу створити годинник з високою точністю та точністю збереження часу.

- Програмне забезпечення: існують програмні засоби, такі як LabVIEW або MATLAB, які дають змогу створювати електронні годинники без програмування мікроконтролерів (мікропроцесорів), але можливості програмних засобів обмежені в порівнянні з мікроконтролерами (мікропроцесорами), тому не всі функції можуть бути реалізовані.

- Інтегральні схеми, такі як RTC (Real-Time Clock), мають вбудований кварцовий генератор та RTC, що дозволяє створювати електронний годинник без програмування мікроконтролерів (мікропроцесорів). Однак, такі годинники зазвичай мають обмежену функціональність і можуть бути менш точні порівняно з мікроконтролерами (мікропроцесорами).

- Схеми на базі TTL-елементів: технологія TTL (Transistor-Transistor Logic) базується на транзисторах для реалізації логічних елементів, які використовують для створення електронного годинника. Цей спосіб може бути дуже ефективним для створення простих годинників, що відображають тільки час або час та дату.

Отже, найкращим варіантом є використання мікроконтролерів (мікропроцесорів): завдяки цьому можна забезпечити високу точність та широкий функціональний діапазон, а також можливість легко оновлювати та розширювати функціональність у майбутньому.

Також пристрій може мати різні типи дисплеїв. Проаналізуємо ринок для визначення найбільш оптимального варіанту. Існує декілька типів дисплеїв, які можуть бути використані для реалізації електронного годинника:

- LED-дисплеї є дуже популярними для реалізації електронних годинників, мають високу яскравість, гарну читабельність та довгу тривалість служби.

- LCD-дисплеї також досить популярні для реалізації електронних годинників, мають високу якість зображення, дозволяють відображати більшу кількість інформації та мають низьке споживання енергії.

- OLED-дисплеї мають високу якість зображення та глибокі чорні кольори, низьке споживання енергії та потребують меншої електричної потужності, однак OLED-дисплеї можуть бути досить дорогими, особливо якщо потрібен великий розмір екрану.

- TFT-дисплеї є одними з найбільш розповсюджених дисплеїв, які використовуються для відображення інформації, мають високу якість зображення та можуть відображати кольорову графіку.

Найбільш доступні дисплеї – це LCD-дисплеї, які дешеві у виробництві та забезпечують гарну

якість зображення. Таким чином, для економії витрат на реалізацію електронного годинника краще використовувати LCD-дисплей. Якщо стоїть задача розширити функціонал, то можна замінити даний вид дисплея на TFT.

Для аналізу додаткового функціоналу розглянемо деякі конкретні приклади електронних годинників різної цінової категорії, а саме TFA 60.2528.01, WS-8157U-CH-IT та Xiaomi qingping clock.

У всіх трьох пристроях час відображається на цифровому дисплеї. У TFA 60.2528.01 та WS-8157U-CH-IT використовується LED-дисплей, а у Xiaomi clock – LCD-дисплей. Годинники TFA 60.2528.01 та WS-8157U-CH-IT мають великі цифри, які легко зчитуються здалеку, Xiaomi clock має менші цифри.

У годиннику TFA 60.2528.01 використовується кварцовий генератор для забезпечення точності часу. Для налаштування часу використовуються клавіші, що знаходяться на задній стороні годинника. Xiaomi clock має вбудований Bluetooth-модуль, який дозволяє синхронізувати час зі смартфоном через спеціальний додаток Mi Home. Це дозволяє не лише налаштувати точний час, але й використовувати годинник як будильник, додавати нагадування та отримувати інформацію про погоду та інші параметри.

Атомний годинник WS-8157U-CH-IT використовує радіосигнал для синхронізації часу. Годинник приймає сигнал від стандарту часу NIST (National Institute of Standards and Technology) США, що дозволяє забезпечити точність часу на рівні 1 секунди на 10 мільйонів років. Однак, для синхронізації годинника необхідно забезпечити наявність сигналу радіостанції WWVB, що може бути проблемою у деяких регіонах.

Годинники TFA 60.2528.01 та Xiaomi clock мають кілька додаткових функцій. Обидва пристрої можуть служити як будильники, тобто відтворювати звуковий сигнал у заданому часі. Крім того, Xiaomi може вимірювати температуру та вологість повітря. У порівнянні з цими пристроями, атомний годинник має значно більшу кількість додаткових функцій. Наприклад, він може відображати погодні умови та прогнозувати погоду, використовуючи власні сенсори та отримуючи дані з Національної метеорологічної служби США. Також він має функцію автоматичного переходу на літній час та зимовий час, яка є досить корисною для користувачів, які мешкають в регіонах, де змінюється час.

Функціональність

Запропонована система контролю часу має наступні характеристики:

- точне та надійне відображення часу в форматі годин, хвилин та секунд;
- відображення часу у 24-годинному або 12-годинному форматі;
- можливість синхронізації годинника з точним джерелом часу;
- можливість встановлення будильника та налаштування часу спрацювання будильника;
- помітний для користувача сигнал про спрацювання будильника;
- можливість встановлення таймера та налаштування часу спрацювання таймера;
- можливість вимірювання температури повітря у градусах Цельсія або Фаренгейта;
- вимірювання поточної вологості повітря в приміщенні;
- LCD-дисплей, що забезпечує легке зчитування часу, навіть здалеку;
- зручний інтерфейс для керування системою;
- можливість встановлення секундоміра та його налаштування;
- можливість ручного встановлення часу та дати;
- невисока ціна.

Також наявність у складі датчика для вимірювання температури дає можливість використати його для сповіщення при надмірних чи недостатніх для комфортного життя людини показниках температури.

Опис реалізації

Структурна схема системи контролю часу наведена на рис. 1 і складається з трьох частин:

- Вхідний блок.
- Блок обробки даних.
- Вихідний блок.

Вхідний блок

Блок включає в себе USB роз'єм, котрий забезпечує вхідну напругу. Також передбачений стабілізатор живлення для забезпечення вихідної напруги 3.3 В. До блоку входять такі елементи, як керування пристроєм, датчик для вимірювання показників навколишнього середовища та Wi-Fi модуль для взаємодії з мережею.

Елемент керування характеризується п'ятьма тактовими кнопками, які з'єднані з блоком обробки даних за допомогою GPIO [2]. Цей елемент блоку забезпечує керування пристроєм, а саме: зміну відображення часового формату, зміну відображення температурного формату, налаштування дати та часу, налаштування функції будильника, її деактивацію та відкладення, налаштування функції таймера та секундоміра, а також перемикання між різними стилями відображення інформації на дисплеї. Тобто даний елемент блоку відповідає за вибір режиму роботи та налаштування пристрою безпосередньо користувачем.

Датчик вимірювання показників навколишнього середовища здійснює вимір показників температури та відсоток вологості у приміщенні, де знаходиться прилад. Взаємодія з блоком обробки даних здійснюється аналогічно до елемента керування.

Wi-Fi модуль здійснює взаємодію з Wi-Fi мережею для синхронізації показників часу, дати. Також даний елемент можна використати більш розширено, наприклад, для отримання інформації про прогноз погоди на декілька днів. Для взаємодії з блоком обробки даних використовується інтерфейс UART [3].

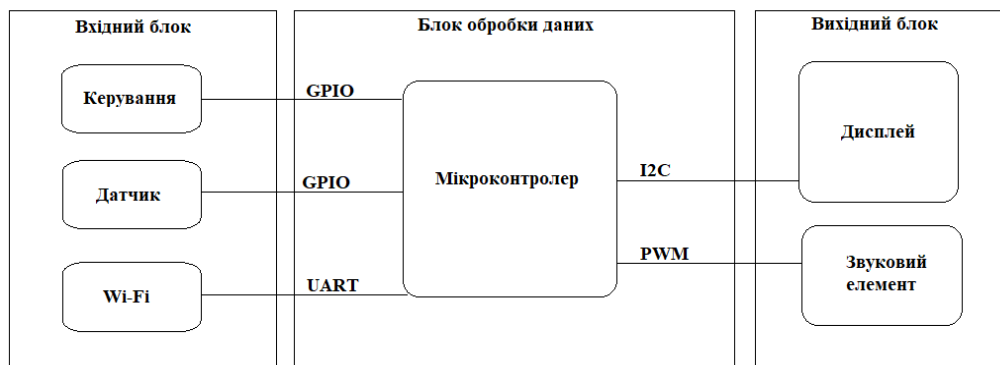


Рис. 1. Структурна схема пристрою

Блок обробки даних

Даний блок обробляє інформацію, яка надійшла від вхідного блоку, тобто обробляє дані з датчику, інформацію від Wi-Fi модуля, налаштування, які надійшли від елемента керування. Також даний блок оброблену інформацію передає до вихідного блоку для відображення її на дисплеї чи поданні звукового сигналу. Для забезпечення обробки використано мікроконтролер з вбудованим блоком реального часу, а саме – STM32 [4].

Вихідний блок

Даний блок відображає всі дані, котрі він отримав від блоку обробки даних. Він представлений LCD-дисплеєм 20x04, для відображення інформації у чотири ряди по двадцять символів у кожному, що дає змогу відобразити більше інформації для користувача в один проміжок часу. З блоком обробки даних вихідний блок взаємодіє по інтерфейсу I2C [5], завдяки такому рішенню забезпечується зручний інтерфейс між мікроконтролером та дисплеєм, знижується кількість необхідних пінів на мікроконтролері та спрощується схема підключення. Також у вихідному блоці наявний звуковий елемент, котрий сповіщає користувача про спрацювання таких функцій, як будильник, таймер, секундомір тощо. Звуковий елемент з'єднується з мікроконтролером завдяки GPIO.

Висновок

Запропоновано систему контролю часу з розширеними додатковими можливостями в порівнянні з рішеннями, представленими на ринку. Варіант реалізації системи з визначеною функціональністю представлений структурною схемою та описом взаємодії блоків системи між собою. Взявши за основу дану реалізацію системи, для подальшого її вдосконалення можна реалізувати:

- заміну LCD дисплея на TFT дисплей;
- заряджання від сонячної батареї, що дасть змогу використовувати систему у походах чи подорожах в автономному режимі;
- розширений мовний інтерфейс для користувача.

Література

1. Електронний годинник. Науково-популярний блог. 2014. URL: <https://www.npblog.com.ua/index.php/hi-tech/elektronnij-godinnik.html>.
2. Zhu Y. Embedded Systems with ARM Cortex-M Microcontrollers in Assembly Language and C: Third Edition. E-Man Press LLC, 2017. 738 p.
3. Noviello C. Mastering STM32. 2018. 823 p.
4. Yiu J. The definitive guide to the ARM Cortex-M3. Amsterdam: Newnes, 2010.
5. Himpe V. Mastering the I2C Bus: LabWorX 1. PUBLITR ELEKTOR, 2011. 247 p.

References

1. Elektronnyi hodynnyk. Naukovo-populiarnyi bloh. 2014. URL: <https://www.npblog.com.ua/index.php/hi-tech/elektronnij-godinnik.html>.
2. Zhu Y. Embedded Systems with ARM Cortex-M Microcontrollers in Assembly Language and C: Third Edition. E-Man Press LLC, 2017. 738 p.
3. Noviello C. Mastering STM32. 2018. 823 p.
4. Yiu J. The definitive guide to the ARM Cortex-M3. Amsterdam: Newnes, 2010.
5. Himpe V. Mastering the I2C Bus: LabWorX 1. PUBLITR ELEKTOR, 2011. 247 p.

МАНУКОВ ІГОР

Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-9985-9460>igor.manukoff@gmail.com

БОНДАРЕНКО НАТАЛІЯ

Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9237-8187>nalbondarenko@gmail.com

БОНДАРЕНКО ВІКТОР

Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1663-4799>vicbondarenko@gmail.com

РОБОТИЗОВАНА ТЕСТОВА ПЛАТФОРМА

Все більш широке використання у сучасному житті електрообладнання потребує побудови платформи для його тестування. Стаття присвячена створенню системи керування роботизованою тестовою платформою з мотор-колесами та світлодіодними фарами. Запропоновано структурну схему системи керування, описано принцип керування та створена програма керування, обрано елементну базу, що забезпечить надійну роботу системи за визначених умов експлуатації. Завдяки грамотному програмуванню мікроконтролерів та правильному вибору елементної бази вирішуються актуальні проблеми, пов'язані зі швидкістю та зменшенням габаритів платформи. Програма керування розроблена для використання з мікроконтролерами архітектури ARM сімейства STM32. Застосовано операційну систему FreeRTOS та спеціалізовані бібліотеки для програмування автоматизованих систем та підвищення рівня абстракції, що забезпечило модульність і перенесення коду на інші серії мікроконтролерів, полегшило тестування та в значній мірі спростило та зробило більш ефективним код.

Ключові слова: система керування, роботизована платформа, мотор-колесо, мікроконтролер, FreeRTOS

IHOR MANUKOV, NATALIYA BONDARENKO, VIKTOR BONDARENKO

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

ROBOTIC TEST PLATFORM

The increasingly widespread use of electrical equipment in modern life requires the construction of a platform for its testing. The article is devoted to the creation of a control system for a robotic test platform with motorized wheels and LED headlights. A structural diagram of the control system is proposed, the control principle is described and a control software is created, an element base is selected that will ensure reliable operation of the system under specified operating conditions. Due to the competent programming of microcontrollers and the correct selection of the element base, the actual problems related to the speed of operation and the reduction of the dimensions of the platform are solved. The control software is designed for use with microcontrollers of the ARM architecture of the STM32 family. The FreeRTOS operating system and specialized libraries for programming automated systems and increasing the level of abstraction were applied, which ensured modularity and portability of the code to other series of microcontrollers, facilitated testing, and greatly simplified and made the code more efficient.

Keywords: control system, robotic platform, wheel motor, microcontroller, FreeRTOS

В світі існує декілька варіантів платформ з мотор-колесами та світлодіодними фарами з дистанційним керуванням. Деякі з них використовують у побутових цілях, таких як робот-кур'єр, деякі у цивільній інфраструктурі, наприклад робот-пожежник, інші ж є лише експериментальними.

Всі платформи зовні мають більш або менш схожий вигляд, приклад наведений на рис. 1.

Порівняємо декілька конкретних прикладів тестових платформ:

1. Leo Rover v1.8: призначена для випробувань, має «відкритий» код, колеса діаметром 130 мм, дальність зв'язку – 100 м, залежну підвіску, камеру (некеровану).

Вступ



Рис. 1. Платформа LYNXMOTION ALUMINUM A4WD1 ROVER KIT

2. Rover Robotics 4WD Rover Pro: має захист від вологи та пилю, колеса діаметром 6,5 дюймів, залежну підвіску, дальність зв'язку невідома, камера відсутня.
3. 4X4 1/10 MOBILE ROBOT SYSTEM WITH MOTOR AND SERVO: має діаметр коліс – 115 мм, незалежну підвіску, дальність зв'язку невідома, камера відсутня, потребує встановлення блоку керування.
4. LYNXMOTION ALUMINUM A4WD1 ROVER: має колеса діаметром 4,75 дюймів, залежну підвіску, камеру, дальність зв'язку невідома, потребує встановлення блоку керування.

В кожній з роботизованих платформ є свої переваги та недоліки, проте більшість з них мають спільні недоліки, що й призвело до необхідності створення нової платформи. Отже про недоліки: більшість цих платформ є унікальними, а отже неможливо змінити лише мотор-колесо, аби його перевірити, необхідно змінювати платформу. Другим критичним недоліком є неможливість отримати початковий код або необхідність його розробки власноруч, що унеможливило зміну налаштувань таким чином аби досягнути лімітів випробуваних елементів та виграти час. Також до недоліків можна віднести проблеми зі зв'язком віддаленого керування, економічний аспект у цій роботі не розглядаємо.

Постановка задачі

Мета роботи полягає у побудові власної платформи з дистанційним керуванням для тестування мотор-колес та світлодіодних фар зі своїм початковим кодом та «електричною начинкою» для більш детальних та точних налаштувань випробуваних елементів, підвіска має бути незалежною з можливістю заміни коліс діаметром від 6,5 до 15 дюймів, дальність зв'язку – не менше 1000 м, камера керування аби мати кут огляду не менше 180°. Також необхідно зробити платформу універсальною, надійною та придатною до ремонту та швидкої зміни конфігурації елементів. При порівнянні будь-якої з представлених платформ із наведеними вимогами можна побачити, що жодна з них їх не задовольняє, тому прийнято рішення побудувати роботизовану платформу, яка дозволить реалізувати всі зазначені вимоги. В даній статті зосередимось на створенні системи керування роботизованою тестовою платформою.

Структурна схема системи керування та принцип роботи

Запропоновану структурну схему системи керування наведено на рис. 2.

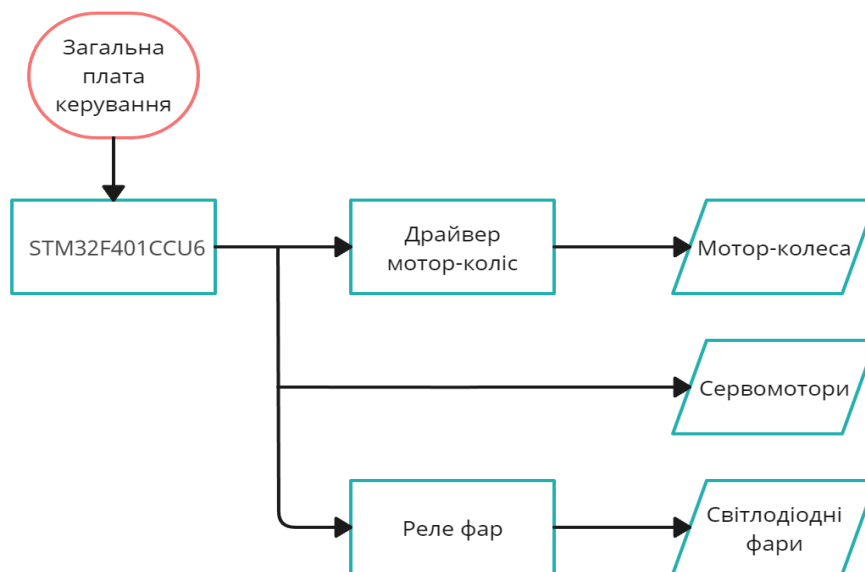


Рис. 2. Структурна схема системи керування

Система керування платформою складається з наступних блоків:

- загальна плата керування на LGT8F328D [1] – приймає сигнали з пульта дистанційного керування та постачає сигнали на плату драйвера;
- STM32F401CCU6 [2] – мікроконтролер, що приймає сигнали загальної плати керування, проводить розрахунки та подає сигнали на периферійні пристрої;
- драйвери моторів коліс TauTau [3] – приймають сигнал від STM32F401CCU6 та керують колесами;
- драйвери сервомоторів SG90 [4] – приймають сигнал від STM32F401CCU6 та керують сервомоторами;
- реле фар srd-05vdc-sl-c [5] – приймають сигнал від STM32F401CCU6 та керують фарами.

Принцип керування пристроєм

Для керування пристроєм застосовується пульт дистанційного керування, що посиляє сигнал на приймач, а той декодує та відправляє цей сигнал на загальну плату керування. Загальна плата керування оброблює отримані дані та відправляє на STM32F401CCU6 за протоколом UART [6]. STM32F401CCU6, в свою чергу, обробляє отримані дані та здійснює керування сервоприводами завдяки ШІМ, виставляє на реле керуючий сигнал 0 або 1 та за протоколом UART відправляє команду на драйвери коліс.

Пульт дистанційного керування побудований на базі мікроконтролера ATmega328P у складі плати Arduino Nano. До контактів мікроконтролера під'єднані кнопки, аналогові джойстики та модуль LoRa. Отримуючи дані від джойстиків та кнопок мікроконтролер ATmega328P кодує команду та відправляє її за протоколом UART на модуль LoRa, який саме є передавачем. Отже, змінюючи положення джойстиків та натискаючи на кнопки ми змінюємо посилку, що передається на роботизовану платформу. Живлення пульта здійснюється від літій-іонного акумулятора, що заряджається через роз'єм USB type-C.

Параметри керування:

STM32F401CCU6 аналізує «контрольну суму» та довжину посилки, чи є вона коректною. З перших трьох бітів отримуємо значення обраної швидкості, взагалі маємо 5 швидкостей і цей показник можна збільшити. Чотири наступні біти посилки вказують напрям руху, який задає оператор: вперед, назад, вправо, вліво, відповідно. Одночасно може бути обрано поворот та рух вперед або назад, параметри обраховуються наступним чином:

$$\text{Швидкість повороту} = \text{модифікація швидкості повороту} * \text{довжина бази} * 60 / (4 * \pi * \text{радіус колеса}),$$

де:

«модифікація швидкості повороту» – умовна константа, що задається задля налаштування швидкості;

«довжина бази» - довжина тестової платформи, що використовується на даний момент;

«радіус колеса» - радіус коліс, що в даний момент встановлено на тестову платформу.

$$\text{Швидкість} = \text{модифікація швидкості} * 60 / (2 * \pi * \text{радіус колеса})$$

Тоді маємо:

$$\text{Обертаючий момент коліс} = \text{швидкість} + \text{швидкість повороту}$$

Таким чином, при швидкості рівній нулю відбувається поворот на місці, а при відсутності повороту відбувається рух вперед або назад без повороту. При одночасному заданні руху вперед та назад або вліво та вправо ці параметри сприймаються як нуль.

Перші чотири біти другого байту посилки відповідають за рух камери: вгору, вниз, вправо, вліво. При одночасному заданих двох протилежних напрямках вони сприймаються рівними нулю, аналогічно до керування колесами. При ініціалізації камера становиться у нульове положення, у цей момент період ШІМ дорівнює 1,5 мс. Мінімальне значення ШІМ – 0,5 мс, максимальне – 2,5 мс. При кожному сигналі на поворот у будь-яку сторону, камера повертається на 0,5 градуса, що відповідає зміні ШІМ на 0,02 мс. Затримка передачі даних дорівнює 200 мс, отже за секунду відбувається поворот на 2,5 градуса, що дорівнює зміні ШІМ на 0,1 мс. Вираховується сигнал ШІМ наступним чином:

$$(\text{кут} - \text{початковий кут}) * (\text{кінцевий період} - \text{початковий період}) / \text{різниця кутів} + \text{початковий період},$$

Де «кут» - кут, на який ми прагнемо поставити камеру відносно початкового положення;

«початковий кут» – кут початкового положення;

«кінцевий період» – період, що відповідає максимальному куту повороту;

«початковий період» – період, що відповідає мінімальному куту повороту;

«різниця кутів» – від кута максимального положення відняти початковий кут.

Кут визначається як кут, що був, плюс 0,5 градуса. Ця швидкість є комфортною, проте може бути змінена за бажанням. Камера має фізичні обмеження для повороту, тому для безпеки сервомотора, аби його не зіпсувати, застосовані програмні обмеження.

П'ятий біт другого байту посилки відповідає за живлення фар. Якщо біт дорівнює одиниці – фари світять, якщо нуль – фари вимкнені. Реалізовано це за допомогою реле, що приймає сигнал з відповідного піну STM32F401CCU6 та визначає, подавати логічний нуль чи логічну одиницю на фари. Задля усунення невизначеності, піни мають підтяжку до високого чи низького рівня, залежно від того, який є необхідним.

Елементна база

У якості мікроконтролера драйверів обрано STM32F401CCU6. Це досить популярний та бюджетний мікроконтролер, має необхідний нам UART та достатню кількість таймерів та GPIO виводів. Також популярний мікроконтролер LGT8F328D, що має UART та достатню кількість виводів, обрано для загальної плати керування. Перевагами обраних мікроконтролерів є простота використання та програмування.

У якості драйверів обрано TauTau (ТаоТао), він має усі необхідні характеристики, а саме – максимальний струм до 10 А, колеса до 0,5 м у радіусі. У комплекті з драйвером обрано сервомотор SG90 за його низьку вартість та широке застосування. У подальшому SG90 буде замінений на MG995, який також відносно недорогий та має усі переваги SG90, таку ж ШІМ, проте, на відміну від SG90, має металеві

шестерні редуктора та працює із більшою вагою.

У якості реле фар обрано SRD-5VDC-SL-C за його популярність та характеристики, а саме: максимальний струм до 10 А та 5 В напруги.

Опис використаних програмних засобів та бібліотек

Для реалізації програмного коду використовуються наступні бібліотеки:

- string.h, stdlib.h – стандартні бібліотеки мови С для роботи зі строками;
- math.h – стандартна бібліотека мови С для виконання математичних розрахунків;
- бібліотека gos.h – є базою для програмування автоматизованих систем, у проекті використовується для побудови ієрархії;
- бібліотека HAL – застосована для підвищення рівня абстракції та подальшого більш зручного перенесення коду на інші серії мікроконтролерів STM32.

Також використано операційну систему FreeRTOS, яка підвищує модульність, дозволяє працювати в команді, адже окремі модулі не зв'язані, полегшує тестування та перенесення коду на інші контролери, підвищує ефективність та надає видимість багатопоточності, що спрощує і код, і його розуміння. Для генерації коду ініціалізації та подальшої роботи з кодом застосовано програмне забезпечення stm32CubeIDE, у вбудованому інструменті stm32CubeMX були обрані порти та відповідні їх функції.

Порти, що працюють за протоколом UART, налаштовані на роботу з DMA, що дозволяє збільшити швидкодію та зняти зайве навантаження з мікроконтролера. Більша частина коду написана на мові С та С++, що обумовлено відповідними бібліотеками, модульністю коду та можливістю перенесення коду на інші мікроконтролери.

Висновки

Створена система керування роботизованою тестовою платформою, призначеною для керування мотор-колесами та світлодіодними фарами в залежності від заданих оператором команд. Базою системи керування є запропонована структурна схема, принцип та програма керування. Обрано елементну базу, що забезпечить надійну роботу системи за визначених умов експлуатації. Застосовано операційну систему FreeRTOS та спеціалізовані бібліотеки для програмування автоматизованих систем та підвищення рівня абстракції, що забезпечило модульність і перенесення коду на інші серії мікроконтролерів, полегшило тестування та в значній мірі спростило та зробило більш ефективним код.

Вдосконалення системи керування можливе шляхом використання моторів зі зворотнім зв'язком або додаткового обладнання, що втілюється у життя без значних змін в системі. При переході на мікроконтролери з меншою потужністю та об'ємом пам'яті, є можливість прибрати деякий функціонал відповідних бібліотек без суттєвих переробок коду.

Література

1. Документація на мікроконтролер LGT8F328D [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://voltage.ru/datasheets/LGT8FX8D-datasheet.pdf>
2. Документація на мікроконтролер STM32F401CCU6 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f401cc.html>
3. Документація на драйвер TauTau [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://aliexpress.ru/item/1005002911831820.html?sku_id=12000022742072820
4. Документація на сервомотори SG90 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://www.ee.ic.ac.uk/pcheung/teaching/DE1_EE/stores/sg90_datasheet.pdf
5. Документація на реле srd-05vdc-sl-c [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.circuitbasics.com/wp-content/uploads/2015/11/SRD-05VDC-SL-C>
6. Zhu Y. Embedded Systems with ARM Cortex-M Microcontrollers in Assembly Language and C: Third Edition Yifeng Zhu. – [В. м.]: E-Man Press LLC, 2017. – 738 s.

References

1. Dokumentatsiya na mikrokontroler LGT8F328D [Elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu do resursu: <https://voltage.ru/datasheets/LGT8FX8D-datasheet.pdf>
2. Dokumentatsiya na mikrokontroler STM32F401CCU6 [Elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu do resursu: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f401cc.html>
3. Dokumentatsiya na drayver TauTau [Elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu do resursu: https://aliexpress.ru/item/1005002911831820.html?sku_id=12000022742072820
4. Dokumentatsiya na servomotory SG90 [Elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu do resursu: http://www.ee.ic.ac.uk/pcheung/teaching/DE1_EE/stores/sg90_datasheet.pdf
5. Dokumentatsiya na rele srd-05vdc-sl-c [Elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu do resursu: <https://www.circuitbasics.com/wp-content/uploads/2015/11/SRD-05VDC-SL-C>
6. Zhu Y. Embedded Systems with ARM Cortex-M Microcontrollers in Assembly Language and C: Third Edition / Yifeng Zhu. – [В. м.]: E-Man Press LLC, 2017. – 738 s.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-321-3-37-42
УДК 637.5.02

БЕЛОУС РОМАН
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
ORCID ID: [0000-0002-7588-941X](https://orcid.org/0000-0002-7588-941X)
e-mail: belous22@ukr.net
КРИЛОВ ЄВГЕН
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
ORCID ID: [0000-0003-4313-938X](https://orcid.org/0000-0003-4313-938X)
e-mail: ekrylov1964@gmail.com

ОПТИМІЗАЦІЯ ЧАСУ ПРОЦЕСУ УЗГОДЖЕНОСТІ ДАНИХ В NOSQL

Наголошено, що продуктивність розподіленої інформаційної системи залежить від багатьох факторів, включаючи розмір і структуру бази даних, використовуване обладнання, кількість реплік та їх географічне розташування. Зроблено висновок про перспективність концепції нереляційних баз даних NoSQL та зроблено висновок, що була запропонована для ефективного зберігання та забезпечення швидкого доступу до великих обсягів інформації, т. зв. Big Data, що неможливо досягти використовуючи традиційні системи управління реляційними базами даних. Розкрито сутність поняття «база даних NoSQL» та названо існуючі на даний час труднощі у користуванні великих систем.

В базах даних NoSQL для забезпечення високої відмовостійкості використовується багаторазова реплікація (копіювання) запису. Але для них існує суттєвий недолік, адже в цих системах не підтримується режим ведення транзакцій і блокувань, тому виникає проблема узгодження даних. Наголошено, що у базах даних NoSQL в основному використовуються два способи розміщення і оновлення часу процесу узгодженості даних в NoSQL: за принципом «головний-підлеглий» (master-slave) і «по кільцю» (ring).

Описана модель сильного узгодження даних в NoSQL та розглянуто приклад оптимізації часу для онлайн журналу «eClass». Встановлено, що навіть при великих значеннях інтенсивності надходження вимог на читання λ час очікування не перевищує 3 мс. Однак при виконанні аналітичних запитів цей час може зрости, так при великих N і великій інтенсивності вхідних вимог на читання цей час може досягати 7 мс.

Ключові слова: Бази даних, NoSQL, час очікування, Big Data, масив даних, реляційна база.

BELOUS ROMAN, KRYLOV IEVGEN
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

TIME OPTIMIZATION OF PROCESS OF DATA CONSISTENCY IN NOSQL

It is emphasized that the performance of a distributed information system depends on many factors, including the size and structure of the database, the hardware used, the number of replicas and their geographical location. A conclusion was made about the perspective of the concept of non-relational NoSQL databases and it was concluded that it was proposed for efficient storage and provision of quick access to large volumes of information, the so-called Big Data, which cannot be achieved using traditional relational database management systems. The essence of the concept of "NoSQL database" is revealed and the currently existing difficulties in using large systems are named.

In NoSQL databases, multiple replication (copying) of a record is used to ensure high fault tolerance. But there is a significant drawback for them, because these systems do not support the mode of conducting transactions and blocking, so there is a problem of data reconciliation. It is emphasized that NoSQL databases mainly use two methods of placing and updating the time of the data consistency process in NoSQL: according to the principle of "master-slave" and "ring". A model of strong data reconciliation in NoSQL is described and an example of time optimization for the healthcare system is considered. It has been established that even with large values of the intensity of receiving requests for reading λ , the waiting time does not exceed 3 ms. However, when performing analytical queries, this time can increase, so with large N and high intensity of incoming read requests, this time can reach 7 ms.

Keywords: databases, NoSQL, waiting time, Big Data, data array, relational database.

Постановка проблеми

Існуючі на даний час комп'ютерні системи щоденно оперують величезними обсягами даних в мережі і значна їх частина опрацьовується системами управління реляційними базами даних (RDBMS). Функціонування таких баз даних полегшує моделювання даних та прикладне програмування за рахунок чіткої математичної основи [5].

Концепція нереляційних баз даних (БД) NoSQL була запропонована для ефективного зберігання та забезпечення швидкого доступу до великих обсягів інформації, т. зв. Big Data, що неможливо досягти використовуючи традиційні системи управління реляційними базами даних. Технології Big Data є однією з найбільш швидкозростаючих сфер інформаційних технологій, адже загальний обсяг оброблюваних даних подвоюється кожні 1-2 роки [1]. Відповідно до прогнозів і тенденцій ринку до 2024 року, обсяг ринку Big Data зросте в 2.4 рази щодо 2014 року і складе 68.7 млрд \$, отже, потреба в базах даних NoSQL буде зростати.

Поряд із значним прогресивним розвитком великих систем розробники стали відчувати такі труднощі як: 1) ускладнилася процедура агрегування даних, тому що такий процес включає прочитку записів з великою кількістю пов'язаних таблиць (виникла проблема втрати відповідності), 2) виникає протиріччя між необхідністю зберігання великих обсягів неструктурованих даних і необхідністю їх структурувати за допомогою розробки схеми бази даних, 3) для зберігання великих обсягів інформації потрібно купувати спеціалізовані програмні комплекси паралельних систем баз даних (Teradata, Sun Oracle

database Machine), 4) за наявності великої кількості вузлів виникає проблема забезпечення необхідної відмовостійкості системи. Як спроба вирішити накопичені проблеми реляційних баз даних з'явилися альтернативні засоби зберігання і обробки даних, що отримали назву «бази даних NoSQL» [10].

Аналіз останніх джерел

Оптимізація часу процесу узгодженості даних в NoSQL є актуальною темою для багатьох дослідників та розробників баз даних. В останні роки було опубліковано багато статей та досліджень на цю тему. Нижче наведено аналіз останніх джерел публікацій на цю тему.

1. "Optimizing Data Consistency and Availability in NoSQL Databases" (2020) авторів Akhil Arora та інших. У цій статті автори розглядають питання забезпечення консистентності та доступності даних в NoSQL базах даних. Вони пропонують підхід, який дозволяє забезпечити високу консистентність даних без втрати доступності. Автори проводять експерименти на різних NoSQL базах даних та демонструють ефективність свого підходу.

2. "Efficient Data Consistency for NoSQL Databases" (2021) авторів M. M. Ahsan та інших. У цій статті автори розглядають питання забезпечення ефективної консистентності даних в NoSQL базах даних. Вони пропонують новий підхід до вирішення цього питання, який забезпечує швидку консистентність даних та зменшує навантаження на систему. Автори проводять експерименти на різних NoSQL базах даних та демонструють ефективність свого підходу.

3. "Optimizing the Consistency and Latency Tradeoff in NoSQL Databases" (2022) авторів M. A. Shaikh та інших. У цій статті автори розглядають питання забезпечення оптимального балансу між консистентністю та затримкою в NoSQL базах даних. Вони пропонують новий підхід до вирішення цього питання, який дозволяє зменшити затримки та зберігати високу консистентність даних.

Метою роботи є аналіз шляхів оптимізації часу процесу узгодженості даних в NoSQL.

Виклад основного матеріалу

В даний час під поняття «база даних NoSQL» потрапляє дуже широкий спектр систем зберігання і обробки даних: сховища типу Riak, Redis, DynamoDB, Project Voldemort, сховища сімейств стовпців (HBase, Apache Cassandra, HyperTable), документо-орієнтовані (CouchDB, MongoDB, eXist), бази даних на основі графів (Neo4j, OrientDB, InfiniteGraph). Бази даних на основі графів в даному дослідженні ми не розглядали, тому що вони не є розподіленими (реплікується весь граф). Крім того, вплив стійкості до втрати зв'язності ми не розглядали, адже вважається, що NoSQL-система повинна володіти цією властивістю [6].

В БД NoSQL для забезпечення високої відмовостійкості використовується багаторазова реплікація (копіювання) запису. Але для них існує суттєвий недолік, адже в цих системах не підтримується режим ведення транзакцій і блокувань, тому виникає проблема узгодження даних. Узгодженість даних означає, що всі екземпляри програми представлені з однаковим набором значень даних весь час. Підтримка необхідного рівня узгодженості для кожної конкретної предметної області може регулюватися параметрами (N, W, R) [3]. Однак, як впливає з теореми Брюера [4], зміна параметрів з метою забезпечення гарантій узгодженості впливатиме на доступність до системи. Оцінка та порівняння оптимізації часу процесу узгодженості даних в NoSQL є актуальним напрямом наукових та практичних досліджень. З цією метою більшість з наявних робіт за цим напрямком використовують засоби навантажувального випробування (наприклад, Yahoo! Cloud Serving Benchmark, YCSB).

Важливими показниками для оптимізації часу процесу узгодженості даних в NoSQL є ймовірність читання застарілого запису за час поширення оновлень по вузлах системи, час очікування початку читання запису з оновленого кворуму серверів, число версій запису в базі даних NoSQL і час їх обробки, ймовірність відмови в доступі до запису БД. Це дозволяє уникнути ручного підбору значень необхідних параметрів для великого числа типів записів БД на етапі налагодження системи і необхідності натурного моделювання екстремального навантаження на систему [2].

У базах даних NoSQL в основному використовуються два способи розміщення і оновлення часу процесу узгодженості даних в NoSQL: за принципом «головний-підлеглий» (master-slave) і «по кільцю» (ring). Перший спосіб має на увазі зберігання даних на master-вузлі і їх реплікація на slave-вузли. Всі зміни виконуються на master-вузлі, і вони зберігаються в пам'яті цього вузла. Slave-вузли періодично опитують master вузол, читають накопичені зміни і зберігають їх у своїй пам'яті. Прикладами таких баз даних є MongoDB, HBase, Neo4j. При розміщенні даних «по кільцю» необхідно визначити, скільки в ньому буде секцій (v-вузлів). Ці секції розподіляються по серверах (по кільцю).

Ще одним методом вирішення конфліктів є ведення версій записів, реалізована за допомогою вектору часу (Vector Clock - VC) [11]. Вектор часу – це послідовність пар, яка описує порядок поновлення цього запису. На рис. 1 показаний приклад ведення вектора часу (в дужках показаний вектор часу запису). Запис D (наприклад, якийсь документ) оновлюється користувачами A1, A2, A3.

Перші два поновлення виконуються користувачем A1 послідовно. Далі користувачі A2, A3 одночасно читають і оновлюють цей запис (випадковий збір). У базі даних зберігаються дві версії запису: D1 і D2. При читанні документа D користувачеві A1 повертаються дві версії запису з одним і тим же ключем (D1 і D2). Він вносить зміни, наприклад, поєднує в собі оновлення, виконані користувачами A2, A3. У базі зберігається одна узгоджена версія запису з вектором часу, що включає ідентифікатори трьох користувачів. Перевагами вектору часу є відсутність єдиної точки відмови системи, тому що при використанні тимчасових міток в записах необхідно виконувати точну синхронізацію часу з одним еталоном. Недоліками вектору

часу є відсутність можливості автоматично вирішувати конфлікти, а також збільшення довжини вектору часу при багаторазовому оновленні запису. Однак в NoSQL існують механізми урізання вектору часу. Наприклад, в системі Riak можна задавати частоту обрізання вектору на рівні сегмента, а також максимальний розмір (довжину) вектора часу [8].

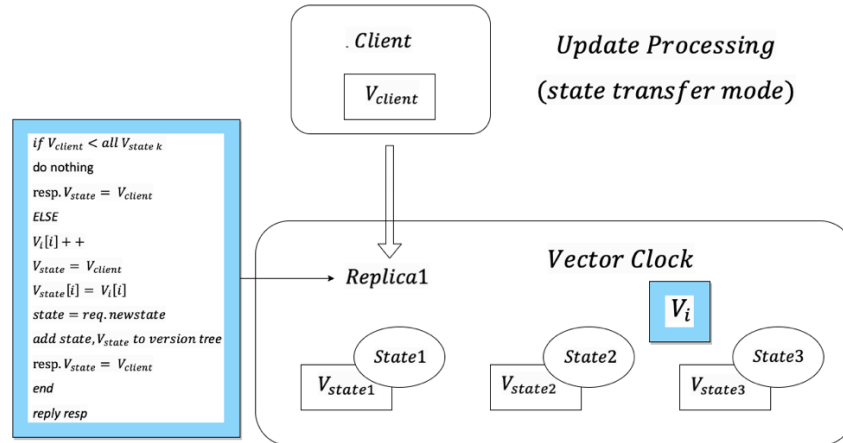


Рис. 1. Схематичне зображення способу реалізації методу ведення вектору часу

Наведемо приклади неузгодженості даних, що призводять до появи кількох версій запису, і способи їх усунення: кілька співробітників одночасно коригують примірник одного і того ж документу (записи) – наприклад, пропозиція щодо розвитку підприємства; дозвіл неузгодженості – об'єднання (вибір) коригувань керівником групи; кілька експертів одночасно оцінюють примірник одного і того ж документа – наприклад, blind-оцінка статті, поданої на конференцію; дозвіл неузгодженості – вибір оцінки головою комісії; кілька співробітників одночасно працюють з одним примірником документа, причому один співробітник може бачити результати роботи іншого співробітника – наприклад, кілька авторів працюють над однією статтею; може з'явитися кілька версій записів, неузгодженість усуває керівник групи авторів; користувачі обговорюють будь-яку одну подію в блозі.

З наведених вище прикладів видно, що забезпечення узгодженості часу для бази даних дуже важливим для стабільної і правильної роботи системи. Одночасна робота призводить до конфліктів, які можуть бути вирішені, наприклад, керівником групи на основі вектору часу в процесі узгодженості даних. Знання оцінки вікна неузгодженості сприяло б у цій ситуації запобігання конфліктів [9].

У випадку багатофазної обробки неузгодженості бути не повинно, тому що вихідні дані однієї фази використовуються як вхідні дані іншій. Знання затримки реакції системи при забезпеченні суворой узгодженості дозволяє виконати точну оцінку часу виконання всього багатофазного завдання. При багатофазній обробці запиту за технологією MapReduce вихідні дані однієї фази є вхідними даними іншої фази, наприклад, при виконанні операції Join при доступі до структурованих даних або при виконанні складних запитів в пошукових системах (репліки вхідних даних наступної фази можуть бути неузгоджені); цю неузгодженість усуває NoSQL (узгодженість, заснована на потенційному причинно-наслідковому зв'язку).

При сильній (суворій) узгодженості даних в NoSQL в кожен момент часу гарантується читання останніх оновлень (досягається за рахунок вибору параметрів $W = R = N/2 + 1$). При слабкій узгодженості гарантується, що всі дані будуть ідентичні в кінцевому рахунку (параметри $W = R = 1$). Гарантії сильної узгодженості при оптимізації часу очікування досягаються шляхом вибору параметрів W і R таким чином, щоб їх сума перевищувала N . У цьому випадку множина реплік, з яких необхідно виконати читання запису БД для завершення операції, і безліч реплік, на яких необхідно виконати оновлення запису, щоб вважати цю операцію завершеною, завжди матимуть непорожню множину в своєму перетині. Отже, гарантується читання актуальної записи хоча б з однієї репліки, оскільки координатор не буде читати записи з реплік в цьому перетині, поки не завершиться їх оновлення. В даному дослідженні розглянемо випадок $W = R = N/2 + 1$.

На рис. 2 представлена модель узгодження даних для розглянутого випадку. Вхідний потік вимог на читання з однієї репліки приймається пуасонівським з параметром λ . На рис. 2 оновлювані репліки позначаються 1, 2, ..., $N/2+1$, буквою K позначений координатор; $\Psi_i(s)$ – перетворення Лапласа-Стилтьєса функції розподілу ймовірностей часу оновлення i -ї репліки



Рис. 2. Схематичне зображення моделі сильної узгодженості реплік ($W = R = N/2 + 1$)

Вимоги на читання надходять з сумарною інтенсивністю $N\lambda$. Вимоги можуть надійти як в процесі оновлення W реплік, так і до початку оновлення. Завдання полягає в тому, щоб оцінити час очікування на читання можливого закінчення оновлення $(N/2 + 1)$ -ї репліки після читання $N/2$ реплік. Читання $N/2$ реплік може завершитися у випадковий момент часу. Для вирішення поставленого завдання спочатку пропонується отримати вироблену функцією (ВФ) $W_q(z)$ кількість тих вимог на читання запису БД з N реплік, які надійдуть за час оновлення $(N/2 + 1)$ реплік. Використовуючи такий підхід можна показати, що необхідна ВФ кількість вимог на читання з N реплік, що надійшли за час оновлення i -ї репліки, рівна $\Psi_i(\lambda N(1 - z))$. Так як вимоги на читання запису БД з кожної репліки надходять незалежно один від одного, ВФ кількості вимог на читання з N реплік, що надійшли за час оновлення $(N/2 + 1)$ реплік, буде дорівнювати [12]:

$$W_q(z) = \prod_{i=1}^{N/2+1} \Psi_i(\lambda N(1 - z)), \tag{1}$$

Тоді ймовірність того, що за час оновлення $(N/2 + 1)$ реплік не надійде жодної вимоги на читання, дорівнює $W_q(0)$. Далі, якщо за деякий часовий інтервал надійшло $n \geq 1$ вимог, то моменти надходження цих вимог всередині даного інтервалу незалежні і розподілені за рівномірним законом. Це дозволяє зробити висновок, що будь-яка з вимог має одну і ту ж функцію розподілу ймовірностей часу очікування закінчення оновлення $(N/2 + 1)$ -ї репліки. Розглянемо інтервал між початком і закінченням оновлення $W = N/2 + 1$ реплік як інтервал між подіями потоку подій $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \dots$ з однаковими функціями розподілів ймовірностей інтервалів між цими подіями. Тоді завдання дослідження зводиться до того, щоб оцінити час t_0 між довільним моментом (в силу рівномірності надходження вимог всередині інтервалу) і моментом настання наступної події ζ_i (рис. 3):

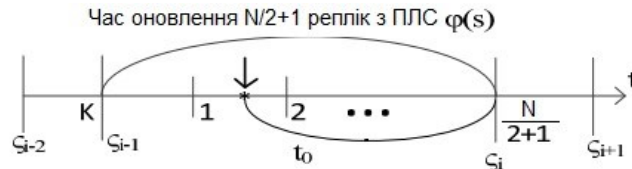


Рис. 3. Схема оцінки часу очікування t_0

ПЛС $\Phi(s)$ часового проміжку t_0 можна вивести в такому вигляді:

$$\Phi(s) = \frac{\alpha}{s} (1 - \varphi(s)), \tag{2}$$

де α – середня кількість подій потоку в одиницю часу; $\varphi(s)$ – перетворення Лапласа-Стілтєса (ПЛС) функції розподілу ймовірностей часу між подіями потоку. Оскільки $\alpha = -1 / \varphi'(0)$, формулу (2) можна переписати наступним чином:

$$\Phi(s) = \frac{1}{-s * \sum_{i=1}^{N/2+1} \Psi_i(0)} \left(1 - \prod_{i=1}^{N/2+1} \Psi_i(0) \right), \tag{3}$$

де $\Psi_i(s)$ – перетворення Лапласа-Стілтєса розподілу ймовірностей часу оновлення i -ї репліки [2].

ПЛС $\Omega(s)$ функції розподілу ймовірностей часу очікування вимогою на читання закінчення оновлення $(N/2 + 1)$ -ї репліки (після читання $N/2$ реплік) має наступний вигляд:

$$\Omega(s) = W_q(0) + (1 - W_q(0)) * \Phi(s), \tag{4}$$

де $W_q(0)$ і $\Phi(s)$ визначаються виразами (3) та (4) і їх можна трактувати так: з ймовірністю $W_q(0)$ того, що за час оновлення $(N/2 + 1)$ реплік не надійде жодної вимоги на читання з n реплік, ПЛС дорівнює одиниці (час очікування дорівнює нулю); з ймовірністю $(1 - W_q(0))$ того, що за час оновлення $(N/2 + 1)$ реплік надійде хоча б одна вимога на читання, ПЛС часу очікування будь-яким з них закінчення оновлення реплік дорівнює ПЛС, який розраховується за формулою (4).

Проведемо оцінку середнього часу очікування в процесі узгодженості даних для $(N/2 + 1)$ реплік. Диференціюючи вираз по s в нулі, отримаємо математичне очікування часу очікування $(N/2 + 1)$ репліки. Але $\Phi(s)$ і $\Psi_i(s)$ – складні функції, і ручне диференціювання є трудомістким завданням. Для отримання математичного очікування можна використовувати методи чисельного диференціювання і отримані результати представити так:

$$- \Omega(0) \approx \frac{-(\Omega_1^1 - \frac{1}{2} \Omega_1^2)}{h}, \tag{5}$$

де Ω_{im} – різниця m -го порядку (i – ціле при парному m ; i – напівціле при непарному m); h – крок таблиці різниць. Формули для розрахунку Ω_{im} мають вигляд:

$$\Omega_i^m = \sum_{j=0}^m (-1)^j C_m^j \Omega_{i+m/2-1} \tag{6}$$

$$\Omega_i = \Omega(ih) \quad (7)$$

де C_m^j – кількість поєднань з m по j .

Однак безпосередньо вирази (6) та (7) використовувати не можна, адже при чисельному їх диференціюванні на одній з ітерацій отримуємо невизначеність виду $0/0$. Для розкриття невизначеностей використовують правило Лопітала. Для вираження початкових моментів з врахуванням виразу $\Phi(1)(0)$ отримуємо таке математичне очікування шуканої величини:

$$M_{\Omega} = -\Omega^{(1)}(0) = -\left(1 - W_q(0)\right) * \frac{\varphi^{(2)}(0)}{2 * \varphi^{(1)}(0)} \quad (8)$$

де $(-1)^j \varphi^{(j)}(s)$ – j -й початковий момент ПЛС $\varphi(s)$. Для отримання початкових моментів функції $\varphi(s)$ можна використовувати методи чисельного диференціювання.

В якості прикладу проведемо аналіз шляхів оптимізації часу процесу узгодженості даних в NoSQL для системи електронного журналу «eClass», для закладів середньої освіти, яка може працювати на території Київської області, середня кількість записів(оцінок), для всіх навчальних закладів середньої освіти можна оцінити як 128.4 млн.

Згідно реєстром суб'єктів освітньої діяльності Київської області всього 770 навчальних закладів середньої освіти, тому це 770 точок входу в систему. Середню інтенсивність поновлення будь-якого запису можна встановити в 0.0012 1 / с (1 раз в 13.5 хвилини). Середній розмір агрегату з повного опису специфікацій розглянутих сегментів дорівнює 3417 байтів. На одному вузлі зберігається 128.4 млн / 15 = 8.56 млн записів, середній обсяг записів на одному вузлі - 8.56 млн \approx 3417 байтів = 27.25 Гбайт.

Продуктивність локальної мережі всередині сегменту мережі приймаємо 100 Мбіт / с; інтенсивність передачі даних по шині локальної мережі $\mu_n = 12.5 \cdot 10^6$ (байт/с). Продуктивність мережі між її сегментами становить 32 Мбіт / сек; інтенсивність передачі даних по шині мережі, що з'єднує підмережі $\mu_{ns} = 4 \cdot 10^6$ (байт/с). Результати оцінки зміни часу процесу узгодженості даних в NOSQL наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати оцінки зміни часу процесу узгодженості даних в NOSQL

| N = 3 | N = 4 | N = 5 | N = 6 | N = 7 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,22 | 0,33 | 0,36 | 0,61 | 0,77 |
| 0,34 | 0,5 | 0,55 | 1,25 | 1,42 |
| 0,41 | 0,73 | 0,78 | 1,73 | 1,91 |
| 0,45 | 0,91 | 1,16 | 2,3 | 2,44 |
| 0,49 | 1,22 | 1,42 | 2,67 | 2,77 |

Розглянемо проблеми узгодженості, які можуть виникнути при роботі з системою:

1. Може виникати затримка читання записів з сегменту бази даних «eClass», тому що в період виставлення оцінок в кінці кожного семестру інтенсивність читання і оновлення даних сегменту висока.
2. При високій інтенсивності читання даних з сегменту бази даних «eClass» користувачам може бути повернута неактуальна інформація (застарілі записи), тому що даний сегмент узгоджений в кінцевому рахунку.

Висновки

Таким чином, ми встановили, що навіть при великих значеннях інтенсивності надходження вимог на читання λ час очікування не перевищує 3 мс. Однак при виконанні аналітичних запитів цей час може зрости, так при великих N і великій інтенсивності вхідних вимог на читання цей час може досягати 7 мс. Також слід зазначити, що при збільшенні кількості реплік N значення часу очікування вимогою на читання все менше залежить від λ , що підтверджує рівномірність розподілу моментів надходження вимог на читання всередині інтервалу оновлення баз даних.

За результатами проведених досліджень був запропонований шлях оптимізації часу процесу узгодженості даних в NOSQL.

Література

1. Борис Т. В. Управління великими масивами даних в якості послуги. Проблеми телекомунікацій. Київ. 22-25 квітня. 2014. С. 243–245.
2. Брацький В. О. Дослідження особливостей застосування реляційних і нереляційних баз даних на прикладі SQL Server та MongoDB. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2016. Т. 22. № 2-5. С. 15–24.
3. Григор'єв Ю. А. Аналіз характеристик узгодження реплік в базах даних NoSQL. Інформатика та системи управління. 2014. № 3. С. 3–11.
4. Крашівський А. І. Розробка веб-системи з використанням NODE.JS та MONGODB на прикладі

- системи автоматизації HR-процесів. Комп'ютерні інформаційні технології. Тернопіль : ЗУНУ, 2020. С. 23–24.
5. Спасітелева С. О. Комплексний захист гетерогенних корпоративних сховищ даних. Сучасний захист інформації: науково-технічний журнал. 2017. № 1(29). С. 58–65.
 6. Цвященко О. В. Аналіз адекватності моделі узгодження реплік в базах даних NoSQL. Інформаційні технології. 2015. Т. 21. № 11. С. 840–848.
 7. Joshi S. Balanced Load in Distributed System with NoSQL Middleware. International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research. 2019. № 6(5), pp. 133–137.
 8. Gyorodi C., Gyorody R., Andrada I., Livia B. A Comparative Study Between the Capabilities of MySQL Vs. MongoDB as a Back-End for an Online Platform. IJACSA. 2016. №1. С. 73–38.
 9. Gorbenko A., Romanovsky A. Interplaying Cassandra NoSQL consistency and performance: A benchmarking approach. Communications in Computer and Information Science, Vol. 1279 / Editors: S. Bernardi, et al. Springer Nature. Berlin, 2020. pp. 168–184.
 10. Karniavoura F. and Magoutis K. A measurement-based approach to performance prediction in NoSQL systems. 25th IEEE Int. Symposium on the Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecom. Systems, Banff, Canada, 2017. pp. 255–262.
 11. Klein J., Gorton I., Ernst N., Donohoe P. Pham Performance Evaluation of NoSQL Databases: A Case Study. Proceedings of the 1st ACM/SPEC Int. Workshop on Performance Analysis of Big Data Systems, Austin, USA, 2015. pp. 5–10.
 12. Kumar S. Comparison of NoSQL Database and Traditional Database-An emphatic analysis. JOIV: International Journal on Informatics Visualization. 2018. № 2. P. 51–55.
 13. Nayak A., Poriya A., Poojary D. Type of NOSQL Databases and its Comparison with Relational Databases. International Journal of Applied Information Systems. № 5 (4). 2013. С. 16–19.
 14. NoSQL Database Classification: New Era of Databases for Big Data. International Journal of Knowledge-Based Organizations (IJKBO). 2019. № 9. P. 50–65.
 15. Rao T. R. The big data system, components, tools, and technologies: a survey. Knowledge and Information Systems. 2018. P. 71–81.
 16. Banothu N., Bhukya S. and Sharma K. (2016). Big-data: Acid versus base for database transactions. 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7755401>.

References

1. Borys T. V. Upravlinnia velykymy masyvamy danykh v yakosti posluhy. Problemy telekomunikatsii. Kyiv. 22-25 kvitnia. 2014. S. 243–245.
2. Bratskyi V. O. Doslidzhennia osoblyvosti zastosuvannia reliatsiinykh i nereliatsiinykh baz danykh na prykladi SQL Server ta MongoDB. Naukovi pratsi Natsionalnoho universytetu kharchovykh tekhnolohii. 2016. T. 22. № 2-5. С. 15–24.
3. Hryhoriev Yu. A. Analiz kharakterystyk uzgodzhennia replik v bazakh danykh NoSQL. Informatyka ta systemy upravlinnia. 2014. № 3. S. 3–11.
4. Krashivskiy A. I. Rozrobka veb-systemy z vykorystanniam NODE.JS ta MONGODB na prykladi systemy avtomatyzatsii HR-protseviv. Kompiuterni informatsiini tekhnolohii. Ternopil : ZUNU, 2020. S. 23–24.
5. Spasitielieva S. O. Kompleksnyi zakhyst heterohennykh korporatyvnykh skhovyshch danykh. Suchasnyi zakhyst informatsii: naukovo-tekhnichnyi zhurnal. 2017. № 1(29). S. 58–65.
6. Tsviashchenko O. V. Analiz adekvatnosti modeli uzgodzhennia replik v bazakh danykh NoSQL. Informatsiini tekhnolohii. 2015. T. 21. № 11. С. 840–848.
7. Joshi S. Balanced Load in Distributed System with NoSQL Middleware. International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research. 2019. № 6(5), pp. 133–137.
8. Gyorodi C., Gyorody R., Andrada I., Livia B. A Comparative Study Between the Capabilities of MySQL Vs. MongoDB as a Back-End for an Online Platform. IJACSA. 2016. №1. S. 73–38.
9. Gorbenko A., Romanovsky A. Interplaying Cassandra NoSQL consistency and performance: A benchmarking approach. Communications in Computer and Information Science, Vol. 1279 / Editors: S. Bernardi, et al. Springer Nature. Berlin, 2020. pp. 168–184.
10. Karniavoura F. and Magoutis K. A measurement-based approach to performance prediction in NoSQL systems. 25th IEEE Int. Symposium on the Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecom. Systems, Banff, Canada, 2017. pp. 255–262.
11. Klein J., Gorton I., Ernst N., Donohoe P. Pham Performance Evaluation of NoSQL Databases: A Case Study. Proceedings of the 1st ACM/SPEC Int. Workshop on Performance Analysis of Big Data Systems, Austin, USA, 2015. pp. 5–10.
12. Kumar S. Comparison of NoSQL Database and Traditional Database-An emphatic analysis. JOIV: International Journal on Informatics Visualization. 2018. № 2. R. 51–55.
13. Nayak A., Poriya A., Poojary D. Type of NOSQL Databases and its Comparison with Relational Databases. International Journal of Applied Information Systems. № 5 (4). 2013. S. 16–19.
14. NoSQL Database Classification: New Era of Databases for Big Data. International Journal of Knowledge-Based Organizations (IJKBO). 2019. № 9. R. 50–65.
15. Rao T. R. The big data system, components, tools, and technologies: a survey. Knowledge and Information Systems. 2018. R. 71–81.
16. Banothu N., Bhukya S. and Sharma K. (2016). Big-data: Acid versus base for database transactions. 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7755401>.

MYLKO VOLODYMYR

Khmelnyskyi National University

<https://orcid.org/0000-0002-1118-3530>e-mail: vlad.mylko@khmnu.edu.ua**SOKOLAN IULIA**

Khmelnyskyi National University

<https://orcid.org/0000-0002-0273-5719>e-mail: sokolanyul@khmnu.edu.ua**SAVYTSKYI YURIY**

Khmelnyskyi National University

<https://orcid.org/0000-0001-6528-6642>e-mail: yra.savisky@gmail.com**ROMANISHINA OLGA**

Khmelnyskyi National University

<https://orcid.org/0000-0003-2029-1004>e-mail: o.v.romanishina@gmail.com

MODELLING OF CONTACT INTERACTION FOR A TOOL IN THE CONDITIONS OF OUTGROWTH

Modelling of machining processes with a cutting tool is currently an important stage for determining machining performance, cutting tool wear, and ultimately evaluating the effectiveness of its use. Such virtual studies make it possible to predict the service life of the cutting tool. Modern CAE systems allow such calculations to a certain extent, but cannot always take into account all the specific properties of the processing process, in particular, such a phenomenon as growth formation. The growth phenomenon makes serious changes in the cutting process itself by changing the actual angles and affecting the heat transfer processes. Therefore, the task of machining processes with a cutting tool in the conditions of growth formation is relevant. These processes occur in one way or another during processing with almost all types of cutting tools, in particular cutters.

The paper substantiates that, regardless of the initial shape of the cutting blade, the main part of the contact zone can be reduced to the contact between the chip and a flat full or shortened front surface, and a method of thermophysical analysis of the cutting zone is proposed, which takes into account the equivalent coefficients of thermal conductivity of the cutting blade, composed of materials of growth and tool

The practical implementation of this approach made it possible to determine that the stable shape of the wear chamfer and the associated valid law of tangential stresses take place when the back surface of the tool and the cutting surface are in full contact and the wear intensity is uniform at each point of contact.

Key words: modelling, cutting, growth, cutting tool, contact processes.

МИЛЬКО ВОЛОДИМИР, СОКОЛАН ІЮЛІЯ, САВИЦЬКИЙ ЮРІЙ, РОМАНІШІНА ОЛЬГА

Хмельницький національний університет

МОДЕЛЮВАННЯ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ДЛЯ ІНСТРУМЕНТУ В УМОВАХ НАРОСТОУТВОРЕННЯ

Моделювання процесів обробки різальним інструментом є наразі є важливим етапом для визначення продуктивності обробки, зношування різального інструмента та зрештою оцінки ефективності його використання. Такі віртуальні дослідження дозволяють прогнозувати ресурс роботи різального інструменту. Сучасні CAE-системи в певній мірі дозволяють виконувати такі розрахунки, але не завжди можуть врахувати усі специфічні властивості процесу обробки, зокрема таке явище як наростоутворення. Явище наросту вносить серйозні зміни в сам процес різання змінюючи дійсні кути та впливаючи на процеси переносу тепла. Тому задача моделювання процесу обробки різальним інструментом в умовах наростоутворення є актуальною. Ці процеси відбуваються в тій чи іншій при обробці практично усіма типами різальних інструментів, зокрема різців.

У роботі обґрунтовано, що незалежно від початкової форми різального леза основна частина контактної зони може бути зведена до контакту між стружкою і плоскою повною або вкороченою передньою поверхнею та запропонована методика теплофізичного аналізу зони різання, яка враховує еквівалентні коефіцієнти теплопровідності різального леза, складеного із матеріалів наросту та інструменту.

Практична реалізація даного підходу дозволила визначити, що стійка форма фаски зношування і зв'язаний з нею дійсний закон дотичних напружень мають місце при повному приляганні задньої поверхні інструменту і поверхні різання та рівномірній інтенсивності зношування в кожній точці контакту.

Ключові слова: моделювання, обробка різанням, нарост, різальний інструмент, контактні процеси.

Introduction

For the analytical determination of contact stresses on the front and rear surfaces of the tool in combination with temperature phenomena, the cutting edge is divided into several areas, both real and reflected, the conditions of which are equated to free cutting. At each section, the chip element, bounded on one side by the shear surface, and on the other by the front surfaces of the tool, is in stable force equilibrium conditions. We established that the property of the cutting system to restore a state of stable equilibrium with a random change of any parameter of the cutting process is also characteristic of its adequate mathematical model. Then, without knowing any parameters of plastic deformation during cutting or contact stresses, a "random disturbance" can be introduced into the mathematical model in the form of an initial approximation of the friction coefficient. If it is adequate, it should

come into equilibrium with some new value, the value of which satisfies all the conditions of the relationship, and can serve as a new, more accurate approximation, etc. The state at which the system stabilizes will determine the set of all parameters characterizing the stress and temperature state of the cutting system [1]. It is interesting to use the developed model for tools with a strengthening chamfer on the cutting blade and a shaped front surface.

Presentation of main material

According to the results of V.S. Kushner [2], the role of the chamfer, the dimensions of which are smaller than the length of the contact area, consists in the formation of a rigid retarded body with a height of h_2 on it, which begins to perform the functions of a cutting blade (Fig. 1). In addition to it, on the other part of the front surface, a thin inhibited layer of chips with a length of l_0 is formed, and at the very top - a wedge-shaped body, the shape of which is determined by the conditions of continuity of deformation rates in the zone of primary plastic deformation [2]. Thus, regardless of the initial shape of the cutting blade, the main part of the contact zone will be equivalent to the contact between the chip and the cutting wedge with a flat front surface. The parameters of the inhibited body - growth were determined in the works of Kushner [2] and Zorev [3] and are:

$$h = (0,5...0,9)a; l = 0,1 \cdot a; h_1 \approx 0,1 \cdot a; h_2 = f \cdot (\cos \gamma_c \cdot \operatorname{tg} \gamma - \sin \gamma_c),$$

where a - is the thickness of the sheared layer;

γ, γ_c - front angle and chamfer angle.

Hence, the front angle of the retarded layer surface is valid:

$$\sin \gamma_r = \frac{h_1}{l_0} \cos^2 \gamma + \sin \gamma \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{h_1}{l_0} \cos \gamma\right)^2}.$$

However, such a calculation scheme can be implemented only when the plastic zone covers the entire chamfer and extends to the main front surface, which is expressed by the ratio:

$$l_0 \cdot \cos \gamma_r \geq f \cdot \cos \gamma_c \tag{1}$$

In the case when the calculated values l_1 i l_0 for the front angle do not meet the condition (1), the chip after the plastic zone continues to move along the surface of the chamfer, as along the front surface. Since the plastic deformation in the chip is already complete, it is unlikely that it can bend further to continue sliding along the very front surface. If $l_0 \cdot \cos \gamma_r < f \cdot \cos \gamma_c$ and $l_1 \cdot \cos \gamma \leq f \cdot \cos \gamma_c$, then the entire contact area is located on the chamfer and the thermomechanical model [1] can be used without modification, only with a simple change of angles $\gamma = \gamma_r$ (Fig. 2).

If $l_0 \cdot \cos \gamma_r < f \cdot \cos \gamma_c$ and $l_1 \cdot \cos \gamma > f \cdot \cos \gamma_r$, then cutting with a tool with an artificially shortened front surface takes place. The method of calculating plastic deformation parameters for this case is described in [4]. All other components of the thermomechanical model will function without changes.

The analysis of cited cases of cutting with a tool with a strengthening chamfer made it possible to reduce them to two that are of practical interest:

1. Cutting with a tool with a flat full front surface, consisting of a braked "rigid body" with a plastic zone and a part of the front surface of the tool,

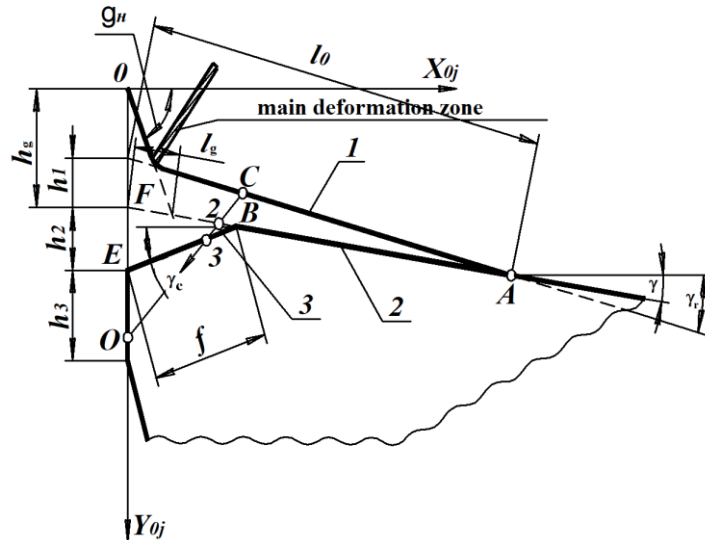


Fig.1. The shape of a valid cutting blade for a chamfered tool

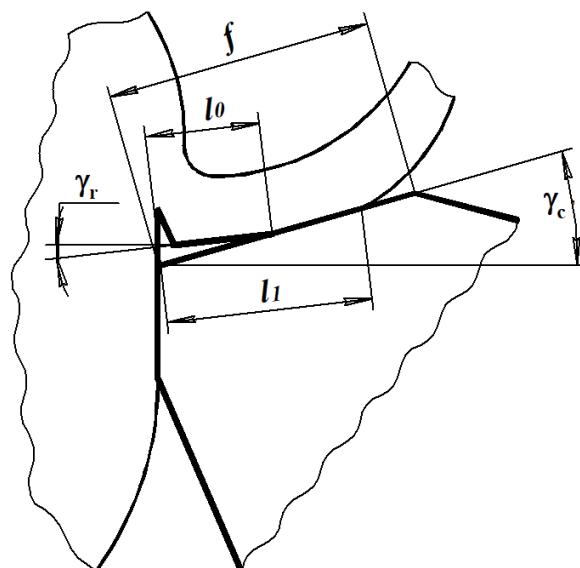


Fig. 2. The shape of the actual cutting blade when cutting with a large chamfer

inclined at an angle γ or γ_r . The length of the folded front surface is greater than the length of the contact area.

2. Cutting with a tool with a flat shortened front surface consisting of the same parts.

The results of the calculation based on the developed model will be the stress at each point of the front surfaces of the tool and the degree of deformation of the sheared layer. This makes it possible to calculate new, refined values of contact temperatures on front and rear surfaces of the tool. For this purpose, the method of heat sources acting on the area of the cutting edge is used. On each of the sections along the curvilinear front and rear surfaces of the tool, there are elementary resulting heat sources of variable intensity and q_{1j} та q_{2j} , which are

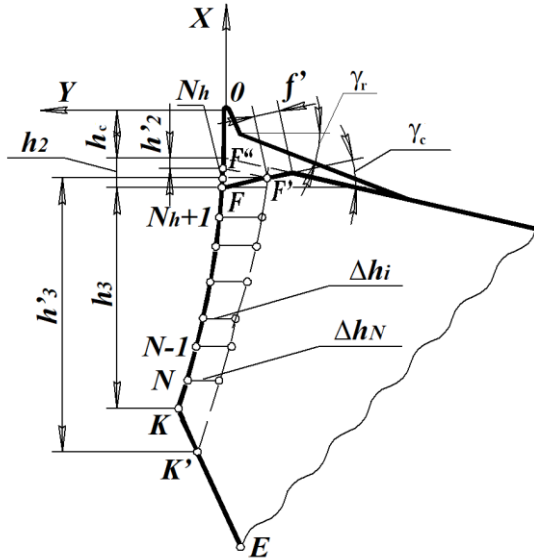


Fig. 3. Scheme for calculating the shape of the wear surface

represented by a combination of N_1 of constant intensity q_{1jk} and q_{2jk} , $j = 1 \dots N_y$, $k = 1 \dots N_1$ (Fig. 3).

Thus, the temperature at the i -th point of the m -th section is defined as the sum of temperatures created by all sources and acting on the sections. The intensities of these sources are determined from the condition of equality of contact temperatures at the boundaries: chip-front surfaces of the tool, cutting surface-rear surfaces of the tool. Moreover, for the first zone, data on the intensity of tangential stresses between the chip and the front surfaces of the tool obtained from the solution of the above model [1] are used.

Representation of the cutting zone with the participation of a composite tool with different thermophysical properties of its parts requires a change in the method of thermophysical analysis of the contact surfaces of the tool. First of all, this concerns the conditions of heat transfer between the k -heat source of the j -th section to the i -th point of the m -th contact section. In general, this problem requires consideration of the volume picture of heat transfer, which is extremely

difficult and hardly possible at the current stage. But, taking into account the small influence of the change in the coefficient of thermal conductivity of the tool on its contact temperature, it is suggested to use an approximate method that takes into account the equivalent coefficient of thermal conductivity of the composite body λ_e .

$$\lambda_e = \frac{\delta_\Sigma}{\frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{(\delta_\Sigma - \delta_i)}{\lambda}}, \quad (2)$$

where λ_i i λ - respectively, coefficients of thermal conductivity of tool material and chips;

δ_Σ - the total distance between the heat source and a given point of the composite body;

δ_i - the distance travelled by the heat flow in the body of the tool.

Let's assume that the heat flow passes from the source, whose coordinate center is at point C (see Fig. 1) to point D of the rear surface. Depending on the position of points C and D , line CD can cross lines 2 and 3 at points 2 and 3 with coordinates:

$$x_2 = \frac{y_D - h}{K_c + tg\gamma}; \quad y_2 = y_D - K_c \cdot x_2; \quad x_3 = \frac{y_D - h - h_2}{K_c + tg\gamma_c}; \quad y_3 = y_D - K_c \cdot x_3,$$

where $K_c = \frac{y_D - y_C}{x_C}$; x_C, y_C, y_D - corresponding point coordinates C i D .

Then the position of the CD line relative to the inhibited layer on the front surface will determine the following calculation options λ_e :

1. If $y_D < h$ i $x_C < x_A$, then $\lambda_e = \lambda$ (that is, the heat flow goes through the chip), and if $y_D < h$ i $x_C \geq x_A$ $\lambda_e = \lambda_i$ (that is, the heat flow goes through the tool).

2. If $h \leq y_D < h + h_2$ i $x_C < x_4$, then $\lambda_e = \lambda$,

where $x_4 = \frac{h_1 + h_2}{tg\gamma_r - tg\gamma_c}$ - coordinate of the point of intersection of the continuation of the chamfer with the line 1.

$$3. \text{ If } h \leq y_D < h + h_2 \text{ i } x_A > x_C \geq x_4, \text{ then } \lambda_e = \frac{\delta_{CD}}{\frac{\delta_{23}}{\lambda_i} + \frac{\delta_{CD} - \delta_{23}}{\lambda}},$$

where δ_{CD} i δ_{23} - distances between the corresponding points.

$$4. \text{ If } h \leq y_D < h + h_2 \text{ i } x_A < x_C, \text{ then } \lambda_e = \frac{\delta_{CD}}{\frac{\delta_{C3}}{\lambda_i} + \frac{\delta_{CD} - \delta_{C3}}{\lambda}}.$$

$$5. \text{ If } y_D \geq h + h_2 \text{ i } x_B > x_C, \text{ then } \lambda_e = \frac{\delta_{CD}}{\frac{\delta_{3D}}{\lambda_i} + \frac{\delta_{CD} - \delta_{3D}}{\lambda}}.$$

$$6. \text{ If } y_D \geq h + h_2 \text{ i } x_B \leq x_C < x_A, \text{ then } \lambda_e = \frac{\delta_{CD}}{\frac{\delta_{2D}}{\lambda_i} + \frac{\delta_{CD} - \delta_{2D}}{\lambda}}.$$

If $y_D \geq h + h_2$ i $x_A \leq x_C$, then, $\lambda_e = \lambda_i$.

In the case when points C and D are located either only on the front or on the back surfaces, the value is found similarly depending on the position of points C and D in relation to point A (on the front surface) or to point E (on the back surface). It is known that the temperature on the back surface of the wear is the result of the combined effect of friction processes on the front and back surfaces of the tool.

As for the magnitude and law of distribution of tangential stresses on the back surface, there are currently no reliable dependencies. Therefore, it was proposed to determine them by the method of superposition of stress fields from the zone of primary deformation and the zone of elastic recovery, each of which is calculated by the method of finite elements [5]. This takes into account the variability of the active contact length depending on the shape of the worn rear surfaces of the tool, the presence of friction between the rear surfaces of the tool and the cutting surface, the coefficient of which in general can be variable along the rear surfaces of the tool, as well as the fact that the surface layer of the cutting surface, which has passed through the zone of primary deformation, was strengthened. It was established by calculations that the law of change of tangential stresses on the rear surfaces of the tool q_{F2} is determined by the shape of the contact chamfer. Since no hypotheses about its profile have received the necessary confirmation, a mathematical model of wear of rear surfaces of the tool was developed, which is based on the structural energy theory of wear.

Conclusions

Thus, the proposed model allows you to determine temperatures, frictional stress, and then allows you to calculate the amount of wear at each i -th point of the contact surface and the parameters of the new cutting blade. Substantiates that, regardless of the initial shape of the cutting blade, the main part of the contact zone can be reduced to the contact between the chip and a flat full or shortened front surface, and a method of thermophysical analysis of the cutting zone is proposed, which takes into account the equivalent coefficients of thermal conductivity of the cutting blade, composed of materials of growth and tool

The practical implementation of this approach made it possible to determine that the stable shape of the wear chamfer and the associated valid law of tangential stresses take place when the back surface of the tool and the cutting surface are in full contact and the wear intensity is uniform at each point of contact.

Література

1. Мазур М.П. Термомеханічна теорія розрахунку параметрів контактної зони при різанні пластичних матеріалів. Проблеми сучасного машинобудування : збірник наукових праць. Хмельницький : ТУП, 1996. С. 8–12.

2. Кушнер В.С. Термомеханическая теория процесса непрерывного резания пластических материалов. Иркутск : Изд-во Иркутского ун-та, 1982. 180 с.

3. Зорев Н.Н. О взаимозависимости процессов в зоне стружкообразования в зоне контакта в передней поверхности инструмента. Вестник машиностроения. 1963. № 12. С. 45–50.

4. Мазур М.П. Визначення параметрів зони контакту для інструментів із вкороченою передньою поверхнею. Вісник Технологічного університету Поділля. Хмельницький : ТУП, 1998. № 2. С. 49–52.

5. Гладкий Я., Милько В., Маковкін О. Прогнозування зносостійкості інструментальних матеріалів в умовах тертя та зношування. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2006. № 6, том 1. С. 168–172.

References

1. Mazur M.P. Thermomechanical theory of the development of parameters in the contact zone when cutting plastic materials. Problems of modern machine-building: collection of scientific practices. Khmelnytskyi: TUP. 1996. p. 8–12.
2. Kushner V.S. Thermomechanical theory of the process of continuous cutting of plastic materials. Irkutsk: Publishing House of Irkutsk University. 1982. 180 p.
3. Zorev N. On the interdependence of processes in the chip formation zone in the contact zone in the front surface of the tool. Bulletin of Mechanical Engineering. 1963. No. 12. p. 45–50.
4. Mazur M. Defining the parameters of the contact zone for tools with a shortened front surface. Herald of the Podillya Technology University. Khmelnytsky: TUP. 1998. No. 2. P. 49–52.
5. Gladkyi Y., Mylko V., Makovkin O. Predicting the wear resistance of tool materials under conditions of friction and wear. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. 2006. No. 6, Vol. 1. p. 168–172.

ЗАЛЮБОВСЬКИЙ МАРК

Київський національний університет технологій та дизайну, Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»
ORCID ID: 0000-0001-6258-0088
e-mail: markzalubovskiy@gmail.com

ПАНАСЮК ІГОР

Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID ID: 0000-0001-6671-4266
e-mail: panasyuk1961@gmail.com

БЛАЖЕНКО МАРІЯ

Національний університет харчових технологій, відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»
ORCID ID: 0000-0002-0984-8660
e-mail: blagmary@ukr.net

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ГАЛТУВАЛЬНОЇ МАШИНИ НА РЕАЛІЗАЦІЮ РЕЖИМІВ РУХУ МАСИВУ В СЕРЕДИНІ РОБОЧОЇ ЄМКОСТІ ЗІ СКЛАДНИМ ПРОСТОРОВИМ РУХОМ

Зазначається, що переміщення робочого масиву в галтувальних ємкостях з різним характером руху може здійснюватися при каскадному, водоспадному, а також змішаному режимах руху. Представлено характеристику даних режимів руху робочого масиву, які можуть бути реалізовані у робочій ємкості, яка виконує складний просторовий рух галтувальної машини. Кожен режим руху робочого масиву є найбільш сприятливим для відповідних фінішних галтувальних технологічних операцій. Із використанням системи автоматизованого проектування «SolidWorks» проведені аналітичні дослідження впливу конструктивних особливостей галтувальної машини з додатковою рухомою ланкою коромислом з горизонтальною віссю обертання на реалізацію режимів руху масиву всередині робочої ємкості зі складним просторовим рухом. Встановлено, що реалізація режимів руху робочого масиву в середині ємкості галтувальної машини залежить від куткової швидкості обертання ведучого валу, масштабного коефіцієнту машини та коефіцієнту, який характеризує відношення відстані між осями робочої ємкості до відстані між осями вилки машини. Отримані математичні вирази для визначення граничної куткової швидкості ведучого валу галтувальної машини типу з додатковою рухомою ланкою коромислом з горизонтальною віссю обертання, що відповідатиме реалізації необхідного режиму руху робочого масиву, при його русі у даній ємкості. Отримані результати досліджень можуть бути використані на стадії проектування відповідного галтувального обладнання.

Ключові слова: галтувальна машина, робочий масив, кутова швидкість.

ZALYUBOVSKIY MARK

Kyiv National University of Technology and Design, Open International University of Human Development "Ukraine"

PANASYUK IGOR

Kyiv National University of Technology and Design

BLAZHENKO MARIIA

National University of Food Technologies, Open International University of Human Development "Ukraine"

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE DESIGN FEATURES OF THE TURNING MACHINE ON THE IMPLEMENTATION OF THE MOVEMENT MODES OF THE ARRAY IN THE MIDDLE OF THE WORKING CAPACITY WITH COMPLEX SPATIAL MOVEMENT

It is noted that the movement of the working array in the filling tanks with different types of movement can be carried out in cascade, waterfall, and mixed modes of movement. The characteristics of these modes of movement of the working array, which can be implemented in the working capacity that performs complex spatial movement of the rolling machine, are presented. Each mode of movement of the working array is the most favorable for the corresponding finishing felting technological operations. With the use of the automated design system "SolidWorks", analytical studies of the influence of the design features of the rolling machine with an additional movable rocker link with a horizontal axis of rotation on the implementation of the mass movement modes in the middle of the working capacity with complex spatial movement were carried out. It was established that the implementation of the modes of movement of the working mass in the middle of the capacity of the rolling machine depends on the angular speed of rotation of the drive shaft, the scale coefficient of the machine and the coefficient that characterizes the ratio of the distance between the axes of the working capacity to the distance between the axes of the fork of the machine. Mathematical expressions for determining the maximum angular speed of the drive shaft of the rolling machine type with an additional movable rocker link with a horizontal axis of rotation, which will correspond to the implementation of the necessary mode of movement of the working array, when it moves in a given capacity, are obtained. The obtained research results can be used at the stage of designing the appropriate felting equipment.

Key words: rolling machine, working array, angular velocity.

Постановка задачі. Робочий масив у середині галтувальних ємкостей з різним характером руху може переміщатися при різних режимах – каскадному, водоспадному або змішаному. Наприклад, для галтувальної технологічної операції відділення деталей від ливників [1] – найбільш раціонально використовувати водоспадний режим руху, при покращенні якості поверхні виробів (шліфування чи полірування) [2] – змішаний режим руху тощо.

Для кожного типу галтувального обладнання (обертів барабани [3], планетарні барабани [4], машини зі складним просторовим рухом робочих ємкостей [5, 6] тощо) властиві відповідні відмінні

математичні залежності для можливості розрахунку умов, при яких буде реалізувати відповідний режим руху робочого масиву. Аналогічна ситуація і з обладнанням з відмінними конструктивними особливостями, де робочі ємкості виконують складний просторовий рух. Конструктивні особливості кожного типу такого обладнання унеможливають застосування уніфікованих математичних підходів, які описуються залежність між зміною режимів руху робочого масиву, конструктивними особливостями та кутовою швидкістю ведучого валу відповідної галтувальної машини.

Аналіз досліджень та публікацій. У роботах [7, 8] надається загальний опис усіх режимів руху робочого масиву. У [8] зазначається, що у обладнанні зі складним просторовим рухом робочих ємкостей реалізація зазначених вище режимів руху робочого масиву має особливий характер. Зокрема, будь-який режим руху має циклічний характер внаслідок із почерговим зіткнення робочого масиву із торцями ємкості та подальшою зміною напрямку його переміщення.

У роботі [9] проведені дослідження «базової» конструкції галтувальної машини типу «Turbula» внаслідок яких встановлено взаємозв'язок між кутовою швидкістю ведучого валу, габаритними параметрами ємкості та зміною режимів руху, у [10] – дослідженої конструкції галтувальної машини з робочою ємкістю, яка виконує складний просторовий рух та містить у своєму кінематичному ланцюзі додаткову рухому ланку повзун, у [11] – дослідженої конструкції галтувальної машини з робочою ємкістю, яка виконує складний просторовий рух та містить у своєму кінематичному ланцюзі додаткову рухому ланку коромисло з вертикальною віссю обертання.

Виділення невирішених частин. Попередньо отримані математичні залежності для розрахунку необхідної кутової швидкості ведучого валу, що відповідає реалізації необхідного режиму руху робочого масиву, отримані лише для окремих конструкцій галтувальних машин зі складним просторовим рухом робочих ємкостей. У той самий час, залишаються типи галтувального обладнання зі складним просторовим рухом робочих ємкостей, для яких, до тепер, не проводилися дослідження та не було отримано відповідні математичні залежності.

Формулювання цілей. Суть даної роботи полягає у аналітичному дослідженні, з точки зору визначення залежності між зміною режимів руху робочого масиву та конструктивними особливостями, галтувальної машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості, у кінематичному ланцюзі якої застосовується додаткова рухома ланка коромисло з горизонтальною віссю обертання.

Виклад основного матеріалу. У робочій ємкості зі складним просторовим рухом можуть бути реалізовані наступні режими руху робочого масиву: каскадний, при якому частинки робочого масиву, здебільшого, не відділялися одна від одної, а перекочувалися та проковзували по поверхні ємкості та одна відносно іншої. Фрагменти переміщення робочого масиву при реалізації каскадного режиму руху представлено на рис. 1.

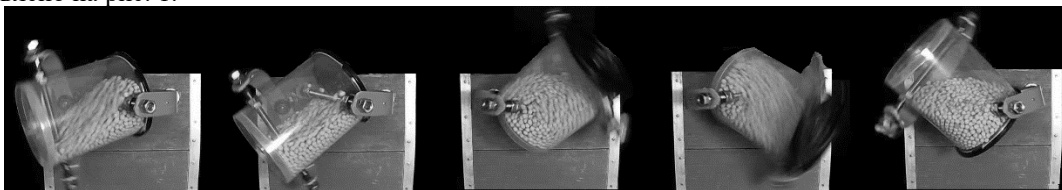


Рис. 1. Каскадний режим руху робочого масиву

При водоспадному режимі руху практично весь робочий масив перебуває у стані вільного польоту. Фрагменти переміщення робочого масиву при реалізації водоспадного режиму руху представлено на рис. 2.

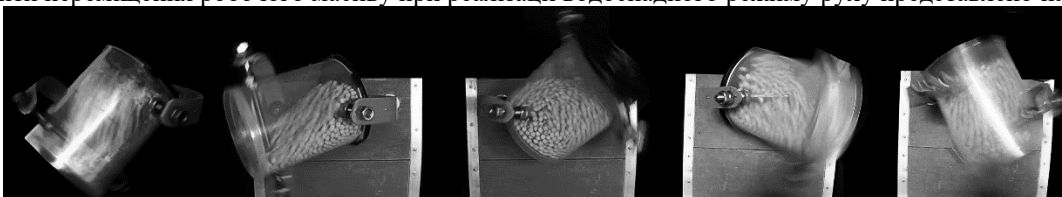


Рис. 2. Водоспадний режим руху робочого масиву

При змішаному режимі руху одночасно проявляються два режими руху технологічного середовища – каскадний та водоспадний. Переміщуючись до одного ємкості ємкості практично весь робочий масив перебуває у стані вільного польоту, однак, при переміщенні у зворотному напрямі робочий масив рухається без відриву від стінок ємкості.

Попередньо, у роботі [12] було синтезовано семиланковий кінематичний ланцюг галтувальної машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості, що містить у своєму кінематичному ланцюзі додаткову рухому ланку коромисло з горизонтальною віссю обертання. Таким чином, було досягнути виключення впливу пасивного зв'язку із просторового механізму. Модель розробленої галтувальної машини на рис. 3. а, кінематична схема синтезованого семиланкового механізму – на рис. 3. б відповідно.

Просторовий механізм машини складається зі станини 1, ведучого 2 та веденого 3 валів. Ведучий вал 2 встановлений у підшипниковій опорі станини 1, ведений вал 3 кінематично з'єднаний з коромислом 4, яке рухомо встановлено в станині 1 та виконує коливальний рух у вертикальній площині відносно горизонтальної вісі. Ведучий 2 та ведений 3 вали шарнірно з'єднані другими кінцями з ведучим шатуном 5

та веденим шатуном 6 відповідно, діаметрально взаємо перпендикулярні вісі яких 7 і 8 є вісями кріплення проміжного шатуна 9. Проміжним шатуном 9 являється робоча ємкість машини. *A, B, C, D, E, F, G* – обертальні кінематичні пари.

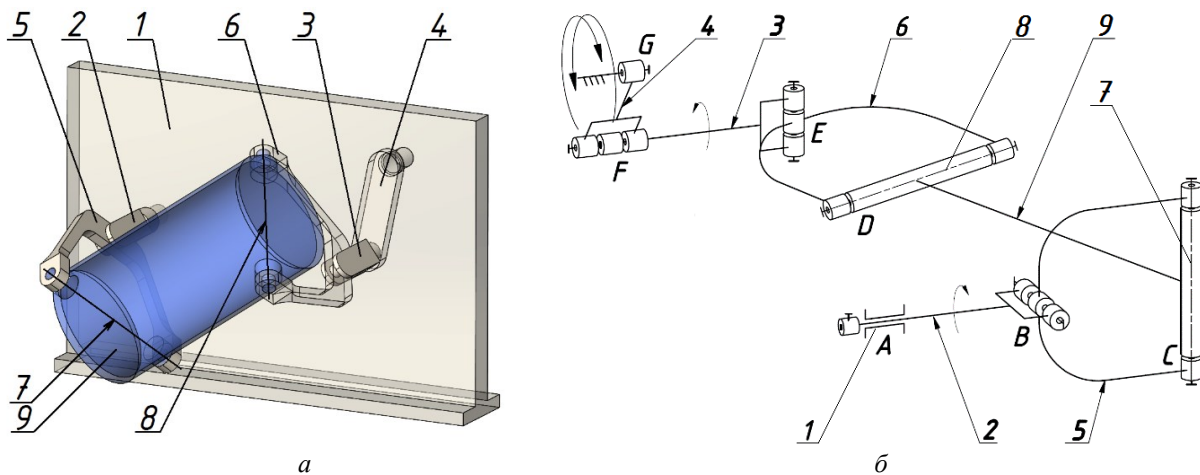


Рис. 3. Гальтувальна машина зі складним просторовим рухом робочої ємкості, що містить у своєму кінематичному ланцюзі додаткову рухому ланку коромисло з горизонтальною віссю обертання:
а – модель машини, б – кінематична схема

Дослідженнями, які були виконані у [13] було визначено аналітичні передумови реалізації режимів руху робочого масиву в середині ємкості зі складним просторовим рухом. Доведено, що характер переміщення робочого масиву в ємкості залежить від таких головних параметрів: кутової швидкості ведучого валу $\omega_{ведуч}$, та максимальних значень повних прискорень, a_{maxA} та a_{maxB} точок *A* та *B*, які співпадають з центрами основ ємкості, а також масштабного коефіцієнту конструкції машини *n*. Таким чином, у роботах [12, 13] були отримані нерівності, що визначають умови переходу від каскадного до водоспадного режиму руху робочого масиву:

$$g > a; \tag{1}$$

$$a > g, \tag{2}$$

де *g* – прискорення вільного падіння; *a* – максимальні значення повного прискорення торця ємкості.

У [12, 13] було встановлено, що перехід від каскадного до водоспадного режиму буде відбуватися у той час, коли максимальне прискорення відповідного торця ємкості, стане перевищувати прискорення *g*. Максимальні значення прискорень a_{maxA} та a_{maxB} торців ємкості ще будуть залежати від значення коефіцієнту λ , який характеризує відношення міжосьової довжини робочої ємкості l_{PC} до міжосьової довжини ведучої чи веденої вилок l_B :

$$\lambda = l_{PC} / l_B \tag{3}$$

Аналітичні дослідження виконували з урахуванням усіх трьох параметрів – кутової швидкості ведучого валу $\omega_{ведуч}$, масштабного коефіцієнту *n* (для $n=1; 1,5; 2; 3,5; 4$) та коефіцієнту λ . Дослідження виконували із застосуванням САПР SolidWorks. За «базовий типорозмір» (масштабний коефіцієнт $n=1, \lambda=1,0$) було прийнято машину з наступними геометричними параметрами: відстань між осями кріплення вилок та міжосьова відстань робочої ємності – 0,077 м, діаметр ємності – 0,095 м.

У таблицях 1 – 4 представлено максимальні значення повних прискорень a_{maxA} та a_{maxB} для 5-и типорозмірів гальтувальної машини при різних значеннях кутових швидкостей ведучого валу з урахуванням зміни коефіцієнту λ . Отримані максимальні значення повних прискорень торців ємкості було апроксимовано у вигляді графічних залежностей квадратичної функції. На рис. 4 – рис. 7 представлено відповідні графічні залежності.

Після аналізу отриманих даних, які представлені у таблицях та на рис. 4 – рис. 7 встановлено, що приріст прискорень a_{maxA} та a_{maxB} від кутової швидкості ведучого валу $\omega_{ведуч}$ машини відбувається за квадратичною функцією. Прискорення a_{maxA} та a_{maxB} залежать від зміни коефіцієнту λ . У конструкції машини при коефіцієнту $\lambda=1,4$ різниця між максимальними значеннями прискорень a_{maxA} та a_{maxB} протилежних торців ємкості буде найменшою, однак, зі збільшенням коефіцієнту λ буде спостерігатися приріст цієї різниці. Також було отримані загальні математичні вирази для визначення максимальних прискорень a_{maxA} та a_{maxB} в залежності від зміни масштабного коефіцієнту *n* та коефіцієнту λ для конструкції гальтувальної машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості, що містить у своєму кінематичному ланцюзі додаткову рухому ланку коромисло з горизонтальною віссю обертання:

$$a_{maxA} = 0,25n\omega_{ведучA}^2 (\lambda - 0,4)^{1,4}; \tag{4}$$

$$a_{maxB} = 0,33n\omega_{ведучB}^2 (\lambda - 0,4)^2. \tag{5}$$

Таблиця 1

| $\omega_{\text{введуч}} [\text{рад/с}]$ | Масштабний коефіцієнт n | | | | | | | | | |
|---|--|----------------------|------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|
| | $n=1$ | | $n=1,5$ | | $n=2$ | | $n=3,5$ | | $n=4$ | |
| | $a_{\text{maxA}(1)}$ | $a_{\text{maxB}(1)}$ | $a_{\text{maxA}(1,5)}$ | $a_{\text{maxB}(1,5)}$ | $a_{\text{maxA}(2)}$ | $a_{\text{maxB}(2)}$ | $a_{\text{maxA}(3,5)}$ | $a_{\text{maxB}(3,5)}$ | $a_{\text{maxA}(4)}$ | $a_{\text{maxB}(4)}$ |
| | Максимальні значення прискорень $[\text{м/с}^2]$ | | | | | | | | | |
| 1,1 | 0,3 | 0,4 | 0,4 | 0,6 | 0,6 | 0,8 | 1 | 1,4 | 1,2 | 1,6 |
| 2,1 | 1,16 | 1,6 | 1,7 | 2,5 | 2,3 | 3,3 | 4,1 | 5,9 | 4,7 | 6,7 |
| 3,2 | 2,6 | 3,7 | 3,9 | 5,5 | 5,2 | 7,4 | 9,3 | 13,4 | 10,8 | 15,7 |
| 4,2 | 4,6 | 6,5 | 6,9 | 9,8 | 9,2 | 13,1 | 16,8 | 24,5 | 19,5 | 28,8 |
| 5,3 | 7,2 | 10,1 | 10,8 | 15,2 | 14,5 | 20,4 | 26,6 | 39 | 30,8 | 48,9 |
| 6,3 | 10,4 | 14,6 | 15,7 | 22 | 20,9 | 29,6 | 38,9 | 57 | 45,4 | 72,6 |
| 7,4 | 14,2 | 19,8 | 21,3 | 30 | 28,5 | 40,4 | 53,5 | 78,7 | 62,5 | 102 |

Таблиця 2

| $\omega_{\text{введуч}} [\text{рад/с}]$ | Масштабний коефіцієнт n | | | | | | | | | |
|---|--|----------------------|------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|
| | $n=1$ | | $n=1,5$ | | $n=2$ | | $n=3,5$ | | $n=4$ | |
| | $a_{\text{maxA}(1)}$ | $a_{\text{maxB}(1)}$ | $a_{\text{maxA}(1,5)}$ | $a_{\text{maxB}(1,5)}$ | $a_{\text{maxA}(2)}$ | $a_{\text{maxB}(2)}$ | $a_{\text{maxA}(3,5)}$ | $a_{\text{maxB}(3,5)}$ | $a_{\text{maxA}(4)}$ | $a_{\text{maxB}(4)}$ |
| | Максимальні значення прискорень $[\text{м/с}^2]$ | | | | | | | | | |
| 1,1 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,8 | 0,7 | 1 | 1,2 | 1,8 | 1,4 | 2,1 |
| 2,1 | 1,4 | 2,5 | 2,1 | 3,2 | 2,8 | 4,2 | 4,9 | 7,5 | 5,7 | 8,6 |
| 3,2 | 3,2 | 5,6 | 4,8 | 7,1 | 6,4 | 9,6 | 11,3 | 16,8 | 13,2 | 20,3 |
| 4,2 | 5,6 | 10,1 | 8,4 | 12,6 | 11,2 | 16,9 | 20,3 | 31,1 | 23,8 | 37,2 |
| 5,3 | 8,8 | 15,9 | 13,2 | 19,6 | 17,7 | 26,3 | 32,2 | 50,3 | 37,6 | 63,1 |
| 6,3 | 12,6 | 23 | 19,2 | 28,4 | 25,5 | 38,2 | 47,1 | 73,2 | 55,5 | 91,7 |
| 7,4 | 17,3 | 31,2 | 26 | 38,7 | 34,8 | 52,1 | 65 | 101 | 76,4 | 132 |

Таблиця 3

| $\omega_{\text{введуч}} [\text{рад/с}]$ | Масштабний коефіцієнт n | | | | | | | | | |
|---|--|----------------------|------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|
| | $n=1$ | | $n=1,5$ | | $n=2$ | | $n=3,5$ | | $n=4$ | |
| | $a_{\text{maxA}(1)}$ | $a_{\text{maxB}(1)}$ | $a_{\text{maxA}(1,5)}$ | $a_{\text{maxB}(1,5)}$ | $a_{\text{maxA}(2)}$ | $a_{\text{maxB}(2)}$ | $a_{\text{maxA}(3,5)}$ | $a_{\text{maxB}(3,5)}$ | $a_{\text{maxA}(4)}$ | $a_{\text{maxB}(4)}$ |
| | Максимальні значення прискорень $[\text{м/с}^2]$ | | | | | | | | | |
| 1,1 | 0,4 | 0,6 | 0,6 | 1 | 0,8 | 1,2 | 1,4 | 2,2 | 1,9 | 2,6 |
| 2,1 | 1,6 | 2,6 | 2,5 | 4,1 | 3,4 | 4,9 | 5,4 | 8,1 | 7,5 | 10,7 |
| 3,2 | 3,8 | 5,8 | 5,6 | 9,2 | 7,5 | 11,2 | 11,8 | 17,8 | 17,3 | 25,1 |
| 4,2 | 6,7 | 10,4 | 10 | 16,3 | 13,3 | 19,8 | 21,5 | 32,5 | 31,2 | 46,1 |
| 5,3 | 10,5 | 16,2 | 15,6 | 25,3 | 21 | 30,6 | 33,6 | 51,8 | 49,3 | 78,3 |
| 6,3 | 15,1 | 23,4 | 22,7 | 36,7 | 30,3 | 44,3 | 49,2 | 74,6 | 72,7 | 116,3 |
| 7,4 | 20,6 | 31,7 | 30,8 | 50 | 41,3 | 60,6 | 68,4 | 103,6 | 100,1 | 163,4 |

Таблиця 4

| $\omega_{\text{введуч}} [\text{рад/с}]$ | Масштабний коефіцієнт n | | | | | | | | | |
|---|--|----------------------|------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|
| | $n=1$ | | $n=1,5$ | | $n=2$ | | $n=3,5$ | | $n=4$ | |
| | $a_{\text{maxA}(1)}$ | $a_{\text{maxB}(1)}$ | $a_{\text{maxA}(1,5)}$ | $a_{\text{maxB}(1,5)}$ | $a_{\text{maxA}(2)}$ | $a_{\text{maxB}(2)}$ | $a_{\text{maxA}(3,5)}$ | $a_{\text{maxB}(3,5)}$ | $a_{\text{maxA}(4)}$ | $a_{\text{maxB}(4)}$ |
| | Максимальні значення прискорень $[\text{м/с}^2]$ | | | | | | | | | |
| 1,1 | 0,5 | 0,8 | 0,7 | 1,9 | 1 | 1,6 | 1,8 | 2,9 | 1,9 | 3,1 |
| 2,1 | 2 | 3,3 | 2,9 | 8 | 4 | 6,7 | 7 | 12,3 | 8 | 13,1 |
| 3,2 | 4,5 | 7,2 | 6,5 | 17,9 | 8,9 | 14,8 | 16,1 | 27,1 | 18,6 | 30,3 |
| 4,2 | 7,9 | 12,9 | 12,1 | 32,5 | 16 | 26,3 | 29 | 50,3 | 33,5 | 56,8 |
| 5,3 | 12,5 | 20,1 | 18,9 | 49,5 | 25,1 | 40,4 | 44,9 | 78,7 | 52,9 | 95,4 |
| 6,3 | 18 | 29 | 27,1 | 72,6 | 35,3 | 59,2 | 66,3 | 115,5 | 78,2 | 142 |
| 7,4 | 24,1 | 39,1 | 36,7 | 99,5 | 47,8 | 80,1 | 90,8 | 157,5 | 107,9 | 199 |

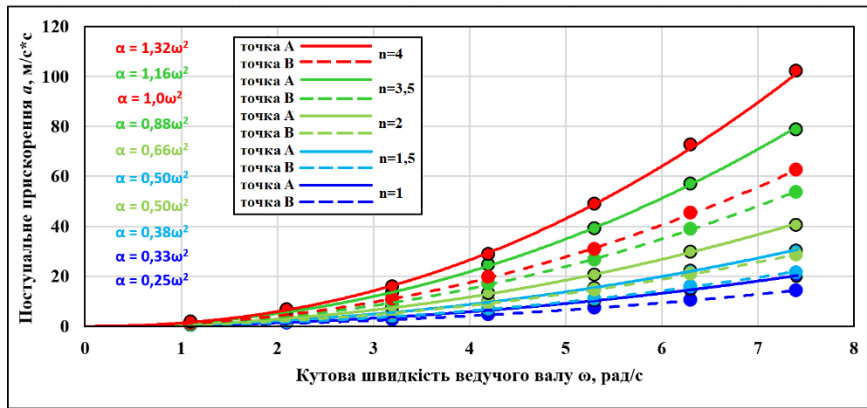


Рис. 4. Графік залежності максимальних значень прискорень a_{maxA} та a_{maxB} від кутової швидкості $\omega_{ведуч}$ ведучого валу машини при коефіцієнті $\lambda=1,4$

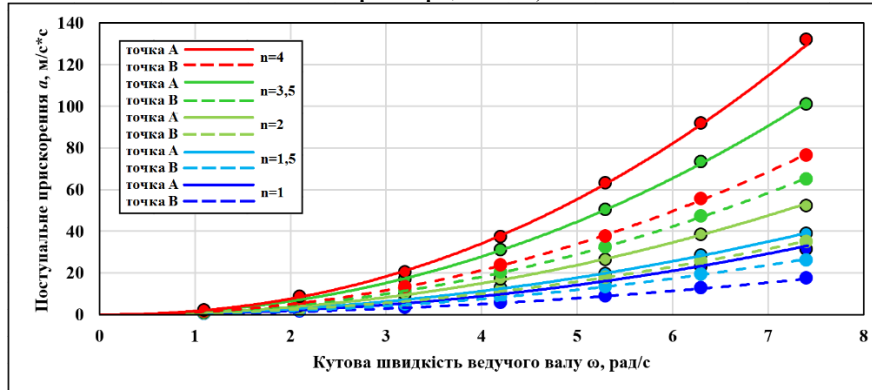


Рис. 5. Графік залежності максимальних значень прискорень a_{maxA} та a_{maxB} від кутової швидкості $\omega_{ведуч}$ ведучого валу машини при коефіцієнті $\lambda=1,6$

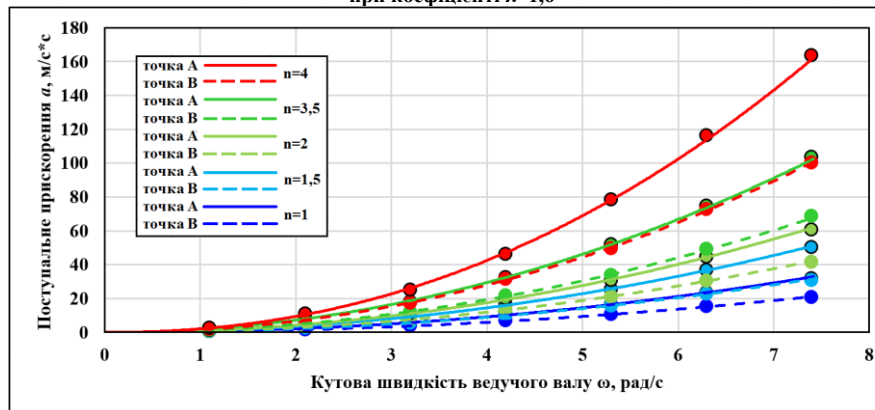


Рис. 6. Графік залежності максимальних значень прискорень a_{maxA} та a_{maxB} від кутової швидкості $\omega_{ведуч}$ ведучого валу машини при коефіцієнті $\lambda=1,8$

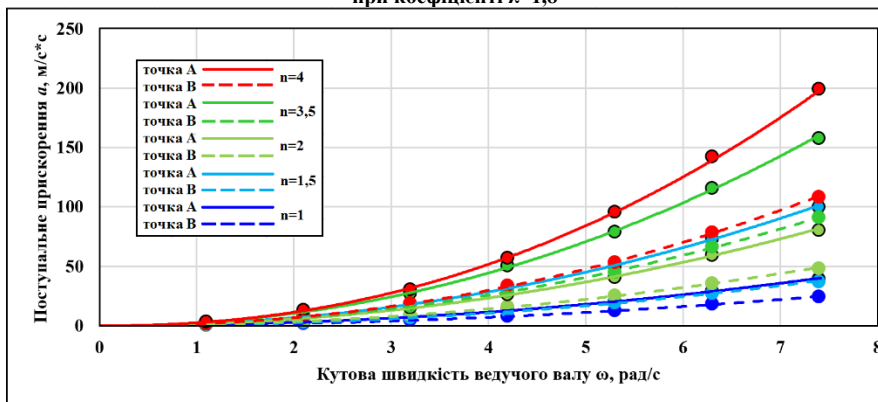


Рис. 7. Графік залежності максимальних значень прискорень a_{maxA} та a_{maxB} від кутової швидкості $\omega_{ведуч}$ ведучого валу машини при коефіцієнті $\lambda=2,0$

Для визначення режиму руху робочого масиву, утворенню якого у ємкості буде відповідати кутова швидкість ведучого валу, виразимо із виразів (4) та (5) значення $\omega_{ведуч}$, а також запишемо ці вирази, враховуючи умови, які отримані у попередніх дослідженнях та представлені у роботі [14], що відповідають зміні режимів руху робочого масиву в середині ємкості.

$$\omega_{\text{ведучи}A} = \sqrt{\xi \frac{g}{0,25n(\lambda - 0,4)^{1,4}}}; \quad (6)$$

$$\omega_{\text{ведучи}B} = \sqrt{\xi \frac{g}{0,33n(\lambda - 0,4)^2}}; \quad (7)$$

де ξ – коефіцієнт, який відповідає частині робочого масиву, яка зможе перейти до стану вільного польоту.

При $\xi=0,5$ перейти до стану польоту у ємкості зможе перейти приблизно половина робочого масиву, відповідно, за виразами (8), (9) можна буде розрахувати граничне значення кутової швидкості ведучого валу, при якому в середині ємкості почнуть реалізуватися перші ознаки змішаного режиму руху. При $\xi=1$ весь робочий масив зможе перейти до стану вільного польоту. Таким чином, за виразами (8) та (9) можна буде розрахувати граничне значення кутової швидкості ведучого валу, при якому в середині ємкості почнуть реалізуватися перші ознаки водоспадного режиму руху.

Із застосуванням виразів (8) та (9) розраховано граничні значення кутової швидкості ведучого валу машини, що відповідають зміні режимів руху робочого масиву в середині ємностей машин із відповідним коефіцієнтом λ . Розраховані граничні значення кутової швидкості ведучого валу представлено у таблицях 5–8.

Таблиця 5

| $\omega_{\text{ведучи}}, [рад/с]$ $n=1$ | $\omega_{\text{ведучи}}, [рад/с]$ $n=1,5$ | $\omega_{\text{ведучи}}, [рад/с]$ $n=2$ | $\omega_{\text{ведучи}}, [рад/с]$ $n=3,5$ | $\omega_{\text{ведучи}}, [рад/с]$ $n=4$ | Режим руху робочого масиву |
|--|--|--|--|--|----------------------------|
| 0 – 3,8 | 0 – 3 | 0 – 2,6 | 0 – 2 | 0 – 1,8 | Каскадний |
| 3,9 – 6,3 | 3,1 – 5,1 | 2,7 – 4,4 | 2,1 – 3,3 | 1,9 – 3,1 | Змішаний |
| 6,4 < | 5,2 < | 4,5 < | 3,4 < | 3,2 < | Водоспадний |

Таблиця 6

| $\omega_{\text{ведучи}}, [рад/с]$ $n=1$ | $\omega_{\text{ведучи}}, [рад/с]$ $n=1,5$ | $\omega_{\text{ведучи}}, [рад/с]$ $n=2$ | $\omega_{\text{ведучи}}, [рад/с]$ $n=3,5$ | $\omega_{\text{ведучи}}, [рад/с]$ $n=4$ | Режим руху робочого масиву |
|--|--|--|--|--|----------------------------|
| 0 – 3,1 | 0 – 2,5 | 0 – 2,2 | 0 – 1,6 | 0 – 1,5 | Каскадний |
| 3,2 – 5,5 | 2,6 – 4,5 | 2,3 – 3,9 | 1,7 – 2,9 | 1,6 – 2,8 | Змішаний |
| 5,6 < | 4,6 < | 4 < | 3 < | 2,9 < | Водоспадний |

Таблиця 7

| $\omega_{\text{ведучи}}, [рад/с]$ $n=1$ | $\omega_{\text{ведучи}}, [рад/с]$ $n=1,5$ | $\omega_{\text{ведучи}}, [рад/с]$ $n=2$ | $\omega_{\text{ведучи}}, [рад/с]$ $n=3,5$ | $\omega_{\text{ведучи}}, [рад/с]$ $n=4$ | Режим руху робочого масиву |
|--|--|--|--|--|----------------------------|
| 0 – 2,7 | 0 – 2,1 | 0 – 1,8 | 0 – 1,4 | 0 – 1,3 | Каскадний |
| 2,8 – 4,9 | 2,2 – 4 | 1,9 – 3,5 | 1,5 – 2,6 | 1,4 – 2,5 | Змішаний |
| 5 < | 4,1 < | 3,6 < | 2,7 < | 2,6 < | Водоспадний |

Таблиця 8

| $\omega_{\text{ведучи}}, [рад/с]$ $n=1$ | $\omega_{\text{ведучи}}, [рад/с]$ $n=1,5$ | $\omega_{\text{ведучи}}, [рад/с]$ $n=2$ | $\omega_{\text{ведучи}}, [рад/с]$ $n=3,5$ | $\omega_{\text{ведучи}}, [рад/с]$ $n=4$ | Режим руху робочого масиву |
|--|--|--|--|--|----------------------------|
| 0 – 2,3 | 0 – 1,9 | 0 – 1,6 | 0 – 1,2 | 0 – 1,1 | Каскадний |
| 2,4 – 4,5 | 2 – 3,7 | 1,7 – 3,2 | 1,3 – 2,4 | 1,2 – 2,3 | Змішаний |
| 4,6 < | 3,8 < | 3,3 < | 2,5 < | 2,4 < | Водоспадний |

Висновки

1. Виконані дослідження впливу конструктивних особливостей галтувальної машини з додатковою рухомою ланкою коромислом з горизонтальною віссю обертання на реалізацію режимів руху масиву в середині робочої ємкості зі складним просторовим рухом.

2. Встановлено, що реалізація режимів руху робочого масиву в середині ємкості галтувальної машини залежить від кутової швидкості обертання ведучого валу, масштабного коефіцієнту машини та коефіцієнту, який характеризує відношення відстані між осями робочої ємкості до відстані між осями вилки машини.

3. Отримано математичні залежності для визначення граничної кутової швидкості ведучого валу галтувальної машини типу «Turbula» з додатковою рухомою ланкою коромислом з вертикальною віссю обертання, що відповідатиме реалізації необхідного режиму руху робочого масиву, при його русі у ємкості.

Література

1. Залюбовський М.Г. Експериментальне дослідження впливу режимів руху робочого масиву та об'єму заповнення ємкості на інтенсивність відділення металевих деталей від ливників / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну – 2020. – №1 (142). – С. 27-38.
2. Zalyubovskiy M.G. Experimental investigation of the handling process of polymeric units in a machine

with a compacted space movement of working capacity / Zalyubovskiy M.G., Panasyuk I.V., Smirnov Y.I., Klaptsov Y.V., Malyshev V.V. // Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design – 2019. Vol. 2 (132). P. 24 – 32.

3. Першин В.Ф. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа / Першин В.Ф., Однолько В.Г., Першина С.В. // Монография – М.: Машиностроение, 2009. – 220 с.

4. [Бурмістенков О.П.](#) Виробництво литих деталей та виробів з полімерних матеріалів у взуттєвій та шкіргалантерейній промисловості: монографія / О. П. Бурмістенков, Б. М. Злотенко, В. П. Коновал, І. В. Панасюк, М. Є. Скиба, О. М. Синюк. – Хмельниц., 2007. – 255 с.

5. Zalyubovskii M. G. Studying the main design parameters of linkage mechanisms of part-processing machines with two working barrels / M. G. Zalyubovskii, I. V. Panasyuk // International Applied Mechanics, 56, No. 6, November 2020, 762 – 772.

6. Zalyubovskii M. G. On the study of the basic design parameters of a seven-link Spatial mechanism of a part processing machine / M. G. Zalyubovskii, I. V. Panasyuk // International Applied Mechanics, 56, No. 1, April 2020, p. 54 – 64.

7. Marigo M. Discrete Element Method Modelling of Complex Granular Motion in Mixing Vessels: Evaluation and Validation: dissertation EngD – The University of Birmingham, UK., 2012. – 316 P.

8. Panasyuk I. Driving machine shaft angular velocity impact on motion conditional change of granular medium in working reservoir for components compounding and process / I. Panasyuk, M. Zalyubovskiy // Metallurgical and Mining Industry – 2015. – №3. – P. 260-264.

9. Zalyubovskii M. G. Modeling and designing the barreling machine drive with complex spatial motion of the container / M.G. Zalyubovskii, I.V. Panasyuk, S.O. Koshel', G.V. Koshel' // International Applied Mechanics, 58, No. 4, July 2022, p. 472 – 480.

10. Залюбовський М.Г. Визначення залежності між зміною режимів руху робочого масиву та конструктивними особливостями галтувальної машини типу «Turbula» / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки – 2022. – №6 (315). – С. 82 – 88;

11. Залюбовський М.Г. Аналітичне дослідження конструктивних особливостей галтувальної машини типу «Turbula», які впливають на реалізацію відповідного режиму руху робочого масиву / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки – 2023. – № 1 (317). – С. 87 – 93;

12. Залюбовський М.Г. Машини зі складним рухом робочих ємкостей для обробки полімерних деталей: монографія / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк, В.В. Малишев – К.: Університет «Україна», 2018. – 228 с.

13. Панасюк І.В. Визначення залежності режиму руху робочого середовища у ємкості зі складним рухом від кутової швидкості ведучого валу / І.В. Панасюк, М.Г. Залюбовський // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну – 2015. – №1. – С. 43-52.

References

1. Zaliubovskiy M.H. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu rezhymiv rukhu robochoho masyvu ta ob'iemu zapovnennia yemkosti na intensyvniat viddilennia metalevykh detalei vid lyvnykiv / M.H. Zaliubovskiy, I.V. Panasiuk // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnologii ta dyzainu – 2020. – №1 (142). – S. 27-38.

2. Zalyubovskiy M.G. Experimental investigation of the handling process of polymeric units in a machine with a compacted space movement of working capacity / Zalyubovskiy M.G., Panasyuk I.V., Smirnov Y.I., Klaptsov Y.V., Malyshev V.V. // Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design – 2019. Vol. 2 (132). P. 24 – 32.

3. Pershyn V.F. Pererabotka syrchuykh materyalov v mashynakh barabannogo typu / Pershyn V.F., Odnolko V.H., Pershyna S.V. // Monohrafiya – M.: Mashynostroenye, 2009. – 220 c.

4. Burmistenkov O.P. Vyrobnystvo lytykh detalei ta vyrobiv z polimerykh materialiv u vzuttievii ta shkirhalantereynii promyslovosti: monohrafiya / O.P. Burmistenkov, B.M. Zlotenko, V.P. Konoval, I.V. Panasiuk, M.Ie. Skyba, O.M. Syniuk. – Khmelnyts., 2007. – 255 s.

5. Zalyubovskii M. G. Studying the main design parameters of linkage mechanisms of part-processing machines with two working barrels / M. G. Zalyubovskii, I. V. Panasyuk // International Applied Mechanics, 56, No. 6, November 2020, 762 – 772.

6. Zalyubovskii M. G. On the study of the basic design parameters of a seven-link Spatial mechanism of a part processing machine / M. G. Zalyubovskii, I. V. Panasyuk // International Applied Mechanics, 56, No. 1, April 2020, p. 54 – 64.

7. Marigo M. Discrete Element Method Modelling of Complex Granular Motion in Mixing Vessels: Evaluation and Validation: dissertation EngD – The University of Birmingham, UK., 2012. – 316 P.

8. Panasyuk I. Driving machine shaft angular velocity impact on motion conditional change of granular medium in working reservoir for components compounding and process / I. Panasyuk, M. Zalyubovskiy // Metallurgical and Mining Industry – 2015. – №3. – P. 260-264.

9. Zalyubovskii M. G. Modeling and designing the barreling machine drive with complex spatial motion of the container / M.G. Zalyubovskii, I.V. Panasyuk, S.O. Koshel', G.V. Koshel' // International Applied Mechanics, 58, No. 4, July 2022, p. 472 – 480.

10. Zaliubovskiy M.H. Vyznachennia zalezhnosti mizh zminoiu rezhymiv rukhu robochoho masyvu ta konstruktyvnymi osoblyvostiamy haltuvalnoi mashyny typu «Turbula» / M.H. Zaliubovskiy, I.V. Panasiuk // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky – 2022. – №6 (315). – S. 82 – 88;

11. Zaliubovskiy M.H. Analitichne doslidzhennia konstruktyvnykh osoblyvostei haltuvalnoi mashyny typu «Turbula», yaki vplyvaiut na realizatsiu vidpovidnoho rezhymu rukhu robochoho masyvu / M.H. Zaliubovskiy, I.V. Panasiuk // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky – 2023. – № 1 (317). – S. 87 – 93;

12. Zaliubovskiy M. H. Mashyny zi skladnym rukhom robochykh yemkosti dlia obrobky polimerykh detalei: monohrafiya / M. H. Zaliubovskiy, I. V. Panasiuk, V. V. Malyshev – K.: Universytet «Ukraina», 2018. – 228 s.

13. Panasiuk I.V. Vyznachennia zalezhnosti rezhymu rukhu robochoho sredovyshcha u yemkosti zi skladnym rukhom vid kutovoi shvydkosti veduchoho valu / I.V. Panasiuk, M.H. Zaliubovskiy // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnologii ta dyzainu – 2015. – №1. – S. 43-52.

КУПЧУК ІГОР

Вінницький національний аграрний університет

ORCID ID: [0000-0002-2973-6914](https://orcid.org/0000-0002-2973-6914)e-mail: kupchuk.igor@i.ua

БИСТРИЦЬКИЙ ОЛЕКСАНД

Вінницький національний аграрний університет

ORCID ID: [0000-0002-6597-9112](https://orcid.org/0000-0002-6597-9112)e-mail: ipserhiy@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ТВЕРДОГО БІОПАЛИВА

Стаття присвячена огляду та аналізу процесу виробництва твердого біопалива з використанням різних видів сировини. Описано процес подрібнення сировини за допомогою різних типів дробарок та висвітлено особливості кожного з них. Також було проаналізовано ефективність різних методів подрібнення сировини та визначено їх вплив на якість та властивості гранул твердого біопалива. Було зазначено, що оптимальна довжина частинок для гранулювання залежить від типу сировини та може бути різною для різних видів біомаси.

Ключові слова: подрібнення, органічні відходи, біопаливо, пелети, брикети, пресування.

KUPCHUK IHOR

Vinnytsia National Agrarian University

BYSTRYTSKYI OLEXANDER

Vinnytsia National Agrarian University

RESEARCH OF SOLID BIOFUEL PRODUCTION TECHNOLOGY

The article is devoted to the review and analysis of the solid biofuel production process using various types of raw materials. The article describes the process of crushing raw materials using different types of crushers and highlights the features of each of them. The effectiveness of various raw material grinding methods was also analyzed and their impact on the quality and properties of solid biofuel granules was determined. It was noted that the optimal particle length for granulation depends on the type of raw material and may be different for different types of biomass.

In addition, the influence of various impurities on the quality and properties of solid biofuel pellets, such as dust, metal pieces, plastic impurities, etc., was investigated. It was found that the presence of impurities in raw materials can significantly worsen the quality and properties of solid biofuel granules, so it is necessary to carry out quality control at each stage of production. The process of biofuel production using thermochemical methods, such as pyrolysis and gasification, has also been investigated. Data on the effectiveness of using each of the methods and their impact on the quality and properties of biofuel are presented. The process of solid biofuel compression and granulation is considered, and data on the influence of various factors on the quality and properties of granules are given.

Key words: grinding, organic waste, biofuel, pellets, briquettes, pressing.

Постановка проблеми

У зв'язку зі зростанням екологічних проблем та залежності від нестабільних цін на нафту, пошук альтернативних джерел енергії стає актуальним завданням [1]. Тверде біопаливо є одним із джерел, що може бути виготовлене з різних видів, таких як деревина, солома, буряки, сировина з вирощування енергетичних культур тощо. Проте, на даний момент, технології виробництва твердого біопалива не досконалі, існують проблеми з якістю та властивостями гранул, що знижує їх конкурентоспроможність на ринку [2]. Отже, проблема полягає в тому, щоб розробити ефективну технологію виробництва з високоякісними гранулами, які будуть відповідати вимогам ринку та забезпечувати стабільний прибуток виробників [3].

Враховуючи стратегічну важливість формування матеріально-технічної бази для забезпечення високоефективної переробки сільськогосподарських відходів рослинного походження, а також високі енерговитрати, якими відзначається традиційна підготовка біомаси до брикетування, виникає потреба в проведенні досліджень спрямованих на вирішення проблеми енергоефективного подрібнення структурно-неоднорідних матеріалів, у тому числі з високими показниками вологовмісту, що і обумовлює актуальність теми [4].

Аналіз останніх джерел

Останні дослідження в галузі технології виробництва твердого біопалива показують активний розвиток і пошук нових підходів до вирішення проблем в цій галузі. Дослідники з усього світу працюють над поліпшенням технологій та збільшенням ефективності виробництва твердого біопалива. Наприклад, у своїй статті "Recent advances in biomass pretreatment – Torrefaction fundamentals and technology" (2022) Margio та співавтори аналізували принципи торрефікації біомаси, яка є одним з ключових етапів виробництва твердого біопалива. Дослідження дозволило встановити оптимальні параметри торрефікації для різних видів біомаси, що знизило вартість виробництва твердого біопалива.

У роботі "Investigation of biochar as a binder material for biomass pellet production" (2021) автори Кукульська-Журавська та Дума досліджували використання біовугілля як зв'язуючого матеріалу для виробництва гранул твердого біопалива. Вони показали, що додавання біокомпонента зменшує кількість використаного зв'язуючого матеріалу та збільшує якість і ефективність гранул.

У дослідженнях "Optimization of Process Parameters for Biomass Pellets Production Using Response Surface Methodology" (2021) Янг та Юнг використовували методологію реагування поверхні для встановлення оптимальних параметрів процесу виробництва гранул твердого біопалива з використанням

різних видів біомаси. Вони виявили, що вплив температури та часу на якість гранул залежить від типу використаної біомаси.

Метою роботи є дослідження процесу виробництва твердого біопалива з різних видів сировини, визначення оптимальних параметрів процесу та оцінка впливу різних факторів на якість та властивості гранул твердого біопалива. Також метою є порівняння ефективності різних типів дробарок та визначення їх впливу на якість та властивості гранул твердого біопалива.

Виклад основного матеріалу

Тверде біопаливо може бути виготовлене з різних рослинних матеріалів, таких як дерево, солома, торф, сміття та інше [4]. Найбільш поширеним матеріалом для виробництва твердого біопалива є деревина.

Технологія виробництва твердого біопалива може включати наступні етапи:

1. Збір сировини: сировина збирається та транспортується до заводу для подальшої обробки.
2. Дроблення: сировина проходить через дробарку, де вона розтинається на менші шматки. Це зменшує розмір сировини та полегшує подальшу обробку.
3. Сушіння: вологість сировини може бути високою, тому перед подальшою обробкою її необхідно підсушити. Це можна зробити природним шляхом, розкладаючи сировину на відкритому повітрі, або шляхом сушіння в спеціальних сушильних камерах.
4. Пресування: суха сировина подрібнюється ще дрібніше та пресується за допомогою спеціального обладнання у форму брикетів або пелет.
5. Охолодження: після пресування брикети або пелети охолоджуються, щоб зберігатися транспортуватися.
6. Упакування: готові брикети або пелети упаковуються у спеціальні мішки або контейнери для транспортування та зберігання.

Зазвичай технологія виробництва твердого біопалива є досить ефективною та екологічно чистою, оскільки вона використовує відновлювальну сировину та не викидає в атмосферу багато вуглекислого газу [5]. Крім того, тверде біопаливо може бути використовується в різних типах котлів, які використовуються для опалення приміщень або виробничих потреб.

Наприклад, брикети можуть бути використані в спеціальних котлах з прямим спалюванням, а пелети в автоматичних. Паливні гранули та брикети мають значні переваги порівняно з традиційними видами палива: для їх виробництва витрачається близько 3% енергії, при цьому під час виробництва нафти ці енерговитрати становлять близько 10%, електроенергії – 60%, а їх теплотворна здатність знаходиться у межах від 4,5 до 5,0 кВт/кг, що у 1,5 рази більше, ніж у звичайної деревини та вугілля [6]. Також паливні гранули та брикети мають високу конкурентоспроможність, порівняно з іншими видами традиційного палива. Ціни на біопалива не залежать від стрибків цін на вичопні види палива та на екологічні податки, що постійно збільшуються [7]. Завдяки вказаним перевагам твердих біопалив, постає необхідність нарощування темпів їх споживання регіонами України зі зменшенням використання вугілля у структурі енергоспоживання країни.

Ринок паливних брикетів та гранул України, на відміну від ринку біодизеля, вже став самостійним і експортоорієнтованим. Вироблені в Україні гранули, пелети, брикети реалізують як на внутрішньому ринку, так і за межами держави. Експорт твердих біопалив зумовлений вдвічі більшою ціною продажу на цей вид продукції у країнах ЄС, ніж на вітчизняному ринку, а також збільшенням попиту на тверді біопалива з боку європейських ринків.

Тверде біопаливо є екологічно чистим та ефективним вибором, особливо для тих, хто прагне зменшити свою залежність від нафти та інших видів енергії. Крім того, воно може бути виготовлене з відходів виробництва та використання деревини, що знижує витрати на сировину та вплив на навколишнє середовище.

Виробництво твердого біопалива може бути організовано як на великому промисловому рівні, так і на домашньому рівні за допомогою спеціального обладнання. Важливо забезпечити якісну сировину та дотримуватися вимог до якості твердого біопалива, щоб забезпечити ефективне його використання та мінімізувати вплив на довкілля.

Невід'ємними складовими частинами технологічного циклу виробництва такого твердого палива є підготовка біомаси до брикетування з метою забезпечення потрібних розмірів та вологовмісту вихідного продукту [8]. Оскільки відходи рослинного походження відносяться до структурно-неоднорідних матеріалів з різними фізико-механічними характеристиками окремих анатомічних частин (вологовміст, твердість, крихкість тощо), це знижує енергоефективність застосування того чи іншого відомого способу руйнування (наприклад, ударом, стиранням, різанням, розколюванням тощо) та зумовлює потребу в застосуванні кількох стадій подрібнення із використанням відповідного обладнання.

Існує кілька основних методів виробництва твердого біопалива, таких як механічний брикетування, термічна обробка та хімічна обробка.

Механічний брикетування полягає у виготовленні брикетів з сировини шляхом її здавлювання під високим тиском без використання хімічних реагентів [9]. Під час процесу механічного брикетування сировину змішують зі сполучувачем (наприклад, крохмалем або меласою), який допомагає зв'язати частки сировини разом, утворюючи брикет. Зазвичай брикети виготовляють з відходів деревообробки або зі сміття, що містить біомасу, наприклад, з міських зелених зон.

Термічна обробка включає в себе піроліз, торфопіроліз, газифікацію та карбонізацію. Під час термічної обробки сировину піддають впливу високої температури та відсутності повітря [10]. Це допомагає видалити з сировини вологу та легкозаймисті речовини, зменшити вміст димових газів та збільшити

енергетичну цінність біопалива.

Хімічна обробка включає в себе гідроліз, естерифікацію та трансестерифікацію. Під час гідролізу високомолекулярні біомаси розкладаються на менші молекули за допомогою води та кислоти або лужної обробки. Естерифікація використовується для перетворення жирів та олій на біопаливо. Трансестерифікація використовується для перетворення жирів та олій на біодизель.

Одна з переваг механічного брикетування полягає в тому, що цей процес не вимагає великих інвестицій та може використовуватись для переробки різних видів сировини. Недоліком механічного брикетування є те, що витрати на енергію для здавлювання сировини під високим тиском можуть бути значними, а також можуть виникнути проблеми зі зносом обладнання.

Термічна обробка є ефективним методом для виробництва твердого біопалива, особливо зі сировини, яка містить великі кількості вологи та легкозаймистих речовин [11]. Однак термічна обробка може бути дорогим та складним процесом, що вимагає великих інвестицій в обладнання та інженерні рішення.

Хімічна обробка є ефективним методом для перетворення біомаси на тверде біопаливо, але вона може бути дорогим та складним процесом, що вимагає великих інвестицій в обладнання та хімічні реагенти. Крім того, хімічна обробка може створювати проблеми зі видаленням залишків хімічних реагентів та інших відходів.

У кінцевому підсумку, технологія виробництва твердого біопалива залежить від доступної сировини, технічних можливостей та ринкових умов.

Залежно від технології виробництва, сировина для виробництва твердого біопалива може відрізнятися за складом та показниками (табл. 1). Однак, нижче наведено загальні показники для декількох видів біомаси, які можуть використовуватися для виробництва твердого біопалива:

Таблиця 1

Загальні показники різних видів біомаси

| Сировина | Вологість, % | Зольність, % | Калорійність, МДж/т |
|---------------------|--------------|--------------|---------------------|
| Деревина хвойних | 40-60 | 0,4-1,5 | 16-19 |
| Деревина листяних | 30-50 | 0,5-2,5 | 18-21 |
| Деревопродукти | 20-30 | 0,5-2,0 | 18-21 |
| Солома | 12-20 | 3,0-8,0 | 14-17 |
| Сіно | 15-20 | 3,0-8,0 | 14-17 |
| Сухі листя та гілки | 10-15 | 3,0-8,0 | 15-18 |
| Сировина кукурудзи | 12-18 | 2,0-6,0 | 15-17 |
| Сировина пшениці | 12-18 | 2,0-6,0 | 15-17 |
| Органічні відходи | 50-70 | 20-30 | 8-15 |
| Просо | 10-15 | 3,0-8,0 | 18-21 |

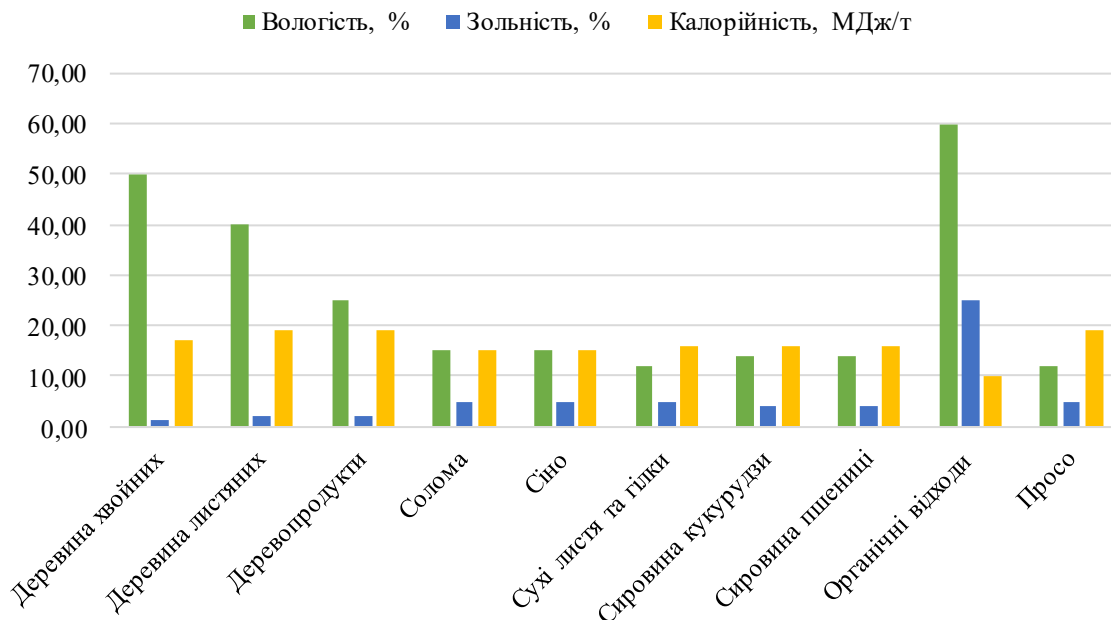


Рис. 1. Енергетичні показники сировини для виготовлення твердого палива

Наприклад, біомасу проса можна використовувати в процесі спалювання як окреме паливо або спалювати разом з вугіллям. Однак використання проса як єдиного джерела палива або в суміші на електростанціях великої потужності не є поширеним або економічно вигідним [12]. Це відбувається внаслідок зашлакування та забруднення систем згоряння. Причиною цього несприятливого явища є наявність у біомасі калію, кальцію, магнію, хлору та кремнію у більших кількостях, ніж у вугіллі. Чим вищий вміст калію та натрію, тим нижча температура плавлення золи біомаси і, як наслідок, більше шлаку та корозії котла. Газоподібний хлор і хлористий водень є основними факторами корозії енергетичних котлів, але дія HCl на

метал котла менш небезпечна, ніж Cl_2 . Хлориди, особливо калію та натрію, що виділяються під час спалювання біомаси, конденсуються на поверхні котлів і труб пароперегрівачів. Потім у реакції хлоридів з оксидами заліза, присутніми в відкладеннях, або SO_2 , яка виникає у відпрацьованих газах, утворюються хлор і хлористий водень відповідно. Тверді продукти цих реакцій, з іншого боку, розплавляються у склоподібний в'язкий шар, який захоплює нелеткі елементи (Ca, Si та Mg), з яких утворюються силікати з нижчою температурою плавлення, ніж у випадку хлоридів, що збільшує ризик корозії.

Ефективність спалювання біомаси проса також залежить від вмісту золи та вологи. Складу і калорійності проса наведені в таблиці 3. Відносно високий вміст золи пояснюється більшою часткою листя, яке може містити в 3 рази більше золи, ніж стебла, в біомасі цієї рослини (табл. 2). Зола знижує теплотворну здатність біомаси. Високий вміст вологи в біомасі також призводить до зниження калорійності, і цей вміст не повинен перевищувати 23%. У процесі спалювання біомаси вміст азоту також важливий, оскільки він впливає на викиди NO_x .

Процес подрібнення є однією з основних стадій при виробництві твердого біопалива з біомаси. Метою цього процесу є зменшення розміру сировини та збільшення її поверхні для подальшої обробки. Подрібнення може здійснюватися за допомогою різноманітних видів обладнання, залежно від виду біомаси та вимог до фракцій результуючої продукції.

Найпоширенішим типом обладнання для подрібнення є дробарки. Для деревини використовуються дискові та барабанні дробарки. При цьому деревина подрібнюється на фракції різної величини – від дрібної стружки до кусочків деревини довжиною до 10 см (табл. 3).

Для подрібнення соломи застосовуються різні типи обладнання, наприклад, молоткові дробарки та прес-підбирачі. Молоткові дробарки дозволяють подрібнювати соломку на фракції різного розміру, а прес-підбирачі додатково стискають соломку для отримання щільнішого матеріалу.

Для подрібнення використовуються різні типи дробарок, наприклад, валкові, дискові, молоткові та кулачкові. Даний процес відбувається з метою зменшення розміру та збільшення поверхні буряку для подальшої обробки.

Для органічних відходів зазвичай використовуються різноманітні типи дробарок, такі як молоткові дробарки, валкові дробарки, дискові дробарки, а також гранулятори.

Таблиця 2

Класифікація дробарок для виробництва твердого біопалива за технічними показниками

| Тип дробарки | Призначення | Продуктивність, т/год | Потужність, кВт | Розмір подрібненої фракції, мм |
|--------------|-------------------------------------|-----------------------|-----------------|--------------------------------|
| Молоткова | Солома, деревина, органічні відходи | 1-20 | 15-400 | 1-50 |
| Дискова | Деревина | 5-25 | 30-350 | 3-60 |
| Барабанна | Деревина | 10-50 | 60-600 | 10-100 |
| Валкова | Буряк цукровий | 5-30 | 10-150 | 2-20 |

Таблиця 3

Класифікація дробарок для виробництва твердого біопалива за ефективністю подрібнення

| Тип дробарки | Сировина | Розмір початкової сировини, мм | Розмір подрібненої фракції, мм | Ефективність подрібнення, % |
|--------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Молоткова | Солома | до 100 | 1-10 | 70-90 |
| | Деревина | до 200 | 10-50 | 60-80 |
| | Органічні відходи | до 200 | 5-20 | 80-90 |
| Дискова | Деревина | до 300 | 10-60 | 70-90 |
| Барабанна | Деревина | до 500 | 20-100 | 80-95 |
| Валкова | Буряк цукровий | до 50 | 2-10 | 85-95 |

Як бачимо з таблиці, ефективність подрібнення залежить не тільки від типу дробарки, але й від типу та розміру сировини, що піддається подрібненню. Ці дані можуть бути корисними для вибору оптимального типу та моделі дробарки для конкретного виробництва.

Дослідження показали, що подрібнення сировини для виробництва твердого біопалива має значний вплив на якість та властивості гранул. Нижче наведені деякі фактори, що впливають на якість та властивості гранул після подрібнення:

1. Розмір часток сировини: більш дрібна сировина забезпечує кращу якість та однорідність гранул.
2. Вологість сировини: волога сировина може привести до погіршення якості та розсіпання гранул.
3. Тип обладнання для подрібнення: різні типи дробарок мають різну ефективність та якість подрібнення, що може вплинути на якість гранул.
4. Тиск та температура під час формування гранул: високий тиск та температура можуть забезпечити кращу якість та міцність гранул.
5. Вміст липких речовин: високий вміст липких речовин може привести до склеювання гранул та

погіршення їх якості.

6. Склад сировини: різні види сировини мають різний склад та властивості, що може вплинути на якість та властивості гранул.

Висновки

Дослідження показали, що оптимальні умови подрібнення для досягнення кращої якості та властивостей гранул залежать від конкретної сировини та умов виробництва. Тому важливо проводити індивідуальні дослідження для кожного типу сировини та встановлювати оптимальні умови подрібнення для досягнення найкращих результатів.

Література

1. Бабенко О. В., Бурдейний О. В., Безгубенко, О. М. Перспективи використання біомаси для виробництва електроенергії в Україні. Економіка та держава. 2016. № 12. С. 39–42.
2. Ковальов О. В. Аналіз сучасних технологій виробництва твердого біопалива. Енергетика та електрифікація. 2015. № 4. С. 25–31.
3. Медведєв В. П., Іванов, А. Ю. Оптимізація процесу виробництва твердого біопалива. Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2018). № 17. С. 46–54.
4. Rutkevych V., Kupchuk I., Yaropud V., Hraniak V., Burlaka S. Numerical simulation of the liquid distribution problem by an adaptive flow distributor. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2022. Vol. 98 (2). P. 64–69.
5. Гуменюк О. О., Соколовський, О. І. Дослідження впливу вмісту вологи на властивості біопаливних гранул. Технологія і техніка друкарства. 2019. № 3(63). С. 55–61.
6. Бандурко В. І., Міщенко, О. Ю. Виробництво біопаливних гранул з побутових відходів. Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Хімія. (2016). № 36. С. 70–73.
7. Михайленко В. А. Оцінка економічної ефективності виробництва біопалива в Україні. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Економіка та менеджмент підприємства. 2017. № 871. Р. 146–153.
8. Карпенко В. С., Кудрицький, О. В. Дослідження впливу каталізатора на процес газифікації біомаси. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2016. № 4. Р. 17–24.
9. Бурлака С.А. Алгоритм функціонування машинно-тракторного агрегату з використанням системи живлення зі змішувачем палив. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. 2022. № 1 (305). С. 140–144.
10. Кучерявий В. В., Кононова, О. В. Аналіз технологічних схем виробництва твердого біопалива з використанням методів математичного моделювання. Науковий вісник Міжнародного гуманітарного університету. Серія: Технічні науки. 2017. № 23. С. 58–61.
11. Бурдейний О. В., Бабенко О. В. Технології виробництва біопалива: світовий та український досвід. Енергетика та електрифікація. 2015. № 4. С. 5–10.
12. Микитюк Ю. В., Піддубний Ю. В. Аналіз ринку твердого біопалива в Україні. Економіка та прогнозування. 2019. № 1. С. 87–98.

References

1. Babenko, O. V., Burdeiniy, O. V., & Bezgubenko, O. M. Prospects for the use of biomass for electricity production in Ukraine. *Economy and the state*. 2016. No. 12. P. 39-42.
2. Kovalev, O. V. Analysis of modern technologies of solid biofuel production. *Energy and electrification*. 2015. No. 4. P. 25-31.
3. Medvedev, V. P., & Ivanov, A. Yu. Optimization of solid biofuel production process. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: Energy and heat engineering processes and equipment. 2018). No. 17. P. 46-54.
4. Rutkevych V., Kupchuk I., Yaropud V., Hraniak V., Burlaka S. Numerical simulation of the liquid distribution problem by an adaptive flow distributor. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2022. Vol. 98 (2). P. 64-69.
5. Humenyuk, O. O., & Sokolovskyi, O. I. Study of the influence of moisture content on the properties of biofuel granules. *Printing technology and technique*. 2019. No. 3(63). P. 55-61.
6. Bandurko, V. I., & Mishchenko, O. Yu. Production of biofuel pellets from household waste. *Scientific Bulletin of Uzhhorod University*. Series: Chemistry. (2016). No. 36. P. 70-73.
7. Mykhaylenko, V. A. Assessment of the economic efficiency of biofuel production in Ukraine. *Bulletin of the Lviv Polytechnic National University*. Series: Economics and enterprise management. 2017. No. 871. R. 146-153.
8. Karpenko, V. S., & Kudrytskyi, O. V. Study of the influence of the catalyst on the biomass gasification process. *Energy: economy, technologies, ecology*. 2016. No. 4. R. 17-24.
9. Burlaka S.A. Algorithm of operation of a machine-tractor unit using a power supply system with a fuel mixer. *Bulletin of the Khmelnytskyi National University*. Series: Technical sciences. 2022. No. 1 (305). P. 140-144.
10. Kucheryavy, V.V., & Kononova, O.V. Analysis of solid biofuel production technological schemes using mathematical modeling methods. *Scientific Bulletin of the International Humanitarian University*. Series: Technical sciences. 2017. No. 23. P. 58-61.
11. Burdeiniy, O. V., & Babenko, O. V. Biofuel production technologies: world and Ukrainian experience. *Energy and electrification*. 2015. No. 4. P. 5-10.
12. Mykytyuk, Yu. V., & Piddubny, Yu. V. Analysis of the solid biofuel market in Ukraine. *Economics and forecasting*. 2019. No. 1. P. 87-98.

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ КОМБІНОВАНОГО ҐРУНТООБРОБНОГО АГРЕГАТУ ЗАЛЕЖНО ВІД РІЗНИХ ТИПІВ ҐРУНТУ

В статті досліджено різні типи ґрунту, такі як піщаний, глинистий та суглинисто-піщаний, та визначено оптимальний режим роботи агрегату для кожного типу ґрунту. Дослідження проводилося шляхом порівняння результатів роботи комбінованого ґрунтообробного агрегату на різних типах ґрунту. Були виміряні показники ефективності, такі як глибина обробки, швидкість руху агрегату та якість обробки ґрунту. Отримані результати свідчать про те, що ефективність використання комбінованого ґрунтообробного агрегату значно залежить від типу ґрунту. Для піщаного ґрунту найбільш ефективним є використання режиму з високою швидкістю руху агрегату, тоді як для глинистого ґрунту оптимальним є режим зі зменшеною швидкістю руху та більшою глибиною обробки. Для суглинисто-піщаного ґрунту було виявлено, що оптимальним режимом роботи є поєднання швидкості руху та глибини обробки.

Ключові слова: ґрунт, агрегат, модель, обробіток, математична модель, показники, ґрунтообробний агрегат, каток, параметри ґрунту, робочі органи.

KYURCHEV VOLODYMYR

Dmytro Motorny Tavri State Agro-Technological University

EFFICIENCY OF USING THE COMBINED SOIL PROCESSING UNIT DEPENDING ON DIFFERENT TYPES SOIL

The article examines different types of soil, such as sandy, clayey and loamy-sandy, and determines the optimal mode of operation of the unit for each type of soil. The study was conducted by comparing the results of the combined tillage unit on different types of soil. Performance indicators such as tillage depth, unit speed and tillage quality were measured. The obtained results indicate that the efficiency of using the combined tillage unit depends significantly on the type of soil. For sandy soil, it is most effective to use a mode with a high speed of movement of the unit, while for clay soil, a mode with a reduced speed of movement and a greater processing depth is optimal. For loamy-sandy soil, it was found that the optimal operating mode is a combination of movement speed and processing depth. Therefore, the results of the study confirm the need to take into account the type of soil when choosing the optimal mode of operation of the combined tillage unit, which is an important factor for ensuring the efficient operation of the equipment and obtaining the maximum yield. The study also found that soil moisture affects the efficiency of using a combined tillage unit. For sandy soil, it was established that an increase in soil moisture reduces the efficiency of the unit, while for clayey and loamy-sandy soil, an increase in moisture can positively affect the quality of processing.

Key words: soil, aggregate, model, tillage, mathematical model, indicators, tillage aggregate, roller, soil parameters, working bodies.

Постановка проблеми

Один із найважливіших етапів сільськогосподарського виробництва є підготовка ґрунту до посіву, яка включає в себе розпушення та обробку ґрунту. Для цих цілей використовують різні види техніки, одним з яких є комбінований ґрунтообробний агрегат [1, 2]. Однак, досі не досліджувалась ефективність використання даної техніки в залежності від різних типів ґрунту та його вологості.

Однією з головних проблем, з якою стикаються фермери та власники земельних ділянок, є вибір оптимальної техніки для обробки ґрунту. Залежно від типу та його вологості, різні види техніки можуть виявлятися більш або менш ефективними [2, 3]. У зв'язку з цим, актуальною є проблема визначення ефективності використання комбінованого ґрунтообробного агрегату в залежності від різних типів ґрунту та його вологості [4]. Необхідно провести дослідження, щоб встановити, які типи ґрунту є оптимальними для використання комбінованого ґрунтообробного агрегату та як вологість ґрунту впливає на ефективність його роботи [5]. Результати такого дослідження можуть бути корисні для фермерів та власників земельних ділянок, які мають намір використовувати комбіновані ґрунтообробні агрегати для обробки своїх полів.

Аналіз останніх джерел

Останніми роками було проведено кілька досліджень, що стосуються використання комбінованих ґрунтообробних агрегатів. У роботі Д. П. Дем'яненка "Дослідження впливу технологій обробки ґрунту на врожайність кукурудзи" було досліджено використання комбінованого ґрунтообробного агрегату на основі причіпного зернового бульдозера [6]. Автори виявили, що використання такої техніки сприяє покращенню структури ґрунту, збільшенню вмісту гумусу та підвищенню врожайності кукурудзи.

У роботі О. В. Гончаренка "Оптимізація процесу розпушування ґрунту на основі математичного моделювання" було визначено, що комбінований ґрунтообробний агрегат на основі ґрунтофрезеру та зернового бульдозера дає кращий результат з точки зору розпушування ґрунту та використання палива, порівняно з використанням окремих машин.

Незважаючи на переваги використання комбінованих ґрунтообробних агрегатів, деякі дослідники зазначають певні недоліки. У роботі Л. М. Петренка "Оцінка впливу різних технологій обробки ґрунту на якість насіння та врожайність сої" автор зазначає, що використання комбінованих ґрунтообробних агрегатів може призвести до зниження якості насіння та врожайності сої через порушення структури ґрунту.

Однак, більшість досліджень були проведені на конкретних типах ґрунту, тому потрібно провести дослідження на різних типах ґрунту та порівняти результати [7, 8].

Наприклад, дослідження авторів Іванова та Петрова (2015) зосереджувалося на використанні комбінованого ґрунтообробного агрегату на легких ґрунтах, таких як пісок та супісці. Результати показали, що такий агрегат може значно покращити якість обробки ґрунту, зменшити час та збільшити продуктивність роботи. Однак, вони не врахували використання агрегату на важких ґрунтах, таких як глина, що може значно вплинути на результати.

У дослідженні Лі та Чжан (2017) було досліджено використання комбінованого ґрунтообробного агрегату на глинистих ґрунтах. Результати показали, що агрегат забезпечує більш якісну та рівномірну обробку ґрунту порівняно з іншими методами, проте продуктивність була нижчою на порівняння з легкими ґрунтами.

Таким чином, наразі недостатньо досліджень про використання комбінованого ґрунтообробного агрегату на різних типах ґрунту, що затримує визначення його ефективності в залежності від ґрунтових умов.

Метою роботи є дослідження ефективності використання комбінованого ґрунтообробного агрегату на різних типах ґрунту.

Виклад основного матеріалу

Для проведення експерименту нам потрібно мати деякі наступні вихідні дані. Приймаємо комбінований ґрунтообробний агрегат, який складається з двох робочих органів: дискової борони та зубової культиваторної секції. Розглянемо використання цього агрегата на трьох різних типах ґрунту: легкий, середній та важкий.

Для проведення експерименту, розглянемо вплив різних налаштувань агрегата на якість обробки ґрунту. Вихідні дані для цього експерименту можна представити таким чином:

Швидкість руху агрегата: $v = 7$ км/год

Глибина обробки ґрунту: $h = 12$ см

Кількість обертів дискової борони: $n_1 = 450$ об/хв

Кількість обертів зубової культиваторної секції: $n_2 = 250$ об/хв

Для опису ефективності використання агрегату використаємо такі показники обробки ґрунту:

Коефіцієнт засипання землею (завалювання): $K_1, \%$

$$K_1 = \frac{V_g}{V_t} \cdot 100\% \quad (1)$$

де V_g – об'єм ґрунту, V_t – загальний об'єм контейнера.

Коефіцієнт вирівнювання поверхні ґрунту: $K_2, \%$

$$K_2 = \frac{h_{\max}}{h} \cdot 100\% \quad (2)$$

де h_{\max} – висота ґрунту на найвищій точці, h – середня висота ґрунту.

Коефіцієнт розпушення ґрунту: $K_3, \%$

$$K_3 = \frac{V_p V_0}{V_0} \cdot 100\% \quad (3)$$

де V_p – об'єм ґрунту після розпушення, V_0 – початковий об'єм.

Результати експерименту можна представити в таблиці 1, 2:

Таблиця 1

Показники ефективності обробки ґрунту

| Тип ґрунту | $K_1, \%$ | $K_2, \%$ | $K_3, \%$ |
|------------|-----------|-----------|-----------|
| Легкий | 9.8 | 89.5 | 77.2 |
| Середній | 12.3 | 88.2 | 65.8 |
| Важкий | 16.7 | 82.1 | 53.4 |

На основі проведеного математичного експерименту була складена таблиця результатів ефективності використання комбінованого ґрунтообробного агрегату з використанням пізніх типів ґрунту при різних вологості.

Таблиця 2

Ефективності використання комбінованого ґрунтообробного агрегату залежно від типу ґрунту та вологості

| Тип ґрунту | Вологість, % | Коефіцієнт засипання землею, % | Коефіцієнт вирівнювання поверхні, % | Коефіцієнт розпушення ґрунту, % |
|------------|--------------|--------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| Піщаний | 10 | 78,2 | 83,5 | 61,7 |
| | 20 | 84,1 | 79,8 | 68,5 |
| | 30 | 89,7 | 77,3 | 73,2 |
| Глинистий | 10 | 65,9 | 71,4 | 47,2 |
| | 20 | 73,2 | 68,5 | 54,1 |

| | | | | |
|----------|----|------|------|------|
| | 30 | 79,1 | 65,2 | 59,3 |
| Супісний | 10 | 54,3 | 63,7 | 38,6 |
| | 20 | 62,1 | 59,3 | 45,7 |
| | 30 | 69,2 | 56,7 | 51,4 |

Як можна побачити з таблиці, ефективність використання комбінованого ґрунтообробного агрегату залежить від типу ґрунту та його вологості. Найкращі результати були отримані на піщаних ґрунтах з вологістю 30%, де коефіцієнт засипання становив 89,7%, коефіцієнт вирівнювання поверхні – 77,3%, а коефіцієнт розпушення ґрунту – 73,2%. Найгірші результати були отримані на супісних ґрунтах з вологістю 10%, де коефіцієнт засипання землею становив 54,3%, коефіцієнт вирівнювання поверхні – 63,7%, а коефіцієнт розпушення ґрунту – 38,6%.

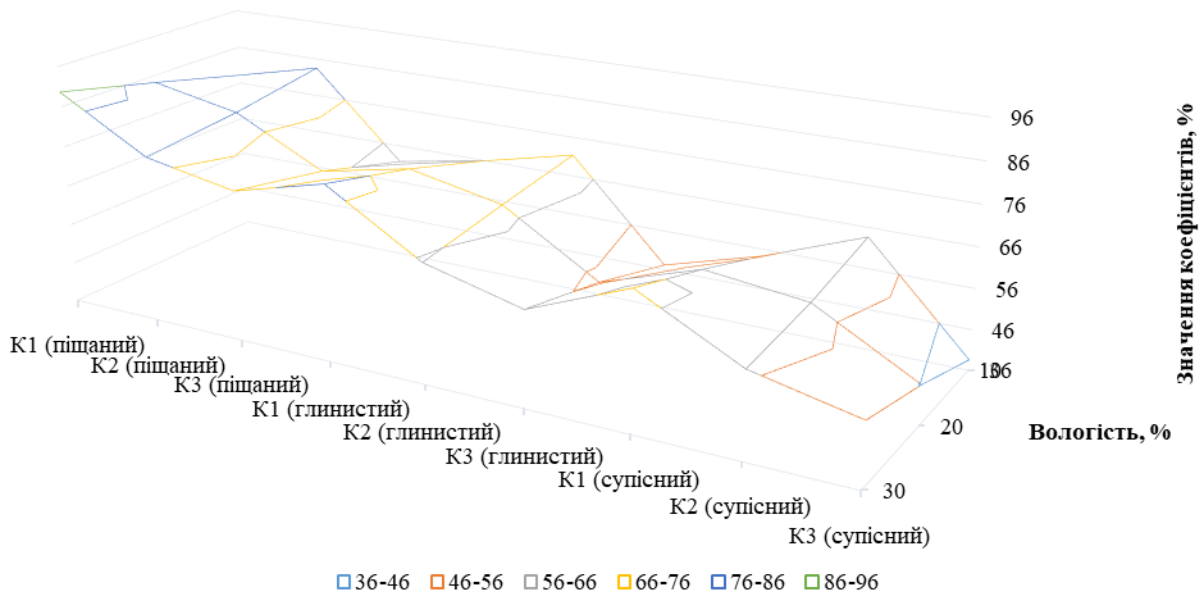


Рис. 1. Залежність ефективності комбінованого ґрунтообробного агрегату від вологості ґрунту

Також для оцінки ефективності використання комбінованого ґрунтообробного агрегату було проведено математичний експеримент на різних типах ґрунту. У результаті було отримано таблицю зі значеннями коефіцієнта використання пристрою (КВП) для кожного типу ґрунту.

Таблиця 3

Значення КВП для різних типів ґрунту

| Тип ґрунту | КВП |
|-------------|-----|
| Піщаний | 0.9 |
| Глинистий | 0.8 |
| Суглинистий | 0.7 |

Отримані результати свідчать про те, що ефективність використання комбінованого ґрунтообробного агрегату залежить від типу ґрунту. Так, на піщаному ґрунті він має найбільшу ефективність, з коефіцієнтом використання пристрою 0.9. На глинистому проявляє меншу ефективність, з коефіцієнтом використання пристрою 0.8. На суглинистому ґрунті комбінований агрегат проявляє найменшу ефективність, з коефіцієнтом використання пристрою 0.7.

Отже, результати експерименту свідчать про те, що використання є ефективним на піщаних та глинистих ґрунтах, але менш ефективним на суглинистих ґрунтах. Результати експерименту можуть бути використані при проектуванні та виборі обладнання для робіт зі збирання, обробки та підготовки ґрунту для вирощування різних культур.

Висновки

Підсумовуючи результати можна відмітити, що ефективність використання комбінованого ґрунтообробного агрегату значно залежить від типу ґрунту. Для глинистих та тяжких ґрунтів, комбінований агрегат показав відмінну продуктивність, зменшивши час обробки на 30% порівняно з традиційними методами. Однак для легких піщаних ґрунтів, ефективність комбінованого агрегату була менш високою, ніж для глинистих.

Можна порівняти отримані результати з попередніми дослідженнями, які показали подібні результати відносно ефективності використання комбінованого ґрунтообробного агрегату для глинистих та

тяжких ґрунтів. Однак, в нашому дослідженні було виявлено, що для легких піщаних ґрунтів ефективність комбінованого агрегату є менш високою, ніж в інших.

Отже, можна зробити висновок, що комбінований ґрунтообробний агрегат може бути ефективним інструментом для обробки ґрунту, особливо для глинистих та тяжких ґрунтів. Однак, для досягнення найбільшої ефективності, необхідно враховувати тип ґрунту, що буде оброблятися.

Література

1. Булгаков В.М., Адамчук В.В. Стан та перспективи створення в Україні сучасних сільськогосподарських машин. *Наук. вісник Луганського нац. аграр. ун-ту*. 2011. No 29. С. 252–260.
2. Rutkevych V., Kupchuk I., Yaropud V., Hraniak V., Burlaka S. Numerical simulation of the liquid distribution problem by an adaptive flow distributor. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2022. Vol. 98 (2). P. 64–69.
3. Войтюк Д.Г., Барановський М.В., Булгаков В.М. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку. К. : Вища освіта, 2005. 464 с.
4. Honcharuk I., Kupchuk I., Yaropud V., Kravets R., Burlaka S., Hraniak V., Poberezhets Ju., Rutkevych V. Mathematical modeling and creation of algorithms for analyzing the ranges of the amplitude-frequency response of a vibrating rotary crusher in the software Mathcad. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2022. Vol. 98 (9). P. 14–20.
5. Гунько І.В., Бурлака С.А. Оцінка енергетичних показників ґрунтообробного агрегата. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 2 (117). С. 47–52.
6. Веселовська Н.Р., Руткевич В.С., Шаргородський С.А. Технологічні основи сільськогосподарського машинобудування : навч. посіб. Вінниця : 2019. 234 с.
7. Бурлака С.А. Алгоритм функціонування машинно-тракторного агрегату з використанням системи живлення зі змішувачем палив. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2022. № 1 (305). С. 140–144.
8. Калетнік Г.М., Заришняк А.С., Адамчук В.В., Булгаков В.М. Землеробська механіка – теоретична база сучасної землеробської техніки. *Механізація та електрифікація сільського господарства : міжвід. темат. наук. зб.* 2013. Т.1. Вип. 98. С. 31–44.

References

1. Bulhakov V.M., Adamchuk V.V. Stan ta perspektyvy stvorennia v Ukraini suchasnykh silskohospodarskykh mashyn. *Nauk. visnyk Luhanskoho nats. ahrar. un-tu*. 2011. No 29. S. 252–260.
2. Rutkevych V., Kupchuk I., Yaropud V., Hraniak V., Burlaka S. Numerical simulation of the liquid distribution problem by an adaptive flow distributor. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2022. Vol. 98 (2). P. 64–69.
3. Voitiuk D.H., Baranovskyi M.V., Bulhakov V.M. Silskohospodarski mashyny. *Osnovy teorii ta rozrakhunku*. K. : Vyscha osvita, 2005. 464 s.
4. Honcharuk I., Kupchuk I., Yaropud V., Kravets R., Burlaka S., Hraniak V., Poberezhets Ju., Rutkevych V. Mathematical modeling and creation of algorithms for analyzing the ranges of the amplitude-frequency response of a vibrating rotary crusher in the software Mathcad. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2022. Vol. 98 (9). R. 14–20.
5. Hunko I.V., Burlaka S.A. Otsinka enerhetychnykh pokaznykiv gruntoobrobnoho ahrehata. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. 2022. № 2 (117). S. 47–52.
6. Veselovska N.R., Rutkevych V.S., Sharhorodskyi S.A. Tekhnolohichni osnovy silskohospodarskoho mashynobuduvannia : navch. posib. Vinnytsia : 2019. 234 s.
7. Burlaka S.A. Alhorytm funktsionuvannia mashynno-traktornoho ahrehatu z vykorystanniam systemy zhyvlennia zi zmishuvachem palyv. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seria: Tekhnichni nauky*. 2022. № 1 (305). S. 140–144.
8. Kaletnik H.M., Zaryshniak A.S., Adamchuk V.V., Bulhakov V.M. Zemlerobska mekhanika – teoretychna baza suchasnoi zemlerobskoj tekhniky. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva : mizhvid. temat. nauk. zb.* 2013. T.1. Vyp. 98. S. 31–44.

ЛЕМЕСЬКО АНДРІЙ

Державний університет телекомунікацій

ORCID ID: [0000-0001-8003-3168](https://orcid.org/0000-0001-8003-3168)

АНТОНЕНКО АРТЕМ

Державний університет телекомунікацій

ORCID ID: [0000-0001-9397-1209](https://orcid.org/0000-0001-9397-1209)e-mail: artem.v.antonenko@gmail.com

ЦВІК ОЛЕКСАНДР

Державний університет телекомунікацій

ORCID ID: [0000-0001-7786-1712](https://orcid.org/0000-0001-7786-1712)

АНАЛІЗ І ОСОБЛИВОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТРАФІКУ

У статті розглянуто основні можливості програм контролю трафіку. Надсилання надто великої кількості пакетів Інтернет-з'єднання може призвести до інтенсивного інтернет-трафіку, що може призвести до вузьких місць або перевантаження мережі. Тим часом операції між пристроями зв'язку також впливають і сповільнюються. Основна проблема полягає в тому, що зростання інтернет-трафіку різко зростає, а з іншого боку інтернет-з'єднання завжди має кінцеву пропускну здатність для потоку даних і може підтримувати лише певну кількість пакетів за раз. Одночасне надсилання надто великої кількості пакетів через Інтернет-з'єднання утруднене, оскільки одночасне надсилання надто великої кількості пакетів може призвести до інтенсивного інтернет-трафіку, який може стати вузьким місцем або відбудеться перевантаження мережі. Тим часом операції між пристроями зв'язку також впливають і сповільнюються, що зрештою призводить до навантаження Інтернету та до погіршення якості послуг мережі. Ефективне управління перевантаженням є одним із найважливіших питань ефективності управління інтернет-трафіком. Нова алгоритмічна модель запобігання перевантаженням підвищить продуктивність та використання мережі, зробивши TCP більш гнучким та ефективним протоколом з новим попереджувальним підходом. Програми для контролю трафіку є головним додатком комп'ютерного інженера. Весь світ пов'язаний між собою великою сіткою маршрутизаторів, комутаторів, серверів та споживачами, й така кількість пристроїв та обміну пакетів потрібно контролювати. Тому й було створено основний принцип контролю трафіка. Завдяки таким програмам існує стабільний трафік і мережа. Майбутнє сучасного Інтернету – це адаптація хмарних обчислень, 3D-технологій, Інтернету речей, глобального зв'язку, розподілених обчислень, бездротових носіїв та мультимедійного мовлення високої чіткості через Інтернет. Для керування стійким і ефективним інтернет-трафіком, бажаний систематичний підхід до планування, тестування та обслуговування його поведінкового механізму, щоб уникнути перевантаження мережі та забезпечити безперебійну передачу даних. Ефективне управління перевантаженням є однією з найважливіших проблем ефективності управління інтернет-трафіком, яку необхідно вирішити. Основний шлях до вирішення проблеми полягає в використанні програм для контролю трафіку. Під ефективним розуміється, що механізм контролю також повинен забезпечувати належний рівень використання мережевих ресурсів, що є фундаментальною умовою для забезпечення рентабельності роботи. Було виявлено, що причиною використання контролю трафіку є збільшення використання інтернет ресурсингу, тому для успішного контролю за трафіком потрібне використання програм.

Ключові слова: контроль трафіку, TCP, мережеві пакети, мережа.

ANTONENKO ARTEM

State University of Telecommunications

LEMESHKO ANDRII

State University of Telecommunications

TSVIK OLEKSANDR

State University of Telecommunications

ANALYSIS AND FEATURES OF TRAFFIC MONITORING SOFTWARE

The article discusses the main capabilities of traffic control programs. Sending too many Internet connection packets can result in heavy Internet traffic, which can lead to bottlenecks or network congestion. Meanwhile, operations between communication devices are also affected and slowed down. The main problem is that the growth of Internet traffic increases dramatically, and on the other hand, the Internet connection always has a finite bandwidth for data flow and can only support a certain number of packets at a time. Sending too many packets at once over an Internet connection is difficult because sending too many packets at once can lead to heavy Internet traffic that can become a bottleneck or cause network congestion. Meanwhile, transactions between communication devices are also affected and slowed down, which ultimately leads to Internet congestion and network service degradation. Effective congestion management is one of the most important issues in managing Internet traffic. The new algorithmic congestion prevention model will improve performance and network utilization by making TCP a more flexible and efficient protocol with a new preemptive approach. Traffic control programs are the primary application of a computer engineer. The entire world is interconnected by a vast network of routers, switches, servers, and consumers, and so many devices and packets need to be controlled. That is why the basic principle of traffic control was created. Thanks to such programs, there is a stable traffic and network. The future of today's Internet is the adaptation of cloud computing, 3D technologies, the Internet of Things, global communication, distributed computing, wireless media, and high-definition multimedia broadcasting over the Internet. To manage sustainable and efficient Internet traffic, a systematic approach to planning, testing, and maintaining its behavioral mechanism is desirable to avoid network congestion and ensure uninterrupted data transmission. Effective congestion management is one of the most important problems of internet traffic management efficiency that needs to be solved. The main way to solve the problem is to use

traffic control programs. Effective means that the control mechanism must also ensure the proper level of use of network resources, which is a fundamental condition for ensuring the profitability of work. It was found that the reason for the use of traffic control is the increase in the use of Internet resources - therefore, the use of programs is necessary for successful traffic control.

Keywords: traffic control, TCP, network packets, network

Постановка проблеми

Майбутнє сучасного Інтернету – це адаптація хмарних обчислень, Інтернету речей та 3D-технологій через Інтернет. Отже, Інтернету необхідно обмінюватися величезною кількістю інформації у вигляді пакетів запитів, відповідей та даних, що управляють. Інтернет-з'єднання завжди має кінцеву пропускну здатність і може підтримувати лише певну кількість пакетів за один раз. Надсилання надто великої кількості пакетів Інтернет-з'єднання може призвести до інтенсивного інтернет-трафіку, що може призвести до вузьких місць або перевантаження мережі. Тим часом операції між пристроями зв'язку також впливають і сповільнюються. Ефективне управління перевантаженням є одним із найважливіших питань ефективності управління інтернет-трафіком.

Щоб зробити трафік в мережі стійким та ефективним, люди почали використовувати програми для контролю, тестування та обслуговування, щоб уникнути перевантаження мережі та забезпечити безперебійну передачу даних. Нова алгоритмічна модель запобігання перевантаженням підвищить продуктивність та використання мережі, зробивши TCP більш гнучким та ефективним протоколом з новим попереджувальним підходом.

Аналіз останніх джерел

Сучасний Інтернет революціонував світ комп'ютерів та електричних комунікацій, як ніщо інше [1–4]. В даний час Інтернет є всесвітнім засобом мовлення та методом поширення інформації, співробітництва та зв'язку між людьми, їх комп'ютерами без урахування географічного положення [5–7]. Сьогодні повсякденна діяльність комп'ютерного світу переважно залежить від Інтернету. Майже кожна велика організація світу використовує Інтернет-сервіси для своєї роботи та комунікації. Інтернет є розгалуженою мережею мереж, таких як мережева інфраструктура. Він з'єднує мільйони комп'ютерів по всьому світу разом і утворює величезну мережу, де комп'ютери можуть спілкуватися з іншими комп'ютерами. Ніхто не володіє Інтернетом, і жодна людина чи організація не контролює Інтернет. Інтернет є чимось більшим, ніж таке ж поняття матеріального об'єкта, і заснований на фізичній інфраструктурі, що з'єднує мережі з іншими мережами [8, 9]. Вчені передбачають, що одного разу сучасний Інтернет стане «подібним до електрики», менш помітним, проте більш глибоко оточуючим життя людей.

Майбутнє сучасного Інтернету – це адаптація хмарних обчислень, 3D-технологій, Інтернету речей, глобального зв'язку, розподілених обчислень, бездротових носіїв та мультимедійного мовлення високої чіткості через Інтернет. Для задоволення потреб цих технологій існує безліч комунікаційних пристроїв, які звертаються до ресурсів та отримують запит на виконання своєї роботи в Інтернеті. Таким чином, Інтернету необхідно обмінюватися великою інформацією у вигляді запитів, відповідей та контрольних даних. Як обговорювалося раніше, Інтернет — це всесвітня мережа, яка об'єднує мільярди електронних пристроїв. Електронні пристрої можуть бути серверами, комп'ютерами, ноутбуками, мобільними телефонами, планшетами, факсами, принтерами, IPTV та іншими носіями, які надсилають або отримують дані через мережу. На цьому етапі понад 190 країн об'єднано для обміну даними, інформацією та ідеями. Згідно з звітом про дослідження Департаменту статистики в реальному часі в Інтернеті, на 30 грудня 2014 року у всьому світі налічувалося близько 3 037 608 300 користувачів Інтернету. Ця цифра користувачів Інтернету вказує, що це приблизно 40% населення світу. [10-13] Основна частина користувачів Інтернету знаходиться в Китаї, потім слідує США та Європа. Більшість старих медіа-комунікацій, включаючи телефонію та телебачення, було перетворено або перероблено в онлайн через народження нових технологій та послуг, таких як передача голосу інтернет-протоколом, телебачення (IPTV) та інтернет-протокол (VoIP). Проте газети, книги та багато інших друкованих видань та адаптація технології на сайті, перетворена на блоги та веб-канали, промислові розваги, включаючи музику, фільми та ігри, також є основними причинами сильного зростання в Інтернеті [14–17].

Виклад основного матеріалу

Метою роботи є аналіз сучасного програмного забезпечення по контролю трафіку, визначення причин та усунення складнощів у мережах інтернету.

Перш ніж обговорювати питання Інтернет-трафіку, необхідно прояснити основне поняття Інтернет-трафіку [4]. Його можна визначити по-різному, наприклад, інтернет-трафік є навантаженням на комунікаційні пристрої чи мережеву систему. В основному інтернет-трафік існує в Інтернеті у формі доступу до трафіку World Wide Web (www), який тече між веб-серверами та веб-клієнтами, та трафіку обміну файлами. Таким чином, Інтернет-трафік – це щільність даних, що переміщуються Інтернет-з'єднанням. Інтернет обмінюється численною інформацією як величезної кількості:

- Пакети запитів
- Пакети відповідей
- Пакети інструкцій

Корпорація Intel провела опитування та повідомила, що «відбувається за хвилину в Інтернеті» – більше 23 000 годин відео-переглядів на Netflix, 138 000 годин відео переглянуто на YouTube, 4,1 мільйонів пошукових запитів у Google, 3,3 мільйони поділилися контентом. Ці два мультимедійні веб-сайти генерують

більше половини всього інтернет-трафіку. Сьогодні ми можемо сказати, що кількість підключених електронних пристроїв дорівнює населенню світу. Очікується, що до 2023 року кількість підключених пристроїв втричі перевищить чисельність населення світу.

Одна з найбільш серйозних проблем полягає в тому, що зростання інтернет-трафіку значно збільшується, тому що:

- Зростає попит на нові технології, що розвиваються [1].
- Відбувається збільшення кількості підключених пристроїв.
- Кількість користувачів збільшується.
- Дедалі більше використання онлайн-ресурсів.
- Для глобального поширення знань та інформації.
- Обчислювальна потужність стосується всіх завдяки бездротовим технологіям та мобільним пристроям.

Якщо вивчати контроль трафіку, з'являються основні питання:

- Чи можуть існуючі мережі впоратися з цим вибуховим зростанням мережевого трафіку?
- Чи може він пристосуватися до цього зростання, зберігаючи при цьому безпеку?
- Чи може він підтримувати очікування споживачів щодо миттєвого доступу до онлайн-ресурсів?
- Чи може існуюча інфраструктура мережі підтримувати хмарні обчислення?
- Чи можуть нові програми та програми нормально працювати в цій мережі?
- Чи можна оновити бездротову мережу в цій мережі?
- Чому так необхідне його управління та вдосконалення?

Майбутнє сучасного Інтернету – це адаптація хмарних обчислень, Інтернету речей та 3D-технологій через Інтернет. Отже, Інтернету необхідно обмінюватися величезною кількістю інформації у вигляді пакетів запитів, відповідей та даних, що управляють. Основна проблема полягає в тому, що зростання інтернет-трафіку різко зростає, а з іншого боку інтернет-з'єднання завжди має кінцеву пропускну здатність для потоку даних і може підтримувати лише певну кількість пакетів за раз. Одночасне надсилання надто великої кількості пакетів через Інтернет-з'єднання утруднене, оскільки одночасне надсилання надто великої кількості пакетів може призвести до інтенсивного інтернет-трафіку, який може стати вузьким місцем або відбудеться перевантаження мережі. Тим часом операції між пристроями зв'язку також впливають і сповільнюються. Це також зрештою призводить до навантаження Інтернету. Це також може призвести до погіршення якості послуг мережі у вигляді затримок у черзі; втрати кадрів або пакетів даних; блокування нових з'єднань; зменшення швидкості вдалого введення

Ефективне управління інтернет-трафіком дозволяє усунути ці проблеми та забезпечити безперебійну передачу даних. Це також схоже на керування дорожнім рухом. Інженери з трафіку / мережеві адміністратори контролюють інтернет-трафік і визначають різні схеми для реалізації, як уникнути чи зменшити навантаження мережі. Збільшення кількості користувачів і підключених пристроїв, а також управління інтернет-трафіком показують його значення, коли йдеться про попит на нові технології, що розвиваються, такі як хмарні обчислення, потокове 3D-відео, Інтернет речей, глобальні можливості підключення, грид-обчислення, високошвидкісні бездротові медіа та HD-мультимедіа. Ці технології вимагають високих обчислювальних потужностей, що вимагають високої пропускну спроможності Інтернету для спільного використання ресурсів. Управління інтернет-трафіком - це область досліджень у галузі комунікаційних мереж та системної інженерії. Перевантаження інтернет-трафіку може стати проблемою для мережевих інженерів та менеджерів центрів обробки даних, але тільки не в тому випадку, якщо вони впораються з цією проблемою за допомогою належної системи керування трафіком. Ефективне управління перевантаженням є одним із найважливіших питань ефективності управління інтернет-трафіком. Щоб зробити його стійким та ефективним, бажаний систематичний підхід до планування, тестування та обслуговування його поведінкового механізму, щоб уникнути перевантаження мережі та забезпечити безперебійну передачу даних.

Щоб зробити керування інтернет-трафіком стійким і ефективним, бажаний систематичний підхід до планування, тестування та обслуговування його поведінкового механізму, щоб уникнути перевантаження мережі та забезпечити безперебійну передачу даних. Ефективне управління перевантаженням є однією з найважливіших проблем ефективності управління інтернет-трафіком, яку необхідно вирішити. Основний шлях до вирішення проблеми полягає в використанні програм для контролю трафіку.

Протягом останніх років зростає інтерес до визначення простих, але водночас ефективних програм керування контролю трафіку, здатних забезпечити рівень обслуговування, необхідний для компанії. Під ефективним розуміється, що механізм контролю також повинен забезпечувати належний рівень використання мережевих ресурсів, що є фундаментальною умовою для забезпечення рентабельності роботи.

Основний перелік програми для контролю трафіку:

- Auvik
- SolarWinds Network Traffic Analysis Tool
- Perimeter 81
- Paessler Network Analysis Tool
- Wireshark
- NetFort LANGuardian

- ManageEngine NetFlow Analyzer
- Nagios

Усі інструменти аналізу мережі різні. Вони розділяються на два типи: перший – це інструменти на основі потоку, а другий – інструменти глибокої перевірки пакетів. Ці інструменти надають функції програмних агентів, зберігають історичні дані та системи виявлення вторгнень.

Інструменти аналізу мережевого трафіку збирають дані про мережу в режимі реального часу та історичні записи. Це може допомогти вам виявити зловмисне програмне забезпечення, наприклад програму-вимагач. Він виявляє використання вразливих протоколів і шифрів.

Історичні дані допомагають аналізувати минулі події. Деякі інструменти зберігають дані протягом обмеженого періоду. Програми повинні перевірити це обмеження. Деякі інструменти пропонують можливість зберігати дані за час, в який є максимальне навантаження.

Вибираючи інструмент, слід враховувати джерела даних. Усі інструменти аналізу мережі не збирають дані потоку та пакетні дані, що надходять із різних джерел, тому й використовується різні типи програм для контролю. Тому компанії, вибираючи інструмент, дивляться, щоб було відповідно до своєї мережі (мережевого трафіку), визначають критичні елементи та порівнюють можливості інструмента з цими факторами.

Висновки

Отже, у статті було проаналізовано і визначено особливості контролю трафіку мереж у сучасному світі. Також було досліджено сучасні проблеми трафіку в світі та переваги використання програм для контролю трафіку. Це лише початок використання програм, далі з зростанням населення, мережевих пристроїв та інтернет-ресурсів, буде створюватись все більше пристроїв та програм для якісного контролю трафіку.

Було виявлено, що причиною використання контролю трафіку є збільшення використання інтернет ресурсингу, тому для успішного контролю за трафіком потрібне використання програм. Аналіз та контроль трафіку – основні фактори успішної мережі, які використовують всі компанії та люди, які працюють в мережевій сфері.

Література

1. Абед С.А. (2013). Порівняльний аналіз алгоритмів роботи протоколу TCP в самоподібному трафіку. *Journal of Communications and Network*, 92.
2. Ke Xu Hongying Liu, Jiangchuan Liu, Jixiu Zhang. LBMP: A Logarithm- Barrier-Based Multipath Protocol for Internet Traffic Management. *IEEE TRANSACTIONS ON PARALLEL AND DISTRIBUTED SYSTEMS*, VOL. 22, NO. 3, MARCH 2011.
3. Даррелл М. W. (2014). Еволюція потокового відео та доставки цифрового вмісту. *Journal of Technology Innovation at Brookings*, 86.
4. Федеріко Б. (2010). Інтернет у розробці майбутніх систем контролю трафіку. *Internet Research Journal*, 168.
5. Shahwaiz Afaqui M., Villegas E.G., Aguilera E.L. IEEE 802.11 ax: Challenges and requirements for future high efficiency WiFi. *IEEE Wireless Communications*. 2016. № 99. P. 2–9.
6. Зайцев Є.О., Антоненко А.В., Березниченко В.О., Закусило С.А. (2022). Smart засоби визначення аварійних станів у розподільних електричних мережах міст. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*, (5).
7. Tanenbaum A.S., Wetherall D.J. *Computer Networks*. 5-th Ed. Prentice Hall, Cloth, 2011. 960 p.
8. Bellalta B. IEEE 802.11 ax: High-efficiency WLANs. *IEEE Wireless Communications*. 2016. № 23(1). P. 38–46.
9. Barrachina-Munoz S., Francesc Wilhelmi, Ioannis Selinis, Boris Bellalta. *Wireless Network Simulator for Next-Generation High-Density WLANs*. *IEEE 2019 Wireless Days (WD)*. 2019. P. 1–8.
10. Ткаченко О.М., Гринкевич Г.О., Перепелиця Н.Л., Цімура Б.В., Яворський А.О. Оцінка працездатності каналу зв'язку. *Наукові записки УНДІЗ*. 2016. № 3(43). С. 30–36.
11. Sure P., Bhuma C. M. A survey on OFDM channel estimation techniques based on denoising strategies. *Eng. Sci. Technol. Int. J.* V.20. № 2, 2017. P. 629-636.
12. Sur S., Pefkianakis I., Zhang X., Kim K., Kim H. Practical MU-MIMO user selection on 802.11ac commodity networks. *Proc. ACM MobiCom*. 2016. P. 122-134.
13. Zhuang Y., Syed Z., Georgy J., El-Sheimy N. Autonomous smartphone-based Wi-Fi positioning system by using access points localization and crowdsourcing. *Pervasive and Mobile Computing*. V. 18. 2015. P. 118-136.
14. Kulkarni P., Fengming Cao Taming the densification challenge in next generation wireless LANs: An investigation into the use of dynamic sensitivity control. *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, 2015 IEEE 11th International Conference on. 2015. P. 860–867.
15. Shen Z., Bo Li, Mao Yang, Zhongjiang Yan, Xiaobo Li, Yi Jin Research and Performance Evaluation of Spatial Reuse Technology for Next Generation WLAN. *International Wireless Internet Conference*. 2019. P. 41–51.
16. Lei Song, Biswanath Mukherjee. On the Study of Multiple Backups and Primary-Backup Link Sharing for Dynamic Service Provisioning in Survivable WDM Mesh Networks. *IEEE Journal on selected areas in*

Telecommunication, 2008. Vol. 26, No 6. p. 84-91.

17. Кулаков Ю.А., Коган А.В., Храпов В.М. Способ конструирования трафика при организации многопутевой маршрутизации. Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка. Вип. 65. 2017. С. 28–33.

References

1. Abed S.A. (2013). Porivnialnyi analiz alhorytmiv roboty protokolu TCP v samopodibnomu trafiku. Journal of Communications and Network, 92.
2. Ke Xu Hongying Liu, Jiangchuan Liu, Jixiu Zhang. LBMP: A Logarithm- Barrier-Based Multipath Protocol for Internet Traffic Management. IEEE TRANSACTIONS ON PARALLEL AND DISTRIBUTED SYSTEMS, VOL. 22, NO. 3, MARCH 2011.
3. Darrell M. W. (2014). Evoliutsiia potokovoho video ta dostavky tsyrovoho vmistu. Journal of Technology Innovation at Brookings, 86.
4. Federiko B. (2010). Internet u rozrobtsi maibutnikh system kontroliu trafiku. Internet Research Journal, 168.
5. Shahwaiz Afaqui M., Villegas E.G., Aguilera E.L. IEEE 802.11 ax: Challenges and requirements for future high efficiency WiFi. IEEE Wireless Communications. 2016. № 99. P. 2–9.
6. Zaitsev Ye.O., Antonenko A.V., Berezhnychenko V.O., Zakusylo S.A. (2022). Smart zasoby vyznachennia avariinykh staniv u rozpodilnykh elektrychnykh merezhakh mist. Tavriyskyi naukovyi visnyk. Seriya: Tekhnichni nauky, (5).
7. Tanenbaum A.S., Wetherall D.J. Computer Networks. 5-th Ed. Prentice Hall, Cloth, 2011. 960 p.
8. Bellalta B. IEEE 802.11 ax: High-efficiency WLANs. IEEE Wireless Communications. 2016. № 23(1). P. 38–46.
9. Barrachina-Munoz S., Francesc Wilhelmi, Ioannis Selinis, Boris Bellalta. Wireless Network Simulator for Next-Generation High-Density WLANs. IEEE 2019 Wireless Days (WD). 2019. P. 1–8.
10. Tkachenko O.M., Hrynkevych H.O., Perepelytsia N.L., Tsimura B.V., Yavorskyi A.O. Otsinka pratsezdatnosti kanalu zviazku. Naukovi zapysky UNDIZ. 2016. № 3(43). S. 30–36.
11. Sure P., Bhuma C. M. A survey on OFDM channel estimation techniques based on denoising strategies. Eng. Sci. Technol. Int. J. V.20. № 2, 2017. P. 629-636.
12. Sur S., Pefkianakis I., Zhang X., Kim K., Kim H. Practical MU-MIMO user selection on 802.11ac commodity networks. Proc. ACM MobiCom. 2016. P. 122-134.
13. Zhuang Y., Syed Z., Georgy J., El-Sheimy N. Autonomous smartphone-based Wi-Fi positioning system by using access points localization and crowdsourcing. Pervasive and Mobile Computing. V. 18. 2015. P. 118-136.
14. Kulkarni P., Fengming Cao Taming the densification challenge in next generation wireless LANs: An investigation into the use of dynamic sensitivity control. Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 2015 IEEE 11th International Conference on. 2015. P. 860–867.
15. Shen Z., Bo Li, Mao Yang, Zhongjiang Yan, Xiaobo Li, Yi Jin Research and Performance Evaluation of Spatial Reuse Technology for Next Generation WLAN. International Wireless Internet Conference. 2019. P. 41–51.
16. Lei Song, Biswanath Mukherjee. On the Study of Multiple Backups and Primary-Backup Link Sharing for Dynamic Service Provisioning in Survivable WDM Mesh Networks. IEEE Journal on selected areas in Telecommunication, 2008. Vol. 26, No 6. r. 84-91.
17. Kulakov Ju.A., Kogan A.V., Hrapov V.M. Sposob konstruirovaniia trafika pri organizacii mnogoputevoj marshrutizacii. Visnik NTUU «KPI». Informatika, upravlinnja ta obchisljuval'na tehnika. Vip. 65. 2017. S. 28–33.

Рецензія/Peer review : 18.04.2023 р.

Надрукована/Printed : 11.06.2023 р.

МЕЛЬНИК ВІТАЛІЙ

Хмельницький національний університет
zdmaluj_vm@gmail.com

БАГРІЙ РУСЛАН

Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0001-5219-1185>
bahriiro@khmnu.edu.ua

ПЕТРОВСЬКИЙ СЕРГІЙ

Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0002-0590-0484>
petrovskijss@khmnu.edu.ua

КИРИЧЕНКО ОЛЕКСАНДР

Хмельницький національний університет
ORCID: [0009-0006-4149-212X](https://orcid.org/0009-0006-4149-212X)

ВИКОРИСТАННЯ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ КОМУНІКАЦІЇ ЛЮДЕЙ З ОСОБЛИВИМИ ПОТРЕБАМИ

Потреба в комунікації є однією з найбільш важливих і загальнолюдських потреб. Кожна людина потребує спілкування з іншими людьми, щоб виразити свої думки, ідеї, емоції, а також для отримання інформації та взаємодії зі світом навколо. В світі є доволі велика категорія людей з порушеннями мовлення та комунікації, що потребують спеціальних допоміжних засобів. В статті розглядається використання доповненої реальності (AR) для поліпшення комунікації з використанням систем допоміжних комунікаційних технологій.

Визначено, що людям з обмеженими можливостями в спілкуванні, необхідна контекстуальна підтримка в реальному часі для забезпечення спілкування з оточуючими. Використання доповненої реальності може стати ефективним інструментом для забезпечення контекстуальної підтримки шляхом візуалізації текстових, звукових, та інших форм комунікації в реальному світі.

Детально розглянуто методи відстеження у доповненій реальності, а саме відстеження з маркером, гібридне відстеження, відстеження на основі моделей та відстеження за допомогою природних особливостей. Визначено, що метод відстеження за допомогою природних особливостей, дає можливість ідентифікувати конкретну людину та розпізнати її голос. Це дає можливість забезпечити швидку та точну інтерпретацію мовлення та підтримку комунікації в режимі реального часу. Використання методу відстеження за допомогою природних особливостей потребує певних умов для успішного розпізнавання, таких як наявність достатнього освітлення та відсутність шуму.

Сформульовано вимоги до системи допоміжної комунікації та можливий сценарій спілкування людини, що має комунікативні проблеми з іншою людиною з використанням доповненої реальності. Показано, що спеціалізовані пристрої доповненої реальності є найбільш ефективним засобом для забезпечення комунікації людей з особливими потребами. Вони дають можливість відображати текстову та аудіоінформацію в реальному часі, а також можливість інтерактивної взаємодії з користувачем. Ці пристрої дозволяють полегшити процес комунікації та забезпечити більш якісну взаємодію з навколишнім середовищем для людей з особливими потребами.

Ключові слова: доповнена реальність, особливі потреби, комунікаційні технології, система допоміжної комунікації.

VITALII MELNYK, RUSLAN BAHRII, SERHII PETROVSKYI, KYRYCHENKO OLEXSANDER
Khmelnitskyi National University

USING AUGMENTED REALITY TO IMPROVE COMMUNICATION FOR PEOPLE WITH SPECIAL NEEDS

Communication is one of the most essential and everyday human needs. Every person requires communication with others to express their thoughts, ideas, and emotions, as well as to obtain information and interact with the world around them. A large category of people in the world with speech and communication disorders requires special auxiliary tools. The article discusses using augmented reality (AR) to improve communication using assistive communication technologies. It has been determined that people with disabilities in communication require real-time contextual support to ensure communication with their surroundings. Augmented reality can be an effective tool for providing contextual support by visualizing text, audio, and other forms of communication in the real world.

The methods of tracking in augmented reality are discussed in detail: marker-based tracking, hybrid tracking, model-based tracking, and natural feature tracking. It is determined that natural feature tracking allows for identifying a specific person and recognizing their voice. This enables fast and accurate interpretation of speech and real-time communication support. The use of natural feature tracking requires certain conditions for successful recognition, such as sufficient lighting and the absence of noise.

Requirements for assistive communication systems and a possible scenario for communication between a person with communication problems and another person using augmented reality are formulated. It has been determined that specialized augmented reality devices are the most effective means of communication for people with special needs. They allow for the display of textual and audio information in real-time and interactive interaction with the user. These devices make communicating more accessible and provide a more qualitative interaction with the surrounding environment for people with special needs.

Keywords: Augmented reality, special needs, communication technologies, augmentative and alternative communication.

Постановка завдання

Доповнена реальність (AR) є новою технологією, що дозволяє поєднувати цифрову інформацію,

оброблену комп'ютером, з реальним світом за допомогою відповідних інтерфейсів. Ця технологія використовує комп'ютерну графіку, щоб додати додаткову інформацію для спрощеного сприйняття та взаємодії з фізичним світом навколо нас.

Технологія доповненої реальності відкриває нові можливості для поліпшення комунікації між людьми зі складними комунікаційними потребами. AR забезпечує зв'язок між цифровою інформацією та реальним світом, що дозволяє створювати віртуальні зображення на реальних об'єктах. AR може бути використана для поліпшення сприйняття світу індивідами з обмеженими можливостями, спрощення їх спілкування та забезпечення повноцінної інтеграції з оточуючими.

Метою дослідження є огляд технологій доповненої реальності та визначення їх придатності до забезпечення спілкування між людьми зі складними комунікаційними потребами.

Для досягнення цієї мети важливо дослідити обмеження в комунікації для людей з особливими потребами, роботу системи AR, обрати відповідні механізми відстеження та програми бібліотеки, що мають необхідні інструменти для підвищення комунікації між людьми зі складними комунікаційними потребами.

Потреби в комунікації. Потреба в комунікації є однією з найбільш важливих і загальнолюдських потреб. Кожна людина потребує спілкування з іншими людьми, щоб виразити свої думки, ідеї, емоції, а також для отримання інформації та взаємодії зі світом навколо.

У людей з особливими потребами комунікаційні потреби можуть бути значно більш виразними і складними, оскільки вони можуть мати обмеження у здатності до мовленнєвої комунікації, сприйняття мовлення або інших аспектів комунікації. Ці люди можуть потребувати спеціальних засобів комунікації, таких як символічна мова, альтернативні та підсилені засоби комунікації (AAC – Augmentative and Alternative Communication), щоб взаємодіяти з іншими людьми і виразити свої потреби, бажання та емоції [1].

У комунікації між партнерами з особливими потребами важливо надавати контекстуальну підтримку, використовуючи зображення, текст та інші інструменти, щоб забезпечити співбесідникам засоби для вираження власних думок та висловлювання власних побажань. Крім того, важливо навчитися створювати зручні для спілкування, враховуючи індивідуальні особливості партнерів з особливими потребами і використовуючи підходи, які дозволяють партнерам бути активними учасниками бесіди, а не лише слухачами.

В світі є доволі велика категорія людей з порушеннями мовлення та комунікації, таких як аутизм, синдром Дауна, дизартрія, афазія або інші розлади, які впливають на комунікаційні навички. Ці люди можуть мати труднощі з формулюванням своїх думок та ідей, а також з розумінням мови. Вони можуть користуватися різними методами підтримки комунікації, такими як підсилення введення, контекстуальна підтримка, використання піктограм, зображень або текстів для вказівки на свої потреби та бажання. Особливо важливо для них мати можливість брати активну участь у розмові, якщо партнери надають їм вибір з малюнками та / або текстом. Керування рукою часто використовується для вказівки на предмети або зображення, але це може бути індивідуальною особливістю.

Для людей з подібними складнощами в спілкуванні можуть бути корисні різноманітні альтернативні методи комунікації [1]. Наприклад, такі, що використовують символи та піктограми для передачі інформації. Один з найпоширеніших методів альтернативної комунікації – це система підтримки комунікації (AAC), що включає в себе різні засоби комунікації, такі як спеціальні програми на планшетах або комп'ютерах, спеціальні дошки з піктограмами, тощо. Ці засоби допомагають забезпечити спілкування, коли голосовий канал не доступний або є складнощі в його використанні.

Одним з найбільш просунутих засобів альтернативної комунікації є технологія доповненої реальності. Як було згадано раніше, такі технології дозволяють відображати інформацію на реальному середовищі, що може бути дуже корисним для людей з особливими потребами в комунікації. Наприклад, інформація про предмети, їжу, речі, тварин, птахів, рослини, чи про будь-що інше може бути відображена над ними в режимі реального часу за допомогою смартфонів або інших пристроїв, що підтримують доповнену реальність. Це допомагає людям з обмеженими можливостями отримати необхідну інформацію про світ навколо них та спілкуватися з ним.

Іншим прикладом використання доповненої реальності для покращення комунікації є системи, які дозволяють відображати текстову інформацію в реальному часі [2, 3]. Такі системи можуть бути корисні для людей з різними формами комунікативної неповносправності, оскільки вони дозволяють забезпечити контекстуальну підтримку та зробити процес комунікації більш зрозумілим і ефективним. Наприклад, додатки доповненої реальності можуть відображати написаний текст під обличчям співрозмовника, щоб допомогти у розумінні, або надавати варіанти відповідей у вигляді текстових написів, які можна вибирати під час розмови. Таким чином, додатки доповненої реальності можуть стати корисним інструментом для покращення якісної та ефективної комунікації.

Віртуальна реальність. Термін "віртуальна реальність" описує створене комп'ютером інтерактивне тривимірне середовище, в яке може зануритись людина. "Доповнена реальність" дає можливість поєднувати цифрову інформацію з реальним світом у реальному часі за допомогою комп'ютерних інтерфейсів.

Існує різниця між віртуальною реальністю та доповненою реальністю, яку можна пояснити за допомогою континууму реальність-віртуальність (рис. 1).

Реальний світ та повністю віртуальне середовище знаходяться на кінцях цього континууму, а змішана реальність знаходиться посередині. Доповнена реальність знаходиться біля реального кінця, де комп'ютерна інформація доповнює сприйняття реального світу. "Доповнена віртуальність" – це термін, який

використовується для систем, що містять штучні об'єкти з доданими зображеннями реального світу.



Рис. 1. Континуум реальність-віртуальність

Віртуальна реальність повністю занурює користувача у віртуальне середовище, де він не може бачити реальний світ навколо себе. Це може бути досягнуто за допомогою спеціальних окулярів. У той час як в AR, користувач може бачити, як віртуальний світ накладається на реальний світ, тому він може відчувати обидва світи.

Технологічні основи доповненої реальності

В AR системі процес складається з трьох основних кроків: розпізнавання, відстеження та змішування [4]. Спочатку система розпізнає об'єкт, обличчя, тіло або простір, на який буде накладено віртуальний об'єкт. Далі відбувається відстеження цього об'єкта в реальному часі та локалізація його в просторі зображення. Нарешті, на знайдений об'єкт накладається медіа в різних форматах, таких як відео, 3D, 2D, текст та інші.

Відстеження з маркером. Система відстеження з маркером є одним з методів відстеження в доповненій реальності, який заснований на використанні спеціальних знаків або маркерів для орієнтації комп'ютера в просторі та підтримки взаємодії з ними. Ці маркери можуть бути будь-якої форми і розміру, але найчастіше використовуються друковані зображення з чіткими контурами та яскравими кольорами [5].

Система відстеження з маркером включає в себе використання камери, яка знімає об'єкт з маркером та відправляє зображення на обробку в комп'ютер. Обробка зображення дозволяє визначити положення та орієнтацію маркера в просторі, що дає змогу точно визначити положення об'єкту в доповненій реальності. При цьому, система здатна відслідковувати рухи маркера та об'єкту, що дозволяє динамічно змінювати зображення, що накладається на маркер.

Однією з найбільших переваг системи відстеження з маркером є її висока точність та стійкість до зовнішніх впливів, таких як зміна освітлення або шуми на зображенні. Однак, система має деякі недоліки, такі як обмежена кількість маркерів, які можуть бути використані в одному просторі, та потребує наявності маркера для відстеження об'єкту.

Гібридне відстеження. Гібридне відстеження є більш прогресивним рішенням для безмаркерної системи доповненої реальності, оскільки воно використовує комбінацію датчиків, які забезпечують більш точне відтворення рухів користувача в реальному часі [5].

Акселерометр – це датчик, який вимірює прискорення руху. Компас визначає орієнтацію пристрою в просторі, а GPS визначає його місцезнаходження на землі. Комбінація цих датчиків дозволяє системі відстежувати не тільки рух користувача, але й його орієнтацію та місцезнаходження.

Крім того, гібридне відстеження використовує алгоритми комп'ютерного зору, щоб точніше визначити положення та орієнтацію пристрою в просторі. Наприклад, за допомогою камери пристрою можна визначити розмір та форму предметів, що оточують користувача, та врахувати їх у процесі відтворення комп'ютерної графіки.

Гібридне відстеження дозволяє більш точно відтворювати рухи користувача, що забезпечує більш реалістичний досвід використання доповненої реальності. Однак, воно потребує більш потужних пристроїв та складнішого програмного забезпечення для обробки даних датчиків та відтворення комп'ютерної графіки.

Відстеження на основі моделей. Підхід на основі моделей є досить складним та вимагає великої кількості обчислювальних ресурсів для точного відстеження об'єктів у режимі реального часу. Оскільки для виконання таких завдань потрібно створити точну 3D-модель об'єкта та визначити його розташування у просторі, підхід на основі моделей вимагає значно більшої кількості ресурсів, ніж інші методи відстеження. Крім того, збір та обробка даних про 3D-модель об'єкта може бути складним завданням, особливо якщо мова йде про складні об'єкти з багатьма деталями [6].

Проте, підхід на основі моделей має деякі переваги. Зокрема, цей метод дозволяє отримати високу точність відстеження та забезпечує стійкість проти різного роду перешкод, які можуть перешкоджати іншим методам відстеження. Крім того, підхід на основі моделей може бути корисним для відстеження об'єктів зі складною геометрією та для відстеження об'єктів у навколишньому середовищі з високою ступенем динамічності, таким як промислові робочі майданчики.

Отже, підхід на основі моделей є одним з можливих методів відстеження у доповненій реальності, який може бути корисним в певних ситуаціях. Однак, він також має свої недоліки та обмеження, які слід врахувати при виборі підходу до відстеження об'єктів у доповненій реальності.

Відстеження за допомогою природних особливостей. Методика відстеження за допомогою природних особливостей є досить поширеним підходом в AR-технологіях. Основна ідея полягає в тому, щоб використовувати унікальні особливості об'єкта з реального світу, які можуть слугувати маркерами для AR-

додатків.

Наприклад, можна використовувати унікальний пейзаж, який може бути розпізнаний за допомогою візуальної інформації (наприклад, місцевий пам'ятник архітектури або краєвид) як маркер для AR-додатку. Іншими прикладами можуть бути фізичні об'єкти, такі як книги, журнали або навіть пляшки з напоями, які мають унікальні маркери на своїх етикетках.

Для того, щоб AR-додаток міг взаємодіяти з такими маркерами, необхідно розробити дескриптор ознак, який може ідентифікувати маркери і розпізнавати їх у реальному часі. Для цього використовуються різні математичні алгоритми, такі як SIFT, SURF або ORB, які дозволяють визначати особливості зображення та формувати дескриптори для них.

Коли AR-додаток отримує відеопотік з камери, він аналізує зображення та порівнює його з дескрипторами ознак маркерів, які були збережені на початку. Якщо зображення містить маркер, AR-додаток може відобразити додаткову інформацію або 3D-об'єкти на екрані мобільного пристрою або в окулярах AR.

Отже, відстеження за допомогою природних особливостей є ефективним методом для реалізації AR, який дозволяє використовувати об'єкти з реального світу як маркери. Цей метод полягає в розпізнаванні унікальних особливостей об'єкта та формуванні дескриптора ознак за допомогою математичного алгоритму. Інваріантність дескриптора до різних змін, таких як відстань, орієнтація та рівні освітлення, дозволяє точно відстежувати об'єкт в різних умовах.

Пристрої доповненої реальності для забезпечення комунікації. Існує кілька типів пристроїв доповненої реальності, які використовуються для забезпечення комунікації. Ось кілька з них:

1. Смартфони і планшети. Вони є найбільш поширеними пристроями доповненої реальності (рис. 2). Для цього використовуються спеціальні додатки, що дозволяють відображати віртуальний контент на екрані пристрою. Перевагою є доступність і відносно низька вартість таких пристроїв.



Рис. 2. Доповнена реальність на смартфоні

2. Спеціалізовані пристрої доповненої реальності (рис. 3), такі як Microsoft HoloLens, Magic Leap One або Google Glass [7]. Вони забезпечують більш потужні можливості доповненої реальності, такі як спілкування в режимі реального часу, можливість спільної роботи над проектами та інше. Однак, такі пристрої мають значно вищу вартість, що робить їх менш доступними.



Рис. 3. Окуляри доповненої реальності

3. VR-шоломи, такі як Oculus Rift або HTC Vive [8]. Вони дозволяють користувачеві повністю зануритись в віртуальне середовище. Ці пристрої можуть бути корисними для людей з різними видами інвалідності, так як дозволяють створювати віртуальні середовища, що легше доступні для них. Однак, вартість таких пристроїв може бути досить високою, а їх використання вимагає певної підготовки.

Усі ці пристрої мають свої переваги та недоліки, і вибір конкретного пристрою залежить від вимог до системи забезпечення комунікації та можливих сценаріїв його роботи.

Вимоги до систем ААС. Система альтернативної та допоміжної комунікації (ААС) має відповідати певним вимогам для ефективного використання. Основні вимоги до системи ААС включають:

1. Інтегрований дисплей взаємодії з партнером. Дисплей має бути інтегрований в процес взаємодії між користувачем та партнером, щоб забезпечити зручну і ефективну комунікацію.

2. Розширене введення тексту: Для покращення розуміння повідомлень, система повинна надавати можливість вводу тексту.

3. Візуальне представлення вибору: Система повинна забезпечувати візуальне представлення варіантів вибору у вигляді фотографій та слів.

4. Надання вибору в режимі реального часу: Система повинна надавати можливість контекстуального вибору в режимі реального часу під час взаємодії, щоб допомогти користувачу висловлювати свої думки та уподобання.

Ці вимоги допомагають забезпечити ефективну взаємодію між користувачем та партнером за допомогою системи ААС. Вони дозволяють користувачам висловлювати свої думки, уподобання та досвід за допомогою системи, що покращує якість життя та можливості соціальної взаємодії.

Сценарій роботи додатку доповненої реальності

Наприклад, сценарій розмови між дружиною, що має комунікативні проблеми, та її чоловіком:

- ДРУЖИНА підходить до кухні, додаток автоматично активується на її пристрої.
- ЧОЛОВІК запитує "Як почувашся?", додаток відображає написаний текст під обличчям ЧОЛОВІКА, щоб ДРУЖИНА могла краще зрозуміти його запитання.
- За допомогою обробки природної мови, додаток генерує варіанти відповіді на запитання ЧОЛОВІКА та відображає їх у вигляді фотографій з написаним текстом.
- ДРУЖИНА відповідає на запитання, вказуючи на свій вибір.
- Додаток доповненої реальності вимовляє повідомлення, щоб ЧОЛОВІК міг почути відповідь ДРУЖИНИ.

Враховуючи вимоги до системи ААС та можливий сценарій роботи додатку можна зробити висновок, що спеціалізовані пристрої доповненої реальності є найбільш ефективним засобом для забезпечення комунікації людей з особливими потребами. Вони мають ряд переваг, таких як можливість відображення текстової та аудіоінформації в реальному часі, а також можливість інтерактивного взаємодії з користувачем. Ці пристрої дозволяють полегшити процес комунікації та забезпечити більш якісну взаємодію з навколишнім середовищем для людей з особливими потребами.

Висновок

Застосування доповненої реальності може значно покращити якість комунікації для людей з особливими потребами. Зокрема, системи, які дозволяють відображати текстову інформацію в реальному часі, можуть значно полегшити спілкування для людей з проблемами аудіального сприйняття або мовлення. Крім того, додатки доповненої реальності можуть допомогти в реалізації більш натурального та ефективного спілкування, де користувачі можуть виражати свої думки та потреби за допомогою фотографій та написів. Застосування таких систем в комунікації може мати значний позитивний вплив на якість життя людей з особливими потребами, допомагаючи їм бути більш самостійними та соціально активними.

Література

1. What is AAC? URL: <https://www.assistiveware.com/learn-aac/what-is-aac>.
2. Pascoal, Rui Miguel et al. Adapting Speech Recognition in Augmented Reality for Mobile Devices in Outdoor Environments. *Slate* (2017).
3. Teófilo M., Lourenço A., Postal J., Lucena V.F. Exploring Virtual Reality to Enable Deaf or Hard of Hearing Accessibility in Live Theaters: A Case Study. *Interacción*. (2018).
4. Syed T.A., Siddiqui M.S., Abdullah H.B., Jan S., Namoun A., Alzahrani A., Nadeem A., Alkhodre A.B. In-Depth Review of Augmented Reality: Tracking Technologies, Development Tools, AR Displays, Collaborative AR, and Security Concerns. *Sensors* (Basel). 2022 Dec 23;23(1).
5. Moro M., Marchesi G., Hesse F., Odone F., Casadio M. Markerless vs. Marker-Based Gait Analysis: A Proof of Concept Study. *Sensors*. 2022.
6. Wuest H., Engkle T., Wientapper F., Schmitt F., Keil J. From CAD to 3D Tracking—Enhancing & Scaling Model-Based Tracking for Industrial Appliances; Proceedings of the 2016 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR-Adjunct); Merida, Mexico. 19–23 September 2016.
7. Minoufekr M., Schug P., Zenker P., Plapper P.W. Modelling of CNC Machine Tools for Augmented Reality Assistance Applications using Microsoft HoloLens; Proceedings of the ICINCO (2); Prague, Czech Republic. 29–31 July 2019; pp. 627–636.
8. Barz M., Kapp S., Kuhn J., Sonntag D. Automatic Recognition and Augmentation of Attended Objects in Real-time using Eye Tracking and a Head-mounted Display; Proceedings of the ACM Symposium on Eye Tracking Research and Applications; Stuttgart Germany. 25–29 May 2021.

НЕСКОРОДЄВА ТЕТЯНА

Донецький національний університет ім. Василя Стуса

ORCID ID: [0000-0003-2474-7697](https://orcid.org/0000-0003-2474-7697)e-mail: t.neskorodieva@donnu.edu.ua**ФЕДОРОВ ЄВГЕН**

Черкаський державний технологічний університет

Донецький національний університет ім. Василя Стуса

ORCID ID: [0000-0003-3841-7373](https://orcid.org/0000-0003-3841-7373)e-mail: fedorovee75@ukr.net**АНТОНОВ ЮРІЙ**

Донецький національний університет ім. Василя Стуса

ORCID ID: [0000-0001-9285-2988](https://orcid.org/0000-0001-9285-2988)e-mail: y.s.antonov@gmail.com**НЕСКОРОДЄВА АНАСТАСІЯ**

Донецький національний університет ім. Василя Стуса

ORCID ID: [0000-0002-8591-085X](https://orcid.org/0000-0002-8591-085X)e-mail: a.neskorodieva@donnu.edu.ua**МЕТАЕВРИСТИЧНІ МЕТОДИ НА ОСНОВІ ПОВЕДІНКИ СОЦІАЛЬНИХ ПАВУКІВ ДЛЯ ЗАДАЧ ВНУТРІШНЬОГО АУДИТУ**

На сьогодні актуальною задачею є підвищення ефективності внутрішнього аудиту діяльності мережевих виробничо-торгівельних систем в умовах застосування ІТ. Для забезпечення ефективності діяльності таких систем при прийнятті рішення щодо асортименту, обсягів і ціни купівлі-продажу застосовуються методи оптимізації. На сьогодні ці проблеми вирішуються за допомогою метаевристичних методів оптимізації, наприклад, на основі поведінки соціальних павуків. Класичні методи, що ґрунтуються на поведінці соціальних павуків, не враховують номер ітерації в операторі генерації рішення, що знижує точність пошуку рішення. Запропоновані в роботі методи дозволяють усунути зазначені недоліки. Обидва методи за рахунок використання динамічних параметрів виконують глобальний пошук на початкових ітераціях та локальний пошук на заключних ітераціях дозволяють підвищити швидкість і точність пошуку оптимального рішення. Запропоновані методи оптимізації на основі популяційної метаевристики можуть використовуватися для ідентифікації параметрів штучних нейронних мереж інформаційних моделей перетворення даних аудиту. Під час проведення чисельних досліджень, для оцінки ефективності запропонованих методів використовувалась функція Ackley.

Ключові слова: оптимізація, прийняття рішення, внутрішній аудит, метаевристичний метод, соціальні павуки.

NESKORODIEVA TETIANA

Vasyl' Stus Donetsk National University

FEDOROV EUGENE

Cherkasy State Technological University

Vasyl' Stus Donetsk National University

ANTONOV YURIY

Vasyl' Stus Donetsk National University

NESKORODIEVA ANASTASIIA

Vasyl' Stus Donetsk National University

METAHEURISTIC METHODS BASED ON THE BEHAVIOUR OF SOCIAL SPIDERS FOR INTERNAL AUDIT TASKS

Today, the actual task is to increase the efficiency of the internal audit of the network production activities and trade systems in terms of IT application. To ensure the efficiency of such systems operation, when decision-making on the choice of assortment, volume and purchase (sale) price, optimization methods are developed. Optimization methods, which find the exact solution, have high computational complexity. Optimization methods, that find an approximate solution using directed search, have a high probability of hitting a local extremum. Random search methods do not guarantee convergence. In this connection, there is an optimization method insufficient efficiency problem, which needs to be solved. Today, these problems are solved by using metaheuristic optimization methods, for example, based on the behavior of social spiders. Classical methods based on the behavior of social spiders do not consider the iteration number in the solution generation operator, which reduces the accuracy of the solution search. The methods proposed in work allow to eliminate the mentioned shortcomings. To find the minimum continuous functions, a population metaheuristic method based on social spiders optimization was developed. Due to the dynamic parameters use, the proposed method performs a global search at the initial iterations and a local search at the final iterations, allowing to an increase in the speed and accuracy of the search. To find the minimum continuous functions, a population metaheuristic method based on the social spider algorithm was developed. Due to the dynamic parameters use, the proposed method performs a global search at the initial iterations and a local search at the final iterations, allowing to increase in the speed and accuracy of the search. The proposed optimization methods based on population metaheuristics can be used to identify parameters of artificial neural networks of information models for audit data transformation. Prospects for further research consist in testing the proposed methods on a wider set of test data. The proposed methods numerical study was carried out on the Ackley function example.

Keywords: optimization, decision-making, internal audit, metaheuristic method, social spiders.

Вступ. Актуальною науково-технічною проблемою сучасних інформаційних технологій у фінансовій та економічній сферах є створення методології формування систем підтримки прийняття рішень

(СППР) під час аудиту підприємств в умовах застосування ІТ на підприємствах та з використанням інформаційних технологій [1]. Сучасні автоматизовані СППР аудиту засновані на автоматизованому аналізі великих обсягів даних про фінансово-господарську діяльність та стани підприємств з багаторівневою ієрархічною структурою різномірних, багатоваріантних, багатфункціональних зв'язків, взаємозв'язків та взаємодій об'єктів аудиту. Завданнями автоматизованого аудиту СППР є розширення функціональних можливостей, підвищення ефективності та універсальності ІТ-аудиту. Для вирішення завдань аудиту ефективності діяльності мережевих виробничо-торгівельних систем важливу роль відіграють метаевристичні методи оптимізації.

Література та огляд досліджень. Методи оптимізації, що знаходять точне рішення, мають високу обчислювальну складність. Методи оптимізації, що знаходять наближене рішення за допомогою спрямованого пошуку, мають високу ймовірність потрапляння до локального екстремуму. Методи випадкового пошуку не гарантують збіжності. У зв'язку з цим виникає проблема недостатньої ефективності методів оптимізації, яка потребує вирішення.

Для прискореного знаходження квазіоптимального розв'язку задач оптимізації та зниження ймовірності потрапляння до локального екстремуму використовуються метаевристики (або сучасні евристики) [2, 3]. Метаевристика розширює можливості евристики, комбінуючи евристичні методи на основі високорівневої стратегії [4, 5].

В роботі [5] виокремлено дев'ять властивостей метаевристики:

1. Метаевристика є стратегією, яка керує процесом пошуку.
2. Метою метаевристики є ефективне дослідження простору пошуку знаходження (суб)оптимального розв'язку.

3. Методи, що використовуються метаевристичним алгоритмом, перебувають у діапазоні від простого локального пошуку до складного процесу навчання.

4. Метаевристичний алгоритм є наближеним і зазвичай детермінованим.

5. Метаевристика може використовувати механізм, що запобігає потраплянню у пастку в обмеженій області простору пошуку.

6. Основні положення метаевристики допускають абстрактний опис.

7. Метаевристика не є проблемно-орієнтованою.

8. Метаевристика може використовувати проблемно-орієнтоване знання у формі евристик, керованих високорівневою стратегією.

9. Передові метаевристики використовують досвід, накопичений у процесі пошуку та представлений у вигляді пам'яті, для керування пошуком.

Метаевристики за кількістю використовуваних розв'язок поділяються на:

- Непопуляційні (використовують один потенційний розв'язок);
- Популяційні (використовують множину потенційних розв'язок).

Непопуляційні метаевристики поділяються на:

- натуральні (біологічні та фізичні);
- ненатуральні.

Під ненатуральними метаевристиками авторами розуміються метаевристики, які засновані на моделюванні процесів і механізмів біологічних чи фізичних систем. Навпаки, натуральні евристики побудовані з урахуванням моделей природних систем.

Популяційні метаевристики поділяються на:

- еволюційні (детерміновані та імовірнісні);
- роеві (біологічні та фізичні);
- імунні;
- ненатуральні.

Існуючі метаевристики мають один або більше з таких недоліків:

- є лише абстрактний опис методу чи опис методу, який орієнтований на рішення лише певної задачі [6, 7];

- не враховується вплив номера ітерації на процес пошуку розв'язку [8, 9];
- не гарантується збіжність методу [10, 11];
- відсутня можливість використовувати небінарні потенційні розв'язки [12, 13];
- не автоматизовано процедуру визначення значень параметрів [14, 15];
- відсутня можливість вирішувати завдання умовної оптимізації [16, 17];
- недостатня точність методу [18, 19].

У зв'язку з цим постає завдання побудови ефективних метаевристичних методів оптимізації.

Одними з популярних метаевристик є популяційні метаевристики [20], серед яких можна виокремити оптимізацію соціальних павуків [21] та алгоритм соціального павука [22], що дозволяє вирішувати завдання неперервної оптимізації. Більшість павуків виявляють здобич, відчуваючи вібрації на своєму павутинні. Деякі соціальні види павуків, наприклад *Mallos gregalis* та *Oecobius civitas* живуть групами і взаємодіють з іншими членами тієї ж групи. Павуки можуть розділяти різні вібрації та відчувати їхню відповідну інтенсивність. Соціальні павуки пасивно сприймають вібрації, що генеруються іншими павуками на тому ж павутинні, щоб мати чіткий огляд павутиння. Поведінку соціального павука можна

описати як спільний рух павуків до джерела їжі.

Мета та завдання. Мета роботи – пошук мінімуму неперервних функцій шляхом створення методу оптимізації на основі популяційної метаевристики.

Для досягнення мети було поставлено та вирішено такі завдання:

1. Провести аналіз існуючих методів неперервної оптимізації.
2. Створити популяційний метаевристичний метод на основі оптимізації соціальних павуків для пошуку мінімуму неперервних функцій.
3. Розробити популяційний метаевристичний метод на основі алгоритму соціального павука для пошуку мінімуму неперервних функцій.
4. Провести чисельне дослідження.

Постановка проблеми

Проблема підвищення точності пошуку мінімуму функції $F(\mathbf{x})$, де \mathbf{x} – вектор змінних, представляється як проблема знаходження для цієї функції такої множини операторів оптимізації $\{A_i\}$, який задовольняє критерію $F(\mathbf{x}) \rightarrow \min_x$.

1. Оптимізація соціальних павуків із динамічними параметрами

Оптимізація соціальних павуків (social spider optimization) запропонована вченими Куевасом (Cuevas), Сьенфугосом (Cienfuegos), Залдіваром (Zaldívar), Перес-Сісеросом (Pérez-Cisneros) [21] і заснована на паруванні соціальних павуків. Група павуків взаємодіє один з одним з урахуванням біологічних законів кооперативної колонії. Алгоритм враховує стать павуків. Залежно від статі, кожна особина проходить набір різних перетворень, які імітують різні кооперативні моделі поведінки, які зазвичай зустрічаються в колонії. У цій статті для прискорення пошуку розв'язку використовуються динамічні параметри та ймовірність парування. Як шуканий розв'язок (вектор значень змінних) виступає позиція павука.

Структура запропонованого популяційного метаевристичного методу представлена на рис. 1.

1. Ініціалізація.

1.1. Завдання порогової ймовірності p^f , мінімальної та максимальної ймовірностей спарювання q^{\min}, q^{\max} , $\delta^{\min}, \delta^{\max}$ параметрів, $\alpha^{\min}, \alpha^{\max}$ для $\beta^{\min}, \beta^{\max}$ генерації нової позиції, $0 < q^{\min} < q^{\max} < 1$, $0 < \alpha^{\min} < \alpha^{\max} < 1$, $0 < \beta^{\min} < \beta^{\max} < 1$, $0 < \delta^{\min} < \delta^{\max} < 1$.

1.2. Завдання максимальної кількості ітерацій N , розміру популяції K , кількості самок павуків K^f , $[0.65N] \leq K^f \leq [0.9N]$, де $[\cdot]$ – ціла частина числа, кількості самців павуків K^m , $K^m = K - K^f$, довжини вектору позиції павука M , мінімальних і максимальних значень вектору позиції x_j^{\min}, x_j^{\max} , $j \in \overline{1, M}$.

1.3. Створення вихідної популяції P .

1.3.1. Номер павука $k = 1$, $P = \emptyset$.

1.3.2. Створення випадковим чином векторної позиції $x_k = (x_{k1}, \dots, x_{kM})$, $x_{kj} = x_j^{\min} + (x_j^{\max} - x_j^{\min})U(0,1)$, де $U(0,1)$ – функція, що повертає стандартно рівномірно розподілене випадкове число.

1.3.3. Якщо $x_k \notin P$, то $P = P \cup \{x_k\}$, $k = k + 1$.

1.3.4. Якщо $k \leq K$ перехід на крок 1.3.2.

1.4. Розбиття популяції P на підпопуляцію самок $P^f = \{x_k^f\}$ (K^f перших павуків) та підпопуляції самців $P^m = \{x_k^m\}$ (K^m останніх павуків).

1.5. Обчислення радіуса спарювання $r = \frac{1}{2M} \sum_{j=1}^M (x_j^{\max} - x_j^{\min})$.

1.6. Визначити павука найкращого за функцією мети $k^* = \arg \min_k F(x_k)$, $k \in \overline{1, K}$, $x^* = x_{k^*}$.

1.7. Ініціалізація ймовірності спарювання та параметрів $q(n) = q^{\max}$, $\alpha(n) = \alpha^{\max}$, $\beta(n) = \beta^{\min}$, $\delta(n) = \delta^{\min}$.

2. Номер ітерації $n = 1$.

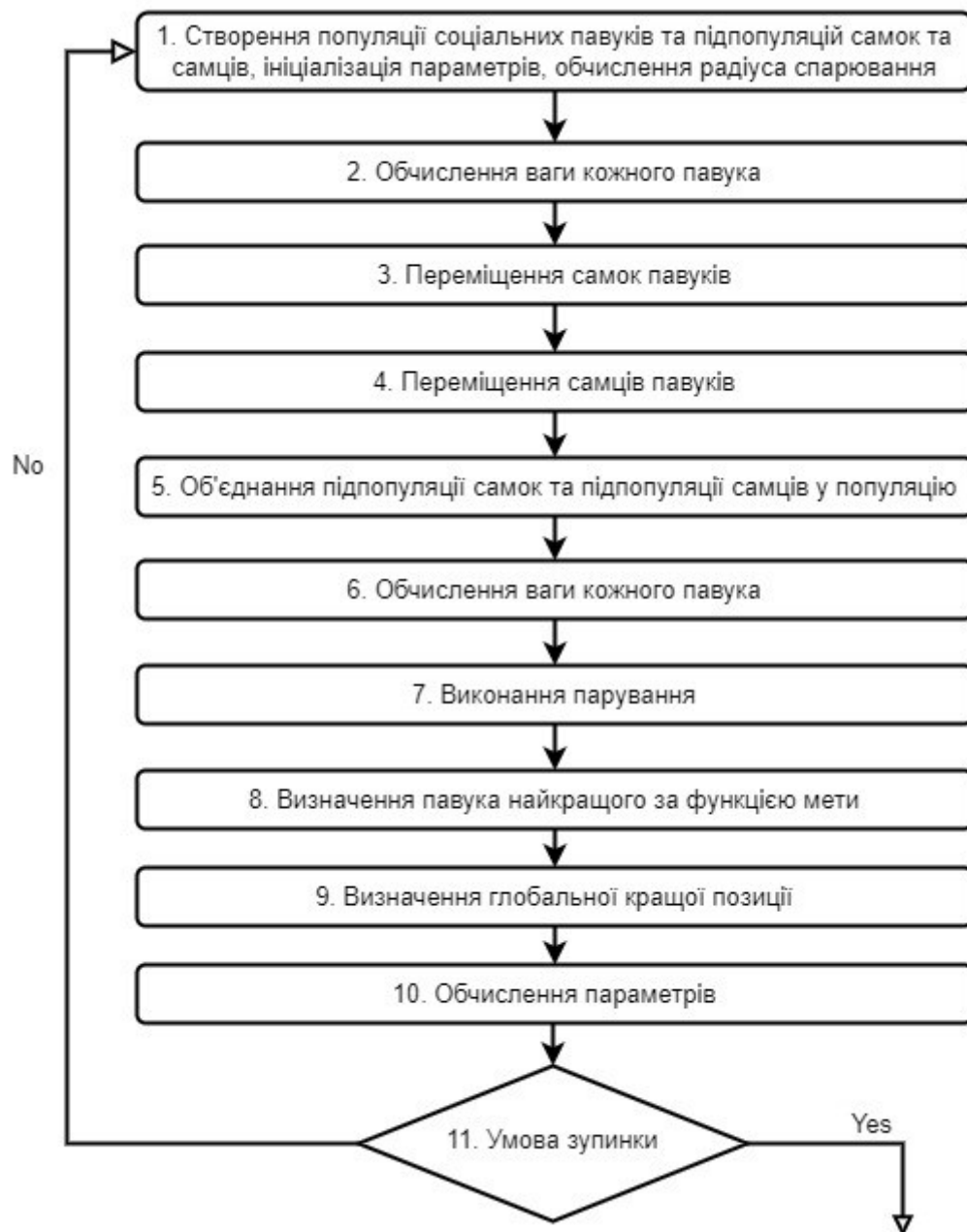


Рис. 1. Структура запропонованого популяційного метаевристичного методу пошуку мінімуму неперервних функцій

3. Обчислити вагу кожного павука $w_k = \frac{F(x_k) - \max_{s \in \overline{1, K}} F(x_s)}{\min_{s \in \overline{1, K}} F(x_s) - \max_{s \in \overline{1, K}} F(x_s)}$, $k \in \overline{1, K}$.

4. Перемістити самок павуків.

4.1. Номер самки павука $k = 1$.

4.2. Визначити самку/самця павука, який найближчий до k -ї самки павука і має більшу вагу, ніж вона/він.

4.2.1. $U_k = \{x_s \mid w_k < w_s, s \in \overline{1, K}\}$.

4.2.2. Якщо $\exists s \in \overline{1, K} : x_s = \arg \min_{x \in U_k} \|x - x_k^f\|$, то $x^c = x_s$, $w^c = w_s$.

4.3. Обчислити вібрацію, отриману k -ю самкою павука від самки/самця павука, яка найближча до неї і має більшу вагу, ніж вона $V_k^c = w^c \exp(-\|x^c - x_k^f\|^2)$.

4.4. Обчислити вібрацію отриману k -ю самкою павука від самки/самця павука кращого за функцією мети $w^* = \max_{s \in \overline{1, K}} w_s$, $V_k^* = w^* \exp(-\|x^* - x_k^f\|^2)$.

4.5. Обчислити нову позицію самки $r_k = U(0, 1)$, $\lambda_k = U(0, 1)$,

$$x_k^f = \begin{cases} x_k^f + \alpha(n)V_k^c(x^c - x_k^f) + \beta(n)V_k^*(x^* - x_k^f) + \delta(n)(r_k - 0.5), & \lambda_k < p^f \\ x_k^f - \alpha(n)V_k^c(x^c - x_k^f) - \beta(n)V_k^*(x^* - x_k^f) + \delta(n)(r_k - 0.5), & \lambda_k \geq p^f \end{cases}$$

4.6. Якщо $k < K^f$, то $k = k + 1$ перехід на крок 4.2.

5. Перемістити самців павуків.

5.1. Визначити за вагою медіанного самця павука підпопуляції P^m з позицією x_l^m та вагою w_{K^f+l} .

$$l = \left(\arg \operatorname{median}_{s \in K^f+1, K} w_s \right) - K^f.$$

5.2. Номер самця павука $k = 1$.

5.3. Визначити самку павука, найближчу до k -го самця павука якщо $\exists s \in \overline{1, K^f} : x_s = \arg \min_{x \in P^f} \|x - x_k^m\|$,

то $x^f = x_s$, $w^f = w_s$.

5.4. Обчислити вібрацію, отриману k -м самцем павука від найближчої до нього самки павука

$$V_k^f = w^f \exp\left(-\|x^f - x_k^m\|^2\right).$$

5.5. Обчислити нову позицію самця $r_k = U(0,1)$,

$$x_k^m = \begin{cases} x_k^m + \alpha(n)V_k^f(x^f - x_k^m) + \delta(n)(r_k - 0.5), & w_{K^f+k} > w_{K^f+l} \\ x_k^m + \alpha(n) \left(\frac{\sum_{s=1}^{K^m} w_{K^f+s} x_s^m}{\sum_{s=1}^{K^m} w_{K^f+s}} - x_k^m \right), & w_{K^f+k} \leq w_{K^f+l} \end{cases}$$

5.6. Якщо $k < K^m$, то $k = k + 1$ перехід на крок 5.3.

6. Об'єднання підпопуляції самок $P^f = \{x_k^f\}$ та підпопуляції самців $P^m = \{x_k^m\}$ у популяцію P .

7. Обчислити вагу кожного павука $w_k = \frac{F(x_k) - \max_{s \in \overline{1, K}} F(x_s)}{\min_{s \in \overline{1, K}} F(x_s) - \max_{s \in \overline{1, K}} F(x_s)}$, $k \in \overline{1, K}$.

8. Виконати спарювання.

8.1. Якщо $U(0,1) \geq q(n)$, то перехід на крок 9.

8.2. Визначити за вагою медіанного самця павука підпопуляції P^m з позицією x_l^m та вагою w_{K^f+l} .

$$l = \left(\arg \operatorname{median}_{s \in K^f+1, K} w_s \right) - K^f.$$

8.3. Сформувати множину доміантних самців $D = \{x_s^m \mid w_{K^f+s} > w_{K^f+l}, s \in \overline{1, K^m}\}$.

8.4. Кількість доміантних самців павуків, для яких є множина самок павуків $Z = 0$.

8.5. Номер самця павука $k = 1$.

8.6. Сформувати для доміантного самця множину самок павуків, найближчих до нього, і включити до цієї множини доміантного самця.

8.6.1. Якщо $x_k^m \notin D$, то перехід на крок 8.9.

$$8.6.2. U_k = \{x_s^f \mid \|x_s^f - x_k^m\| < r, s \in \overline{1, K}\}.$$

8.6.3. Якщо $U_k = \emptyset$, то перехід на крок 8.9.

$$8.6.4. U_k = U_k \cup \{x_k^m\}.$$

8.7. Сформувати нову позицію павука на основі рулетки (пропорційного відбору).

8.7.1. $Z = Z + 1$.

8.7.2. Обчислити імовірності

$$p_m = \frac{\sum_{s=1}^K [x_s = u_{km}] w_s}{\sum_{q=1}^{|U_k|} \sum_{s=1}^K [x_s = u_{kq}] w_s}, [x_s = u_{km}] = \begin{cases} 1, & x_s = u_{km}, m \in \overline{1, |U_k|} \\ 0, & x_s \neq u_{km} \end{cases}$$

8.7.3. Упорядкувати множину ймовірностей U_k , тобто $p_m > p_{m+1}$.

8.7.4. $j = 1$.

8.7.5. Обрати компоненту m , яка задовольняє нерівності $\sum_{s=1}^m p_s < U(0,1) \leq \sum_{s=m+1}^{|U_k|} p_s$.

- 8.7.6. $x_{z_j}^{new} = u_{mj}$.
- 8.7.7. Якщо $j < M$, то $j = j+1$ перехід до кроку 8.7.5.
- 8.8. Якщо $k < K^m$, то $k = k+1$ перехід до кроку 8.6.
- 8.9. Номер домінуючого самця павука $z = 1$.
- 8.10. Визначити павука найгіршого за функцією мети $q = \arg \max_{s \in \overline{1, K}} F(x_s)$.
- 8.11. Замінити павука найгіршого за функцією мети.
- 8.11.1. Якщо $F(x_z^{new}) \geq F(x_q)$, то перехід до кроку 8.12.
- 8.11.2. Якщо $\exists s \in \overline{1, K^f} : x_s^f = x_q$, то $x_s^f = x_z^{new}$.
- 8.11.3. Якщо $\exists s \in \overline{1, K^m} : x_s^m = x_q$, то $x_s^m = x_z^{new}$.
- 8.11.4. $x_q = x_z^{new}$.
- 8.12. Якщо $z < Z$, то $z = z+1$ перехід до кроку 8.10.
9. Визначити павука найкращого за функцією мети $k^* = \arg \min_k F(x_k)$, $k \in \overline{1, K}$.
10. Визначити глобальну кращу позицію, якщо $F(x_{k^*}) < F(x^*)$, то $x^* = x_{k^*}$.
11. Обчислити параметри $q(n) = q^{\max} - (q^{\max} - q^{\min}) \left(\frac{n}{N} \right)$, $\alpha(n) = \alpha^{\max} - (\alpha^{\max} - \alpha^{\min}) \left(\frac{n}{N} \right)$,
 $\beta(n) = \beta^{\max} - (\beta^{\max} - \beta^{\min}) \left(\frac{n}{N} \right)$, $\delta(n) = \delta^{\max} - (\delta^{\max} - \delta^{\min}) \left(\frac{n}{N} \right)$.
12. Якщо $n < N$, то $n = n+1$ перехід до кроку 3
 Результатом є x^* .

2. Алгоритм соціального павука з динамічними параметрами

Алгоритм соціального павука (social spider algorithm) запропонований Ю (Yu), Лі (Li) [22] та імітує обмін інформацією про кормову стратегію соціальних павуків, використовуючи вібрації на павутині для визначення становища жертв. Простір пошуку формується як гіперрозмірне павутиння, на якому кожна позиція є розв'язком. Павутиння також є засобом передачі вібрацій, що генеруються павуками. Кожен павук на павутинні займає свою позицію, а функція мети сприймається як потенціал перебування джерела їжі у цій позиції. Павуки можуть вільно переміщуватися павутинням. Коли павук пересувається на нову позицію, він генерує вібрацію, яка поширюється павутинням. Інтенсивність вібрації корелює зі значенням функції мети. Таким чином, павуки в одному павутинні діляться своєю особистою інформацією з іншими, щоб сформувати колективне соціальне знання. Як шуканий розв'язок (вектор значень змінних) виступає позиція павука.

Структура запропонованого популяційного метаевристичного методу представлена рис. 2.

1. Ініціалізація.

1.1. Завдання параметра r^a , який регулює швидкість згасання інтенсивності вібрації (чим більше r^a , тим менше згасання вібрації), ймовірностей p^c і p^m формування маски, константи C для обчислення інтенсивності вібрації (мале числоділенню на нуль розподілу на нуль), параметрів $\alpha^{\min}, \alpha^{\max}, \beta^{\min}, \beta^{\max}$ для генерації нової позиції причому $r^a \in (0, \infty)$, $0 < \alpha^{\min} < \alpha^{\max} < 1$, $0 < \beta^{\min} < \beta^{\max} < 1$.

1.2. Завдання максимального числа ітерацій N , розміру популяції K , довжини вектору позиції павука M , мінімальних та максимальних значень для позиції вектору x_j^{\min}, x_j^{\max} . $j \in \overline{1, M}$.

1.3. Створення початкової популяції P .

1.3.1. Номер павука $k = 1$, $P = \emptyset$.

1.3.2. Створення випадковим чином векторної позиції $x_k(1)$.

$$x_k(1) = (x_{k1}(1), \dots, x_{kM}(1)), \quad x_{kj}(1) = x_j^{\min} + (x_j^{\max} - x_j^{\min})U(0,1),$$

де $U(0,1)$ - функція, що повертає стандартно рівномірно розподілене випадкове число.

1.3.3. Якщо $x_k(1) \notin P$, то $P = P \cup \{x_k(1)\}$, $k = k+1$.

1.3.4. Якщо $k \leq K$ перехід на крок 1.3.2.

1.3.5. Номер павука $k = 1$, $P = \emptyset$.

1.3.6. Обчислення $r = \text{round}(1 + (K-1)U(0,1))$, де $\text{round}()$ - функція, що округлює число до найближчого цілого.

1.3.7. Створення цільової позиції вектора x_k^{tar} .

Якщо $k \neq r$, то $x_k^{tar} = x_r(1)$, інакше перехід на крок 1.3.6.

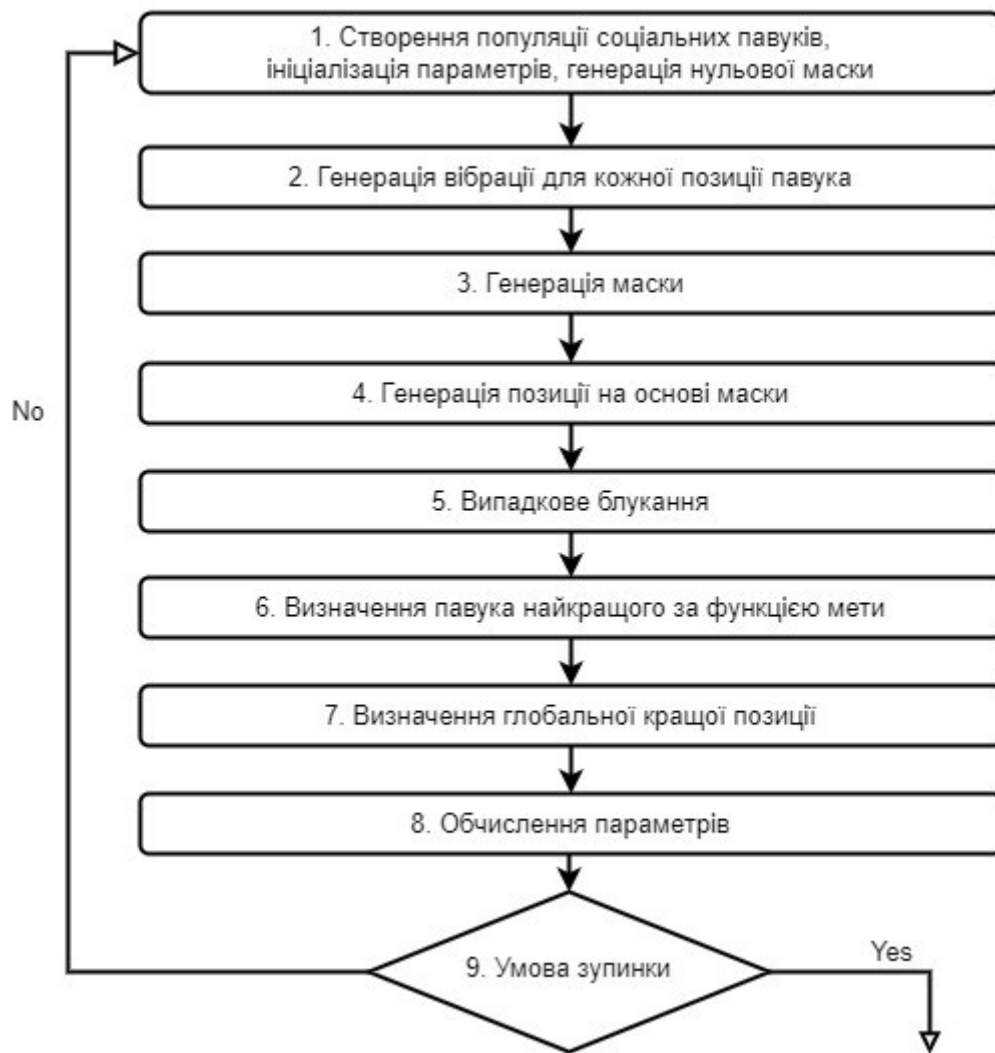


Рис. 2. Структура запропонованого популяційного метаевристичного методу пошуку мінімуму неперервних функцій

1.3.8. Обнуління лічильника кількості ітерацій, на яких не відбувалося зміни цільової позиції $c_k = 0$.

1.3.9. $P = P \cup \{(x_k(1), x_k^{tar}, c_k)\}$.

1.3.10. Якщо $k < K$, то $k = k + 1$ перехід на крок 1.3.6.

1.4. Генерація маски

$m_{kj} = 0, j \in \overline{1, M}, k \in \overline{1, K}$.

1.5. Визначення павука найкращого за функцією мети $k^* = \arg \min_k F(x_k(1)), k \in \overline{1, K}, x^* = x_{k^*}$.

1.6. Ініціалізація параметрів

$\alpha(n) = \alpha^{\max}, \beta(n) = \beta^{\min}$.

2. Номер ітерації $n = 1$.

3. Генерація вібрації для кожної позиції павука.

3.1. Обчислення середньоквадратичного відхилення

$$\sigma = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{s=1}^K (x_{sj}(n))^2 - \left(\frac{1}{K} \sum_{s=1}^K x_{sj}(n)\right)^2}$$

3.2. Обчислення інтенсивності вібрації, створюваної кожним k павуком в позиції $x_k(n)$ і відчувається кожним l павуком в позиції $x_l(n)$

$$I(x_k(n), x_l(n)) = \ln \left(\frac{1}{F(x_k(n)) - C} + 1 \right) \exp \left(- \frac{\|x_k(n) - x_l(n)\|^2}{r^a \sigma} \right), k \in \overline{1, K}, l \in \overline{1, K}$$

3.3. Визначення для кожного l павука в позиції $x_l(n)$ павука створює вібрацію максимальної інтенсивності

$$k^* = \arg \max_{k \in \{1, \dots, K\} \setminus \{l\}} I(x_k(n), x_l(n)), l \in \overline{1, K}$$

3.4. Якщо $I(x_k^*(n), x_l(n)) > I(x_l^{tar}, x_l(n))$, то $x_l^{tar} = x_k^*(n)$, $c_l = 0$, інакше $c_l = c_l + 1$.

4. Генерація маски. Якщо $U(0,1) > (p^c)^{c_l}$, то $m_{lj} = \begin{cases} 0, & U(0,1) \geq p^m \\ 1, & U(0,1) < p^m \end{cases}$, $j \in \overline{1, M}, l \in \overline{1, K}$.

5. Генерація позиції на основі маски.

$r = \text{round}(1 + (K-1)U(0,1))$, $x_{lj}^m = \begin{cases} x_{lj}^{tar}, & m_{lj} = 0 \\ x_{lj}, & m_{lj} = 1 \end{cases}$, $j \in \overline{1, M}, l \in \overline{1, K}$.

6. Випадкове блукання.

6.1. Якщо $n = 1$, то $x_{lj}(n+1) = x_{lj}(n) + \beta(n)(x_{lj}^m(n) - x_{lj}(n))U(0,1)$, інакше

$x_{lj}(n+1) = x_{lj}(n) + \alpha(n)(x_{lj}(n) - x_{lj}(n-1))U(0,1) + \beta(n)(x_{lj}^m(n) - x_{lj}(n))U(0,1)$, $j \in \overline{1, M}, l \in \overline{1, K}$.

6.2. $x_{kj}(n+1) = \max\{x_j^{\min}, x_{kj}(n+1)\}$, $x_{kj}(n+1) = \min\{x_j^{\max}, x_{kj}(n+1)\}$, $j \in \overline{1, M}, k \in \overline{1, K}$.

7. Визначення павука найкращого за функцією мети $k^* = \arg \min_k F(x_k(n+1))$, $k \in \overline{1, K}$.

8. Визначення глобальної кращої позиції. Якщо $F(x_{k^*}) < F(x^*)$, то $x^* = x_{k^*}$.

9. Обчислюються параметри $\alpha(n) = \alpha^{\max} - (\alpha^{\max} - \alpha^{\min})\left(\frac{n}{N}\right)$, $\beta(n) = \beta^{\max} - (\beta^{\max} - \beta^{\min})\left(\frac{n}{N}\right)$.

10. Якщо $n < N$, то $n = n + 1$ перехід до кроку 3.

Результатом є x^* .

3. Чисельне дослідження запропонованих методів

Чисельне дослідження проводилося з використанням функції Ackley

$$f(x) = -a \exp\left(-b \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M x_j^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \cos(cx_j)\right) + a + \exp(1),$$

де $a = 20$, $b = 0.2$, $c = 2\pi$, $x_j^{\min} = -32.768$, $x_j^{\max} = 32.768$, $M = 30$.

У роботі розмір популяції $K = 50$, максимальна кількість ітерацій $N = 100$, кількість самок павуків $K^f = 35$, кількість самців павуків $K^m = 15$, $\delta^{\min} = 0.1$, $\delta^{\max} = 0.9$ порогова ймовірність $p^f = 0.7$, мінімальна і максимальна ймовірності спарювання $q^{\min} = 0.1$, $q^{\max} = 0.9$, параметри $\alpha^{\min} = 0.1$, $\alpha^{\max} = 0.9$, $\beta^{\min} = 0.1$, $\beta^{\max} = 0.9$ для генерації нової позиції, параметр $r^a = 1$ для регулювання швидкості згасання інтенсивності вібрації, ймовірності $p^c = 0.7$ та $p^m = 0.1$ для формування маски $C = 0.001$.

Результати порівняння запропонованих методів із класичними методами наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння запропонованих метаевристичних методів пошуку мінімуму неперервної функції з існуючими

| № п/п | Метод | Середньоквадратична помилка методу | |
|----------|--------------------------------|---|-----------|
| | | запропонованого з динамічними параметрами | існуючого |
| 1 | оптимізація соціальних павуків | 0.04 | 0.08 |
| 2 | алгоритм соціального павука | 0.03 | 0.07 |

Обрані значення параметрів запропонованих методів пошуку мінімуму неперервної функції забезпечують високу ймовірність спарювання та генерації випадкового рішення на початкових ітераціях та низьку ймовірність спарювання та генерації випадкового розв'язку на заключних ітераціях.

Класичні методи, що ґрунтуються на поведінці соціальних павуків, не враховують номер ітерації в операторі генерації розв'язку, що знижує точність пошуку розв'язку (табл. 1).

Запропоновані методи дозволяють усунути зазначені недоліки.

Висновки

1. Для пошуку мінімуму неперервних функцій розроблений популяційний метаевристичний метод на основі оптимізації соціальних павуків та алгоритму соціального павука. Запропонований метод, за рахунок використання динамічних параметрів виконує глобальний пошук на початкових ітераціях і локальний пошук на заключних ітераціях, дозволяє підвищити швидкість і точність пошуку.

2. Запропоновані методи оптимізації на основі популяційної метаевристики можуть використовуватися для ідентифікації параметрів штучних нейронних мереж інформаційних моделей перетворень даних аудиту. Перспективи подальших досліджень полягають у тестуванні запропонованих методів на більш широкому наборі тестових даних.

Література

1. The World Bank: World Development Report 2016. Digital Dividends. URL: <https://www.worldbank.org/en/publication/wdr2016>.
2. Talbi El-G. Metaheuristics: from design to implementation. Hoboken, New Jersey: Wiley & Sons, 2009. 618 p.
3. Engelbrecht A.P. Computational Intelligence: an introduction. Chichester, West Sussex: Wiley & Sons, 2007. 630 p.
4. Yang X.-S. Nature-inspired Algorithms and Applied Optimization. Charm: Springer, 2018. 330 p.
5. Blum C., Raidl G.R. Hybrid Metaheuristics. Powerful Tools for Optimization. Charm: Springer, 2016. 157 p.
6. Glover F., Kochenberger G.A. Handbook of Metaheuristics. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. 570 p.
7. Yang X.-S. Optimization Techniques and Applications with Examples. Hoboken, New Jersey: Wiley & Sons, 2018. 364 p.
8. Martí R., Pardalos P.M., Resende M.G.C. Handbook of Heuristics. Charm: Springer, 2018. 1289 p.
9. Gendreau M., Potvin J.-Y. Handbook of Metaheuristics. New York: Springer, 2010. 640 p.
10. Doerner K.F., Gendreau M., Greistorfer P., Gutjahr W., Hartl R.F., Reimann M. Metaheuristics. Progress in Complex Systems Optimization. New York: Springer, 2007. 408 p.
11. Bozorg - Haddad O., Solgi M., Loaiciga H. Meta-heuristic and Evolutionary Algorithms for Engineering Optimization. Hoboken, New Jersey: Wiley & Sons, 2017. 293 p.
12. Chopard B., Tomassini M. An Introduction to Metaheuristics for Optimization. New York: Springer, 2018. 230 p.
13. Radosavljević J. Metaheuristic Optimization in Power Engineering. New York: The Institution of Engineering and Technology, 2018. 536 p.
14. Grygor O., Fedorov E., Utkina T., Lukashenko A., Rudakov K., Harder D., Lukashenko V. Optimization method based on the synthesis of clonal selection and annealing simulation algorithms. Radio Electronics, Computer Science, Control. 2019. № 2. P. 90–99.
15. Fedorov E., Lukashenko V., Utkina T., Lukashenko A., Rudakov K. Method for parametric identification of Gaussian mixture model based on clonal selection algorithm. CEUR Workshop Proceedings. 2019. Vol. 2353. P. 41-55.
16. Alba E., Nakib A., Siarry P. Metaheuristics for Dynamic Optimization. Berlin: Springer-Verlag, 2013. 398 p.
17. Du K.-L., Swamy M.N.S. Search and Optimization by Metaheuristics. Techniques and Algorithms Inspired by Nature. Charm: Springer, 2016. 434 p.
18. Nakib A., Talbi El-G. Metaheuristics for Medicine and Biology. Berlin: Springer-Verlag, 2017. 211 p.
19. Subbotin S., Oliinyk A., Levashenko V., Zaitseva E. Diagnostic Rule Mining Based on Artificial Immune System for a Case of Uneven Distribution of Classes in Sample. Communications. Vol. 3. 2016. P. 3–11.
20. Brownlee J. Clever Algorithms: Nature-Inspired Programming Recipes. Melbourne: Brownlee, 2011. 436 p.
21. Cuevas E., Cienfuegos M., Zaldvar D., Prez-Cisneros M. A swarm optimization algorithm inspired in the behavior of the social-spider. Expert Syst Appl. 2013. Vol. 40, № 16. P. 6374-6384.
22. Yu J.J.Q., Li V.O.K. A social spider algorithm for global optimization. Appl Soft Comput. 2015. Vol. 30. P. 614-627.

ПАВЛІЧКО ВЛАДИСЛАВ

Національний університет "Львівська політехніка"

ORCID ID: [0000-0001-9596-5240](https://orcid.org/0000-0001-9596-5240)e-mail: vladyslav.pavlichko@gmail.com

МЕЛЬНИКОВА НАТАЛІЯ

Національний університет "Львівська політехніка"

ORCID ID: [0000-0002-2114-3436](https://orcid.org/0000-0002-2114-3436)e-mail: melynkovanatalia@gmail.com

ПЕРЕДБАЧЕННЯ ЦІНИ АВТОМОБІЛЯ МЕТОДАМИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Розвиток сучасного машинобудування є наслідком швидкого зростання економіки в багатьох розвинутих країнах. Станом на сьогоднішній день, інтеграцію автомобілів у повсякденне життя складно заперечити. Логістика, громадський транспорт, особистий транспорт, сервіси доставки, таксопарки, оренда авто тощо. Відповідно, маючи таку гнучкість використання, з'являється і попит на дану продукцію. В свою чергу, виробники прагнуть отримати найбільшу кількість покупців, що призводить до утворення конкуренції на ринку. Як результат час, який витрачається на підбір бажаного авто, є суттєвим, і сам процес вивчення ринку і характеристик всіх авто не є доцільним для користувачів. Тому це дослідження буде спрямовано на спрощення цього процесу, шляхом використання методів машинного навчання, що дасть змогу швидше зорієнтуватись у цінах на ринку і швидше обирати бажане авто.

В роботі наведено результати досліджень методів машинного навчання щодо передбачення ціни автомобіля, попередньої обробки тренувальних даних; запропоновано власну реалізацію, яка базується на комбінуванні декількох моделей машинного навчання. За основу для досліджень були взяті дерева рішень і випадковий ліс, обговорено загальну концепцію їхньої роботи, переваги і недоліки, алгоритм їхньої побудови. Метою цієї статті є порівняльна характеристика застосованих моделей. Окремі моделі можуть прогнозувати результати з високою точністю: дерева рішень – 90% точність і випадковий ліс – 95%. Однак точність являється не єдиною метрикою оцінки ефективності роботи моделей. Впливовість MAE, RMSE є невід'ємними метриками для оптимальної роботи моделей. Згідно з результатами досліджень, значення обидвох метрик кращі у випадкового лісу, що доказує ефективність даного рішення. Однак результати можна покращити, використовуючи комбінований підхід. Стаття якраз і надаватиме відповідь на питання ефективності застосування комбінованих підходів.

Ключові слова: передбачення ціни автомобіля, машинне навчання, попередня обробка, машинобудування.

PAVLICHKO VLADYSLAV T., MELNYKOVA NATALIYA I.

Lviv Polytechnic National University

CAR PRICE PREDICTION USING ML METHODS

The development of car manufacturing industry is consequence of fast-growing economics in developed countries. It is hard to deny the fact of strong integration of cars in all spheres of human life nowadays. Logistics, public transport, personal usage, delivery services, taxi depots, cars for rent, etc. Demand increases due to its flexibility of usage, manufacturers strive to increase amount of customers, which creates competition on the market. As a result, the amount of time spent on investigation of market and key features of each car is dramatically huge. That is why the aim of this research is to simplify process of observation of cars, their features and prices, using machine learning techniques, which will allow to choose desirable cars in shorter time.

Article offers researches of applying machine learning methods for car price prediction, train data preprocessing, suggesting own approach based on combination of several machine learning models. Decision trees and random forest models were chosen as basic methods for this research, general concepts and construction algorithms are discussed, highlighted pros and cons each of them. The main purpose of article is the comparison of proposed methods. Distinct models are capable to predict results quite precisely – 90% accuracy for decision trees and 95% for random forest. But R^2 (accuracy) is not the only metrics used in model's effectiveness evaluation. RMSE and MAE have crucial influence on optimal work of the model. Relying on the results of this research, random forest gives better RMSE and MAE values comparing to decision trees, which proves the effectiveness of such approach. However, results might improve with usage of combined approach. The question about effectiveness of such approach will be answered during this research.

Keywords: car price prediction, machine learning, pre-processing, mechanical engineering,

Постановка проблеми

Цікавість до вирішення даної проблеми є актуальною, оскільки автомобільна тематика тісно взаємопов'язана зі всіма сферами життя людей. Особливо корисною це дослідження буде у сфері бізнесу і особистого використання авто. Попит на авто зростає, автомобілями цікавляться все більше і все частіше їй купляють для особистого використання, або в якості сімейного авто. Однак для людини, яка не орієнтується в ринку авто, варіативність модельного виробників і модельного ряду може значно ускладнити процес вибору.

Для випадку з бізнесом ситуація дещо змінюється. Метою будь-якого бізнесу є мінімізація витрат і максимізація чистого прибутку, що, в свою чергу, призводить до детального планування використання коштів. Взавши умовно починаючий або середній бізнес, головною частиною якого є автотранспорт, наприклад таксопарк, перевезення вантажів, пошта, перевезення пасажирів, швидкий підбір авто допоможе зекономити час, що дасть змогу направити його для вирішення інших проблем бізнесу.

Аналіз останніх джерел

Дослідження у статті [1] спрямовані на поєднання методів популяційного рою, градієнтного підйому та мережі ВР нейронів. Процес обробки даних детально описаний у статті, зображено кінцеві результати, проте недоліком є недостатньо описані всі параметри, що ускладнює відтворення поставлених експериментів.

У статті [2] проводиться аналіз ефективності різних моделей машинного навчання, а саме: регресія, дерев рішення та нейронні мережі. Модель нейронної мережі показала найкращу точність серед всіх. Додатково, автори наводять список факторів, які були використані для прогнозування цін на автомобілі, що може бути корисним при проведенні подібних досліджень. Мінусом статті є мала вибірка даних, оскільки обраний датасет є досить малим, що може призвести до некоректної роботи моделей, особливо з новими вхідними даними.

Стаття [3] описує дослідження використання випадкового лісу для поставленої задачі. В ході дослідів використовувалась логістична регресія для порівняння. Згідно з результатами експерименту, випадковий ліс виявився більш ефективним у порівнянні з логістичною регресією. Проте в статті не надано детального опису використаних даних, а також не наведено достатньо великого обсягу експериментальних результатів для оцінки ефективності запропонованого методу в порівнянні з іншими методами, що були використані раніше.

Виклад основного матеріалу

Оскільки дана проблема є комплексною, її вирішення можна розбити на декілька підзадач:

- Пошук вибірки даних і її попередню обробку
- Оцінка вагомості кожної з ознак
- Підбір методів машинного навчання
- Налаштування методів та їх використання

Для дослідження був обраний датасет [4] у відкритому доступі, з понад 400 тисяч лотів авто американського ринку. Попередня обробка такої вибірки буде обов'язковою, оскільки кількість неінформативних записів може бути значною. У наборі даних 26 колонок, які несуть в собі ту чи іншу інформацію, однак не всі характеристики будуть важливими для ціноутворення. Даний етап можна виокремити у препроцесінг [5], оскільки проводиться видалення записів з відсутньою інформацією, видалення викидів даних, а також виробників, кількість авто яких є суттєво малою. Результат обробки наведений на рис. 1.

| | price | year | manufacturer | model |
|--------|-------|--------|--------------|-----------------------------|
| 31 | 15000 | 2013.0 | ford | f-150 xlt |
| 32 | 27990 | 2012.0 | gmc | sierra 2500 hd extended cab |
| 33 | 34590 | 2016.0 | chevrolet | silverado 1500 double |
| 34 | 35000 | 2019.0 | toyota | tacoma |
| 35 | 29990 | 2016.0 | chevrolet | colorado extended cab |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| 426863 | 25590 | 2017.0 | null | Genesis G80 3.8 Sedan 4D |
| 426869 | 13990 | 2016.0 | null | Scion iM Hatchback 4D |
| 426870 | 22990 | 2020.0 | hyundai | sonata se sedan 4d |
| 426874 | 33590 | 2018.0 | lexus | gs 350 sedan 4d |
| 426878 | 28990 | 2018.0 | lexus | es 350 sedan 4d |

121838 rows × 14 columns [Open in new tab](#)

Рис. 1. Датасет після препроцесінгу

Наступний крок – виокремлення лише вагомих ознак, які впливають на фінальну ціну авто. Такі характеристики як опис авто не є показником, оскільки аналізувати опис кожного авто – не є однією з задач цього дослідження, скоріше її вже можна класифікувати як проблему зі сфери NLP, щоб виокремити головні аспекти з опису, що є цілою окремою роботою. До цього списку також відносяться поля: 'VIN', 'posting_date', 'id', 'url', 'region', 'state', 'region_url', 'image_url', 'lat', 'long', 'description', 'county'. Вони не несуть ніякої інформації для користувача і ніяк не впливають на ціну авто.

Нижче наведено кореляційну матрицю, що визначає залежності між ознаками. Найбільш важливою для цього дослідження – кореляція ціни з іншими ознаками. З рис. 2 можна зробити висновок, що найбільш вагомими ознаками – це рік, пробіг, кількість циліндрів у моторі і вид КПП.

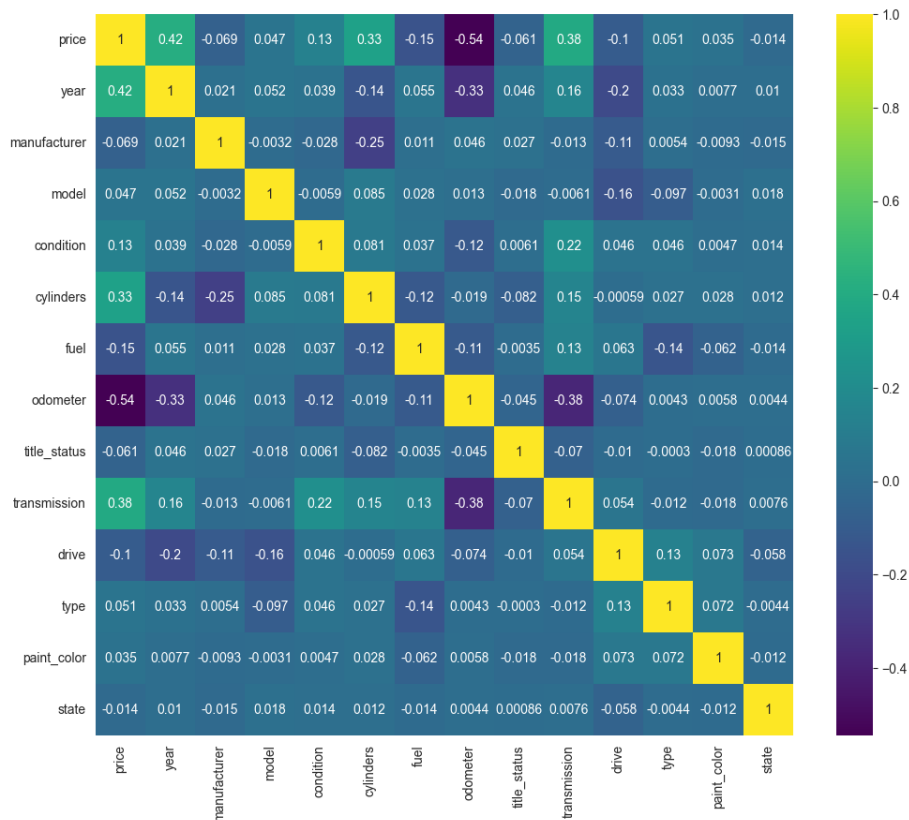


Рис. 2. Кореляційна матриця ознак

Методами, які використовуватимуться у досліді було обрано дерева рішень (Decision Tree [6]) і випадковий ліс (RandomForest [7]). У проаналізованих роботах зазначалось, що результати, які досягаються з їхнім використанням є досить високими для точного передбачення, у порівнянні SVM, kNN та іншими.

Дерева рішень являють собою модель машинного навчання, які репрезентуються у вигляді дерев, переважно бінарного виду. Складаються вони з вузлів, ребер і листків [8]. Алгоритм роботи дерев [9] наступний:

- Головний вузол – точка вхідних даних.
- На основі вхідних даних, перехід з одного вузла у інший є результатом відповідності переліку правил у вузлі.
- Кожне ребро з'єднує вузли між собою, проте у випадку бінарної репрезентації, у вузла можуть бути лише 2 нащадки.
- Процедура відповідності правилам повторюється для інших ознак.
- Критерії зупинки – обмеження глибини дерева, рання зупинка, введення поняття мінімального допустимого.

Випадковий ліс – ансамблевий метод, який використовує в собі дерева рішень. Метод використовує в собі дерева рішень, проте з іншими цілями. При тренуванні, будується n -на кількість дерев з m -ознаками [10], обраними з вихідних даних. Як результат виходить ансамбль дерев, які вчать на різних ознаках і на різних даних, які теж випадково беруться для кожних дерев. Таким чином вирішується проблема перенавчання, яка притаманна деревам рішень, а обираючи прогноз обирається мажоритарним голосуванням [11] або усередненням результатів зі всіх дерев.

Хоч використання одного методу для прогнозування ціни може надавати досить точні результати, проте для покращення нерідко комбінують методи між собою. У цій роботі буде запропоновано власний підхід, який базується на комбінації дерева рішень і випадкового лісу.

Реалізацію підходу можна поділити на два етапи: використання класифікаційного дерева рішень для формування додаткової вагової ознаки – категорії, до якої відноситься авто і використання випадкового лісу, що зображено на рис. 3

З результатів помітно, що результати з використанням комбінування моделей є значно кращими, ніж використання моделей по окремоті, про що свідчать значення R^2 , RMSE та MAE. Зменшення останніх двох метрик свідчить про те, що модель надає стабільніші результати, які суттєво не відрізняються від реальних цін. У конкретному випадку, у середньому, отримані спрогнозовані ціни варіюються близько 1187\$, що не є великою різницею, особливо беручи до уваги, що ціни базуються на американському ринку.

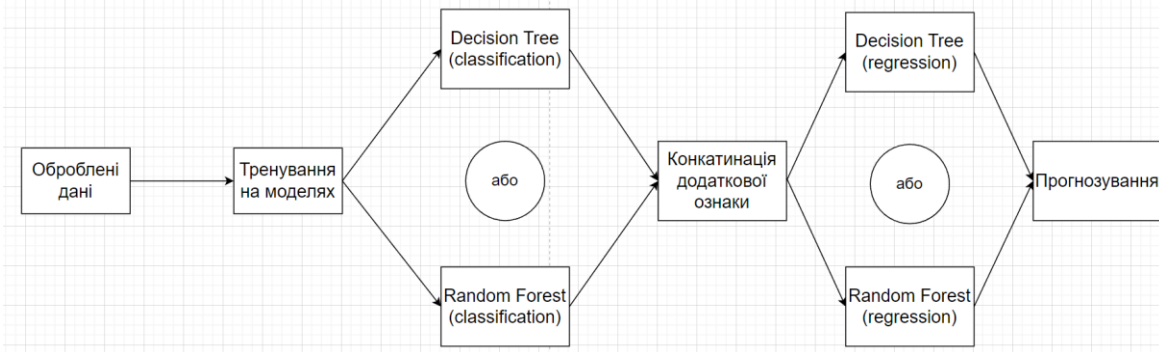


Рис. 3. Запропонований метод

Таблиця 1

Порівняння отриманих результатів

| Модель | R2 | RMSE | MAE |
|------------------------------|------|---------|---------|
| Decision Tree | 0.90 | 3755.79 | 1820.45 |
| Random Forest | 0.95 | 2808.99 | 1550.68 |
| Decision Tree +Random Forest | 0.97 | 2061.64 | 1187.59 |

Висновки

У цій роботі було проведено досліджено тематику прогнозування ціни автомобіля. Результатами досліджень являється порівняльна таблиця застосованих підходів прогнозування. Застосовано наступні методи машинного навчання: дерева рішень, випадковий ліс і запропонований комбінований метод, який використовує для своєї роботи два попередніх. Одинарне використання методів хоч і надає точні результати, 90% і 95% для дерев рішень і випадкового лісу, проте середня абсолютна похибка залишається значною. Комбінований підхід, в свою чергу, дозволяє розбити процес прогнозування на декілька етапів і покращити кожен з використовуваних метрик – точність у 97% на тестових даних є солідним результатом. Середню абсолютну похибку близько 1000\$ не можна назвати високою, оскільки бюджет для авто закладається з очікуванням підвищеної ціни.

За результатами досліджень, комбінування різних методів дозволяє покращити точність передбачення, зменшити помилку, що суттєво збільшить якість передбачень для кінцевого користувача. Подальший розвиток цього дослідження може включати застосування більшої кількості різних методів машинного навчання, тренування і застосування нейронних мереж і вдосконалення запропонованого підходу з метою покращення результатів.

References

- Liu E., Li J., Zheng A. (2022). Research on the prediction model of the used car price in view of the pso-gra-bp neural network. Sustainability. Vol. 14, No. 15. P. 8993.
- Gegic E., Isakovic B., Keco D. Car price prediction using machine learning techniques. Vol. 8, No. 1. P. 6.
- Pandey A., Rastogi V., Singh S. Car’s selling price prediction using random forest machine learning algorithm. Rochester, NY: 2020.
- Used cars dataset. <https://www.kaggle.com/datasets/austinreese/craigslist-carstrucks-data>.
- Piramuthu S. Input data for decision trees. Expert Systems with Applications. 2008. Vol. 34, No. 2. P. 1220–1226.
- Webb G. I., Fürnkranz J., Fürnkranz J., Sammut C. (2011). Decision tree. Encyclopedia of Machine Learning / G. I. Webb. Boston, MA: Springer US, P. 263–267.
- Breiman L. Random forests. Machine Learning. 2001. Vol. 45, No. 1. P. 5–32.
- Rokach L., Maimon O. Decision trees. The Data Mining and Knowledge Discovery Handbook. 2005. P. 165–192.
- Garofalakis M., Hyun D., Rastogi R., Shim K. Building decision trees with constraints. Data Mining and Knowledge Discovery. 2003. Vol. 7, No. 2. P. 187–214.
- Toloşi L., Lengauer T. (2011). Classification with correlated features: unreliability of feature ranking and solutions. Bioinformatics. Vol. 27, No. 14. P. 1986–1994.
- El Habib Daho M., N. Settouti, M. El Amine Lazouni, M. El Amine Chikh (2014). Weighted vote for trees aggregation in random forest.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-321-3-87-90
УДК 621.865

РОМАНЕЦЬ ТАРАС

Хмельницький національний університет
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0848-0825>
e-mail: romanetsta@khmnu.edu.ua

НЕЙМАК ВІТАЛІЙ

Хмельницький національний університет
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1204-3932>
e-mail: nejmakvit@gmail.com

МАЙДАН ПАВЛО

Хмельницький національний університет
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3319-8730>
e-mail: maidanps@gmail.com

СМУТКО СВІТЛАНА

Хмельницький національний університет
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7344-3799>
e-mail: svsmutko@gmail.com

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВАКУУМНИХ ЗАХВАТНИХ ПРИСТРОЇВ У ЛЕГКІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

Робота стосується автоматизації технологічних процесів у легкій промисловості. Зокрема розглядається можливість оснащення промислових роботів та маніпуляторів безнасосними вакуумними захватними пристроями вакуумного типу. Проаналізовано існуючі технічні рішення вакуумних захватних пристроїв для плоских об'єктів малої жорсткості та складної форми. Отримано залежності зміни об'єму вакуумної камери безнасосного захвату в процесі маніпулювання, що необхідні для розрахунку конструктивних параметрів робочих органів цих захватів та для визначення технологічних режимів їх роботи. Також вказані залежності, що можуть бути використані при аналітичному описі процесу натікання повітря в камеру безнасосного вакуумного захвату для визначення залежності часу натікання повітря у вакуумну камеру від конструктивних і технологічних параметрів захватного пристрою, а також від фізико-механічних властивостей об'єкта маніпулювання. Це дасть змогу проектувати безнасосні вакуумні захватні пристрої для маніпулювання деталями взуттєвої промисловості, а також буде корисним при виборі режимів роботи захватних пристроїв такого типу.

Ключові слова: маніпулювання, промисловий робот, захватний пристрій, безнасосний захват, натікання повітря.

ROMANETS TARAS, NEIMAK VITALII, MAIDAN PAVLO, SMUTKO SVITLANA
Khmelnyskyi National University

PROSPECTS FOR THE USE OF VACUUM CAPTURE DEVICES IN LIGHT INDUSTRY

The work concerns the automation of technological processes in light industry. In particular, the possibility of equipping industrial robots and manipulators with pumpless vacuum gripping devices of the vacuum type is being considered. The existing technical solutions of vacuum gripping devices for flat objects of low rigidity and complex shape are analyzed. The dependences of the change in the volume of the vacuum chamber of the pumpless gripper during the manipulation process, which are necessary for calculating the structural parameters of the working bodies of these grippers and for determining the technological modes of their operation, have been obtained. Also, the indicated dependencies can be used in the analytical description of the process of air inflow into the chamber of a pumpless vacuum gripper to determine the dependence of the time of air inflow into the vacuum chamber on the structural and technological parameters of the gripping device, as well as on the physical and mechanical properties of the manipulation object. This will make it possible to design pumpless vacuum gripping devices for handling parts of the shoe industry, and will also be useful in choosing the modes of operation of gripping devices of this type.

Keywords: manipulation, industrial robot, gripper, pumpless gripper, air inflow.

Постановка проблеми

Розвиток техніки і технологій вимагає збільшення ступеня автоматизації технологічних процесів у легкій промисловості. Особливе місце в загальному комплексі завдань із автоматизації вказаних процесів належить операціям завантаження і розвантаження технологічного обладнання плоскими деталями верху взуття. Для їх виконання можуть використовуватись робототехнічні пристрої, роботи, маніпулятори та автоматизовані системи керування технологічними процесами [1]. Автоматизація виробничих процесів дозволяє збільшити продуктивність обладнання, підвищити якість продукції, зменшити кількість обслуговуючого персоналу.

Робочими органами промислових роботів та маніпуляторів є захватні пристрої. Вони повинні забезпечувати надійне захоплення і утримання об'єктів маніпулювання, забезпечувати їх чітку орієнтацію в просторі; стабільність базування; швидкість переміщення; не повинні пошкоджувати об'єкт в місці контакту. Вид захоплення визначається формою, розміром, масою та властивостями захоплюваного об'єкта маніпулювання, а також специфічними вимогами технологічного процесу.

Оснащення промислових роботів захватними пристроями вакуумного типу дозволяє застосовувати їх для різних технологічних процесів взуттєвих та швейних виробництв. Останнім часом інтенсивно ведуться розробки вакуумних захватних пристроїв (ВЗП), які здатні захоплювати і базувати об'єкти різних форм. Тому аналіз конструкцій ВЗП, розробка методів їх вибору, розрахунку та проєктування, встановлення

технічних вимог до них в залежності від характеру виконуваних операцій є актуальною задачею.

Поява та вдосконалення високошвидкісних приводів, що значно скорочують час виконання транспортних операцій, призвели до необхідності пошуку технічних рішень, спрямованих на зменшення часу захоплення та переміщення об'єкта маніпуляційним механізмом у загальному технологічному циклі.

Тому актуальним є розробка нових швидкодіючих безнасосних вакуумних захватних пристроїв для деталей легкої промисловості.

Аналіз останніх джерел

Важливий вклад у формування наукових основ автоматизації технологічних процесів завантаження і розвантаження обладнання штучними заготовками з допомогою промислових роботів внесли дослідження відомих учених: Ямпольського Л.С., Волчкєвича Я.І., Камишного Н.І., Малова А.Н., Шаумяна Г.А. та ін. [2]. Дослідження з кінематики і динаміки промислових роботів, з розроблення алгоритмів керування та інших питань проводили Юревич Є.І., Козирєв Ю.Г., Спиноу Г.А., Костюк В.І. [3]. Питанням автоматизації складальних процесів в легкій промисловості присвячені роботи Піскорського Г.А., Орловського Б.В., Дрожжина В.І., Тонковиди Л.А., Ганулича О.А. тощо [4].

В своїх працях автори статті теж вже торкалися цієї теми. Зокрема пропонувалось для маніпулювання деталями верху взуття використовувати безнасосні вакуумні захвати [5]. Їх перевага у автономності роботи (відсутність джерел живлення). Безнасосні вакуумні захвати бувають поршневі, діафрагмові та сильфонні. У поршневих системах вакуум створюється шляхом зміни об'єму захоплюючої камери під час руху поршня в циліндрі. Діафрагмові схожі на поршневі, але замість поршня використовується діафрагма. У сильфонних принцип дії відповідає діафрагмовим, але він виконаний у вигляді гофрованого циліндра, що складається.

Ми проаналізували продукцію провідних європейських фірм, зокрема, Festo, Schmalz, Camozzi, FEZER, AERO-LIFT Vakuumtechnik, SMI Handling Systeme, GRIPWIQ, HOVA, що займаються виробництвом вакуумних захватних пристроїв. Однак відповідних готових технічних рішень ВЗП для плоских об'єктів малої жорсткості та складної форми, якими є деталі верху взуття, не виявили. Звичайно серед продукції вказаних виробників є достатньо пропозицій самих робочих органів ВЗП, а саме круглих та овальних присосів різних розмірів та різної жорсткості. Також є струминні захватні пристрої (захвати Бернуллі), які можуть справитись з поставленою задачею, однак вони мають інший принцип дії.

Найбільш близькими за вимогами, які ставляться авторами, є захватні пристрої фірми Vaculift серії Green Line. Щоправда це стосується лише автономності роботи пристрою.

Таким чином, спираючись на наші попередні дослідження та враховуючи аналіз відомих конструкцій ВЗП, ставиться задача створення вакуумних захватних пристроїв, що відповідають сучасним вимогам.

Вклад основного матеріалу

Розрідження у вакуумній камері безнасосного захвату в процесі маніпулювання, на відміну від вакуумних захватів що використовують активний вакуум, не залишається сталим. В процесі маніпулювання має місце натікання повітря в вакуумну камеру захвату крізь контактний зазор між юбною присоса і поверхнею деталі, який утворюється через наявність на контактуючих поверхнях нерівностей, а також крізь матеріал деталі. Для вакуумних захватів, що використовують активний вакуум, основні параметри пристроїв і режими їх роботи досліджені досить добре. Безнасосні ж вакуумні захвати з цього погляду досліджені мало. Внаслідок натікання повітря у вакуумну камеру захвату в процесі маніпулювання розрідження в порожнині безнасосного вакуумного захвату буде поступово зменшуватися, і в певний момент часу, коли сила утримання стане меншою від сил відриву деталі, захват перестане її утримувати. Таким чином постає задача визначення часу натікання повітря в робочий орган, тобто часу утримання деталі безнасосним вакуумним захватом.

Оскільки в процесі маніпулювання робочий об'єм безнасосного вакуумного захвату не залишається сталим, то виникає необхідність його визначення. Розрахунок зміни робочого об'єму зробимо на прикладі безнасосного вакуумного захвату поршневого типу (рис. 1). Всі інші типи безнасосних вакуумних захватів можна привести до поршневого.

На першому етапі поршень 1 захвату під дією сили деформації F переміщається в крайнє нижнє положення стискаючи при цьому пружний елемент 2 (Рис. 1, а). При цьому об'єм порожнини присоса зменшується до мінімально можливого об'єму V_0 . Тиск в ній дорівнює атмосферному тиску p_a . Для створення розрідження силу деформації знімають. Сила пружності F_{np} пружного елемента переміщує поршень захвату вгору. Робочий об'єм в початковий момент захвату збільшується до величини V_1 . При цьому в робочому органі захвату створюється розрідження $p_p = p_a - p_{e,0}$, де $p_{e,0}$ величина тиску в присосі в момент захвату об'єкта. При збільшенні робочого об'єму від V_1 до V_2 тиск в порожнині присоса залишається сталим. Визначимо величину розрідження, що створюється в робочому органі захвату в початковий момент захвату. Для цього розглянемо сили що діють на поршень захвату. Як видно з наведеної на рисунку 2 схеми процесу взаємодії елементів захвату, на поршень діють сила пружності пружного елемента F_{np} , а також тиск повітря в штоковій порожнині p_a та поршневій порожнині $p_{e,0}$. Тому можна записати:

$$p_a(S_{nop} - S_{um}) = F_{np} + p_{e,0}S_{nop}, \quad (1)$$

де $S_{шт}$ і $S_{пор}$ – площа штока та поршня захвату відповідно.

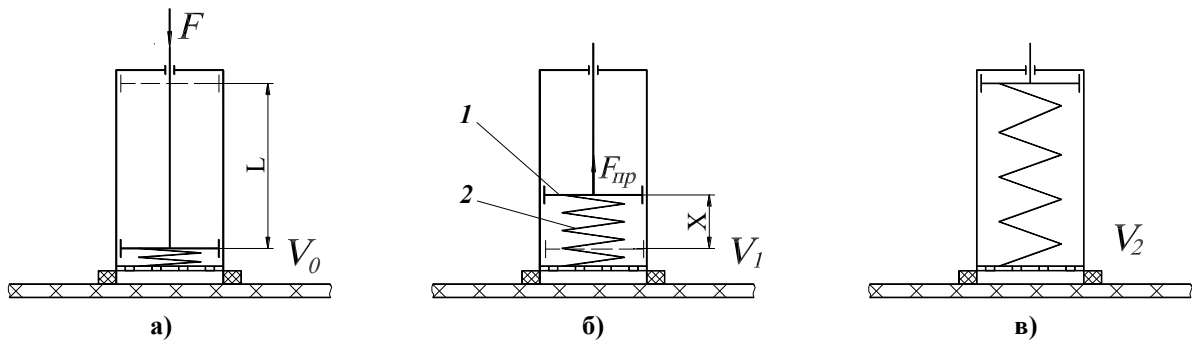


Рис. 1. Зміна робочого об'єму безнасосного вакуумного захвату

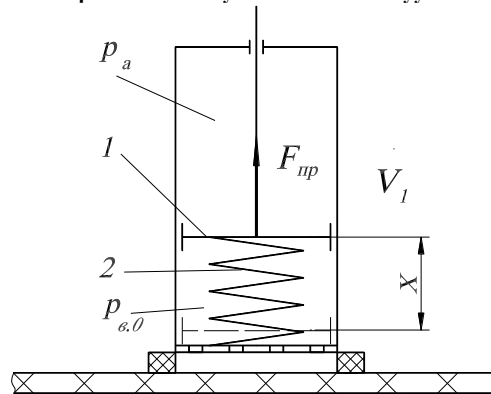


Рис. 2. Силова взаємодія елементів захвату

Підставивши значення цих величин і нехтуючи площею штока через незначну її величину отримаємо:

$$(p_a - p_{в.0})S_{пор} = kX, \tag{2}$$

де k - жорсткість пружного елемента захвату, X - переміщення поршня.

При збільшенні об'єму порожнини захвату від V_0 до V_1 тиск в ній змінюється від p_a до $p_{в.0}$. Вважаючи що процес протікає адіабатично можна записати:

$$p_a V_0 = p_{в.0} V_1,$$

звідки

$$p_{в.0} = \frac{p_a V_0}{V_1}. \tag{3}$$

Підставимо значення тиску p_0 з формули (3) в (2):

$$\left(p_a - \frac{p_a V_0}{V_1} \right) S_{пор} = kX. \tag{4}$$

При зміні робочого об'єму від V_0 до V_1 поршень переміщується на величину ходу $X = \frac{V_1 - V_0}{S_{пор}}$.

Підставимо його значення в формулу (4):

$$\left(p_a - \frac{p_a V_0}{V_1} \right) S_{пор} = k \frac{V_1 - V_0}{S_{пор}}.$$

Після нескладних математичних перетворень отримаємо:

$$\frac{k}{S_{пор}} V_1^2 - \left(\frac{k}{S_{пор}} V_0 + p_a S_{пор} \right) V_1 + p_a S_{пор} V_0 = 0. \tag{5}$$

Об'єм V_0 є величиною сталою. Таким чином ми маємо квадратне рівняння відносно змінної V_1 .

Корені цього рівняння V_{11} та V_{12} дорівнюють $V_{11} = V_0$; $V_{12} = \frac{p_a S_{пор}^2}{k}$. Перший з цих коренів позбавлений фізичного змісту. А отже розв'язком рівняння (5) є:

$$V_1 = \frac{p_a S_{\text{нор}}^2}{k}. \quad (6)$$

Знайдемо тиск в порожнині присоса в початковий момент захоплення об'єкта маніпулювання. При цьому може бути два випадки:

- перший - $V_1 \geq V_2$;

- другий - $V_1 < V_2$.

Для визначення тиску скористаємось рівнянням (3). В першому випадку

$$p_{в.0} = \frac{p_a V_0}{V_2}, \quad (7)$$

тобто після зняття деформуючого навантаження пружний елемент захвату відразу повертає камеру до вихідного стану.

В другому випадку:

$$p_{в.0} = \frac{p_a V_0}{\frac{p_a S_{\text{нор}}^2}{k}} = \frac{V_0 k}{S_{\text{нор}}^2}, \quad (8)$$

а отже спочатку розмір камери набуває певного проміжного стану об'ємом V_1 за якого в ній створюється розрідження $p_p = p_a - p_{в.0}$. Далі, внаслідок натікання повітря, камера поступово збільшується до вихідного стану.

Час натікання повітря в присос можна розділити на два етапи. Перший з них – час протягом якого робочий об'єм збільшується від V_1 до V_2 . При цьому тиск в камері присоса $p_{в.0}$ залишається сталим і його можна визначити за формулою (8). Другий відрізок часу відповідає тривалості процесу натікання повітря в камеру захвату від моменту коли форма камери набуде вихідного стану, тобто робочий об'єм стане рівним V_2 , до моменту коли деталь самовільно відокремиться від присоса. Протягом цього етапу робочий об'єм залишається сталим і рівним V_2 , а внаслідок натікання повітря зростає тиск від $p_{в.0}$ до $p_{гр}$ - граничного тиску, за якого деталь ще утримується присосом.

Висновки

Отримані залежності зміни об'єму вакуумної камери безнасосного захвату в процесі маніпулювання що необхідні для розрахунку конструктивних параметрів робочих органів цих захватів, а також для визначення технологічних режимів їх роботи. Вони будуть використані при аналітичному описі процесу натікання повітря в камеру безнасосного вакуумного захвату для визначення залежності часу натікання повітря у вакуумну камеру від конструктивних і технологічних параметрів захватного пристрою, а також від фізико-механічних властивостей об'єкта маніпулювання. Що дасть змогу проєктувати безнасосні вакуумні захватні пристрої для маніпулювання деталями взуттєвої промисловості, а також буде корисним при виборі режимів роботи захватних пристроїв такого типу.

Література

1. Проць. Я.І. Захоплювальні пристрої промислових роботів : навчальний посібник. Тернопіль : Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя, 2008. 232 с.
2. Автоматическая загрузка технологических машин : справочник / под ред. И.А. Клусова. М. : Машиностроение, 1990. 358 с.
3. Костюк В.И., Ямпольский Л.С. Гибкие сборочные робототехнические систем. К. : Выща шк., Головное изд-во, 1988. 722 с.
4. Тонковид Л.А. Автоматические манипуляторы в обувном производстве. М. : Легпромбытгиздат, 1987. 176 с.
5. Драпак Г.М., Романець Т.П., Онофрійчук В.І. Використання пасивних вакуумних захватів у взуттєвій промисловості. Вісник Технологічного університету Поділля. Хмельницький, 2003. № 6. Ч. 1, Т. 2.

References

1. Prots. Ya.I. Zakhopliuvalni prystroi promyslovykh robotiv : navchalnyi posibnyk. Ternopil : Ternopilskiy derzhavnyi tekhnichnyi universytet im. I. Puliua, 2008. 232 s.
2. Avtomaticheskaja zagruzka tehnologicheskikh mashin : spravochnik / pod red. I.A. Klusova. M. : Mashinostroenie, 1990. 358 s.
3. Kostjuk V.I., Jampol'skij L.S. Gibkie sborochnye robototekhnicheskie sistem. K. : Vyshha shk., Golovnoe izd-vo, 1988. 722 s.
4. Tonkovid L.A. Avtomaticheskie manipuljatory v obuvnom proizvodstve. M. : Legprombytizdat, 1987. 176 s.
5. Drapak H.M., Romanets T.P., Onofriichuk V.I. Vykorystannia pasyvnykh vakuumnykh zakhvativ u vzuttievii promyslovosti. Visnyk Tekhnolohichnoho universytetu Podillia. Khmelnytskyi, 2003. № 6. Ch. 1, T. 2.

САПОЖНИК ДМИТРО

Львівський торговельно-економічний університет

ORCID ID: [0000-0002-1125-8571](https://orcid.org/0000-0002-1125-8571)e-mail: dimalv.ua@gmail.com

СУЧАСНІ АСПЕКТИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ КОНТРАФАКТНОЇ ПРОДУКЦІЇ

У статті розглядаються проблеми та сучасні аспекти ідентифікації контрафактної продукції, проблеми, що виникають під час боротьби з контрафактними товарами. Констатовано, що у випадку, коли виготовлення, розповсюдження чи інше використання, а також імпорт, перевезення чи зберігання матеріальних носіїв, у яких виражено результат інтелектуальної діяльності чи засіб індивідуалізації, призводять до порушення виключного права на такий результат чи на такий засіб, такі матеріальні носії вважаються контрафактними.

Показано, що ввезення та розповсюдження контрафактної продукції, насамперед, пов'язані з фальсифікацією кількісних і якісних показників товарів з метою заниження митної вартості товарів, що суттєво впливає на обчислення митних платежів. Констатовано, що основними аспектами сучасної ідентифікації контрафактної продукції є визначення однорідності представленого зразка товару зареєстрованим товарам (зазначеним у свідоцтві). Товари, що порівнюються в процесі експертизи, можуть бути визнані неоднорідними, однорідними, ідентичними, близькими до ідентичності; визначення тотожності або схожості товарів, у т. ч. і до можливого змішування (ступінь змішування) багатокomпонентної продукції.

Ключові слова: контрафактна продукція, декларування, митна експертиза, митний реєстр об'єктів експертизи.

SAPOZHNYK DMYTRO

Live University of Trade and Economics

MODERN ASPECTS OF IDENTIFICATION OF COUNTERFEIT PRODUCTS

The article discusses the problems and modern aspects of identification of counterfeit products, as well as the problems arising in the course of combating counterfeit goods. It is stated that if the manufacture, distribution or other use, as well as import, transportation or storage of material media containing the result of intellectual activity or means of individualization lead to infringement of the exclusive right to such result or means, such material media are considered counterfeit.

The author shows that importation and distribution of counterfeit products are primarily associated with falsification of quantitative and qualitative indicators of goods in order to understate the customs value of goods, which significantly affects the calculation of customs duties. At the same time, up to 80% of goods in circulation in the domestic market are related to copyright or patent infringement, and in certain groups of goods in circulation, 30 to 50% are actually counterfeit or falsified. The author analyzes the damage caused by counterfeit products to the country's economy and business.

It is noted that an integrated approach is needed to combat counterfeit products, detect and prevent their import and export, and the following measures are worthy of attention: improvement of interaction between customs authorities and right holders; improvement of the regulatory framework in the field of intellectual property protection; raising the legal culture of citizens in the field of intellectual property; introduction of new technical means of control and information transfer; improvement of the procedure for declaration and commodity expertise.

It is stated that the main aspects of modern identification of counterfeit products are: determination of the homogeneity of the presented sample of goods to the registered goods (specified in the certificate). The goods compared in the course of examination may be recognized as heterogeneous, homogeneous, identical, close to identity; determination of identity or similarity of goods, including possible mixing (degree of mixing) of multi-component products.

Keywords: counterfeit products, declaration, customs examination, customs register of the objects of mine inspection.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

В інноваційній економіці особливу значимість для юридичних осіб мають нематеріальні активи. Одним із різновидів нематеріальних активів вважається абсолютне право на зазначений у власності юридичної особи товарний знак – засіб індивідуалізації, позначення, що дає можливість відрізнити відповідно товари і послуги одних юридичних або фізичних осіб від однорідних товарів, послуг інших юридичних або фізичних осіб. За рахунок впізнаваності правовласник товарного знаку стає впізнаваним, гарантуючи йому додатковий прибуток.

Захист цивільних прав від незаконного використання товарного знаку, окрім вимог про припинення порушення або стягнення завданих збитків, здійснюється також шляхом: публікації судового рішення з метою відновлення ділової репутації потерпілого; видалення з товару або його упаковки незаконно використаних товарного знаку чи позначення, подібного до нього до ступеня знищення; виготовлення зображень виготовлених зображень товарного знаку, схожого до нього до ступеня змішування; арешту чи знищення товарів, щодо яких незаконно застосували товарний знак; арешту або знищення товарів, які незаконно використовували.

Контрафакція (лат. *contrafactio* – підробка) – це виробництво та реалізація окремими фірмами товарів, схожих із товарами відомих фірм-виробників, шляхом незаконного використання ними відомих на ринку товарних фірмових знаків з метою отримання фінансової вигоди.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Нині спостерігається стійка тенденція зростання кількості правопорушень у сфері інтелектуальної

власності, пов'язаних із виробництвом і розповсюдженням контрафактної продукції. Проблема контрафакту набула глобальних масштабів і загрожує економічній безпеці держав [1, 2]. У законодавстві більшості країн поняття контрафактної продукції визначається, як товари, що містять об'єкти права інтелектуальної власності, ввезення яких на митну територію країни або вивезення з цієї території призводить до порушення прав власника, що захищаються відповідно до чинного законодавства та її міжнародних договорів, укладених в установленому законом порядку [3–5]. Крім того, у національному визначенні, що у випадку, коли виготовлення, розповсюдження чи інше використання, а також імпорт, перевезення чи зберігання матеріальних носіїв, у яких виражено результат інтелектуальної діяльності чи засіб індивідуалізації, призводять до порушення виключного права на такий результат чи на такий засіб, такі матеріальні носії вважаються контрафактними.

Згідно з даними Всесвітньої митної організації, 9% усієї світової торгівлі становить піратська та контрафактна продукція. В останні роки в ЄС частка контрафакту зросла з 6% до 8%. Збитки від контрафакту за країнами: Франція – 6,8 млрд євро, Велика Британія – 9,2 млрд євро, Німеччина – 8,3 млрд євро [6]. Незважаючи на зусилля, що докладаються у боротьбі з контрафактною продукцією, на ринку спостерігається стабільна тенденція зростання кількості правопорушень. Частка підробок, що варіюються залежно від товарних категорій, становить 25-40%. Контрафактна продукція випускається як на території держави, так і імпортується із зарубіжжя. Більша частина всієї контрафактної продукції у світі, за даними експертів ОЕСР, виробляється в Китаї – 63,2% від усіх підробок у світі. Серед інших лідерів з виробництва підроблених товарів такі країни, як Туреччина (3,3%), Сінгапур (1,9%), Таїланд (1,6%) та Індія (1,2%). Понад 90% контрафакту прибуває з Китаю, Таїланду, Малайзії, країн Південно-Східної Азії [6, 7].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття.

Наявність контрафактної продукції створює негативний образ країни в міжнародному масштабі, сприяє формуванню кримінального ринку, призводить до збільшення тіншового товарного обігу і до скорочення легального виробництва внаслідок недобросовісної конкуренції. Якісну підробку часом буває просто неможливо відрізнити від оригіналу, оскільки виробник контрафакту випускає останній на виробничих потужностях правовласників, що ускладнює відрізнити підробку від оригіналу без спеціальної апаратури. Висока ціна на продукцію також не гарантує споживачеві придбання оригінальної продукції

Формулювання цілей статті

Метою статті є аналіз проблем ідентифікації контрафакту під час митного контролю та оформленні товарної продукції, яка містить ознаки об'єктів інтелектуальної власності та сучасних аспектів ідентифікаційних митних процедур.

Виклад основного матеріалу

Поділ контрафактної продукції за змістом засобів індивідуалізації (товарні знаки, знаки обслуговування, фірмові найменування, найменування місць походження товарів тощо), наведено на рис. 1.

| Засіб індивідуалізації | Зміст ознак індивідуалізації |
|---|--|
| товари-двійники (тотожні товари) | аналогі, що мають абсолютну схожість з оригіналом, які асоціюються з товарами правовласника і виробляються для введення в обіг у манау споживача |
| товари-імітатори | мають часткову схожість, так звану «до ступеня змішування», метою виробництва яких є створення у споживача асоціації з продукцією правовласника. Схожість може бути різних видів: схожість дизайну, схожість найменування, об'єднання частин кількох найменувань в одне тощо |
| контекстна схожість | асоціативно-сміслова схожість товару або групи товарів у загальній сюжетній лінії з брендом фірми-власника товарного знаку (наприклад, товар у складі предметів, які не випускаються виробником оригінальної продукції) |

Рис. 1. Зміст засобів індивідуалізації контрафактної продукції

Джерело: узагальнено за [2, 7]

Ввезення та розповсюдження контрафактної продукції, насамперед, пов'язані з фальсифікацією кількісних і якісних показників товарів з метою зниження митної вартості товарів, що суттєво впливає на обчислення митних платежів. Вважають, що на внутрішньому ринку до 80% товарів, які перебувають у обігу, пов'язані з порушенням авторських чи патентних прав, а за окремими групами товарів, які перебувають у обігу від 30 до 50% за фактом є контрафактними або фальсифікованими [8]. Збитки, що завдаються контрафактною продукцією згруповані у рис. 2.

| |
|---|
| втрати економіки, пов'язані з ненадходженням податкових та інших платежів до бюджетів держави і державних позабюджетних фондів |
| зниження престижу держави, погіршення інвестиційного клімату |
| фінансові втрати власників авторських прав на продукцію і прав на товарні знаки |
| шкода здоров'ю споживачів контрафактної продукції |

Рис. 2. Збитки від реалізації контрафактної продукції

Джерело: власна розробка

Угода з *TRIPS*, розроблена членами СОТ (Марракеш; 15.04.1994) (зі зм. від 06.12.2005), містить комплекс заходів законодавчого, правоохоронного та організаційного характеру, спрямованих на запобігання ввезенню та вивезенню контрафактних товарів, створення заходів, що забезпечують охорону об'єктів інтелектуальної власності. До них належать:

- 1) кримінальне покарання у вигляді тюремного ув'язнення для осіб, які підробляють товари;
- 2) адміністративна відповідальність, у вигляді накладення штрафів на осіб, накладення арешту на товар, конфіскації товару, знищення товару.

До характерних ознак контрафакту митні та правоохоронні органи можуть віднести продукцію за наявності ознак наступного (рис. 3).

Немає жодних сумнівів, що у питаннях боротьби з контрафактною продукцією, виявлення та запобігання її ввезенню і вивезенню потрібен комплексний підхід, серед заходів якого заслуговують на увагу:

- удосконалення взаємодії митних органів і правовласників;
- удосконалення нормативної бази у сфері охорони інтелектуальної власності;
- підвищення правової культури громадян у сфері інтелектуальної власності;
- запровадження нових технічних засобів контролю та передачі інформації;
- удосконалення порядку проведення декларування та товарознавчих експертиз.

| |
|---|
| невідповідність найменування країни походження, зазначеної на товарі, з країною вивезення товару |
| ввезення здійснюється з країни, яка не є країною виготовлення оригінального товару |
| ввезення і вивезення здійснюється через пункти, які не використовує правовласник оригінального товару |
| товари марковані товарними знаками, схожими до ступеня змішування з оригінальними товарними знаками |
| упаковки мають дефекти |
| інструкція із застосування товару замінена фотокопією |
| перевезення товару здійснюється в розуккомплектованому вигляді або навалом |
| порівняно з однорідними або ідентичними товарами значно занижено суму страхівки |
| при ввезенні/вивезенні товарів відсутні дані про укладені ліцензійні договори |
| у списках ліцензіатів імпортер або одержувач товару не зазначені правовласником |

Рис. 3. Характерні ознаки ідентифікації контрафакту товарної продукції

Джерело: узагальнено за [1, 2, 8]

При цьому припинення правопорушень у сфері захисту прав інтелектуальної власності митними органами повинно здійснюватися:

- 1) до випуску товарів, на етапі митного декларування за рахунок призупинення випуску товарів, що внесені до Митного реєстру об'єктів права інтелектуальної власності України;
- 2) після випуску товарів шляхом проведення камеральних і виїзних митних перевірок;
- 3) у форматі оперативно-розшукових заходів на основі співпраці митних органів у рамках перевірок МВС України та інших дотичних контролюючих органів.

А особливості декларування товарів, що містять об'єкти інтелектуальної власності та/або їх ознаки, пов'язані із обов'язковим заявленням декларантом митному органу відомостей про товар у частині правомірності використання виключних прав на об'єкти інтелектуальної власності.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Підсумовуючи викладене констатуємо, що основними аспектами сучасної ідентифікації контрафактної продукції є:

- визначення однорідності представленого зразка товару зареєстрованим товарам (зазначеним у свідоцтві). Товари, що порівнюються в процесі експертизи, можуть бути визнані неоднорідними, однорідними, ідентичними, близькими до ідентичності;
- визначення тотожності або схожості товарів, у т. ч. і до можливого змішування (ступінь змішування) багатокomпонентної продукції.

Тотожність означає збіг позначень, елементів та складових у всіх конструкціях, тобто, точне копіювання засобу індивідуалізації товару. Подібність до ступеня змішування – це асоціація товарних складових між собою незважаючи на окремі відмінності. Дослідження позначення на товарі повинно проводитися експертом за наступними ознаками:

- а) тотожність за призначенням;
- б) графічна (візуальна) схожість;
- в) смислова (семантична) схожість;
- г) звукова (фонетична) схожість.

Таким чином, особливістю митної експертизи товарів є те, що у висновку експерта повинно бути зазначено: позначення можуть бути визнані неспорідненими (несхожими, неподібними, відмінними), подібними до ступеня змішування, схожими до ступеня змішування, схожими у високому ступені близького до ідентичності, тотожними із порівнюваними при експертизі товарними об'єктами.

Література

1. Shraddha M., Gunjan R. Economics of Counterfeit Products: With Special Reference to Mobile Phones & Watches. *Theoretical Economics Letters*. Vol. 9, No. 5, June 2019. DOI: [10.4236/tel.2019.95108](https://doi.org/10.4236/tel.2019.95108).
2. Marta B., Di Liddo A., Villani G. How do Fines and Their Enforcement on Counterfeit Products Affect Social Welfare? *Computational Economics* (2022) 60:1547–1573. <https://doi.org/10.1007/s10614-021-10195-6>.
3. Сапожник Д. І., Демидчук Л. Б. Постановка питань при призначенні митної експертизи об'єктів інтелектуальної власності. *Вісник ЛТЕУ. Технічні науки*. 2022. № 31, С. 62-69. DOI: <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2022-31-08>.
4. Чубенко А. Г. та ін. Термінологічний словник з питань запобігання та протидії легалізації (відмиванню) доходів, одержаних злочинним шляхом, фінансуванню тероризму, фінансуванню розповсюдження зброї масового знищення та корупції. К. : Ваіте, 2018. 826 с.
5. Митна енциклопедія : у двох томах. Т. 1 / Бережнюк І. Г. (відп. ред.) та ін. Хмельницький : ПП Мельник А.А., 2013. 472 с.
6. OECD/EUIPO (2019), Trends in Trade in Counterfeit and Pirated Goods, Illicit Trade, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/g2g9f533-en>.
7. Buttice V., Caviggioli F., Franzoni C., Scellato G., Stryszowski P., Thumm N. Counterfeiting in digital technologies: An empirical analysis of the economic performance and innovative activities of affected companies. *Research Policy*. Volume 49, Issue 5, June 2020. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2020.103959>.
8. Захистити Україну від контрафакту можна лише об'єднавши зусилля державних органів та усього суспільства! URL: <http://pakharenko.ua/zaxistiti-ukra%D1%97nu-vid-kontrafaktu-mozhna-lishe-obyednavshi-zusillya-derzhavnix-organiv-ta-usogo-suspilstva/>.

References

1. Shraddha M., Gunjan R. Economics of Counterfeit Products: With Special Reference to Mobile Phones & Watches. *Theoretical Economics Letters*. Vol. 9, No. 5, June 2019. DOI: [10.4236/tel.2019.95108](https://doi.org/10.4236/tel.2019.95108).
2. Marta B., Di Liddo A., Villani G. How do Fines and Their Enforcement on Counterfeit Products Affect Social Welfare? *Computational Economics* (2022) 60:1547–1573. <https://doi.org/10.1007/s10614-021-10195-6>.
3. Sapozhnyk D. I., Demydchuk L. B. Postanovka pytan pry pryznachenni mytnoi ekspertyzy ob'ektiv intelektualnoi vlasnosti. *Visnyk LTEU. Tekhnichni nauky*. 2022. № 31, S. 62-69. DOI: <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2022-31-08>.
4. Chubenko A. H. ta in. Terminolohichni slovnyk z pytan zapobihannia ta protydii lehalizatsii (vidmyvanniu) dokhodiv, oderzhanykh zlochnym shliakhom, finansuvanniu teroryzmu, finansuvanniu rozpovsiudzhennia zbroi masovoho znyshchennia ta koruptsii. K. : Vaite, 2018. 826 s.
5. Mytna entsyklopediia : u dvoch tomakh. T. 1 / Berezhniuk I. H. (vidp. red.) ta in. Khmelnytskyi : PP Melnyk A.A., 2013. 472 s.
6. OECD/EUIPO (2019), Trends in Trade in Counterfeit and Pirated Goods, Illicit Trade, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/g2g9f533-en>.
7. Buttice V., Caviggioli F., Franzoni C., Scellato G., Stryszowski P., Thumm N. Counterfeiting in digital technologies: An empirical analysis of the economic performance and innovative activities of affected companies. *Research Policy*. Volume 49, Issue 5, June 2020. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2020.103959>.
8. Zakhystyty Ukrainu vid kontrafaktu mozhna lyshe obiednavshy zusyllia derzhavnykh orhaniv ta usoho suspilstva! URL: <http://pakharenko.ua/zaxistiti-ukra%D1%97nu-vid-kontrafaktu-mozhna-lishe-obyednavshi-zusillya-derzhavnix-organiv-ta-usogo-suspilstva/>.

СМАЧИЛО ОКСАНА

Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна» м. Київ

ORCID ID: [0009-0001-9875-901X](https://orcid.org/0009-0001-9875-901X)e-mail: oksana.sma79@gmail.com

ЛЯШОК ІРИНА

Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна» м. Київ

ORCID ID: [0000-0001-9171-1075](https://orcid.org/0000-0001-9171-1075)e-mail: liashok77@gmail.com

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ВОЛОКНИСТИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

Статтю присвячено удосконаленню технології виготовлення волокнистих композиційних матеріалів. Дослідження зосереджені на технології виготовлення полімерного композиційного матеріалу на основі політетрафторетилену та вуглецевого волокна. В роботі досліджено можливість удосконалення деяких процесів та етапів технології виготовлення композиції, що допомагає досягти позитивних результатів щодо покращення ряду характеристик композиційного матеріалу.

SMACHYLO OKSANA V., LIASHOK IRINA O.
Open International University of Human Development «Ukraine»

IMPROVEMENT OF THE MANUFACTURING TECHNOLOGY OF FIBROUS COMPOSITE MATERIALS

The work is devoted to the improvement of the manufacturing technology of fibrous composite materials. Modern industry requires the production of new polymer and composite materials with a high level of operational characteristics. A promising direction for the creation of such materials is the use of various methods of modification of known materials. A very important problem that determines the technical and economic efficiency of the use of new composite materials is the prediction of operational properties and the modeling of polymers related to this problem. Research in this direction was focused on the technology of obtaining PMK based on polytetrafluoroethylene with a carbon filler. Research is focused on the technology of manufacturing polymer composite material based on polytetrafluoroethylene and carbon fiber. The first stage of improving the production technology of a fibrous composite material based on polytetrafluoroethylene is the preparation of the matrix by modifying the polymer, the second stage is the modification of the surface of the fibrous filler.

The work optimizes the technology of forming (pressing) the composition into the product, which helps to achieve positive results in terms of reducing moisture absorption. By improving the manufacturing technology of fibrous composite materials by modifying the polymer, modifying the surface of the fibrous filler and optimizing the technology of forming (pressing) the composition, it is possible to increase the parameters of the deformation-strength characteristics of the composite while maintaining high tribotechnical indicators; increase the strength of the PTFE composite and its wear resistance; reduce moisture absorption, increase indicators of operational properties. The further development of the production of polytetrafluoroethylene-based polymers should be based on the scientific principles of technology of polymers and composites based on them, applied materials science and physico-chemical mechanics of composite structures. Materials with a leading future for use in friction units of industrial equipment are carbon plastics based on polytetrafluoroethylene and modified fillers, which are successfully used to replace traditional materials of purpose.

Key words: composite polymer material, fibrous filler, polytetrafluoroethylene, physical and mechanical properties.

Інтенсивний розвиток будівельної індустрії пов'язаний з використанням нових методів і технологій синтезу матеріалів, що дозволило здійснити революцію на ринку будівельних матеріалів. Композиційний будівельний матеріал – це штучно створений неоднорідний суцільний матеріал, що складається з двох або більше компонентів з чіткою межею поділу між ними. У більшості композитів компоненти можна розділити на матрицю і включені в неї армуючі елементи. Знання закономірностей формування структури композитних матеріалів відкриває можливості регулювання їх властивостей, проектування матеріалів із заданими характеристиками. Це можна здійснювати за рахунок удосконалення технологічних параметрів, введення ефективних добавок і регулювання складу композицій.

В роботі [1] зроблено огляд робіт, присвячених дослідженню впливу різних факторів технологічного процесу підготовки складових на фізико-механічні та експлуатаційні властивості композитних матеріалів на основі політетрафторетилену (ПТФЕ). Авторами роботи [2] описаний традиційний промисловий процес одержання вуглецевоволокнистого композиту на основі політетрафторетилену, який, в основному, складається з наступних ланок технологічного ланцюжка операцій: приймання, відбракування та складування сировини, підготовка матриці та наповнювачів до змішування, змішування рецептурної кількості матриці та наповнювачів, диспергування композиції після змішування, пресування (формування) заготовок, термічна обробка (спікання) заготовок, механічна обробка деталей.

Метою даної роботи є удосконалення технології виготовлення волокнистого композиційного матеріалу з покращеними фізико-механічними та трибологічними характеристиками. В якості модельної обрано технологію виготовлення полімерного композиційного матеріалу на основі політетрафторетилену та вуглецевого волокна (ВВ).

Першим етапом удосконалення технології виготовлення волокнистого композиційного матеріалу на основі ПТФЕ є підготовка матриці шляхом модифікування полімеру. В роботі розглядався механічний метод активації порошку ПТФЕ. Активація порошку ПТФЕ здійснювалася за допомогою млина МРП-1М з різною частотою обертання робочих органів в інтервалі $n = (5000 - 9000) \text{ хв}^{-1}$ і протягом експериментально визначеного інтервалу часу $\tau = (3 - 8) \text{ хв}^{-1}$. Різниця у будові структури активованого і неактивованого ПТФЕ призводить до відмінності фізико-механічних властивостей (табл. 1).

Таблиця 1

Вплив механічної активації на густину полімеру

| № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------------------------------|---------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Пара-метри активації | Без активації | $\tau = 3$ хв, $n = 5000 \text{ хв}^{-1}$ | $\tau = 5$ хв, $n = 5000 \text{ хв}^{-1}$ | $\tau = 8$ хв, $n = 5000 \text{ хв}^{-1}$ | $\tau = 3$ хв, $n = 7000 \text{ хв}^{-1}$ | $\tau = 5$ хв, $n = 7000 \text{ хв}^{-1}$ | $\tau = 8$ хв, $n = 7000 \text{ хв}^{-1}$ | $\tau = 3$ хв, $n = 9000 \text{ хв}^{-1}$ | $\tau = 5$ хв, $n = 9000 \text{ хв}^{-1}$ | $\tau = 8$ хв, $n = 9000 \text{ хв}^{-1}$ |
| Густина $\rho, \text{ г/см}^3$ | 2,268 | 2,209 | 2,212 | 2,176 | 2,199 | 2,206 | 2,212 | 2,204 | 2,215 | 2,214 |

В роботі також визначалася залежність фізико-механічних характеристик полімеру від параметрів механічної активації. Дані цих досліджень наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Вплив механічної активації на фізичні та хімічні властивості ПТФЕ

| № | Параметри активації | Міцність на розрив σ , МПа | Відносне видовження δ , % | Інтенсивність зношування $I \cdot 10^{-7}$, $\text{мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$ |
|----|---|-----------------------------------|----------------------------------|--|
| 1 | Без активації | 9,6 | 96 | 113,4 |
| 2 | $\tau = 3$ хв, $n = 5000 \text{ хв}^{-1}$ | 10,3 | 241 | 108,0 |
| 3 | $\tau = 5$ хв, $n = 5000 \text{ хв}^{-1}$ | 21,7 | 415 | 93,0 |
| 4 | $\tau = 8$ хв, $n = 5000 \text{ хв}^{-1}$ | 17,3 | 281 | 80,0 |
| 5 | $\tau = 3$ хв, $n = 7000 \text{ хв}^{-1}$ | 10,7 | 271 | 97,1 |
| 6 | $\tau = 5$ хв, $n = 7000 \text{ хв}^{-1}$ | 23,6 | 422 | 82,1 |
| 7 | $\tau = 8$ хв, $n = 7000 \text{ хв}^{-1}$ | 18,3 | 357 | 71,8 |
| 8 | $\tau = 3$ хв, $n = 9000 \text{ хв}^{-1}$ | 19,7 | 290 | 89,1 |
| 9 | $\tau = 5$ хв, $n = 9000 \text{ хв}^{-1}$ | 24,9 | 416 | 61,1 |
| 10 | $\tau = 8$ хв, $n = 9000 \text{ хв}^{-1}$ | 18,0 | 340 | 72,2 |

Аналізуючи наведені дані видно, що найкращим результатом, що досягається, є режим механічної активації матриці ПТФЕ з числом обертів робочих органів подрібнювача $n = 9 \cdot 10^3 \text{ хв}^{-1}$ протягом 5 хвилин. При цьому міцність при розриві $\sigma = 24,9 \text{ МПа}$, відносне подовження $\delta = 416 \%$, інтенсивність зношування $I = 61,1 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$.

Поверхня вуглецевого волокна, що використовується для виготовлення полімерного композитного матеріалу сама по собі є інертною. Для покращення з'єднання цього ВВ з матрицею ПТФЕ виникає необхідність модифікувати його поверхню. Така обробка наповнювача дозволяє підвищити характеристики композитного матеріалу, які багато в чому залежать від адгезійного зв'язку вуглецевого волокна та полімерної матриці. Проведені дослідження показали, що найбільш поширеним способом модифікації поверхні ВВ з метою покращення адгезії ПТФЕ до ВВ є термоокислення поверхні волокон. Термоокислююча обробка поверхні ВВ приводить до зростання питомої поверхні і підвищення ступеню адсорбції.

Наведені в таблиці 3 результати дослідження зносостійкості вуглепластиків, що містять термооброблене ВВ, свідчать про ефективність термічної (зростання зносостійкості до 100 %) та термомеханічної модифікації (зростання до 130 %) волокна.

Таблиця 3

Інтенсивність зношування вуглепластику ($I \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$) при введенні вуглецю після термічної та термомеханічної модифікації

| Модифікація | Контрольний зразок | Температура, К | | | | | |
|----------------|--------------------|----------------|------|-----|-----|------|------|
| | | 373 | 473 | 573 | 673 | 773 | 873 |
| Термічна | 12,6 | 12,1 | 10,1 | 8,0 | 6,0 | 12,6 | 13,0 |
| Термомеханічна | | 11,1 | 9,1 | 7,0 | 5,6 | 11,5 | — |

Найбільший ефект термічної та термомеханічної модифікації реалізується при температурі 673 К (температура плавлення кристалітів ПТФЕ 598 - 623 К), внаслідок зміни надмолекулярної структури – за рахунок зростання гнучкості макромолекул ПТФЕ. Спостерігається зростання рівня міцності на 50 %, а зносостійкості – більше ніж у 2 рази для вуглепластиків, що містять ВВ після термомеханічної модифікації.

У сучасному матеріалознавстві широко застосовується підхід поєднання параметрів технологічного процесу для підвищення рівня міцності композитів, тому було здійснено дослідження сумісного впливу термомеханічного оброблення та вакуумування вуглеволокна на рівень фізико-механічних і триботехнічних властивостей вуглепластику (табл. 4). Як видно з наведених даних при термомеханічній модифікації волокна при температурі 673 К протягом 15 хв в умовах вакууму ($p = 550 \pm 10$ мм. рт. ст.) рівень міцності вуглепластику зростає більше ніж на 75 %, а рівень зносостійкості – більш ніж у 3 рази, порівняно з немодифікованим зразком.

Таблиця 4

Властивості ПТФЕ при термомеханічній модифікації подрібненого волокна в умовах вакууму ($p = 550 \pm 10$ мм рт. ст.)

| Параметри процесу | Контрольний зразок | Температура процесу, К | | | | |
|--|--------------------|------------------------|------|------|------|------|
| | | 373 | 473 | 573 | 673 | 773 |
| Міцність на розрив, МПа | 15,0 | 24,8 | 24,9 | 25,2 | 26,0 | 24,4 |
| Інтенсивність зношування, $1 \cdot 10^{-7}$ мм ³ /Н·м | 12,5 | 4,4 | 4,4 | 4,2 | 4,0 | 4,5 |

В умовах роботи хімічного і нафтогазового обладнання з рідкими і газоподібними середовищами ПМК на основі ПТФЕ та ВВ має великий недолік, це вологе поглинання [3]. Матеріал деталей, що працюють в таких умовах, з часом зношується, часто – до критичної межі. Удосконалення технології формування (пресування) композиції у виріб допомагає досягти позитивних результатів щодо зниження вологопоглинання.

Забезпечення надійного зв'язку наповнювачів і ПТФЕ-матриці в композиті досягається за рахунок оптимальної структурованості ПКМ в процесі його формування (пресування) [4]. Даний показник відображає забезпечення необхідної термодинамічної, кінетичної і механічної сумісності інгредієнтів системи, досягнення максимальної фізико-механічної взаємодії на межі розділу компонентів полімер – наповнювач і однорідності в макроб'ємі композиту, мінімізації дефектів структури і вологопоглинання композитів при роботі в умовах підвищеної вологості.

Чим більша тривалість дії вологи на композитний матеріал ущільнень компресорів його експлуатаційні характеристики та ресурс роботи помітно знижуються (у 3-4 рази), а інтенсивність зношування різко збільшується (в 4-8 разів) [5]. Ці обставини вимагають зупинки обладнання та проведення позапланових ремонтів, що в кінцевому підсумку призводить до економічних втрат. В якості контрольного зразку використовували композит Ф4ВВ20 наступного складу, % (мас.): ПТФЕ – 80, ВВ – 20, отриманий за відомою технологією. Промисловий процес пресування реалізується при режимі пресування – 40–45 МПа, швидкості пресування – $0,5 \cdot 10^{-2}$ м/с і часу витримки пресування під максимальним тиском – 300 с. Встановлено, що основними параметрами процесу пресування є тис, швидкість та тривалість витримки пресування під тиском. Результати досліджень зміни фізико-механічних та експлуатаційних властивостей композитів від технологічних характеристик процесу пресування наведено на наступних діаграмах.

Залежність адгезійної міцності вуглепластику [6] (S_1 – площа поверхні розривів; S – номінальна площа зразка) від тиску пресування наведено на рисунку 1, тривалості витримки тиску на рисунку 2, швидкості пресування на рисунку 3.

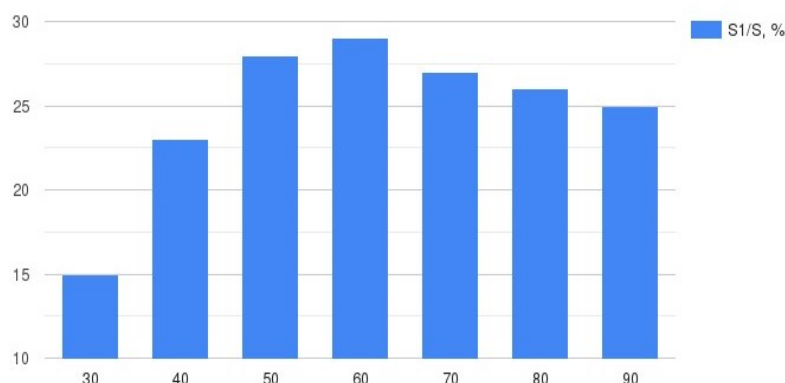


Рис. 1. Залежність адгезійної міцності вуглепластику (S_1 – площа поверхні розривів; S – номінальна площа зразка, %) від тиску пресування МПа

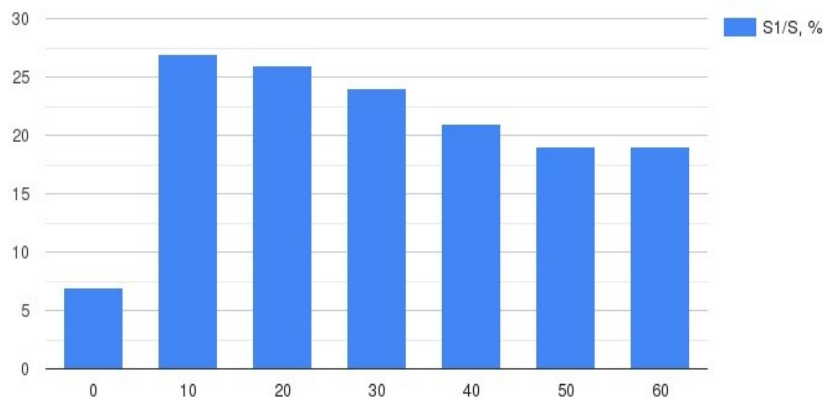


Рис. 2. Залежність адгезійної міцності вуглепластику (S_1 – площа поверхні розривів; S – номінальна площа зразка, %) від тривалості витримки тиску, хв.

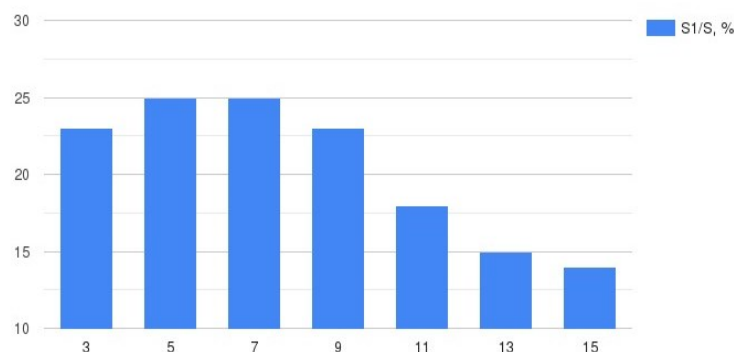


Рис. 3. Залежність адгезійної міцності вуглепластику (S_1 – площа поверхні розривів; S – номінальна площа зразка, %) від швидкості пресування, хв.

Отже, аналізуючи наведені діаграми, можна прийти до висновку, що оптимальними режимами, які забезпечують стійку взаємодію фаз ПТФЕ-матриці з ВВ при пресуванні заготовки у композиції за фізико-механічними їх характеристикам є: тиск пресування – 60 МПа; швидкість пресування заготовки – 0,83 м/с; час витримки пресування під тиском – 600 с.

Висновки

Таким чином, провівши ряд експериментальних досліджень можна дійти висновку, що при модифікації вихідних матеріалів та вдосконаленні параметрів технології отримання полімерного композиційного матеріалу можна отримати покращені матеріали з прогнозними властивостями на рівні кращих світових аналогів.

Енергетичний вплив на ненаповнений ПТФЕ призводить до підвищення параметрів його деформаційно-міцнісних характеристик (міцності при розриві в 2,6 рази, відносного подовження при розриві в 4,3 рази) при збереженні високих триботехнічних показників. Це, очевидно, пов'язано з утворенням нових реакційних центрів і збільшенням поверхневої енергії окремих фрагментів макромолекул в результаті дії пружних і пластичних деформацій.

При модифікації поверхні волокнистого наповнювача з метою покращення адгезії ПТФЕ до ВВ шляхом термоокислення поверхні волокон встановили, що найбільш ефективною виявилася термовакуумна технологія модифікації ВВ, яка дозволяє на 18–22 % підвищити міцність ПТФЕ-композиту та на 20–25 % його зносостійкість, що становить практичний інтерес для промислового впровадження.

Удосконалення технології формування (пресування) композиції у виріб дала можливість визначити оптимальні режими пресування, при яких зменшується вологопоглинання на 15–20 % порівняно з аналогом, збільшуються показники експлуатаційних властивостей (міцність при стиску вище аналога на 15–25 %, а зносостійкість на 40–45 %).

Література

1. Берладір Х. В. Особливості технології одержання полімерних композиційних матеріалів на основі політетрафторетилену (огляд) / Х. В. Берладір, О. А. Будник, В. А. Свідерський, П. В. Руденко, К. О. Дядюра // Фізика і хімія твердого тіла. – 2016. – Т. 17. – № 4. – С. 582–593.
2. Наукові основи розробки полімерних композиційних матеріалів триботехнічного призначення на основі політетрафторетилену : монографія / Х. В. Берладір, О. А. Будник, К. О. Дядюра та ін. ; за заг. ред. К. О. Дядюра. – Суми : Сумський державний університет, 2017. – 176 с. – ISBN 978-966-657-652-4.
3. Будник О. А. Вуглепластики триботехнічного призначення на основі фторопласту-4 та модифікованого вуглецевоволокнистого наповнювача : дис. ... канд. техн. наук / О. А. Будник. – Дніпро, 2011. – 160 с.

4. Мікульонок І. О. Термопластичні композитні матеріали та їх наповнювачі: класифікація та загальні відомості / І. О. Мікульонок // Хімічна промисловість України. – 2005. – № 5. – С. 30–39.
5. Старченко С.І. Модифікація структури політетрафторетилену / С.І. Старченко, Н.І. Доманцевич // Вісник Львівської комерційної академії. Серія товарознавча. – 2014. – Вип. 14. – С. 93–96.
6. Будник О. А. Фізико-хімічні методи активації ПТФЕ та композицій на його основі / О. А. Будник, Х. В. Берладір, П. В. Руденко // Матеріали І Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Сучасне матеріалознавство та товарознавство: теорія, практика, освіта», 26-27 лютого 2014 р. – Полтава, 2014. – С. 68–71.

References

1. Berladir Kh. V. Osoblyvosti tekhnolohii oderzhannia polimernykh kompozytsiinykh materialiv na osnovi politetraforetylenу (ohljad) / Kh. V. Berladir, O. A. Budnyk, V. A. Sviderskyi, P. V. Rudenko, K. O. Diadiura // Fyzyka i khimiiia tverdoho tila. - 2016. - T. 17. - № 4. - S. 582-593.
2. Naukovi osnovy rozrobky polimernykh kompozytsiinykh materialiv trybotekhnichnoho pryznachennia na osnovi politetraforetylenу : monohrafiia / Kh. V. Berladir, O. A. Budnyk, K. O. Diadiura ta in. ; za zah. red. K. O. Diadiury. – Sumy : Sumskiy derzhavnyi universytet, 2017. – 176 s. ISBN 978-966-657-652-4.
3. Budnyk O. A. Vuhleplastyky trybotekhnichnoho pryznachennia na osnovi fluoroplastu-4 ta modyfikovanoho vuhletsevoloknistoho napovniuvacha : dys. ... kand. tekhn. nauk / O. A. Budnyk. – Dnipro, 2011. – 160 s.
4. Mikulonok I. O. Termoplastychni kompozytni materialy ta yikh napovniuvachi: klasyfikatsiia ta zahalni vidomosti / I. O. Mikulonok // Khimichna promyslovist Ukrainy. – 2005. – № 5. – S. 30–39.
5. Starchenko S.I. Modyfikatsiia struktury politetraforetylenу [Elektronnyi resurs] / S.I. Starchenko, N.I. Domantsevych // Visnyk Lvivskoi komertsiiinoi akademii. Seriiia tovaroznavcha. – 2014. – Vyp. 14. – S. 93–96.
6. Budnyk O. A. Fyzyko-khimichni metody aktyvatsii PTFE ta kompozytsii na yoho osnovi / O. A. Budnyk, Kh. V. Berladir, P. V. Rudenko // Materialy I Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii «Suchasne materialoznavstvo ta tovaroznavstvo: teoriia, praktyka, osvita», 26-27 liutoho 2014 r. – Poltava, 2014. – S. 68–71.

МАТВІЙЧУК ЯРОСЛАВ

Національний університет «Львівська політехніка»

ORCID: [0000-0002-5570-182X](https://orcid.org/0000-0002-5570-182X)yaroslav.m.matviychuk@lpnu.ua

ЯЦИШИН ВОЛОДИМИР

Національний університет «Львівська політехніка»

ORCID: [0009-0001-9727-5080](https://orcid.org/0009-0001-9727-5080)volodymyr.p.yatsyshyn@lpnu.ua

РОЗРОБЛЕННЯ АРХІТЕКТУРИ ЗГОРТКОВОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ НА ОБМЕЖЕНОМУ НАБОРІ ДАНИХ

Робота спрямована на розробку архітектури згорткової нейронної мережі для класифікації зображень військової техніки. Ключовою вимогою до моделі є можливість навчання на обмежених вибірках даних. Було взято існуючу модель VGG-16, в якій замінено класифікатор на власний, що базується на повністю зв'язній нейронній мережі з 2-а виходами. Усі натреновані моделі перевіряються на адекватність та в подальшому будуть використовуватися для швидкої ідентифікації військової техніки у потоці відео.

Ключові слова: згорткова нейронна мережа, класифікація зображень, модель машинного навчання, ідентифікація військової техніки

MATVIYCHUK YAROSLAV, YACISHYN VOLODYMYR

Lviv Polytechnic National University

DEVELOPMENT OF A CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK ARCHITECTURE FOR MILITARY EQUIPMENT IMAGE CLASSIFICATION ON A LIMITED DATASET

The work is aimed at developing the architecture of a convolutional neural network for the classification of military equipment images. The key requirement for the model is the ability to be trained on limited data samples. The existing VGG-16 model was chosen, in which fully connected layers were replaced with a classifier based on a fully connected neural network with 2 outputs, resulting in a model with 13 convolutional blocks with a maximizing aggregation layer between each and 3 fully connected layers. Each convolutional layer was pre-trained using the ReLU activation function. Two fully connected layers of the replaced classifier also use ReLU as an activator, the last one-node layer uses a sigmoid function to perform the classification. In order to prevent retraining of the network, the Dropout regularization method with a screening factor of 0.2 was applied. To train the convolutional neural network, we use the Normal vs Military Vehicles dataset. The size of this dataset is quite limited and consists of approximately 17,500 files divided into training, verification and testing sets, each being divided in two asset classes: military and non-military. To overcome this limitation, the transfer learning method was used, when elements of a previously trained model are reused in a new machine learning model. Since VGG-16 is trained on a very large image set and is specially designed for image recognition and classification, resulting models show high accuracy and performance even after being trained on a limited datasets. In our case showing a decent 82% accuracy on Normal vs Military Vehicles validation dataset. All trained models are checked for adequacy, and will be used in the future for quick identification and classification of military equipment in the video stream.

Keywords: convolutional neural network, image classification, machine learning model, identification of military equipment

Вступ

Завдання класифікації зображень полягає у тому, щоб на основі вхідного зображення визначити клас або ймовірність належності до класу, який найкраще описує зображення. Для людей таке вміння розпізнавання є однією із перших базових навичок. Коли людина бачить зображення або спостерігає навколишній світ, у більшості випадків може відразу визначити сцену і присвоїти кожному об'єкту категорію. Ці навички швидкого розпізнавання шаблонів, узагальнення попередніх знань і адаптації до різних зображень ще не повністю доступні машинам. Подібним чином комп'ютер може виконувати класифікацію зображень, шукаючи ознаки низького рівня, такі як краї та криві, а потім створювати більш абстрактні поняття за допомогою серії згорткових шарів. Це загальна ідея роботи згорткової нейронної мережі.

Аналіз літературних джерел

Згорткові нейронні мережі (ЗНМ) є частиною сімейства глибоких нейронних мереж прямого поширення, де проміжний шар отримує на вхід ознаки, вилучені попереднім рівнем та передає свої вихідні дані наступному шару. Згорткові нейронні мережі працюють на основі фільтрів, які розпізнають певні характеристики зображення, наприклад, прямі лінії, прості кольори, вигини тощо [1].

Ядро фільтра – це матриця чисел (ваг). Ядро "навчається" з метою пошуку на зображеннях певних характеристик. Група ядер утворює фільтр. Кожен фільтр є ідентифікатором ознаки.

Фільтр рухається вздовж зображення і визначає, чи є певна потрібна характеристика в конкретній його частині. Для отримання відповіді працює операція згортки, яка є сумою добутків елементів фільтра та матриці вхідних сигналів. Площа, яку охоплює фільтр (рис. 2), називається сприйнятливим (рецептивним) полем. Сприйнятливим полем – частина матриці вхідних сигналів, що піддається згортці. Варто зазначити, що в міру заглиблення в мережу сприйнятливим полем фільтра збільшується, розширюється.

Фільтр переміщується вздовж матриці вхідних сигналів з певним кроком (stride). Крок визначає: на скільки пікселів зміщується фільтр. Якщо крок рівний, наприклад, одиниці, фільтр ковзатиме картою ознак піксель за пікселем. Це є типовим випадком.

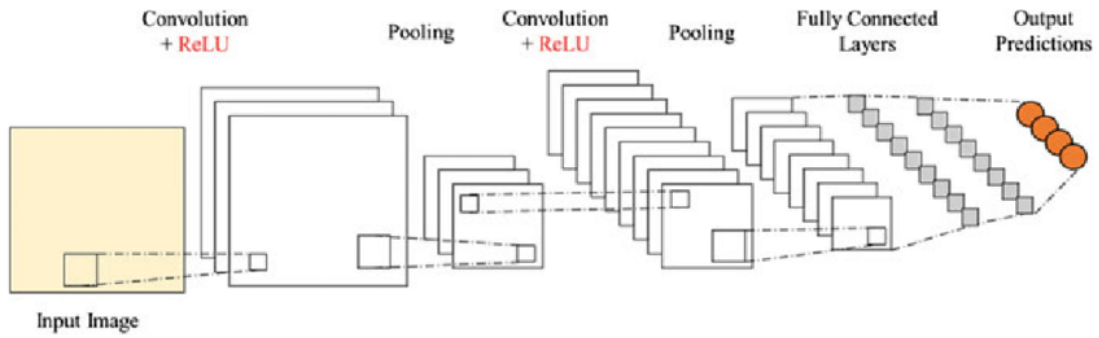


Рис. 1. Типова архітектура ЗНМ

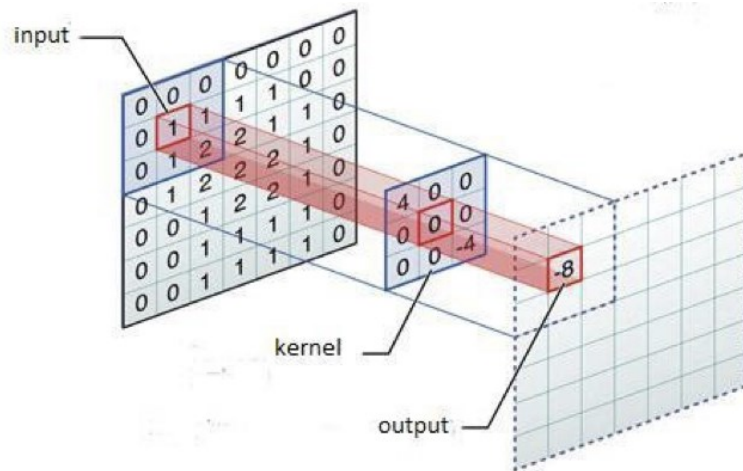


Рис. 2. Результат застосування фільтру

Якщо певна характеристика присутня у фрагменті зображення, охопленому фільтром, операція згортки на виході видаватиме число з відносно великим значенням. Якщо ж характеристика відсутня, вихідне число буде невеликим. На рис. 3 наведено конкретний приклад згортки [2, 4].

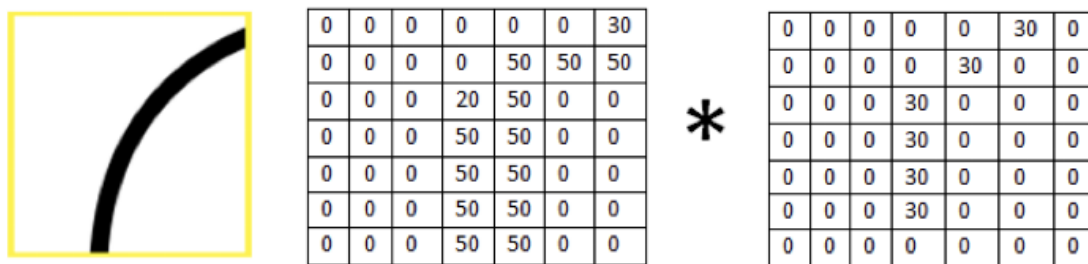


Рис. 3. Фільтр «шукат» лівосторонні криві

Якщо вхідними даними для першого згорткового шару є оригінальне зображення, то на вхід другого шару подається вихід першого шару у вигляді активаційних карт ознак, сформованих на попередньому етапі згортки. Таким чином, вихід шару визначає місця на вхідному зображенні, де є певні елементи низького рівня. Далі на виході наступного набору фільтрів будуть активаційні карти, які відповідають функціям вищого рівня (півкола, квадрати тощо). Послідовність згорткових шарів формує активаційні карти ознак, які представляють все більш складні функції.

З аналізу існуючих рішень визначено мету роботи – побудувати архітектуру системи ідентифікації військових транспортних засобів, що може бути натренована на обмеженому наборі даних.

Основний матеріал

Для навчання нейронної мережі скористаємось набором даних Normal vs Military Vehicles [5]. Розмір цього набору даних є досить обмеженим і складається із приблизно 17500 файлів у двох класах зображень: військова та не військова техніка. Структура наведена на рис. 4.

Для подолання обмеження скористаємось методом Transfer learning – перенесення навчання, коли

елементи попередньо натренованої моделі повторно використовуються в новій моделі машинного навчання. За основу візьмемо блоки згортки моделі VGG-16 [1], що була представлена на щорічному конкурсі ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge (ILSVRC). VGG16 – це згорткова нейронна мережа, навчена на підмножині набору даних ImageNet, колекції з понад 14 мільйонів зображень, що належать до 22 000 категорій. Ця модель запропонована у [2]. Якщо відкинути повністю зв'язні шари, то мережа складається з 13 згорткових шарів, має понад 14 мільйонів натренованих параметрів і завершується шаром максимального агрегування. Як новий класифікатор, у [2] додано два повністю пов'язані шари з кількістю нейронів 128 кожен, а також вихідний шар з одним вузлом (бінарна класифікація). З метою запобігання перенавчання мережі було застосовано метод регуляризації Dropout [3] з коефіцієнтом відсіювання 0.2. Повна характеристика одержаної мережі наведена на рис. 5.

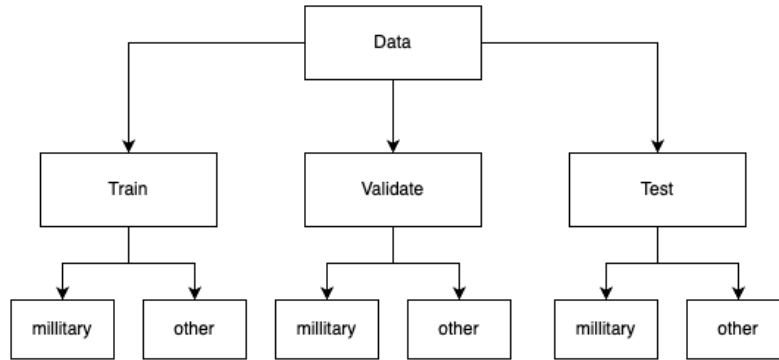


Рис. 4. Структура набору даних Normal vs Military Vehicles

| Layer (type) | Output Shape | Param # |
|----------------------------------|-----------------------|---------|
| input_1 (InputLayer) | [None, 224, 224, 3] | 0 |
| block1_conv1 (Conv2D) | (None, 224, 224, 64) | 1792 |
| block1_conv2 (Conv2D) | (None, 224, 224, 64) | 36928 |
| block1_pool (MaxPooling2D) | (None, 112, 112, 64) | 0 |
| block2_conv1 (Conv2D) | (None, 112, 112, 128) | 73856 |
| block2_conv2 (Conv2D) | (None, 112, 112, 128) | 147584 |
| block2_pool (MaxPooling2D) | (None, 56, 56, 128) | 0 |
| block3_conv1 (Conv2D) | (None, 56, 56, 256) | 295168 |
| block3_conv2 (Conv2D) | (None, 56, 56, 256) | 590080 |
| block3_conv3 (Conv2D) | (None, 56, 56, 256) | 590080 |
| block3_pool (MaxPooling2D) | (None, 28, 28, 256) | 0 |
| block4_conv1 (Conv2D) | (None, 28, 28, 512) | 1180160 |
| block4_conv2 (Conv2D) | (None, 28, 28, 512) | 2359808 |
| block4_conv3 (Conv2D) | (None, 28, 28, 512) | 2359808 |
| block4_pool (MaxPooling2D) | (None, 14, 14, 512) | 0 |
| block5_conv1 (Conv2D) | (None, 14, 14, 512) | 2359808 |
| block5_conv2 (Conv2D) | (None, 14, 14, 512) | 2359808 |
| block5_conv3 (Conv2D) | (None, 14, 14, 512) | 2359808 |
| block5_pool (MaxPooling2D) | (None, 7, 7, 512) | 0 |
| flatten (Flatten) | (None, 25088) | 0 |
| dense (Dense) | (None, 128) | 3211392 |
| dropout (Dropout) | (None, 128) | 0 |
| dense_1 (Dense) | (None, 128) | 16512 |
| dense_2 (Dense) | (None, 1) | 129 |
| Total params: 17,942,721 | | |
| Trainable params: 3,228,033 | | |
| Non-trainable params: 14,714,688 | | |

Рис. 5. Параметри отриманої моделі

На рис. 6. наведено класифікаційний звіт після оцінки моделі на валідаційній вибірці. Враховуючи обмежений розмір набору даних, модель досягла доволі хорошого результату – 82% на валідаційних даних.

| | precision | recall | f1-score | support |
|--------------|-----------|--------|----------|---------|
| military | 0.8 | 0.86 | 0.83 | 198 |
| other | 0.85 | 0.79 | 0.82 | 198 |
| accuracy | | | 0.82 | 396 |
| macro avg | 0.82 | 0.82 | 0.82 | 396 |
| weighted avg | 0.82 | 0.82 | 0.82 | 396 |

Рис. 6. Класифікаційний звіт після оцінки моделі на валідаційній вибірці

Висновки

Для розв'язання задачі ідентифікації військового транспортного засобу було використано попередньо натреновану глибоку нейронну мережу VGG-16 за принципом методу перенесення навчання та здійснено заміну повністю пов'язаних шарів на власний класифікатор. Для побудови моделі було використано відкриту нейромережеву бібліотеку Keras, що є надбудовою до відкритого фреймворку для глибокого навчання TensorFlow.

Виходячи з того, що доступний набір даних налічує обмежену кількість зображень, для даної задачі було прийнято рішення використовувати попередньо натреновану модель VGG-16. Було здійснено заміну повністю зв'язних шарів, в результаті чого модель налічувала 13 згорткових блоків з максимізаційним агрегаційним шаром між кожним з них та 3 повністю пов'язані шари. Кожен згортковий шар був попередньо натренований з використанням функції активації ReLU. Два повністю пов'язані шари заміненого класифікатора також використовують ReLU в ролі активатора, останній шар з одним вузлом використовує сигмоїдну функцію для здійснення класифікації.

Наступними завданнями дослідження можна визначити тренування і верифікацію моделі на більш спеціалізованих наборах даних.

References

1. Transfer learning using VGG-16 with Deep Convolutional Neural Network for Classifying Images (2019). International Journal of Scientific and Research Publications, p. 9420. DOI: 10.29322/IJSRP.9.10.2019.p9420
2. Simonyan Karen, Zisserman Andrew (2014). Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition.
3. Dropout in (Deep) Machine learning. <https://medium.com/@amarbudhiraja/https-medium-com-amarbudhiraja-learning-less-to-learn-better-dropout-in-deep-machine-learning-74334da4bfc5>
4. Javed F.M., Shamrat Mehedi, Chakraborty Sovon (2021). A Model Based on Convolutional Neural Network (CNN) for Vehicle Classification. Conference Paper CIS. https://www.researchgate.net/publication/363634204_A_Model_Based_on_Convolutional_Neural_Network_CNN_for_Vehicle_Classification
5. Normal vs Military Vehicles. <https://www.kaggle.com/datasets/amanrajbose/normal-vs-military-vehicles?resource=download>

ГОМЕЛЯ МИКОЛА

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID ID: [0000-0003-1165-7545](https://orcid.org/0000-0003-1165-7545)e-mail: m.gomelya@kpi.ua

ТРУС ІННА

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID ID: [0000-0001-6368-6933](https://orcid.org/0000-0001-6368-6933)e-mail: inna.trus.m@gmail.com

ВАКУЛЕНКО АННА

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID ID: [0000-0003-1035-9175](https://orcid.org/0000-0003-1035-9175)e-mail: nataliya@gmail.com

ФАТЄЄВ ДАНИЛО

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

e-mail: denkeksov228@gmail.com

ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ВІД НІТРАТІВ МЕТОДОМ ЗВОРОТНОГО ОСМОСУ

В роботі наведено результати досліджень зворотно-осмотичного очищення води від нітратів при вихідних концентраціях 3,0; 10,0; 30,0 та 150,0 мг/дм³. Встановлено, що мембрана низького тиску має високі значення продуктивності при низьких показниках селективності по аніонах.

Ключові слова: зворотній осмос, вилучення нітратів, продуктивність, селективність, перміат, концентрат.

GOMELYA MUKOLA D.

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

TRUS INNA M.

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

VAKULENKO ANNA K.

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

FATIEIEV DANYLO S.

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

DEFINITION OF THE EFFICIENCY OF NITRATE REMOVAL FROM WATER USING THE REVERSE OSMOSIS METHOD

Nitrates are usually present in all natural water bodies. Their source is usually agricultural production, municipal and domestic wastewater, and surface runoff. Elevated concentrations of nitrates in drinking water pose a serious threat to both the environment and human health, and their removal and content control are quite relevant. The content of nitrates in drinking water is regulated by the requirements of regulatory documents and, according to the recommendations of the World Health Organization, should not exceed 50 mg/dm³. Since nitrates are stable and highly soluble water anions with low precipitation or adsorption capabilities, they are quite difficult to remove from water. Currently, processes such as electrodialysis, reverse osmosis, ion exchange, catalytic and biological degradation are used to purify water from nitrates. The choice of a specific method for removing nitrates from water is determined by the technical means of purification, the ultimate purpose of the purified water, the cost, and the degree of purification. Baromembrane methods, in particular reverse osmosis methods, are promising, but their possibilities for nitrate removal have not been sufficiently studied. The reverse osmosis process for the removal of nitrates from water has been studied. A module with a low-pressure Filmtec TW30-1812-50 membrane was used for reverse osmosis water purification from nitrates. The efficiency of nitrate removal on a reverse osmosis membrane was low, and the selectivity of the membrane increased with increasing permeate recovery from 10 to 90% at an initial nitrate concentration of 3.0 mg/dm³, from 34.32 to 72.90%, at 10.0 mg/dm³, from 37.14 to 69.20%; at 30.0 mg/dm³, within 74.86-81.92%, and at 150.0 mg/dm³, within 82.92-83.11%. In general, selectivity increased with increasing nitrate concentration in the water. The residual nitrate concentrations in the water were significant in almost all cases and often exceeded the permissible level in drinking water. At the same time, the nitrate content in the concentrates was low, which complicates the problem of their disposal.

Keywords: reverse osmosis, nitrates, water purification, selectivity, concentration.

Постановка проблеми

Підвищення концентрації нітратів спостерігається в ґрунтових водах та поверхневих водах по всій земній кулі, в основному внаслідок інтенсивного внесення добрив. Також джерелом нітратів є комунально-побутові стічні води та природні процеси нітрифікації [1, 2]. Допустима концентрація нітратів у питній воді не повинна перевищувати 50 мг/дм³.

Аналіз останніх джерел

Зворотний осмос (ЗО), електродіаліз (ЕД), іонообмінні (ІО), сорбційні та біологічні технології можуть бути дуже ефективно застосовані для денітрифікації води [3, 4]. Кожна з цих технологій має свої переваги та недоліки.

Використання біологічних методів передбачає відновлення нітратів до газоподібного азоту відбувається за схемою:



Проте біологічні методи відновлення нітратів доцільно використовувати лише при очищенні стічних вод. Внаслідок вторинного забруднення води їх використання обмежене при підготовці питної води. Те ж саме стосується і методів хімічного та електрохімічного відновлення.

Основним обмеженням широкого впровадження ЗО, ЕД та ІО технологій є утилізація концентрату, що утворюється в процесі опріснення [5]. В процесі ЗО очищення води концентрат може складати приблизно від 10 % до 50 % об'єму очищеної води, залежно від якості вихідної води. Використання методів ЗО буде ефективним лише за умови розробки доцільних способів переробки концентратів. Для переробки концентрату можна використовувати випарні ставки, проте це досить дорогий спосіб, більш економічним є: *відправка* на очисні споруди, біодеградація концентрованих відходів, зменшення об'єму *методами* (на заводах) ЕД, зрошення полів та використання для поливу, що є дуже зручним способом утилізації концентрату. Тому для цього дослідження було обрано технологію ЗО, оскільки вона дуже ефективна для опріснення води.

Метою роботи є дослідження ефективності зворотньоосмотичного очищення води від нітратів різної концентрації в залежності від ступеню відбору перміату.

Виклад основного матеріалу

Мембранні процеси очищення води від нітратів проводили при використанні касет із зворотньо-осмотичною мембраною низького тиску Filmtec TW30-1812-50. Як середовище використовували на першому етапі розчин нітрату натрію з концентрацією по нітратах 3,0 мг/дм³, на кожному наступному етапі в якості вихідного розчину брали концентрат, отриманий на попередній стадії очищення. Концентрації розчинів нітратів становили 3,0; 10,0; 30,0; 150,0 мг/дм³. Початковий об'єм розчину складав 10,0 дм³. Даний розчин з допомогою насоса подавали на зворотньо-осмотичний фільтр з картриджем, який містив мембрану Filmtec TW30-1812-50. У мірний циліндр відбирали перміат об'ємом 1 дм³. Концентрат повертали у ємність з робочим розчином. Тиск у системі підтримували, регулюючи подачу води насосом та краном витрати концентрату. Пропускали 9,0 дм³ води, відбираючи проби по 1,0 дм³. У кожній пробі перміату визначали концентрацію нітратів. Для кожної проби перміату визначали аналітично та розраховували математично вміст нітратів у концентраті. За допомогою секундоміра відмічали час, за який відбирається 1 дм³ перміату.

Концентрацію нітратів визначали потенціометричним методом при використанні іон-селективного електроду АС0117А.

Для розрахунку селективності мембрани (R, %) використовували формулу:

$$R = \frac{C_0 - C_n}{C_0} \cdot 100, \% \quad (1)$$

де R – селективність мембрани, %; C₀ та C_n – концентрація нітратів у вихідному розчині та перміаті, відповідно.

Для розрахунку концентрації нітратів в i-й пробі концентрату (C_{ki}, мг/дм³) використовували формулу:

$$C_{ki} = \frac{V_0 \cdot C_0 - \sum_{i=1}^n (C_{ni} \cdot V_{ni})}{V_0 - \sum_{i=1}^n V_{ni}}, \frac{\text{мг}}{\text{дм}^3}, \quad (2)$$

де C_{ki} – концентрація нітратів у концентраті після відбору i-ї проби перміату, мг/дм³; C₀ та V₀ – концентрація нітратів у вихідному розчині (мг/дм³) та об'єм вихідного розчину (дм³), відповідно; V_{ni} – об'єм проби перміату, 1 дм³; C_{ni} – концентрація нітратів в i-й пробі перміату, мг/дм³; i – число проб перміату, n=1–9.

Для розрахунку продуктивності мембрани (швидкості трансмембранного потоку) (j, дм³/(м²·год)) використовували формулу:

$$j = \frac{V_n}{S \cdot \Delta \tau}, \frac{\text{дм}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{год}}, \quad (3)$$

де j – продуктивність мембрани, дм³/(м²·год); V_n – об'єм проби перміату, 1 дм³; S – площа мембрани, м²; Δτ – час відбору проби, год.

Результати по ефективності очищення водних розчинів нітрату натрію при концентраціях нітратів 3,0–150,0 мг/дм³ представлені на рис. 1–3.

Навіть при використанні розчину з концентрацією нітратів 3,0 мг/дм³ ефективність їх видалення на мембрані Filmtec TW30-1812-50 була низькою. При збільшенні ступеню відбору перміату з 10 % до 90 % вміст нітратів у перміаті зростав з 1,99 мг/дм³ до 2,71 мг/дм³. При цьому вміст нітратів у концентраті зростав приблизно до 10,0 мг/дм³.

При вихідній концентрації нітратів 10,0 мг/дм³ їх вміст у фільтраті зростав з 6,60 мг/дм³ до 9,24 мг/дм³ при збільшенні ступеню відбору перміату з 10 % до 90 %, при вихідній концентрації нітратів 30,0 мг/дм³ їх вміст у фільтраті зростав з 8,80 мг/дм³ до 27,12 мг/дм³, а при вихідній концентрації нітратів 150,0

мг/дм³ їх вміст у фільтраті зростає з 27,50 мг/дм³ до 130,50 мг/дм³. В концентраті концентрація нітратів при ступені відбору 90 % підвищувалась відповідно до 30,0, 150,0 та 755 мг/дм³. При цьому за концентрації нітратів 3,0 мг/дм³ селективність мембрани була на рівні 34,3–72,9 %, при 10,0 мг/дм³ селективність становила 37,1–69,2 %, при 30,0 мг/дм³ селективність становила 74,9–81,9 %, а при 150 мг/дм³ вона була в межах 82,7–82,9 % (рис. 4).

До певної міри із підвищенням концентрації нітратів у розчині зростає селективність мембрани. Однак, у всіх випадках селективність мембрани спочатку знижувалась, а потім зростала зі збільшенням ступеню відбору перміату. Селективність досить стрімко підвищується при збільшенні вихідної концентрації нітратів від 10 мг/дм³ до 30 мг/дм³. Найвищі показники по селективності мембрани відмічено при початковій концентрації нітратів 50 мг/дм³. Проте при подальшому підвищенні концентрації нітратів у воді до 150 цей показник практично не змінюється. Це може бути пов'язано з явищем концентраційної поляризації на мембрані.

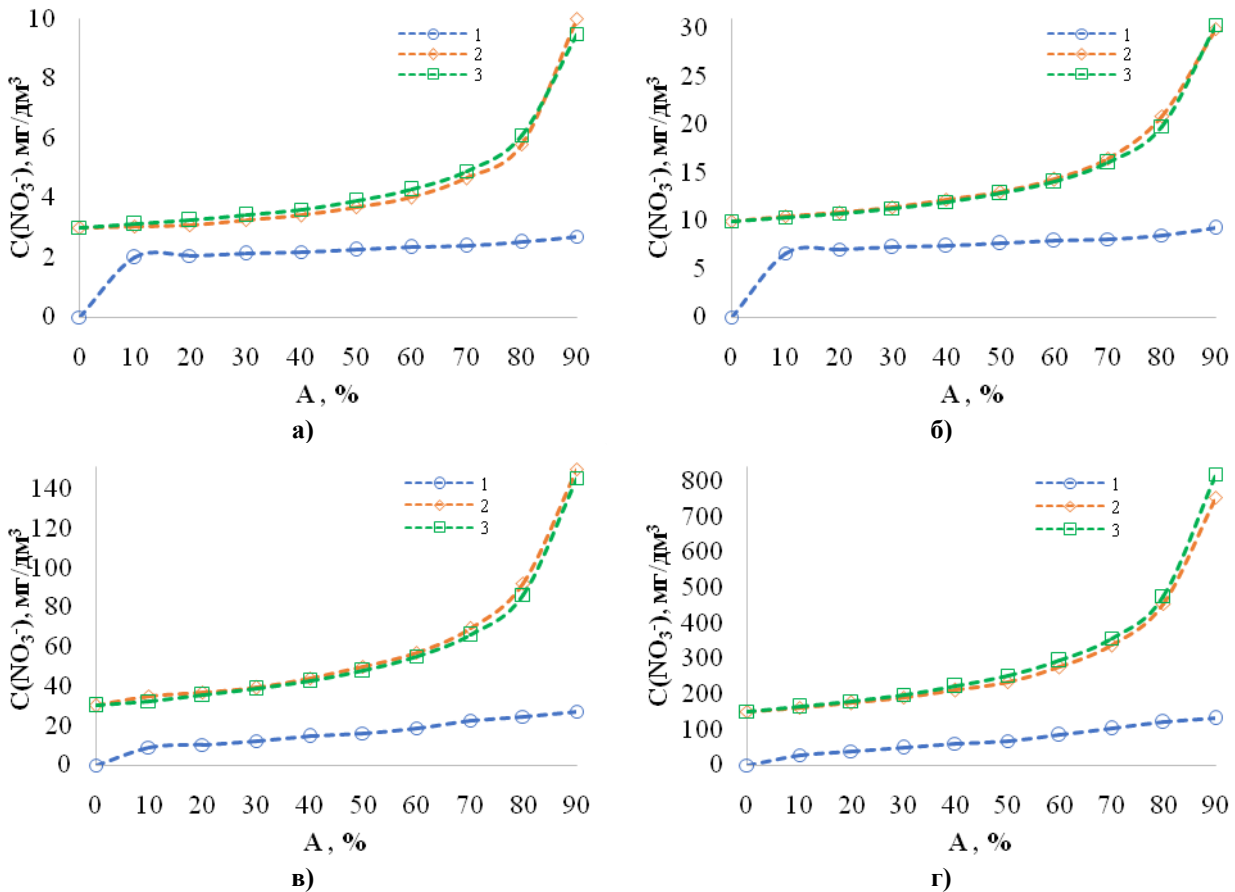


Рис. 1. Залежність концентрації нітратів у перміаті (1), концентраті (2; 3) (реальна (2) і розрахована (3)) від ступеню відбору перміату (A, %) при робочому тиску 4,0 атм. при фільтруванні розчину NaNO₃ з різною початковою концентрацією: а) C_{вих}(NaNO₃) = 3,0 мг/дм³; б) C_{вих}(NaNO₃) = 10,0 мг/дм³; в) C_{вих}(NaNO₃) = 30,0 мг/дм³; г) C_{вих}(NaNO₃) = 150,0 мг/дм³

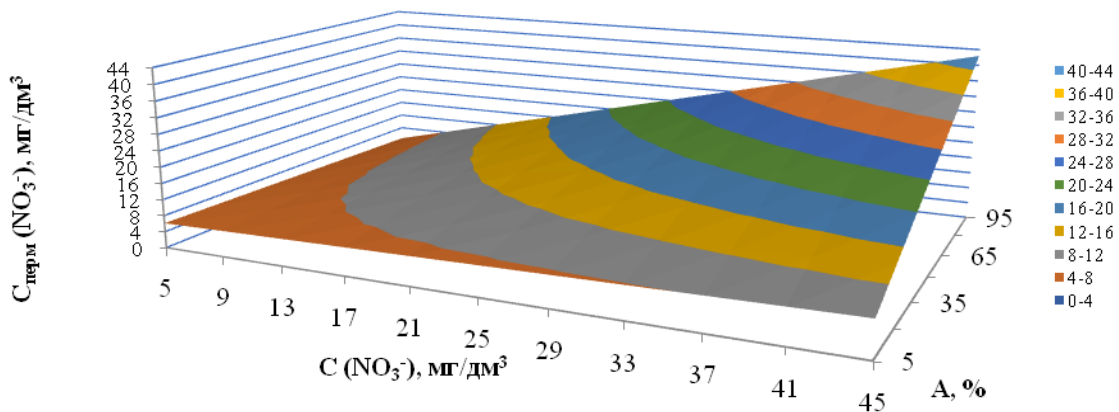


Рис. 2. Залежність концентрації нітратів у перміаті від вихідної концентрації NaNO₃ та ступеню відбору перміату при робочому тиску 4,0 атм.

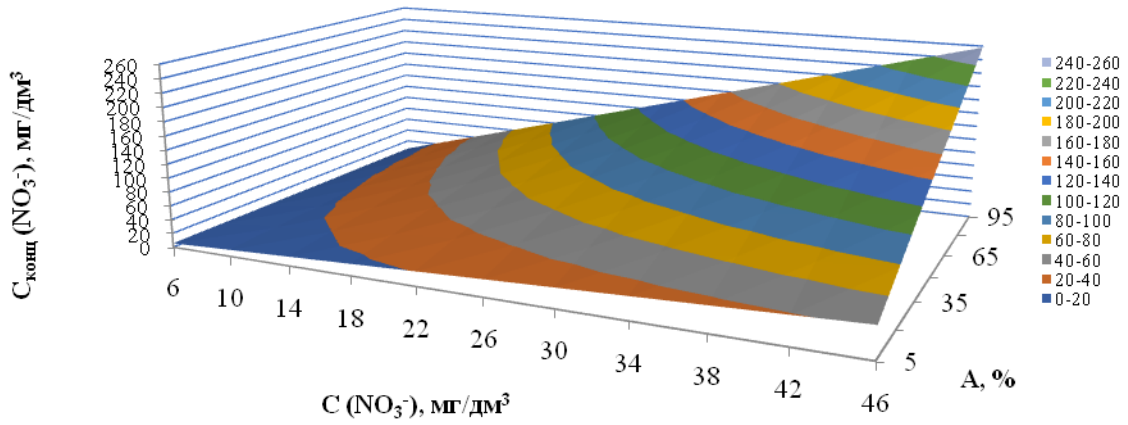


Рис. 3. Залежність концентрації нітратів у концентраті від вихідної концентрації NaNO_3 та ступеню відбору перміату при робочому тиску 4,0 атм.

Продуктивність мембрани в усіх випадках була високою, очевидно це можна пояснити невисокою концентрацією нітратів у воді (рис. 4). Проте при зростанні концентрацій нітратів у воді спостерігалось зниження продуктивності. Отримані результати свідчать про невисоку ефективність мембрани Filmtec TW30-1812-50 при очищенні води від нітратів. Для підвищення ефективності процесу зворотньоосмотичного видалення нітратів із води можна використовувати полікатіоніти для зв'язування нітратів, однак це робить технологію досить складною і унеможливає використання фільтрів зворотного осмосу в побуті.

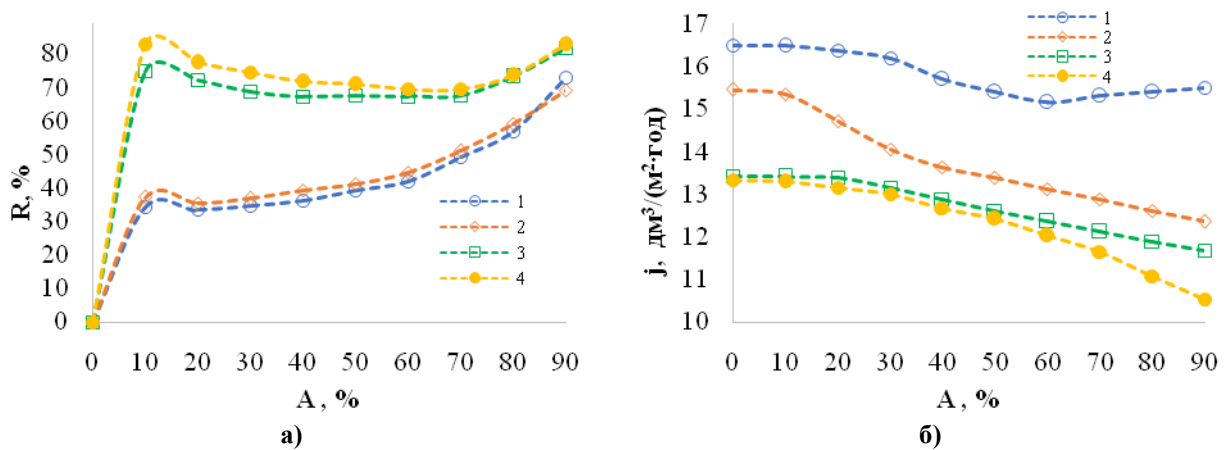


Рис. 4. Залежність продуктивності і селективності при робочому тиску 4,0 атм. від ступеню відбору перміату при фільтруванні через зворотньо-осмотичну мембрану низького тиску Filmtec TW30-1812-50 розчинів NaNO_3 при вихідних концентраціях розчинів по нітратах (mg/dm^3): 3,0 (1), 10,0 (2), 30,0 (3), 150,0 (4): а) селективність; б) продуктивність

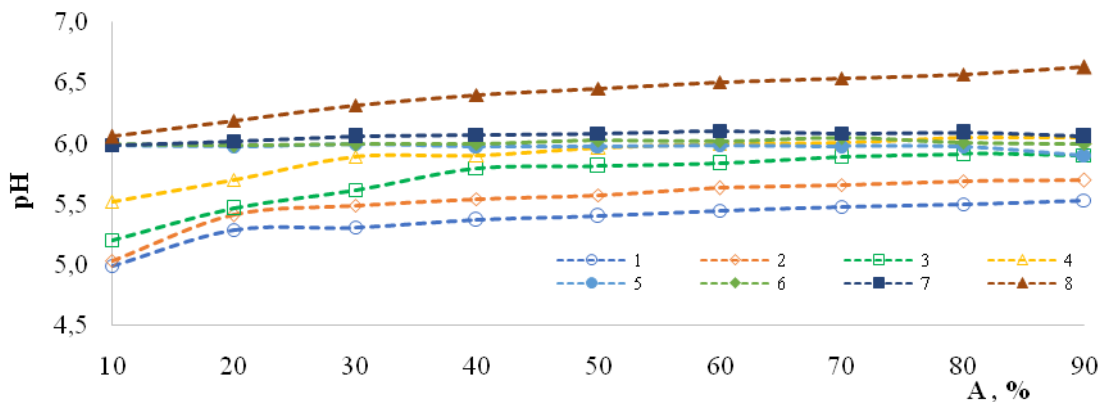


Рис. 5. Залежність рН середовища у перміаті (1; 2; 3; 4) та концентраті (5; 6; 7; 8) при робочому тиску 4,0 атм. в залежності від ступеню відбору перміату при фільтруванні через зворотньо-осмотичну мембрану низького тиску Filmtec TW30-1812-50 розчинів NaNO_3 при вихідних концентраціях розчинів по нітратах (mg/dm^3): 3,0 (1; 5), 10,0 (2; 6), 30,0 (3; 7), 150,0 (4; 8)

У ході досліджень по очищенню води від нітратів на зворотньо-осмотичній мембрані було визначено динаміку зміни рН середовища фільтрату і концентрату зі збільшенням ступеню відбору перміату (рис. 5). В усіх дослідах спостерігалось певне зниження рН у перміаті і підвищення рН у концентраті. Це, імовірно,

пов'язано з вищою селективністю мембрани по відношенню до катіонів натрію порівняно з протонами.

Отже, очищення води від нітратів мембранними методами є недостатньо ефективним, тому іонообмінне вилучення нітратів із води є більш перспективним методом для застосування.

Висновки

Вивчено процеси зворотньоосмотичного очищення води від нітратів на мембранах низького тиску. Встановлено, що залишкові концентрації нітратів в перміаті збільшенні ступеню відбору перміату та при підвищенні вихідних концентрацій з 3 до 150 мг/дм³ зростають. Визначено, що дані мембрани дозволяють знизити вміст нітратів у перміаті до 1,99–27,5 мг/дм³, та мають досить низьку селективність (34,2–82,9 %) та високу продуктивність (10,53 – 16,55 дм³/м²) в діапазоні концентрацій нітратів 3–150 мг/дм³.

References

1. Abascal E., Gómez-Coma L., Ortiz I., Ortiz A. Global diagnosis of nitrate pollution in groundwater and review of removal technologies. *Science of the total environment*. 2022. Т. 810. Р. 152233.
2. Sharma S. K., Sobti R. C. Nitrate removal from ground water: a review. *E-Journal of Chemistry*. 2012. Т. 9. №. 4. С. 1667–1675.
3. Epsztein R., Nir O., Lahav O., Green M. Selective nitrate removal from groundwater using a hybrid nanofiltration–reverse osmosis filtration scheme. *Chemical Engineering Journal*. 2015. Т. 279. С. 372-378.
4. Trus I., Gomelya M., Halysh V., Tverdokhlib M., Makarenko I., ... Zaitsev H. Low waste technology for the removal of nitrates from water. *Archives of Environmental Protection*. 2023. № 49 (1). Р. 74-78.
5. Trus I., Gomelya M. Low-waste technology of water purification from nitrates on highly basic anion exchange resin. *Journal of Chemical Technology and Metallurg*. 2022. № 57 (4). Р. 765-772.

КРИЛИК ЛЮДМИЛА

Вінницький національний технічний університет

ORCID ID: 0000-0001-6642-754X

e-mail: lyudmila.krylik@gmail.com

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕГРЕСІЙНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ФАКТОРІВ НА ЧУТЛИВІСТЬ ЄМНІСНОГО СЕНСОРА ВОЛОГОСТІ ДВОШАРОВОЇ СТРУКТУРИ

В роботі для оптимізації параметрів виготовлення ємнісного сенсора вологості двошарової структури застосовано метод планування багатofакторного експерименту з регресійним аналізом впливу фактора. За критерієм Кохрена на основі статистичної обробки результатів факторного експерименту доведено, що факторний експеримент є відтворюваним. Розроблено рівняння регресії, на основі якого встановлено, що концентрація розчину солі, яку використано для створення вологочутливого шару, суттєво впливає на чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури. За критерієм Стьюдента визначено значущі коефіцієнти рівняння регресії. За критерієм Фішера доведено, що скориговане рівняння регресії є адекватним результатам факторного експерименту. Рівняння регресії в масштабі реальних факторів сприяє оптимізації параметрів створення ємнісного сенсора вологості двошарової структури з максимальним значенням функції відгуку моделі – «чутливість». Встановлено, що найбільша чутливість 2,36 нФ/% забезпечується за таких оптимальних параметрів процесу виготовлення ємнісного сенсора вологості двошарової структури: концентрація адсорбуючого матеріалу NaCl – 5,33 моль/л, товщина захисного шару – 80 мкм. Зважаючи на те, що товщина вологочутливого шару не впливає на чутливість ємнісного сенсора вологості, товщину цього шару доцільно взяти в діапазоні від 5,0 мкм до 10,0 мкм.

Ключові слова: рівняння регресії, матриця планування, повнофакторний експеримент, фактор, відгук моделі, критерій Стьюдента, критерій Кохрена, критерій Фішера.

KRYLIK LYUDMILA

Vinnytsia National Technical University

PRACTICAL APPLICATION OF REGRESSION ANALYSIS FOR INFLUENCE ASSESSMENT OF FACTORS ON THE SENSITIVITY OF THE CAPACITIVE HUMIDITY SENSOR OF THE TWO-LAYER STRUCTURE

In the work, the method of planning a multifactorial experiment with regression analysis of the influence of the factor was used to optimize the manufacturing parameters of the capacitive humidity sensor of the two-layer structure. Capacitive humidity sensors of a two-layer structure, made on a sital substrate with a size of 0.7×0.9 mm, served as experimental samples. A copper film is applied to the surface of the substrate, which forms covers of capacitive elements in the form of a meander. The moisture-sensitive layer in such a structure is a hygroscopic NaCl salt, which performs the function of a dielectric. To create a moisture-sensitive layer, solutions of hygroscopic salt NaCl with concentrations of 0.89 mol/l and 5.33 mol/l were used, which were applied by spraying on the surface of capacitive humidity sensors with thicknesses of 5.0 μm and 10.0 μm. A moisture-absorbing polymethylmethacrylate film with thicknesses of 40 μm and 80 μm served as a protective layer. According to the Cochran criterion, on the basis of statistical processing of the results of the factorial experiment, it is proved that the factorial experiment is reproducible. A regression equation was developed based on which it was established that the concentration of the salt solution used to create the moisture-sensitive layer significantly affects the sensitivity of the capacitive moisture sensor of the two-layer structure. According to the Student's criterion, significant coefficients of the regression equation were determined. According to Fisher's criterion, it is proved that the adjusted regression equation is adequate to the results of the factorial experiment. The regression equation on the scale of real factors contributes to the optimization of the manufacturing parameters of the capacitive humidity sensor of the two-layer structure with the maximum value of the model's response function – "sensitivity". It was established that the highest sensitivity of 2.36 nF/% is provided with the following optimal parameters of the manufacturing process of a capacitive humidity sensor of a two-layer structure: the concentration of the adsorbing material NaCl is 5.33 mol/l, the thickness of the protective layer is 80 μm. Considering the fact that the thickness of the moisture-sensitive layer does not affect the sensitivity of the capacitive humidity sensor, it is advisable to take the thickness of this layer in the range from 5.0 μm to 10.0 μm.

Keywords: regression equation, planning matrix, full-factorial experiment, factor, model response, Student's criterion, Cochran's criterion, Fisher's criterion.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

На сучасному етапі розвитку науково-технічного прогресу висувуються підвищені вимоги до характеристик сенсорів фізичних величин, оскільки від рівня їхнього розвитку залежить ефективна робота контрольно-вимірювальних систем в цілому.

Одним із поширених напрямків вимірювання параметрів навколишнього середовища є вимірювання вологості, оскільки вміст води в повітрі суттєво впливає на якість проведення технологічних процесів в різноманітних галузях промислової індустрії. Крім того, розробка нових та удосконалення існуючих конструктивних рішень з метою покращення метрологічних характеристик як сенсора, так і контрольно-вимірювальних систем потребує проведення значної кількості експериментальних досліджень [1–5]. Зважаючи на те, що проведення експериментів є вартісним та тривалим процесом, при їх підготовці доцільно застосовувати математичний апарат, а саме, математичне планування експерименту [6–12].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Натепер методи наукових досліджень умовно поділяються на: теоретичні, теоретико-експериментальні та експериментальні. Реалізація яких потребує узагальненого накопиченого досвіду, розробці теорії та проведення численних експериментів для підтвердження теорії. Потрібно зауважити, що проведення експериментів – це тривалий та вартісний процес досліджень. Тому, з метою мінімізації кількості експериментів, доцільно застосовувати математичний апарат, а саме, математичне планування експериментів. Основою якого є методи математичного статистичного моделювання, до яких відносять регресійний та дисперсійний аналізи.

Регресійний аналіз є вагомим інструментом у прийнятті ефективних рішень для вирішення різного кола завдань, а саме, він сприяє кількісному оцінюванню впливу факторів на відгук моделі. Дисперсійний аналіз сприяє якісному оцінюванню впливу факторів на відгук моделі. Ефективність яких зростає при застосуванні експериментів за багатофакторними планами [6–12].

Постановка завдання

Метою роботи є оцінювання, за допомогою регресійного аналізу, впливу на чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури таких факторів:

- товщина вологочутливого шару;
- товщина полімерного покриття, як захисного шару;
- концентрація розчину солі, як адсорбуючого матеріалу.

Для досягнення поставленої мети у роботі потрібно вирішити такі задачі:

- 1) провести аналіз існуючих наукових джерел та обґрунтувати доцільність застосування багатофакторного плану експерименту;
- 2) розробити багатофакторний план експерименту на основі матриці планування;
- 3) використовуючи регресійний аналіз впливу фактора провести оцінювання впливу таких факторів: товщина вологочутливого шару; товщина полімерного покриття, як захисного шару; концентрація розчину солі, як адсорбуючого матеріалу на чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури;
- 4) зробити висновки з проведених досліджень.

Виклад основного матеріалу

Проведені дослідження ємнісних вологочутливих елементів, створених на основі гігроскопічної солі NaCl довели, що основним недоліком вологочутливих шарів таких елементів є те, що вони здатні працювати тільки в обмеженому діапазоні відносної вологості нижче точки роси [3]. Тому для вирішення цієї проблеми виникла ідея створення захисного полімерного покриття з метою запобігання випадіння точки роси [4].

Для експерименту були використані ємнісні сенсори вологості двошарової структури (м. Вінниця, Україна, ВНТУ), виготовлені на ситаловій підкладці розміром $0,7 \times 0,9$ мм. На поверхню підкладки нанесено плівку міді, яка утворює обкладки ємнісних елементів у вигляді меандра. Вологочутливим шаром в такій конструкції є гігроскопічна сіль NaCl, яка виконує функцію діелектрика. З метою створення вологочутливого шару, використовувались розчини гігроскопічної солі NaCl з концентраціями 0,89 моль/л та 5,33 моль/л, які наносились шляхом розпилення на поверхню ємнісних сенсорів вологості товщинами 5,0 мкм та 10,0 мкм. Захисним шаром слугувала вологопоглинальна плівка поліметилметакрилату товщинами 40 мкм та 80 мкм.

Проведена серія експериментів, в результаті яких досліджувалась залежність чутливості ємнісного сенсора вологості двошарової структури від впливу таких факторів: товщина вологочутливого шару; товщина полімерного покриття, як захисного шару; концентрація розчину солі, як адсорбуючого матеріалу (гігроскопічна сіль NaCl).

Для розрахунків приймемо такі позначення: фактор X_1 – товщина вологочутливого шару d , мкм; фактор X_2 – товщина захисного шару d , мкм; фактор X_3 – концентрація розчину солі NaCl, яка виконує функцію адсорбуючого матеріалу C , моль/л; відгук моделі y – чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури S_C , нФ/‰.

Для трьох факторів кількість експериментів – $2^3 = 8$, тобто $N = 8$.

При проведенні повного факторного експерименту типу 2^3 при кількості прогонів $p = 3$ отримані такі значення відгуку моделі y_{ij} (табл. 1):

Результати повного факторного експерименту типу 2^3

| X_1 | X_2 | X_3 | y_{j1} | y_{j2} | y_{j3} |
|-------|-------|-------|----------|----------|----------|
| 5,0 | 40 | 0,89 | 0,38 | 0,48 | 0,54 |
| 10,0 | 40 | 0,89 | 0,42 | 0,53 | 0,6 |
| 5,0 | 80 | 0,89 | 0,57 | 0,62 | 0,75 |
| 10,0 | 80 | 0,89 | 0,68 | 0,78 | 0,82 |
| 5,0 | 40 | 5,33 | 0,75 | 0,86 | 0,91 |
| 10,0 | 40 | 5,33 | 0,83 | 0,95 | 1,25 |
| 5,0 | 80 | 5,33 | 0,97 | 1,78 | 2,82 |
| 10,0 | 80 | 5,33 | 1,89 | 2,95 | 3,78 |

Проведемо статистичну обробку результатів факторного експерименту. Розрахуємо значення дисперсії у кожному експерименті D_j , сумарне D_Σ та максимальне D_{\max} значення дисперсії на основі яких за критерієм Кохрена виконаємо оцінювання відтворюваності експерименту [12]:

$$D_j = \frac{\sum_{i=1}^p (y_{ij} - y_j)^2}{p-1}, \quad (1)$$

де y_{ij} – i -е спостереження відгуку моделі в j -му експерименті;

$$D_\Sigma = \sum_{j=1}^N D_j, \quad (2)$$

$$D_{\max} = \max_j D_j. \quad (3)$$

Спостережуване значення критерію Кохрена обчислюють за формулою:

$$G = \frac{D_{\max}}{D_\Sigma}. \quad (4)$$

Використовуючи дані табл. 1, середні значення відгуку моделі обчислимо в такий спосіб:

$$y_j = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p y_{ji}. \quad (5)$$

За формулами (1)–(4) обчислимо спостережуване значення критерію Кохрена: максимальне значення дисперсії: $D_{\max} = 0,9$; сумарне значення дисперсії: $D_\Sigma = 1,85$; спостережуване значення критерію Кохрена: $G \approx 0,486$.

Наступним кроком статистичної обробки результатів факторного експерименту є визначення табличного значення критерію Кохрена G_{kp} . При рівні значимості $\alpha = 0,05$, кількості ступенів вільності $m = p - 1 = 3 - 1 = 2$, маємо $G_{kp} = 0,516$. Оскільки $0,486 < 0,516$ ($G < G_{kp}$) можна зробити висновок, що факторний експеримент є відтворюваним. Оцінкою дисперсії генеральної сукупності є величина

$$D = \frac{1}{N} \sum_j D_j, \quad (6)$$

яка набуває значення: $D = 0,23$.

Спочатку, при проведенні експериментів за багатофакторним планом, перетворюють вхідні змінні X_i , що змінюються в межах ($X_{i\min}$, $X_{i\max}$), в нові змінні x_i – в межах (-1, +1) за формулою [12]:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta_i}, \quad (7)$$

де $X_{i0} = \frac{X_{i\max} + X_{i\min}}{2}$, $\Delta_i = \frac{X_{i\max} - X_{i\min}}{2}$.

Область проведення експериментів (табл. 1) $X_1 \in (5,0; 10,0)$, $X_2 \in (40; 80)$, $X_3 \in (0,89; 5,33)$

За формулами (7) перетворимо початкові змінні в допоміжні, які змінюються в області (-1;1):

$$x_1 = \frac{X_1 - 7,5}{2,5}, \quad x_2 = \frac{X_2 - 60}{20}, \quad x_3 = \frac{X_3 - 3,11}{2,22}. \quad (8)$$

Складемо матрицю планування повнофакторного експерименту (ПФЕ) (див. табл. 2) та визначимо коефіцієнти рівняння регресії.

Обчислимо коефіцієнти рівняння регресії на основі даних матриці планування ПФЕ (табл. 2) за такими формулами [12]:

$$b_0 = \frac{\sum y_i}{N}, \quad b_k = \frac{\sum y_i x_{ik}}{N}, \quad k = 1, \dots, N-1. \quad (9)$$

Таблиця 2

Матриця планування ПФЕ

| 2^3 | x_0 | x_1 | x_2 | x_3 | x_1x_2 | x_1x_3 | x_2x_3 | $x_1x_2x_3$ | y_j |
|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|-------------|-------|
| 1 | + | - | - | - | + | + | + | - | 0,47 |
| 2 | + | + | - | - | - | - | + | + | 0,52 |
| 3 | + | - | + | - | - | + | - | + | 0,65 |
| 4 | + | + | + | - | + | - | - | - | 0,76 |
| 5 | + | - | - | + | + | - | - | + | 0,84 |
| 6 | + | + | - | + | - | + | - | - | 1,01 |
| 7 | + | - | + | + | - | - | + | - | 1,86 |
| 8 | + | + | + | + | + | + | + | + | 2,87 |

Коефіцієнти рівняння регресії набувають таких значень:

$$b_0 = 1,12; \quad b_1 = 0,17; \quad b_2 = 0,41; \quad b_3 = 0,52; \quad b_4 = 0,11; \quad b_5 = 0,13; \quad b_6 = 0,31; \quad b_7 = 0,1.$$

В результаті рівняння регресії має вигляд:

$$y^{pez} = 1,12 + 0,17x_1 + 0,41x_2 + 0,52x_3 + 0,11x_1x_2 + 0,13x_1x_3 + 0,31x_2x_3 + 0,1x_1x_2x_3. \quad (10)$$

З отриманого рівняння регресії (10) видно, що фактор x_3 – концентрація розчину солі NaCl спричиняє на відгук моделі набагато більший вплив ніж фактори: x_1 – товщина вологочутливого шару; x_2 – товщина захисного шару та їх сумісний вплив. Отже, отримане рівняння регресії можна використовувати для наближених розрахунків відгуку моделі в області проведення експериментів.

Оскільки експеримент є відтворюваним, то перейдемо до наступного етапу статистичної обробки результатів. А саме, проведемо оцінювання значущості коефіцієнтів рівняння регресії за критерієм Стьюдента. Спостережуване значення критерію Стьюдента обчислимо за формулою [12]:

$$t_j = |b_j| \sqrt{\frac{N \cdot p}{D}}, \quad (11)$$

При рівні значимості $\alpha = 0,05$, числі ступенів вільності $m = N \cdot (p-1) = 8 \cdot (3-1) = 16$, табличне значення критерію Стьюдента – $t_{kp} = 2,12$.

Проведемо оцінювання значущості коефіцієнтів b_j за формулою (11):

$$\begin{aligned} t_0 = 11,45 > t_{kp} = 2,12 &\rightarrow b_0 \text{ є значущим;} & t_1 = 1,74 < t_{kp} = 2,12 &\rightarrow b_1 \text{ є незначущим;} \\ t_2 = 4,2 > t_{kp} = 2,12 &\rightarrow b_2 \text{ є значущим;} & t_3 = 5,3 > t_{kp} = 2,12 &\rightarrow b_3 \text{ є значущим;} \\ t_4 = 1,12 < t_{kp} = 2,12 &\rightarrow b_4 \text{ є незначущим;} & t_5 = 1,33 < t_{kp} = 2,12 &\rightarrow b_5 \text{ є незначущим;} \\ t_6 = 3,17 > t_{kp} = 2,12 &\rightarrow b_6 \text{ є значущим;} & t_7 = 1,02 < t_{kp} = 2,12 &\rightarrow b_7 \text{ є незначущим.} \end{aligned}$$

Скориговане рівняння регресії за критерієм Стьюдента має вигляд:

$$y^{pez} = 1,12 + 0,41x_2 + 0,52x_3 + 0,31x_2x_3. \quad (12)$$

Зважаючи на те, що в рівнянні регресії є незначущі коефіцієнти, перейдемо до третього етапу статистичної обробки результатів факторного експерименту. Перевіримо адекватність отриманого рівняння регресії результатам експерименту за критерієм Фішера. Для цього розраховують дисперсію адекватності за формулою [12]:

$$D_{ad} = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y_i^{pez})^2}{N - L}, \quad (13)$$

де y_i^{pez} – обчислене за регресійним рівнянням значення i -го експерименту,

L – кількість значущих коефіцієнтів лінійної регресії.

Спостережуване значення критерію Фішера визначають за формулою [12]:

$$F = \frac{D_{ad}}{D}. \quad (14)$$

Підставимо відповідні значення факторів у рівняння (12) і визначимо значення відгуку моделі в кожному експерименті, обчислене за рівнянням регресії. Обчислені значення y^{pez} заносимо у таблицю (табл. 3) результатів експериментів:

Значення відгуку моделі в кожному експерименті

| 2^3 | x_2 | x_3 | y | y^{pez} |
|-------|-------|-------|------|-----------|
| 1 | - | - | 0,47 | 0,5 |
| 2 | - | - | 0,52 | 0,5 |
| 3 | + | - | 0,65 | 0,7 |
| 4 | + | - | 0,76 | 0,7 |
| 5 | - | + | 0,84 | 0,92 |
| 6 | - | + | 1,01 | 0,92 |
| 7 | + | + | 1,86 | 2,36 |
| 8 | + | + | 2,87 | 2,36 |

Визначимо значення адекватності дисперсії за формулою (13), враховуючи, що $N = 8$, $L = 4$:

$$D_{ad} = 5 \cdot 10^{-3}.$$

Значення критерію Фішера обчислене за формулою (14) має вигляд:

$$F = 0,02.$$

Критичне значення критерію Фішера при рівні значимості $\alpha = 0,05$ і кількості ступенів вільності $m_1 = N \cdot (p-1) = 8 \cdot (3-1) = 16$ та $m_2 = p-1 = 3-1 = 2$ дорівнює

$$F_{кр} = 19,41.$$

Оскільки $F < F_{кр}$, рівняння регресії (12) визнається адекватним результатам факторного експерименту.

Фактори x_2 та x_3 входять до рівняння регресії (12) у кодованому вигляді. Розкодуємо рівняння регресії (12), використовуючи вирази (8) і отримаємо остаточне рівняння регресії в масштабі реальних факторів, яке має такий вигляд:

$$y^{pez} = 0,46 - 0,001X_2 - 0,18X_3 + 0,01X_2X_3. \quad (15)$$

Рівняння регресії в масштабі реальних факторів (15) сприяє оптимізації параметрів виготовлення емнісного сенсора вологості двошарової структури з максимальним значенням функції відгуку моделі – «чутливість». Критерієм оптимізації параметрів виготовлення вологочутливого та захисного шарів емнісного сенсора вологості двошарової структури є чутливість. З експериментів видно, що чутливість емнісного сенсора вологості двошарової структури залежить від таких факторів: товщина захисного шару та концентрація розчину солі NaCl, яка виконує функцію адсорбуючого матеріалу. Однак, суттєво впливає на чутливість емнісного сенсора вологості двошарової структури концентрація розчину гігроскопічної солі NaCl. Встановлено, що найбільша чутливість 2,36 нФ/% забезпечується за таких оптимальних параметрів процесу виготовлення емнісного сенсора вологості двошарової структури: концентрація адсорбуючого матеріалу – 5,33 моль/л, товщина захисного шару – 80 мкм. Оскільки товщина вологочутливого шару не впливає на чутливість емнісного сенсора вологості, товщину цього шару доцільно взяти в діапазоні від 5,0 мкм до 10,0 мкм.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Для оптимізації параметрів виготовлення емнісного сенсора вологості двошарової структури, застосовано метод планування багатфакторного експерименту в поєднанні з регресійним аналізом впливу фактора. За критерієм Кохрена на основі статистичної обробки результатів факторного експерименту доведено, що факторний експеримент є відтворюваним. Розроблено рівняння регресії на основі якого встановлено, що концентрація розчину солі, яку використано для створення вологочутливого шару суттєво впливає на чутливість емнісного сенсора вологості. За критерієм Стюдента визначено значущі коефіцієнти рівняння регресії. За критерієм Фішера доведено, що скориговане рівняння регресії є адекватним результатам факторного експерименту.

2. Отримане рівняння регресії в масштабі реальних факторів сприяє оптимізації параметрів виготовлення емнісного сенсора вологості двошарової структури з максимальним значенням функції відгуку моделі – «чутливість». Встановлено, що найбільша чутливість 2,36 нФ/% забезпечується за таких оптимальних параметрів процесу виготовлення емнісного сенсора вологості двошарової структури: концентрація адсорбуючого матеріалу – 5,33 моль/л, товщина захисного шару – 80 мкм. Зважаючи на те, що товщина вологочутливого шару не впливає на чутливість емнісного сенсора вологості, товщину цього шару доцільно взяти в діапазоні від 5,0 мкм до 10,0 мкм.

3. В подальших дослідженнях планується застосувати дробовий план факторного експерименту.

Література

1. Готра З. Ю. Мікроелектронні сенсори фізичних величин. Том 2 / З. Ю. Готра. – Львів : Ліга-Прес, 2003. – 595 с.
2. Осадчук В. С. Сенсори вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик. – Вінниця :

УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 208 с.

3. Осадчук В. С. Дослідження ємнісних вологочутливих елементів / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, М. В. Євсєєва // Вісник ВПІ. – 2002. – № 5. – С. 65–71.

4. Осадчук В. С. Ємнісний сенсор вологості гребінцевої структури на основі полімерних матеріалів / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, М. В. Євсєєва // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. Міжнародний науково-технічний журнал. – 2006. – № 2(12). – С. 222–227.

5. Осадчук О. В. Математична модель мікроелектронного автогенераторного засобу для вимірювання вологості / О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, О. С. Звягін, Я. О. Осадчук // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2021. – Т. 32(71), № 4. – С. 289–296.

6. Левченко Д. В. Вибір та обґрунтування математичного плану 6-ти факторного експерименту при дослідженні пускових якостей ДВЗ / Д. В. Левченко // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2021. – № 2. – С. 86–92.

7. Крилик Л. В. Застосування регресійного аналізу в процесі оцінювання впливу фактора на чутливість ємнісного сенсора вологості / Л. В. Крилик, М. В. Євсєєва // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2022. – № 4(311). – С. 119–124.

8. Ляшок А. В. Планування багатфакторного експерименту при дослідженні процесу ультразвукового розпилення в тонкому шарі / А. В. Ляшок // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. – 2013. – № 3. – С. 13–17.

9. Павлюк К. В. Методичні підходи до розроблення нормативів і оцінки науково-дослідної праці на основі багатфакторного кореляційно-регресійного аналізу / К. В. Павлюк // Наукові праці НДФІ. – 2020. – № 3(92). – С. 5–19.

10. Аксьончиков С. О. Регресійний аналіз тенденцій розвитку кібератак / С. О. Аксьончиков, І. В. Смельянова, К. Д. Маркова, І. І. Сватовський // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія: Мат. моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. – 2017. – Вип. 36. – С. 5–13.

11. Кучернюк П. В. Модель загроз безпеки в інформаційно-комунікаційних системах на основі регресійного аналізу / П. В. Кучернюк, А. О. Довгал // Інформаційні та телекомунікаційні системи та технології, захист інформації. – 2017. – Вип. 22, № 2. – С. 79–84.

12. Стеценко І. В. Моделювання систем / І. В. Стеценко. – Черкаси : ЧДТУ, 2010. – 399 с.

References

- Hotra Z. Yu. Mikroelektronni sensory fizychnykh velychyn. Tom 2 / Z. Yu. Hotra. – Lviv : Liha-Pres, 2003. – 595 s.
- Osadchuk V. S. Sensory volohosti / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, L. V. Krylyk. – Vinnytsia : UNIVERSUM-Vinnytsia, 2003. – 208 s.
- Osadchuk V. S. Doslidzhennia yemnisnykh volohochutlyvykh elementiv / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, L. V. Krylyk, M. V. Yevsieieva // Visnyk VPI. – 2002. – № 5. – С. 65–71.
- Osadchuk V. S. Yemnisnyi sensor volohosti hrebintsevoi struktury na osnovi polimernykh materialiv / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, L. V. Krylyk, M. V. Yevsieieva // Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii. Mizhnarodnyi naukovotekhnichnyi zhurnal. – 2006. – № 2(12). – С. 222–227.
- Osadchuk O. V. Matematychna model mikroelektronnoho avtohenatornoho zasobu dlia vymiryuvannia volohosti / O. V. Osadchuk, L. V. Krylyk, O. S. Zviahin, Ya. O. Osadchuk // Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky. – 2021. – Т. 32(71), № 4. – С. 289–296.
- Levchenko D. V. Vybir ta obgruntuvannia matematychnoho planu 6-ty faktornoho eksperymentu pry doslidzhenni puskovykh yakoste DVZ / D. V. Levchenko // Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia. – 2021. – № 2. – С. 86–92.
- Krylyk L. V. Zastosuvannia rehresiinoho analizu v protsesi otsiniuvannia vplyvu faktora na chutlyvist yemnisnoho sensora volohosti / L. V. Krylyk, M. V. Yevsieieva // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky. – 2022. – № 4(311). – С. 119–124.
- Liashok A. V. Planuvannia bahatofaktornoho eksperymentu pry doslidzhenni protsesu ultrazvukovoho rozpylennia v tonkomu shari / A. V. Liashok // Visnyk NTUU «KPI». Serii: mashynobuduvannia. – 2013. – № 3. – С. 13–17.
- Pavliuk K. V. Metodychni pidkhody do rozroblennia normatyviv i otsinky naukovodoslidnoi pratsi na osnovi bahatofaktornoho koreliatsiino-rehresiinoho analizu / K. V. Pavliuk // Naukovi pratsi NDFI. – 2020. – № 3(92). – С. 5–19.
- 1) Aksonchikov S. O. Rehresiinyi analiz tendentsii rozvytku kiberatak / S. O. Aksonchikov, V. Yemelianova, K. D. Markova, I. I. Svatovskiy // Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V. N. Karazina. Serii: Mat. modeliuvannia. Informatsiini tekhnolohii. Avtomatyzovani systemy upravlinnia. – 2017. – Vyp. 36. – С. 5–13.
- Kucherniuk P. V. Model zahroz bezpeky v informatsiino-komunikatsiinykh systemakh na osnovi rehresiinoho analizu / P. V. Kucherniuk, A. O. Dovhal // Informatsiini ta telekomunikatsiini systemy ta tekhnolohii, zakhyst informatsii. – 2017. – Vyp. 22, № 2. – С. 79–84.
- Stetsenko I. V. Modeliuvannia system / I. V. Stetsenko. – Cherkasy : ChDTU, 2010. – 399 s.

ДУМИН АНДРІЙ

Національний університет «Львівська політехніка»

ORCID ID: [0000-0003-2111-2899](https://orcid.org/0000-0003-2111-2899)e-mail: andrii.r.dumyn@lpnu.ua

СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО ОЗВУЧУВАННЯ З ЕЛЕМЕНТАМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Автоматичне озвучування текстів вже давно не є новинкою серед користувачів. Проте при автоматизованому озвучуванні художніх текстів або при автоматизованому переозвучуванні аудіо з інших мов втрачається емоційна складова. Емоційне перетворення голосу з урахуванням статі мовця, особливостей мовлення тощо має на меті зберегти мовний зміст та ідентичність мовця. У цій статті запропоновано архітектуру системи автоматизованого переозвучування аудіо та відео з вбудованими класифікаторами визначення тональності тексту, емоційного забарвлення мовця та модуля опрацювання метаданих мовця для збереження його ідентичності. Розроблена архітектура стане основою подальших досліджень за даною тематикою.

Ключові слова: ASR, автоматичне розпізнавання мовлення, розпізнавання емоцій, перетворення тексту в мовлення, перетворення мовлення в текст, аналіз голосу.

DUMYN ANDRII

Lviv Polytechnic National University

THE AUTOMATED VOICING SYSTEM WITH ELEMENTS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Automatic voicing of texts has not been a novelty among users for a long time. However, the emotional component is lost during the automated dubbing of artistic texts or audio from other languages. The emotional transformation of the voice, considering the gender of the speaker, features of speech, etc., aims to preserve the linguistic meaning and identity of the speaker. This work provides an overview of the latest research in the field of automated voicing, obtaining metadata from audio, and proposes a general architecture for an automated voicing system with elements of artificial intelligence, such as a classifier for determining the emotional coloring of speech, models for determining gender and speech features. The obtained work results will form the basis of further research in developing a group of classifiers for determining the emotional coloring of speech, gender, age, and features of human speech. Based on the proposed architecture, the corresponding system's design and development are planned. The proposed system will significantly simplify the consumption of foreign language content for users from different countries, regardless of the level of proficiency in one or another language. For this reason, automated translation and voiceover systems are widespread. However, the speaker's emotional component and other features need to be recovered during automated dubbing of texts or audio from other languages. That is why the automated voicing of texts or dubbing of audio or video will be relevant, taking into account the gender of the speaker, his age, emotional coloring and other features of speech. Such a system will simplify the process of adapting audio and video content to the users of one or another country. It will help make a large part of exciting content available to users. In education, this system can be used as an auxiliary tool when viewing lectures or parts of lectures from foreign lecturers, significantly expanding students' access to educational materials.

Keywords: Automatic Speech Recognition, emotional recognition, voice, Text-to-Speech, Speech-to-Text, voice analysis.

Постановка проблеми

Щоденно кількість аудіо та відео контенту в мережі Інтернет збільшується. За даними компанії Cisco [1] у 2022 році 82% глобального інтернет-трафіку належало перегляду потокового відео або завантаженню відео. Цьому сприяє зростаюча популярність стрімінгових платформ, таких як YouTube, Netflix, Amazon Prime Video та інших. Проте часто користувачі стикаються з проблемою, коли знайдений аудіо чи відео контент на цікаву їм тематику подається незнайомою мовою. За даними statista.com [2] найбільш поширеними мовами у світі є English, Chinese(Mandarin), Hindi, Spanish. Тільки на ютубі 33% відео є англійською мовою і відповідно 67% іншими мовами [3]. До прикладу, за звітом EF English Proficiency Index за 2022 рік [4], жителі більше 80 країн в середньому володіють англійською рівнем Moderate proficiency і нижче, що спричиняє складнощі у споживанні актуального для них контенту англійською мовою. Зважаючи на це, можна припустити, що запропонована система значно спростить споживання іншомовного контенту для користувачів з різних країн не залежно від рівня володіння тою чи іншою мовою. З цієї причини популярністю користуються системи автоматизованого перекладу та озвучення. Проте при автоматизованому озвучуванні текстів або при автоматизованому переозвучуванні аудіо з інших мов втрачається емоційна складова та інші особливості мовця. Саме тому актуальною буде система автоматизованого озвучування текстів або переозвучування аудіо чи відео, що враховуватиме й стать мовця, його вік, емоційне забарвлення та інші особливості мовлення. Така система дозволить спростити процеси адаптації аудіо та відео контенту під користувачів тієї чи іншої країни, допоможе зробити велику частину цікавого контенту доступним для користувачів. В сфері освіти дана система може використовуватись як допоміжний інструмент при перегляді лекцій або частин лекцій від іноземних лекторів, що значно розширить доступ студентам до навчальних матеріалів.

Аналіз останніх джерел

Наукова спільнота активно працює над вирішенням проблем аналізу голосу, отримання метаданих з нього, тощо. Зокрема автори [5] займаються побудовою моделі нейронної мережі для визначення статі мовця за голосом. Автори експериментально показують, що комбінація наборів функцій MFCC і Mel

забезпечує точність визначення статі 94,32%. У дослідженні [6] автори використовують структуру мереж Deeper Long Short Term Memory (LSTM) для прогнозування статі на основі набору аудіо даних. Для дослідження автори використовують 10 найбільш ефективних атрибутів даних, запропонований підхід дозволяє успішно передбачити стать мовця з точністю 98,4%. Автори [7] представили метод використання супергаусових мовних сигналів як ознаки для класифікації здорового та дизартричного мовлення. Експериментальні результати показали, що використання супергаусових мовних сигналів дає значно вищу точність класифікації, ніж найсучасніші характеристики, такі як основна частота, тремтіння, мерехтіння, співвідношення гармонік до шуму або кепстральні коефіцієнти частоти Mel.

Щодо досліджень емоційності мовлення автори роботи [8] наводять короткий огляд найбільш актуальних розробок обчислювальної обробки емоцій у голосі. Автори пропонують потенційне використання розглянутих технологій, зокрема для інтерпретації в психологічних дослідженнях і використання в додатках цифрової охорони здоров'я та цифрової психології. У статті [9] автори пропонують нову структуру, засновану на варіаційному автоматичному кодуванні генеративної змагальної мережі Вассерштейна (VAW-GAN), яка використовує попередньо навчену модель розпізнавання мовних емоцій (SER) для передачі емоційного стилю під час навчання та відтворення. Таким чином мережа може передавати як видимий, так і невидимий емоційний стиль у нове висловлювання. Основною метою роботи [10] є покращення швидкості розпізнавання мовних емоцій з використанням різних алгоритмів виділення ознак. У роботі акцентується увага на попередній обробці отриманих звукових зразків, де шум із мовних зразків видаляється за допомогою фільтрів. Ці алгоритми виділення ознак підтверджені для універсальних емоцій, включаючи гнів, щастя, сум і нейтральність. У роботі [11] автори побудували моделі ієрархічної класифікації, щоб дослідити важливість ідентифікації віку та статі перед емоційною ідентифікацією. Автори порівняли продуктивність чотирьох різних моделей і представили зв'язок між віком/статтю та точністю розпізнавання емоцій. Результати дослідження показали, що використання окремої моделі емоцій для кожної статі та вікової категорії дає вищу точність порівняно з використанням одного класифікатора для всіх даних.

Метою роботи є формулювання вимог щодо побудови системи автоматизованого озвучування текстів та проектування базової архітектури розроблюваної системи.

Аналіз існуючих аналогів

На ринку представлено багато сервісів від провідних компаній у цій галузі, що дозволяють в певній мірі адаптувати аудіо та відео контент під свої потреби.

У таблиці 1 наведено огляд найпопулярніших доступних сервісів для перетворення аудіо в текст.

Таблиця 1

Огляд найпопулярніших доступних сервісів для speech to text

| Сервіс | Характеристики | Кількість мов |
|---|---|---|
| Amazon transcribe | Забезпечує транскрибування чисел і пунктуації, налаштування розпізнавання кількох динаміків. | 37 |
| IBM watson speech to text | Модель, що працює у реальному часі, забезпечує визначення ключових слів, мітки доповідачів, мітки часу по мовленню, альтернативи слів | 14 + діалекти |
| Google cloud speech to text | Пакетні моделі та моделі роботи в реальному часі, визначають шумостійкість, фільтр для неправильних слів | 120 (не всі мови підтримують всі функції) |
| Azure Cognitive Services speech to text | Модель у реальному часі, налаштування, форматування, нормалізація тексту, сценарії мовлення | 96 + діалекти |

Підчас дослідження вдалось знайти лише ряд готових до використання моделей для визначення емоційного забарвлення мовлення, проте такі моделі потребують додаткової інтеграції в якусь систему через відсутність користувацького інтерфейсу.

Зокрема хорошими продуктами для подальшої інтеграції є аналізатор мовних емоцій від Мітеша Путрана [12]. Побудована науковцем модель [13] машинного навчання може виявляти емоції під час постійної розмови один з одним.

Також варто звернути увагу на Demfier multimodal speech emotion recognition [14]. У цьому застосунку створено легкі багатомодальні моделі машинного навчання та виконано їх порівняння із важчими та менш інтерпретованими аналогами глибокого навчання. Автори зазначають, що полегшені моделі можна порівняти з базовими лініями глибокого навчання, а в деяких випадках навіть перевершити їх, досягаючи кращої продуктивності.

Ще одним відомим продуктом є застосунок для розпізнавання мовних емоцій від Xuanji Pe [15]. Даний продукт використовує згорткові рекурентні нейронні мережі TensorFlow для розпізнавання мовних емоцій (SER) у базі даних IEMOCAP [16]. Для покращення проставлення міток емоційності продукт використовує три стратегії об'єднання, щоб створити функції рівня висловлювання для SER.

У таблиці 2 міститься огляд найбільш популярних доступних сервісів автоматичного озвучування текстів.

В результаті огляду не було знайдено жодної системи, яка б поєднувала в собі функції одночасного перекладу тексту з аудіо та автоматичного озвучування з урахуванням емоційного забарвлення та інших характеристик мовця. Це, у свою чергу, підтверджує актуальність даної тематики.

Таблиця 2

Огляд найпопулярніших доступних сервісів для text to speech

| Сервіс | Характеристики | Кіл-ть мов |
|---|--|---------------|
| Amazon polly | Модель, що працює у реальному часі, вимова, гучність, висота звуку, швидкість тощо | 25 + діалекти |
| IBM watson text to speech | Забезпечує налаштування вимови, визначає власні слова, виразність, час звучання слів | 20 + діалекти |
| Google cloud text to speech | Визначає вимову, SSML, стать мовця | 45 + діалекти |
| Azure Cognitive Services text to speech | Визначає вимову, гучність, висоту голосу | 96 + діалекти |

Виклад основного матеріалу

Аналізуючи вже існуючі продукти та останні наукові дослідження, а також запити потенційних користувачів, можна сформулювати перелік наступних вимог щодо розроблюваної системи:

- 1) підтримка функції перетворення аудіо в текст;
- 2) підтримка функції визначення тональності аудіо;
- 3) підтримка функції розпізнавання статі та інших особливостей людини (вік, дизартричне мовлення, особливості вимови, акцент, тощо) на основі голосу;
- 4) підтримка функції автоматизованого озвучування текстів з урахуванням особливостей мовця;
- 5) зручний та зрозумілий користувацький інтерфейс;
- 6) можливість задавання власних налаштувань щодо адаптації;
- 7) швидка робота системи.

Для тренування розроблених моделей було вирішено використовувати наступні набори даних:

- Корпус LibriSpeech — колекція прочитаного англійського мовлення, створеного з аудіокниг. Цей корпус є частиною проекту LibriVox, і містить 1000 годин мовлення з частотою дискретизації 16 кГц [17].

- Корпус Common Voice — це багатомовна колекція транскрибованого мовлення. Цей корпус розроблено компанією Mozilla та містить 2 500 годин аудіо 38-а різними мовами [18], зокрема українською.

- Корпус Acted-Emotional-Speech-Dynamic-Database — це загальнодоступний набір даних розпізнавання мовних емоцій для дослідницьких цілей [19, 20].

- Корпус The Ryerson Audio-Visual Database of Emotional Speech and Song (RAVDESS) — динамічний мультимодальний набір виразів обличчя та голосу північноамериканською англійською мовою [21]. Даний набір містить 7356 записів від 24 професійних акторів, які озвучують лексично відповідні твердження з нейтральним північноамериканським акцентом.

- Корпус emotional speech database (ESD) [22] — база даних, що складається з 350 паралельних висловлювань та 29 годин мовних даних, що охоплює 5 класів емоцій (нейтральні, щастя, гнів, смуток і здивування).

На рисунку 1 зображено базову архітектуру системи автоматизованого озвучування.

Загалом розроблювана система повинна складатись із ряду модулів, які можна налаштовувати та розширювати, наприклад, для підтримки різних мов чи покращення їх роботи. У ролі вхідних даних виступає аудіо файл у довільному форматі. Користувачу повинна надаватись можливість задавати певні вхідні параметри для системи, як-от мова перекладу, зберігання проміжних кроків та голос або голоси озвучення.

Першим етапом в системі є попереднє опрацювання аудіо, приведення до потрібного аудіо кодеку та частоти дискретизації, визначення кількості голосів – модуль попередньої обробки (1). Це модуль також відповідатиме за розбиття аудіо на структурні одиниці за звучанням окремого голосу. Також на цьому етапі здійснюватиметься побудова матриці звучання певного голосу та визначення міток часу його звучання.

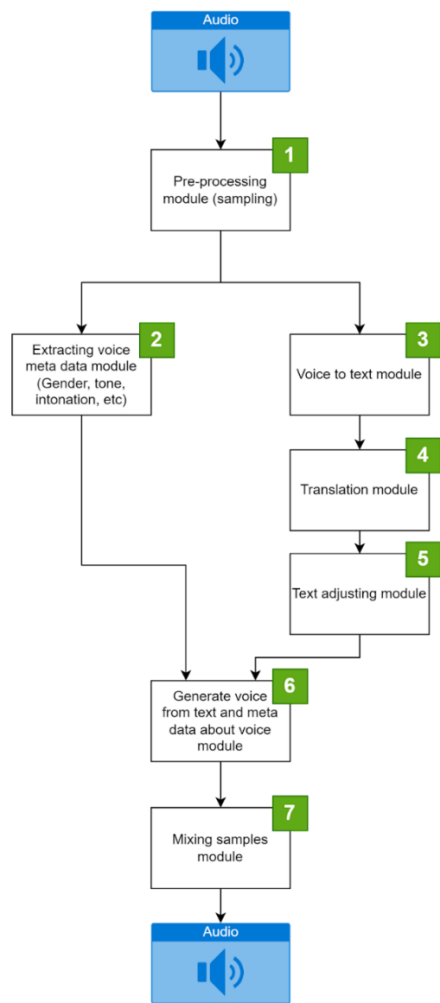


Рис. 1. Запропонована архітектура розроблюваної системи.

Далі система на основі попередньо підготовлених даних повинна визначати емоційне забарвлення фраз, стать, вік (дитина, дорослий, людина похилого віку) та інші особливості мовлення (акцент, дизартричне мовлення тощо) – модуль (2). Для цього необхідно розробити групу відповідних класифікаторів, результати роботи яких взаємодоповнюватимуть одні одних. Модуль (3) відповідає за перетворення підготовлених на першому етапі даних у текст. На цьому етапі здійснюватиметься транскрибування аудіо чи відео та буде складено матрицю тривалості звучання фраз з аудіо чи відео.

Для забезпечення перекладу тексту на обрану користувачем мову використовуватиметься модуль (4). Також на цьому етапі буде складено матрицю тривалості потенційного звучання перекладених фраз. Важливим є модуль (5), що відповідатиме за коригування та виправлення можливих помилок в тексті, а також адаптуватиме переклад до вікна часу в оригіналі (що буде корисно для відео). В результаті коригування буде виконуватись оновлення матриці тривалості потенційного звучання, а також при потребі враховуватиметься зміна перекладених фраз.

На базі підготовленого тексту, який отримано на виході з модуля (2) та комплексу метаданих з модуля (2) буде виконуватись перетворення тексту в голос із врахування матриць тривалості звучання фраз та потенційного звучання перекладених фраз – модуль (6). Для забезпечення такого функціоналу буде розроблено комплекс моделей для автоматичного генерування голосу з урахуванням емоційної складової, віку, статі тощо.

Завершальним модулем системи є модуль (7), що забезпечує об'єднання усіх аудіозаписів в

один, при потребі можлива функція певного вирівнювання звукової доріжки. Також даний модуль буде додавати аудіо доріжку до відеоряду (при переозвучуванні відео).

Висновки

В даній роботі наведено огляд останніх досліджень в галузі автоматизованого озвучення, отримання метаданих з аудіо та запропоновано загальну архітектуру для системи автоматизованого озвучування з елементами штучного інтелекту, такими як класифікатор визначення емоційного забарвлення мовлення, моделі для визначення статі та особливостей мовлення. Отримані результати роботи ляжуть в основу подальших досліджень при розробленні групи класифікаторів для визначення емоційного забарвлення мовлення, визначення статі, віку, особливостей мовлення людини. На базі запропонованої архітектури планується проектування та розроблення відповідної системи.

References

1. Service Provider Network and Technology Services. Cisco. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-741490.html> (date of access: 17.01.2023).
2. Statista Search Department (2023, Mar 9th) The most spoken languages worldwide 2022 [Infographic]. Statista. URL: <https://www.statista.com/statistics/266808/the-most-spoken-languages-worldwide/> (date of access: 9.03.2023).
3. Pew Research Center (2019 July 25th) Popular YouTube channels produced a vast amount of content, much of it in languages other than English. Washington, D.C. URL: <https://www.pewresearch.org/internet/2019/07/25/popular-youtube-channels-produced-a-vast-amount-of-content-much-of-it-in-languages-other-than-english/> (date of access: 8.03.2023)
4. EF English Proficiency Index (2022). URL: <https://www.ef.com/wwen/epi/> (date of access: 08.03.2023).
5. Chachadi, K., Nirmala, S. R. 2022. Voice-based gender recognition using neural network. In Information and Communication Technology for Competitive Strategies (ICTCS 2020) (pp. 741-749). Springer, Singapore. DOI=https://doi.org/10.1007/978-981-16-0739-4_70.

6. Ertam, F. 2019. An effective gender recognition approach using voice data via deeper LSTM networks. *Applied Acoustics*, 156, 351-358. DOI=<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.07.033>.
7. Kodrasi, H., Bourlard. 2019. "Super-gaussianity of Speech Spectral Coefficients as a Potential Biomarker for Dysarthric Speech Detection," ICASSP 2019 - 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Brighton, UK, 2019, pp. 6400-6404, DOI=10.1109/ICASSP.2019.8683107.
8. Schuller, D. M., & Schuller, B. W. (2021). A Review on Five Recent and Near-Future Developments in Computational Processing of Emotion in the Human Voice. *Emotion Review*, 13(1), 44–50. DOI=<https://doi.org/10.1177/1754073919898526>.
9. Zhou, K., Sisman, B., Liu, R., Li H. 2021. "Seen and Unseen Emotional Style Transfer for Voice Conversion with A New Emotional Speech Dataset," ICASSP 2021 - 2021 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Toronto, ON, Canada, 2021, pp. 920-924, DOI=10.1109/ICASSP39728.2021.9413391.
10. Koduru, A., Valiveti, H.B., Budati, A.K. 2020. Feature extraction algorithms to improve the speech emotion recognition rate. *Int J Speech Technol* 23, 45–55 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10772-020-09672-4>.
11. Shaqra, F. A., Duwairi, R., Al-Ayyoub, M. 2019. Recognizing Emotion from Speech Based on Age and Gender Using Hierarchical Models. *Procedia Computer Science*, 151, 37-44. DOI=<https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.04.009>.
12. Ringeval, F. 2011. Ancrages et modèles dynamiques de la prosodie : application à la reconnaissance des émotions actées et spontanées. (Speech anchor and dynamic models of prosody : application to acted and spontaneous emotion recognition).
13. GitHub - MiteshPuthran/Speech-Emotion-Analyzer: The neural network model is capable of detecting five different male/female emotions from audio speeches. (Deep Learning, NLP, Python). GitHub. URL: <https://github.com/MiteshPuthran/Speech-Emotion-Analyzer> (date of access: 10.01.2023).
14. Sahu, G. 2019. Multimodal Speech Emotion Recognition and Ambiguity Resolution. ArXiv. DOI=<https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.06022>
15. Mingyi Chen, Xuanji He, Jing Yang, Han Zhang. 2018. "3-D Convolutional Recurrent Neural Networks With Attention Model for Speech Emotion Recognition", *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 25, no. 10, pp. 1440-1444, 2018.
16. Busso, C., Bulut, M., Lee, C., Kazemzadeh, A., Mower, E., ... Narayanan, S. "IEMOCAP: Interactive emotional dyadic motion capture database," *Journal of Language Resources and Evaluation*, vol. 42, no. 4, pp. 335-359, 2008.
17. Panayotov, V., Chen, G., Povey, D., Khudanpur, S. 2015. "Librispeech: An ASR corpus based on public domain audio books," 2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2015, pp. 5206-5210, DOI=10.1109/ICASSP.2015.7178964.
18. Ardila, R., Branson, M., Davis, K., Henretty, M., Kohler, M., Meyer, J., Weber, G. 2019. Common voice: A massively-multilingual speech corpus. arXiv preprint arXiv:1912.06670. DOI=<https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.06670>
19. Vryzas, N., Kotsakis, R., Liatsou, A., Dimoulas, C. A., Kalliris, G. 2018. Speech emotion recognition for performance interaction. *Journal of the Audio Engineering Society*, 66(6), 457-467.
20. Vryzas, N., Matsiola, M., Kotsakis, R., Dimoulas, C., Kalliris, G. 2018. Subjective Evaluation of a Speech Emotion Recognition Interaction Framework. In *Proceedings of the Audio Mostly 2018 on Sound in Immersion and Emotion* (p. 34). ACM.
21. Livingstone, S. R., & Russo, F. A. 2018. The Ryerson Audio-Visual Database of Emotional Speech and Song (RAVD ESS): A dynamic, multimodal set of facial and vocal expressions in North American English. *PLOS ONE*, 13(5), e0196391. DOI=<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196391>
22. Zhou, K., Sisman, B., Liu, R., Li, H. 2021. Seen and unseen emotional style transfer for voice conversion with a new emotional speech dataset. In ICASSP 2021-2021 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (pp. 920-924). IEEE.

ЛЕМЕСЬКО АНДРІЙ

Державний університет телекомунікацій

ORCID ID: [0000-0001-8003-3168](https://orcid.org/0000-0001-8003-3168)**АНТОНЕНКО АРТЕМ**

Державний університет телекомунікацій

ORCID ID: [0000-0001-9397-1209](https://orcid.org/0000-0001-9397-1209)e-mail: artem.v.antonenko@gmail.com**КУВІК НАЗАР**

Державний університет телекомунікацій

ORCID ID: [0009-0008-0983-7110](https://orcid.org/0009-0008-0983-7110)**ГНЯДИЙ ВЛАДИСЛАВ**

Державний університет телекомунікацій

ORCID ID: [0009-0001-6866-3922](https://orcid.org/0009-0001-6866-3922)

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕРЕЖЕВИХ ЗАГРОЗ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНОГО ЗАХИСТУ ДАНИХ ТА ІНФРАСТРУКТУРИ

Мережі є системами, вразливими для зловмисників, оскільки їх основною функцією є полегшення віддаленого доступу та передачі даних. У розвитку технологій та збільшенні кількості підключених до мереж пристроїв, зростає кількість потенційних загроз для безпеки мережі. Це ставить перед інформаційними технологіями завдання постійного підвищення рівня безпеки мережі та зменшення вразливості до атак. Інформація в мережах має бути безпечною, щоб забезпечити ефективний зв'язок та обмін даними в мережі. Через проблеми та загрози для даних у мережах безпека мережі є одним із найважливіших аспектів інфраструктури інформаційних технологій. У зв'язку з тим, що безпека є однією з головних потреб в інфраструктурі інформаційних технологій, протягом багатьох років різні вчені проводили дослідження в цій області. У результаті під час побудови мережі розробляються заходи безпеки мережі, щоб зменшити можливість хакерів отримати доступ до захищених даних. Метою безпеки мережі є захист мережі та її компонентів від несанкціонованого доступу та зловживань, щоб надати користувачам безпечний та безпечний зв'язок. У цій статті представлено огляд останніх розробок у сфері мережеских загроз і заходів безпеки, а також перспективні напрямки досліджень. У статті розглядаються різні мережескі атаки та засоби підвищення безпеки мережеских даних. На основі аналізу останніх досліджень у цій статті обговорюються основні типи та категорії мережеских загроз і атак, яким піддається мережа. Наведено їх класифікацію та проведено детальний аналіз ознак. Цілі безпеки мережі можна представити трьома категоріями: підтвердження конфіденційності даних, підтримка повних даних, підтримка доступності даних. Велика увага приділяється методам захисту мереж від несанкціонованого доступу та впливу мережеских загроз. Базуючись на огляді досліджень мережескої безпеки, у статті наводиться перелік ефективних заходів безпеки мережі для запобігання мережеским вторгненням. У статті також наголошується на важливості своєчасного виявлення та реагування на мережескі загрози, щоб забезпечити найвищий рівень безпеки передачі даних в мережі. Розробка та застосування ефективних методів захисту є критичним елементом для забезпечення безпеки мереж та їх користувачів. Таким чином, нові ідеї в системах мережескої безпеки можуть бути представлені через аналіз опублікованих робіт для подальших досліджень.

Ключові слова: мережева безпека, захищені дані, типи і категорії загроз та атаки, заходи безпеки, запобігання вторгненням, апаратні брандмауери, програмні брандмауери, рівні безпеки мережі.

LEMESHKO ANDRIY

State University of Telecommunications

ANTONENKO ARTEM

State University of Telecommunications

KUVIK NAZAR

State University of Telecommunications

HNIADYI VLADYSLAV

State University of Telecommunications

INVESTIGATING NETWORK THREATS TO ENSURE MAXIMUM PROTECTION OF DATA AND INFRASTRUCTURE

Networks are systems vulnerable to attackers because their main function is to facilitate remote access and data transfer. With the development of technology and the increase in the number of devices connected to networks, the number of potential network security threats is growing. This challenges information technology to continuously improve network security and reduce attack vulnerabilities. Information on networks must be safe and secure to enable efficient communication and data exchange on the network. Due to the challenges and threats to data in networks, network security is one of the most important aspects of an information technology infrastructure. Due to the fact that security is one of the main needs in information technology infrastructure, scientists have been conducting research in this area for many years. As a result, when building a network, network security measures are designed to reduce the ability of hackers to gain access to protected data. The goal of network security is to protect the network and its components from unauthorized access and abuse in order to provide users with safe and secure communications. This article provides an overview of recent developments in the field of network threats and security measures, as well as promising areas of research. The article discusses various network attacks and ways to improve the security of network data. Based on the analysis of recent research, this article discusses the main types and categories of network threats and attacks to which the network is exposed. Their classification is given and a detailed analysis of the features is carried out. Network security objectives can be provided in three categories: data confidentiality assurance, complete data

maintenance, data availability maintenance. Much attention is paid to methods of protecting networks from unauthorized access and the impact of network threats. Based on a review of network security research, the article provides a list of effective network security measures to prevent network intrusions. The article also notes the importance of timely detection and response to network threats in order to ensure a high level of data transmission security on the network. The development and application of effective protection methods is a critical element in ensuring the security of networks and their users. Thus, new ideas in network security systems can be presented through the analysis of published works for further research.

Keywords: network security, protected data, types and categories of threats and attacks, security measures, intrusion prevention, hardware firewalls, software firewalls, network security levels.

Постановка проблеми

З розширенням залежності бізнес-систем від інфраструктури ІТ-систем мережева безпека на сьогоднішній день є однією з найважливіших вимог в галузі інформаційної безпеки. Відсутність заходів безпеки в ІТ-інфраструктурі може завдати непоправної шкоди організаціям та компаніям, що є небажаним для бізнесу та маркетингового процесу. Метою мережевої безпеки є насамперед запобігання шкоді від неправильного використання даних. Існує низка потенційних проблем, які можуть виникнути, якщо мережева безпека не реалізована належним чином. Кожній комерційній установі необхідно приховувати певну важливу та таємну інформацію від доступу своїх конкурентів. Втрата даних може знизити додану вартість у процесі виробництва та продажу товарів. Більш того, справжній шлях руху в комерційній діяльності та маркетингу продуктів може бути втрачений через маніпулювання даними внаслідок відсутності заходів безпеки у фінансовій інформації. В результаті відсутність заходів безпеки в мережі даних може дуже важливо використовувати суворі принципи для запобігання можливим втратам, незалежно від розміру та типу мережі [1]. Це набір принципів, правил і заходів, розроблених мережним адміністратором або адміністраторами для запобігання та моніторингу несанкціонованого доступу, неправильного використання, виправлення, запобігання змінам або обмеження доступу до комп'ютерних мереж та доступних мережевих ресурсів [2].

Аналіз останніх джерел

У цій роботі розглянуто та класифіковано питання дослідження мережевих загроз і заходів безпеки з метою захисту мереж від несанкціонованого доступу. Проведення аналітичного огляду останніх досліджень стосовно мережевих загроз та вироблення заходів безпеки від них є актуальним завданням, розв'язання якого дозволить зменшити доступ зловмисників до захищених даних та отримати надійну систему мережевої безпеки [3–7].

Значний внесок у вирішення фундаментальних питань у сфері мережевих загроз і заходів мережевої безпеки є дослідження таких вітчизняних та зарубіжних вчених: В.Б. Толубка, В.Л. Бурячка, С. В. Толюпи, В.А. Козачка, Г.І. Гайдур, М.В. Грайворонського, В. Gupta, М. Wazid, Н. І. Kobo, М. Stawowski, D. Barrera, R. Neisse, В. Wang та ін. [1–24].

Метою роботи є аналітичний огляд та систематизація мережевих загроз і визначення стратегії ефективних засобів для забезпечення мережевої безпеки.

Об'єкт дослідження – методи та засоби забезпечення мережевої безпеки.

Предмет дослідження – типи та категорії загроз для мережевої безпеки, класифікація різних атак на захищені мережі.

Виклад основного матеріалу

У зв'язку з тим, що безпека є однією з основних потреб в інфраструктурі інформаційних технологій, у різних науково-дослідних роботах було проведено велике дослідження в цьому напрямку. Щоб забезпечити заходи безпеки в мережі даних, атаки мають бути чітко визначені. Атака – це небезпечна чи безпечна спроба змінити або використовувати ресурс, доступний через мережу, не за призначенням. Мережеві атаки можна розділити на три основні категорії:

- 1) Несанкціонований доступ до ресурсів та інформації через мережу.
- 2) Несанкціоноване маніпулювання інформацією мережі.
- 3) Атаки, які призводять до порушення надання послуг та називається відмовою в обслуговуванні.

Визначення санкціонованої чи несанкціонованої дії є обов'язком політики мережної безпеки, яка може бути визначена як спроба користувача переглянути чи змінити заборонену інформацію. Несанкціонований доступ може бути однією з найпоширеніших атак у будь-якій мережі. Таким чином зловмисник намагається отримати доступ до зони обмеженого доступу до інформації та мережі. Злом паролів, створення фальшивих ідентифікаторів або використання зловмисного програмного забезпечення є основними способами здійснення цих атак [4, 5].

Знищення інформації є однією з найбільш руйнівних атак мережі. Таким чином зловмисник намагається знищити певну інформацію, виконуючи команди в базі даних. Це може бути обмеженим або дуже великим. Залежно від типу зловмисника, мережа може втратити всю інформацію за лічені секунди. Атаки, які призводять до порушення надання послуг, є ще однією формою несанкціонованого доступу. У цьому випадку особа входить в область користувача або керування для виконання команди або набору команд, які зазвичай є забороненими. Таким чином зловмисник може вводити, змінювати, надсилати електронною поштою, копіювати інформацію або видаляти певну інформацію, щоб знайти спосіб доступу до даних з обмеженим доступом. Ступінь атаки залежить від можливостей зловмисника [6, 7].

Загрози мережевої безпеки потрапляють до однієї чи двох загальних категорій, таких як логічні

атаки або атаки з регресом. Раціональні атаки, як випливає з назви, є комерційною стратегією, яка використовується для усунення будь-яких недоліків у системі. До недоліків можна віднести вразливість програмного забезпечення, таку як комп'ютерний дефект, який дозволяє обійти систему захисту, та помилки безпеки в коді. Метою атаки є проникнення в систему з метою пошкодження чи отримання несанкціонованого доступу до системи [8, 9].

Ресурсні атаки спрямовано на знищення ресурсів мереж. Цей прийом став популярним у 1990-х роках, але поступово його популярність знизилася. При цьому методі мережева система примусово руйнується, що робить її вразливою. Ці атаки здійснюються по-різному, щоб застосувати зусилля для доступу до інтернет даних. Найшвидший спосіб для сервера – зіткнутися з величезним потоком запитів на обслуговування, що знаходяться поза його контролем. Також деякі ресурсні атаки передбачають встановлення шкідливого програмного забезпечення в мережі, що робить її вразливою [10].

Існує також інша класифікація різних атак на захищені мережі:

- *Пасивні атаки*: пасивні атаки спрямовані проти безпеки мережі організації. Щоб ідентифікувати мережу, зловмисник контролює мережу організації. Оскільки в цій атаці зловмисник не робить ніяких зловмисних дій, виявити цей тип атаки дуже складно, наприклад, один тип пасивної атаки полягає в тому, що зловмисник захоплює внутрішні мережеві пакети організації. Протидія цій атаці полягає в тому, що цей тип атаки легко запобігти за допомогою належного шифрування в інфраструктурі мережі [11].

- *Активні атаки*: при цьому типі атак зловмисник безпосередньо атакує сервери організації. Атаки відстежуються системою безпеки мережі. Стратегії боротьби з цими атаками включають встановлення брандмауерів (програмних та апаратних), а також систем IPS [11, 12].

- *Внутрішні атаки*: при цьому типі атак зловмисники отримують фізичний доступ до систем. На жаль, при фізичному доступі до систем практично будь-який зловмисник може зробити велику роботу і завдати непоправної шкоди організації. Відповідним та логічним способом боротьби з цим типом атак є забезпечення фізичної безпеки систем та серверів [12].

- *Внутрішні атаки користувачів організацій*: Ці типи мережевих атак зазвичай здійснюються внутрішніми користувачами організацій, які мають доступ до систем та інформації. Залежно від рівня знань та обізнаності зловмисників про комп'ютерні мережі, вони можуть проникнути до мережних систем. Боротьба з атаками полягає у запобіганні цьому типу атак безпеки на рівні 2 і зосередитися на автентифікації, у той час як фізична безпека має бути повністю забезпечена [12, 13].

У сучасній мережі є багато ресурсів для захисту мережі. Нижче наведено список мережевих ресурсів, які мають бути захищені від усіх типів атак:

- міжмережеві екрани, маршрутизатори та комутатори в якості мережевого обладнання;
- інформація про роботу мережі, така як таблиці маршрутизації та конфігурації списків доступу, що зберігаються на маршрутизаторі;
- нематеріальні мережеві ресурси, такі як пропускна здатність та швидкість;
- інформація та інформаційні ресурси, підключені до мережі, такі як бази даних та інформаційні сервери;
- термінали, які підключені до мережі для використання різних джерел;
- інформація, якою обмінюються в мережі у будь-який момент часу;
- конфіденційність операцій користувачів та використання їх мережевих ресурсів для запобігання ідентифікації користувача [14, 15].

На мережевих комп'ютерах, таких як бази даних та веб-сервери, в мережі відбувається обмін інформацією та інформацією про мережеві компоненти для виконання таких завдань, як таблиці маршрутизації маршрутизатора. Мережеві ресурси також можуть бути термінальним обладнанням, таким як маршрутизатори та брандмауери, або механізмами підключення для запобігання доступу хакерів до захищених даних [16].

Для реалізації передових систем безпеки в мережі даних до заходів безпеки мереж слід застосовувати належні методи і принципи проектування. Ключові заходи захисту для мережної безпеки включають брандмауери, виявлення вторгнень та брандмауер веб-додатків, систему виявлення вторгнень (IDS) та систему запобігання вторгнень (IPS), захист віртуальної приватної мережі (VPN) та перегляд контенту – фільтрацію спаму та унікальний механізм вказівки місцезнаходження ресурсів. [17]. Ці апаратні та програмні рішення, що підтримують та доповнюють механізми безпеки для операційних систем, баз даних та додатків. Для забезпечення ефективної системи захисту даних у надійній мережі застосовуються методи проектування за рівнями загроз [18].

Основні принципи безпеки ІТ-систем, які повинні розглядатись при проектуванні системи мережевої безпеки, показано на рисунку 1 [19].

Політика безпеки мережі має бути визначена таким чином, щоб мінімізувати ризик і суму збитку після аналізу ризику в мережі даних. Політика безпеки має бути загальною і в полі загального бачення і не вдаватися в деталі. Деталі можуть змінитися за короткий час, а її політика залишається незмінною.

Елементами політики безпеки є такі питання: що і чому дані повинні бути захищені, хто відповідає за захист даних, створення контексту, який вирішує будь-які можливі конфлікти.

Політики безпеки можна умовно розділити на дві категорії: дозвольна (все, що явно не заборонено, дозволено) та обмежена (все, що явно не дозволено, заборонено). Зазвичай ідея використання

обмежувальної політики безпеки є кращою та доцільнішою з точки зору підвищення безпеки мережесистем. Цей вибір викликаний проблемами безпеки авторизованих політик для забезпечення обмеження доступу до захищених даних [20].

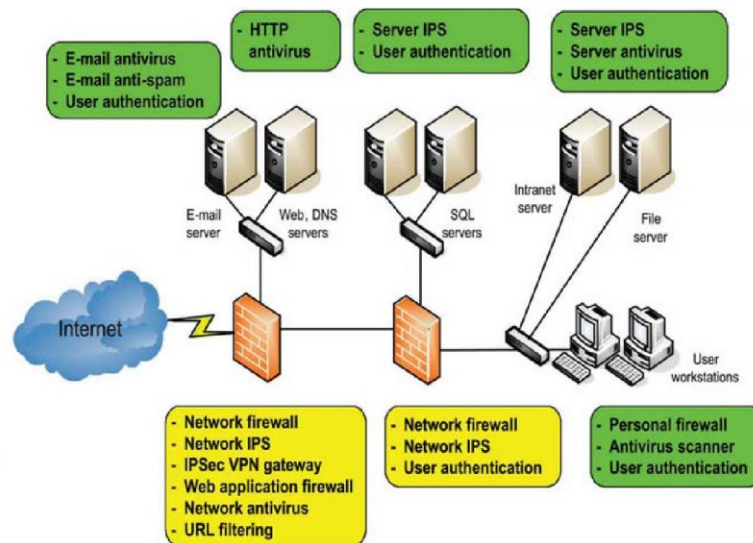


Рис. 1. Принцип комплексного захисту різних ресурсів ІТ-системи на основі кількох взаємодоповнюючих рівнів безпеки

Найкращий підхід до забезпечення надійної мережевої безпеки – повна підготовка мережі до загроз. Існують 4 типи процесів реалізації безпеки мережі:

- безпека: відомості про те, що всі компоненти є надійним чином ліцензовані та мають політики автентифікації та захисту;
- огляд: відстеження мережесистем дій та безперервність дій із захисту;
- тестування: оцінка вразливостей політик безпеки, призначених для мережі, шляхом імітації атаки довіреною особою;
- покращання ситуації: на основі всіх попередніх кроків необхідно зібрати дані та використовувати їх для створення якісніших заходів [21].

Усі мережеві адміністратори повинні мати на увазі, що добра стратегія безпеки мережі передбачає постійний моніторинг і обслуговування. Звичайно, недостатньо лише розроблення політики безпеки, Нападники постійно вдосконалюються, щоб знайти шлях до захищених даних. Отже, мережеві адміністратори повинні бути в курсі цих вдосконалень [22].

Усунення небезпеки : після визначення мережесистем активів та їхніх загрозливих факторів слід оцінити різні ризики. У кращому випадку мережа повинна мати можливість захистити від усіх видів помилок, але дешевої безпеки не досягти. Тому необхідно правильно оцінити типи ризиків, щоб визначити найважливіші з них, а з іншого боку, щоб визначити джерела, від яких слід захистити ці ризики. Існують два основні фактори в аналізі ризику: можливість здійснення нападу та пошкодження мережі у разі успішної атаки.

Рівні мережі: рівні безпеки є класифікацією мережесистем дій, щоб кожна мережева діяльність могла бути захищена окремо та політики безпеки одного рівня не впливали на параметри безпеки іншого рівня.

Рівні безпеки мережі дозволяють перевірити безпеку кожної діяльності окремо шляхом класифікації мережевої діяльності та розміщення їх на різних рівнях. Оскільки кожна діяльність розглядається окремо, можна точно керувати заходами безпеки на кожному рівні.

Щоб збільшити рівень безпеки комплексної ІТ-інфраструктури, рішення безпеки мають використовуватися на всіх рівнях ІТ-архітектури підприємства. Щоб встановити наскрізну безпеку, необхідно застосовувати компоненти безпеки, що стосуються різного обладнання та груп. Завдання рівнів безпеки, як мережесистем рівнів, полягає в наданні послуг і активації вищого рівня. Таким чином, потреба в багаторівневій мережі відчувається в веб-даних.

Рівень безпеки інфраструктури: рівень інфраструктури охоплює безпеку об'єктів передавальної мережі та окремих мережесистем інструментів. Цей рівень дає змогу ознайомитись з основною реалізацією мережі, служб та додатків.

Рівень безпеки програмних додатків: цей режим фокусується на програмах, доступних для користувачів в Інтернеті. Мережні програми можуть бути перевірені в постачальниках послуг додатків (ASP), таких як третій серверний центр обслуговування, серверний сервер, який сам вибирає ASP, або в хост-компаніях, які можуть бути незалежними в цьому центрі. Згідно з цим рівнем, можуть бути сприйняті як загроза чотири цілі: користувачі додатків, постачальник програм, суб-провайдер, постачальник послуг. Структура рівня безпеки програмних додатків в рамках безпеки мережі представлена на рисунку 2.

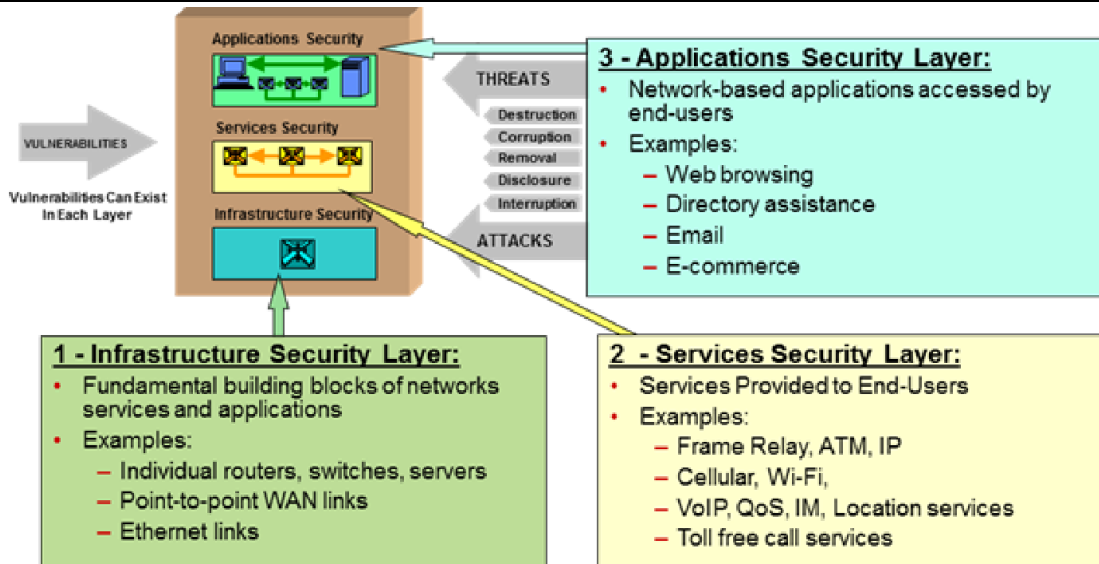


Рис. 2. Структура рівня безпеки програмних додатків в рамках безпеки мереж

Контрольний рівень безпеки: функція цього рівня полягає в тому, щоб виконувати допоміжні дії, що відповідають за передачу інформацію про послуги або мережеві програми. Цей рівень зазвичай включає зв'язок між машинами у мережі, яка зазвичай включає управляюче повідомлення.

Рівень безпеки на стороні користувача: цей рівень безпеки включає власну функцію захисту та перевірки послуг, що надаються провайдером на стороні користувача. Кінцеві користувачі можуть використовувати постачальника послуг самої мережі або послуг розширення, таких як VPN.

Сегментація інформації: ресурси ІТ-системи з різним рівнем і чутливістю, включаючи толерантність до ризику та вразливість до різних ступенів загрози повинна бути включена до різних зон безпеки. Принцип «приховування інформації» розглядається як один з розширених випадків цього правила, так що ІТ-системи лише надають дані, необхідні для виконання завдань ІТ-системи.. Система може бути заблокована як сервер для обслуговування інтернет-провайдерів, які зареєстровані лише у загальнодоступних DNS. Принцип мінімальної кількості балів для людей, підключених до ІТ-системи (таких як користувачі та системні адміністратори) повинен надавати мінімальні привілеї, необхідні для оптимальної продуктивності в організації. Це також стосується і даних та послуг, які є доступними для зовнішніх користувачів. Одним із розширень цього правила є принцип «необхідності знати», згідно з яким користувачі та керівники ІТ системи мають доступ лише до інформації, що стосується їх ролей та завдань [23].

Рівень безпеки ІТ-системи залежить від фактору, який має найменшу безпеку. Одним із розширень цього правила є принцип єдиної точки відмови (SPOF), який пов'язаний з доступністю мережевих послуг, згідно з яким всі сполучні ланки, обладнання (мережі та безпеки), а також сервери на мережевих маршрутах між користувачами та в функціональні характеристики важливих ресурсів ІТ-системи повинні бути реалізовані в надлишковій конфігурації. При проектуванні системи захисту мережі повинні бути розглянуті принципи організаційної безпеки, в тому числі правила «розподілу обов'язків» і "робочий процес". Метою цих принципів є обмеження здатності співробітників ігнорувати та порушувати політику безпеки ІТ-системи. Розподіл обов'язків означає, що важливі завдання і функції повинні виконуватися двома або більшою кількістю працівників. Також плінність робочих кадрів слід враховувати для важливих робочих посад з точки зору заходів безпеки мережі.

Ресурси ІТ-систем різного рівня чутливості повинні бути розташовані в різних зонах безпеки. Комп'ютерне обладнання та постачальники послуг для зовнішніх мереж (такі як інтернет-провайдери) повинні бути розташовані в різних зонах (таких як демілітаризована зона), на відміну від комп'ютерних систем і внутрішнього мережевого обладнання. Стратегічні ресурси ІТ-системи повинні бути розташовані в певному конкретному місці зони безпеки, яким необхідно забезпечити захист [21]. Комп'ютерне обладнання з низькою надійністю та системи, такі як сервери віддаленого доступу та в точки доступу до бездротової мережі слід також слід включати в певні конкретні зони безпеки. Різні типи ресурсів ІТ-системи повинні бути розміщені в окремих зонах безпеки. Робочі станції для користувачів повинні знаходитися в різних зонах безпеки, на відміну від серверів. Системи безпеки та управління мережею повинні бути розташовані в певних конкретних зонах безпеки. Системи на етапі розробки повинні бути розміщені в іншому секторі, на відміну від систем пов'язаних з виробничою фазою [22].

Міжмережеві екрани в програмних та апаратних системах діють як стіни безпеки між користувачами мереж та зовнішнім світом. Брандмауери зазвичай розташовані на межі між мережею та Інтернетом. Апаратні брандмауери можуть контролювати контент і комунікаційні шляхи мережі. Брандмауери визначають правила надходження інформації та визначення того, які дані мають право на вхід і вихід а які не мають право. Програмні брандмауери економічно вигідні інструменти в системах

брандмауерів, які дозволяють досліджувати шаблони і водночас можуть забезпечувати контроль за загрозами. Апаратні брандмауери є більш надійними і можуть бути ефективнішими, але менш функціональними ніж їх програмні брандмауери. На розсуд користувача брандмауер є основним інструментом для підтримання або обмеження потоку мережевого трафіку в різних ситуаціях, такі як спеціальне обладнання брандмауера, функція брандмауера в обладнанні IPS і список контролю доступу в мережеві комутатори та маршрутизатори. При правильному розгортанні і конфігурації брандмауери можуть допомогти створити безпечні архітектури, розділити інфраструктуру IT-мережі на домени безпеки та контролювати комунікацію між ними [24].

Для посилення кібератаки на захищені дані було розроблено вдосконалену систему виявлення вторгнень IDS. В цій роботі представлено моделювання вдосконаленої кібератаки для запобігання доступу хакерів до захищених даних в мережах. Віруси, хробаки та трояни намагаються поширюватися по мережі та можуть залишатись на інфікованих пристроях протягом днів або тижнів. Робота системи безпеки полягає в тому, щоб вжити заходів безпеки, для запобігання проникненню такого типу шкідливого програмного забезпечення, а також шкідливого програмного забезпечення, яке відкриває їм шлях. На рисунку 3 показано виконання мережевих процесів безпеки для того, щоб запобігти вторгненню, що контролює взаємодію користувачів з доступом до внутрішньої мережі. У цьому випадку Інтернет-послуги для внутрішніх користувачів доступні через корпоративну електронну пошту та проксі-сервери Hyper Text Transfer Protocol (HTTP).

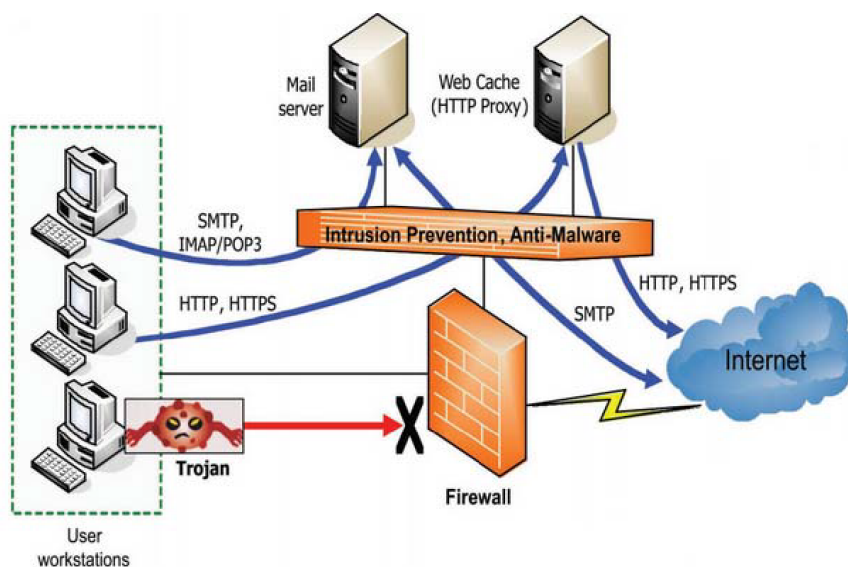


Рис. 3. Приклад схеми для запобігання вторгненням шляхом контролю взаємодії користувачів з доступом до внутрішньої мережі [19]

Загальна стратегія в цьому випадку складається з трьох кроків. Фактично безпека мережі включає в себе наступне:

- 1) захист: потрібно налаштувати системи та мережі належним чином;
- 2) виявлення: необхідно повністю контролювати мережу та виявляти зміни та використання мережевих ресурсів, які є ознаками вторгнення;
- 3) реакція: після виявлення проблем необхідно швидко реагувати та швидко та швидко забезпечити безпечне середовище в мережі.

Це є стратегія захисту від зловмисників. Якщо є один спільний знаменник серед експертів з безпеки, небезпечно покладатися на єдину лінію захисту, оскільки будь-який засіб захисту може бути знищений зловмисником. Мережа є не лінія чи точка, а насправді є територією. В результаті, якщо зловмисник атакував частину захищених даних, можливо зберегти ресурси даних і врятувати їх, якщо система безпеки правильно організована. Рішення мережевої безпеки можна доповнити такими заходами:

- 1) Оцінка ризиків і вразливостей, аналіз і підбір відповідних контролерів.
- 2) Оптимізація серверів, клієнтів, веб-сайтів тощо мережевого середовища організації.
- 3) Оптимізація кешу, трансляції мережевих адрес (NAT), проксі, адрес Інтернет-протоколу (IP) і маршрутизації мережі.
- 4) Консультації щодо вибору правильних стандартів безпеки.
- 5) Консультації щодо визначення та застосування керівних принципів та виконання інструкції з захисту інформації.
- 6) Практичне навчання на місці або періодично на різних рівнях.
- 7) Перевірка міцності систем безпеки шляхом спроб їх зламу.

Висновки

Безпека мережі процес, який певною мірою захищає мережу від різних типів внутрішніх і зовнішніх загроз. Метою безпеки мережі є захист її від зазначених вище атак, тому цілі безпеки мережі можуть бути представлені трьома категоріями: доказ конфіденційності даних, підтримка вичерпних даних, підтримка доступності даних. Для безпеки мережі здійснені наступні кроки: визначено частину, яка має бути захищена; визначено випадки, від яких дана частина має бути захищена; визначено можливі загрози; впроваджено засоби, які можуть захистити активи економічно ефективним способом; постійний контроль процесу і покращання його у разі вразливості. Реалізація політики безпеки досягається у формі плану безпеки мережі. Елементи, з яких складається план безпеки мережі, наступні: функції безпеки кожного пристрою, такі як керуючий пароль або за допомогою Secure Shell (SSH); брандмауери, інтегратори VPN для віддаленого доступу: виявлення вторгнення, сервери безпеки, служби AAA для мережі, механізми контролю та обмеження доступу для різних мережевих пристроїв. Для зниження швидкості вторгнення у захищені дані може бути реалізована удосконалена система моніторингу засобів безпеки. Для захисту даних мають бути передбачені нові протоколи та правила для заходів безпеки різної організації щодо нових рівнів атак на мережі. Для забезпечення розширених заходів безпеки мережі можуть бути модифіковані апаратні засоби систем мережевої безпеки. Удосконалення моделей апаратного процесора та програмного забезпечення системи зв'язку для виявлення та запобігання мережевим атакам можна реалізувати в рамках процесу підвищення безпеки мережі.

Література

1. Бурячок В.Л., Толубко В.Б., Хорошко В.О., Толюпа С.В. Інформаційна та кібербезпека: соціотехнічний аспект : підручник ; за заг. ред. В. Б. Толубка. К. : ДУТ, 2015. 288 с.
2. Бурячок В. Л., Толюпа С.В., Семко В.В., Бурячок Л.В., Складанний П.М., Лукова-Чуйко Н.В. Інформаційний та кіберпростори: проблеми безпеки, методи та засоби боротьби : посібник. К. : ДУТ - КНУ, 2016. 178 с.
3. Козачок В.А., Гайдур Г.І., Гахов С.О., Хмелевський Р.М., Чумак Н.С. Політики безпеки : навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Київ : ДУТ ННІЗІ, 2020. 167 с.
4. Tayal S., Gupta N., Gupta P., Goyal D. and Goyal M. A Review paper on Network Security and Cryptography. *Advances in Computational Sciences and Technology*, vol. 10 (5), pp. 763-770, 2017.
5. Khan R. and Hasan M. Network threats, attacks and security measures: A review. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, vol. 8 (8), pp. 116-120, 2017.
6. Rathore S., Sharma P. K., Loia V., Jeong Y.S., Park, J. H. Social network security: Issues, challenges, threats, and solutions. *Information sciences*, vol. 421. pp. 43-69, 2017.
7. Твердохліб А.О., Коротін Д.С. Ефективність функціонування комп'ютерних систем при використанні технології блокчейн і баз даних. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*, 2022, (6).
8. Цвик О.С. Аналіз і особливості програмного забезпечення для контролю трафіку. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*, 2023, (1).
9. Новіченко Є.О. Актуальні засади створення алгоритмів обробки інформації для логістичних центрів. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*, 2023 (1).
10. Зайцев Є.О. Smart засоби визначення аварійних станів у розподільних електричних мережах міст. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*, 2022, (5).
11. Gao S., Li Z., Xiao B. and Wei G. Security threats in the data plane of software-defined networks. *IEEE network*, vol. 32 (4), pp. 108-113.
12. Islam T., Manivannan D., Zeadally S. A classification and characterization of security threats in cloud computing. *Int J Next-Gener Comput*, vol. 7 (1), pp. 268-285, 2016.
13. Bays L. R., Oliveira R. R., Barcellos M. P., Gaspary L. P. and Madeira R. M. Virtual network security: threats, countermeasures, and challenges. *Journal of Internet Services and Applications*, vol. 6 (1), pp. 1, 2015.
14. Sinha P., Kumar Rai A., Bhushan B. Information Security threats and attacks with conceivable counteraction. In: 2019 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT). IEEE, pp. 1208-1213, 2019.
15. Dastres R., Soori M. Impact of Meltdown and Spectre on CPU Manufacture Security Issues. vol. 18(2) pp. 62-69, 2021.
16. Tayal A., Mishra N., Sharma S. Active monitoring & postmortem forensic analysis of network threats: A survey. *International Journal of Electronics and Information Engineering*, vol. 6 (1), pp. 49-59, 2017.
17. Lu Z., Lu X., Wang W. and Wang C. Review and evaluation of security threats on the communication networks in the smart grid. In: 2010-Milcom 2010 Military Communications Conference. IEEE, pp. 1830-1835, 2010.
18. Kaynar K. A taxonomy for attack graph generation and usage in network security. *Journal of Information Security and Applications*, vol. 29, pp. 27-56, 2016.
19. Khondoker R., Larbig P., Senf D., Bayarou K, and Gruschka N. AutoSecSDNDemo: Demonstration of automated end-to-end security in software-defined networks. In: 2016 IEEE NetSoft Conference and Workshops

(NetSoft). IEEE, pp. 347-348, 2016.

20. Mahmoud R., Yousuf T., Aloul F. and Zualkernan I. Internet of things (IoT) security: Current status, challenges and prospective measures. In: 2015 10th International Conference for Internet Technology and Secured Transactions (ICITST). IEEE, pp. 336-341, 2015.

21. Kobo H. I., Abu-Mahfouz A. M., and Hancke G. P. A survey on software-defined wireless sensor networks: Challenges and design requirements. IEEE access, vol. 5pp. 1872-1899, 2017.

22. Barrera D., Molloy I., and H. Huang H. Standardizing IoT network security policy enforcement. In: Workshop on Decentralized IoT Security and Standards (DISS). p 6, 2018.

23. Wang B., Lu, K. and Chang P. "Design and implementation of Linux firewall based on the frame of Netfilter/IPtable. In: 2016 11th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE). IEEE, pp. 949-953, 2016.

24. Zheng S., Li Z. and Li B. Implementation and application of ACL in campus network. In: AIP Conference Proceedings. vol 1. AIP Publishing LLC, p. 090014, 2017.

References

1. Buryachok V. L., Tolubko V. B., Khoroshko V. O., Tolyupa S. V. Information and cyber security: socio-technical aspect; in general ed. V. B. Tolubka. K.: DUT, 2015. 288 p.
2. Buryachok V. L., Tolyupa S. V., Semko V. V., Buryachok L. V., Skladanyy P. M., Lukova-Chuiko N. V. Information and cyberspace: security problems, methods and means of combat. K.: DUT - KNU, 2016. 178 p.
3. Kozachok V.A., Haydur G.I., Gakhov S.O., Khmelevskiy R.M., Chumak N.S. Security policies. Study guide for students of higher educational institutions. Kyiv: DUT NNZI, 2020. 167 p.
4. Tayal S., Gupta N., Gupta P., Goyal D. and Goyal M. A Review paper on Network Security and Cryptography. Advances in Computational Sciences and Technology, vol. 10 (5), pp. 763-770, 2017.
5. Khan R. and Hasan M. Network threats, attacks and security measures: A review. International Journal of Advanced Research in Computer Science, vol. 8 (8), pp. 116-120, 2017.
6. Rathore S., Sharma P. K., Loia V., Jeong Y.S., Park, J. H. Social network security: Issues, challenges, threats, and solutions. Information sciences, vol. 421. pp. 43-69, 2017.
7. Tverdokhlib A.O., Korotin D.S. Efektyvnist funktsionuvannya kompiuternykh system pry vykorystanni tekhnolohii blokchein i baz dannykh. Tavriiskiy naukoviy visnyk. Seriya: Tekhnichni nauky, 2022, (6).
8. Tsvyk O.S. Analiz i osoblyvosti prohramnoho zabezpechennia dlia kontroliu trafiku. Herald of Khmelnytskyi National University, 2023, (1).
9. Novichenko Ye.O. Aktualni zasady stvorennia alhorytmiv obrobky informatsii dlia lohystychnykh tsentriv. Tavriiskiy naukoviy visnyk. Seriya: Tekhnichni nauky, 2023 (1).
10. Zaitsev Ye.O. Smart zasoby vyznachennia avariinykh staniv u rozpodilnykh elektrychnykh merezhakh mist. Tavriiskiy naukoviy visnyk. Seriya: Tekhnichni nauky, 2022, (5).
11. Gao S., Li Z., Xiao B. and Wei G. Security threats in the data plane of software-defined networks. IEEE network, vol. 32 (4), pp. 108-113.
12. Islam T., Manivannan D., Zeadally S. A classification and characterization of security threats in cloud computing. Int J Next-Gener Comput, vol. 7 (1), pp. 268-285, 2016.
13. Bays L. R., Oliveira R. R., Barcellos M. P., Gaspary L. P. and Madeira R. M. Virtual network security: threats, countermeasures, and challenges. Journal of Internet Services and Applications, vol. 6 (1), pp. 1, 2015.
14. 14 Sinha P., Kumar Rai A., Bhushan B. Information Security threats and attacks with conceivable counteraction. In: 2019 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT). IEEE, pp. 1208-1213, 2019.
15. Dastres R., Soori M. Impact of Meltdown and Spectre on CPU Manufacture Security Issues. vol. 18(2) pp. 62-69, 2021.
16. Tayal A., Mishra N., Sharma S. Active monitoring & postmortem forensic analysis of network threats: A survey. International Journal of Electronics and Information Engineering, vol. 6 (1), pp. 49-59, 2017.
17. Lu Z., Lu X., Wang W. and Wang C. Review and evaluation of security threats on the communication networks in the smart grid. In: 2010-Milcom 2010 Military Communications Conference. IEEE, pp. 1830-1835, 2010.
18. Kaynar K. A taxonomy for attack graph generation and usage in network security. Journal of Information Security and Applications, vol. 29, pp. 27-56, 2016.
19. Khondoker R., Larbig P., Senf D., Bayarou K, and Gruschka N. AutoSecSDNDemo: Demonstration of automated end-to-end security in software-defined networks. In: 2016 IEEE NetSoft Conference and Workshops (NetSoft). IEEE, pp. 347-348, 2016.
20. Mahmoud R., Yousuf T., Aloul F. and Zualkernan I. Internet of things (IoT) security: Current status, challenges and prospective measures. In: 2015 10th International Conference for Internet Technology and Secured Transactions (ICITST). IEEE, pp. 336-341, 2015.
21. Kobo H. I., Abu-Mahfouz A. M., and Hancke G. P. A survey on software-defined wireless sensor networks: Challenges and design requirements. IEEE access, vol. 5pp. 1872-1899, 2017.
22. Barrera D., Molloy I., and H. Huang H. Standardizing IoT network security policy enforcement. In: Workshop on Decentralized IoT Security and Standards (DISS). p 6, 2018.
23. Wang B., Lu, K. and Chang P. "Design and implementation of Linux firewall based on the frame of Netfilter/IPtable. In: 2016 11th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE). IEEE, pp. 949-953, 2016.
24. Zheng S., Li Z. and Li B. Implementation and application of ACL in campus network. In: AIP Conference Proceedings. vol 1. AIP Publishing LLC, p. 090014, 2017.

МЕТЕЛИЦЯ АРТЕМ

Вінницький технічний фаховий коледж

ORCID ID: [0000-0002-9383-7752](https://orcid.org/0000-0002-9383-7752)e-mail: artemmetelicha@gmail.com**КОВАЛЕНКО ВІКТОР**

Запорізький національний університет

ORCID ID: [0000-0001-5950-4412](https://orcid.org/0000-0001-5950-4412)e-mail: victor.l.kovalenko@gmail.com**ТРОМСЮК ВОЛОДИМИР**

Вінницький технічний фаховий коледж

ORCID ID: [0000-0001-5022-8159](https://orcid.org/0000-0001-5022-8159)e-mail: 2013tvd@gmail.com**ФОРМАНЧУК МИКОЛА.**

Вінницький технічний фаховий коледж

ORCID ID: [0009-0006-4186-0965](https://orcid.org/0009-0006-4186-0965)e-mail: mif530522@gmail.com**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИМЕТРИЧНОГО ВІБРАТОРА**

В роботі наведено результати синтезу математичної моделі значення густини потоку потужності хвильового симетричного вібратора у ближній зоні. Визначено залежність між густиною потоку потужності та радіусом відстані від вібратора, що є важливим фізичним показником для побудови антен мобільних телефонів. Наведена математична модель може бути використана для розрахунків та проектування радіотехнічних та телекомунікаційних систем та пристроїв, що використовують симетричні вібратори для забезпечення мінімального впливу електромагнітного випромінювання на здоров'я людини.

Ключові слова: симетричний вібратор, електрична складова поля, діаграма спрямованості.

METELYTSYA ARTEM

Vinnytsia Technical Applied College

KOVALENKO VIKTOR

Zaporizhzhia National University

TROMSIUK VOLODYMYR

Vinnytsia Technical Applied College

FORMANCHUK MYKOLA

Vinnytsia Technical Applied College

MATHEMATICAL MODEL OF SYMMETRIC VIBRATOR

In the work, theoretical and experimental studies of the mathematical model of the value of the power flux density of the wave symmetric vibrator in the near zone were carried out using the MMANA-GAL software package. The density and structure of the field of an elementary electric emitter in the near zone have been determined. Directional diagrams of a half-wave symmetric vibrator with wavelengths of 0.5λ , λ , and 100λ were constructed. The directionality of electromagnetic wave radiation is of great importance in radio communication technology. The directionality of radiation can be ensured if the size of the antenna significantly exceeds the length of the emitted or received wave. The development of portable antennas for mobile phones is determined by two main aspects – acceptable broadband and maximum uniformity of electromagnetic radiation along the azimuthal angle with a high amplification factor. These conditions contradict the fact that the antenna is raised close to the human head with a wavelength comparable to the wavelength. During telephone conversations, the subscriber's head absorbs and scatters the electromagnetic energy emitted by the antenna, so that the meridional uniformity of the radiation is disturbed. The proposed mathematical model of the value of the power flow density of the wave symmetric vibrator in the near zone allows us to reduce the impact of the electrical component on human health. Such conclusions were drawn based on the results of simulation modeling of a half-wave symmetric vibrator using a synthesized mathematical model for the power flux density of a symmetric wave vibrator in the near zone in the MMANA-GAL environment, taking into account the fact that the direction of electric and magnetic radiation changes by 90 degrees with an increase in wavelength. The results of the study can be used for the development of effective antennas to reduce the negative impact on human health, in particular on the functioning of the brain.

Keywords: symmetric vibrator, electric field component, directional diagram.

Постановка проблеми

Симетричні вібратори є важливими елементами радіотехнічних та телекомунікаційних систем, без яких складно уявити сучасні системи зв'язку. Одним із ключових параметрів, який характеризує ефективність роботи симетричного вібратора, є густина потоку потужності у ближній зоні. Тому розробка математичної моделі густини потоку потужності є важливим науковим завданням, яке має практичне значення. Синтез математичної моделі густини потоку потужності симетричного вібратора дає можливість виявити вплив електромагнітного випромінювання на мозок людини. Результати дослідження такої моделі можуть бути використані для розрахунку ефективності роботи вібратора в радіотехнічних системах, а також для вдосконалення конструкції вібраторів, випромінювання яких буде менше впливати на мозок людини.

З розвитком мобільного зв'язку, який переходить на все більш високі частоти, стало актуально розглядати питання, які вивчають поширення електромагнітного поля ближньої зони оскільки це стосується впливу електромагнітного поля на людину, тому що мобільний телефон знаходиться на відстані в декілька міліметрів від кори головного мозку і працює на досить високій частоті, 890...915 МГц та 1710...1785 МГц

[1, 2, 3]. Системи зв'язку 4G та 5G працюють ще на більш високих частотах 2.5...3.7 ГГц [4].

На сьогодні для аналізу електромагнітного поля, що випромінюється антеною, використовують описи електричної і магнітної складових, що стосуються дальньої зони. Але дані результати будуть справедливими лише в тому випадку, коли антена мобільного телефону знаходиться на досить великій відстані від користувача.

Оскільки математичному аналізу електромагнітного випромінювання у ближній та проміжній зонах приділено мало уваги внаслідок ускладнення формул для розрахунку, то основним завданням роботи є виведення математичної моделі значення густини потоку потужності хвильового симетричного вібратора у ближній зоні. Також виконані експериментальні дослідження віртуальної моделі розподілу радіального потоку потужності у програмному пакеті MMANA-GAL [5].

Аналіз останніх джерел

У роботах [1, 2, 3, 6] було визначено співвідношення, які дозволили оцінювати спрямованість симетричних дротяних тонких вібраторів у ближній та проміжній зонах їх полів. Автори розглянутих робіт запропонували методику дослідження впливу електромагнітного випромінювання мобільного телефону на кору головного мозку людини. В роботах [7, 8] проведено оцінку взаємодії електромагнітного поля антени мобільного пристрою зв'язку з мозком людини. Дослідження авторів опрацьованих праць показують, що тривале електромагнітне випромінювання мобільного телефону чинить небажаний вплив на тканини головного мозку, нагріває їх та може спричинити небажані наслідки для здоров'я людини. Тому розглянутих праць пропонують різні методи зменшення впливу випромінювання мобільного телефону на голову людини.

Жорсткі вимоги до рівня потужності електромагнітного випромінювання, що поглинають певні органи людини [7, 8], який характеризує ступінь впливу мобільний телефон-людина, вимагають проведення досить складних і дорогих експериментальних вимірювань. Засоби такого контролю повинні бути неінвазивними і неспотвореними. В таких умовах зростає роль математичного та імітаційного моделювання високочастотних електромагнітних полів, що створюються мобільними телефонами, зокрема їх антенами, і насамперед, розрахунку рівня потужності випромінювання, яке поглинають окремі органи людини. Для цих цілей потрібно мати досить просту і зрозумілу математичну модель густини потоку потужності хвильового симетричного вібратора у ближній зоні.

У роботах [9, 10, 11] було наведено моделювання різних випромінювачів електромагнітних сигналів, які дають досить точні результати для визначення експериментальних залежностей між геометричними параметрами і характеристиками антени. Розгляд моделювання різних випромінювачів електромагнітних сигналів дозволяє сформулювати методику дослідження математичної моделі густини потоку потужності хвильового симетричного вібратора у ближній зоні. Побудова діаграм спрямованості для різних довжин хвиль дозволяє знайти ефективні величини при яких симетричний вібратор буде працювати найбільш ефективно та з найменшим впливом на окремі мозок людини.

Метою роботи є синтез математичної моделі значення густини потоку потужності хвильового симетричного вібратора у ближній зоні та імітаційне дослідження моделі розподілу радіального потоку потужності у програмному пакеті MMANA-GAL. Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання: 1) синтезувати спрощену математичну модель густини потоку потужності хвильового симетричного вібратора у ближній зоні; 2) отримати та опрацювати результати імітаційного моделювання густини потоку електромагнітного випромінювання у ближній зоні для довжин хвиль $0,5\lambda$, λ , 100λ .

Виклад основного матеріалу

Для синтезу математичної моделі значення густини потоку потужності хвильового симетричного вібратора у ближній зоні необхідно умовно розмістити тонкий симетричний вібратор довжиною $2l$ у сферичній системі координат таким чином, як показано на рис. 1 і визначили електричну і магнітну складові електромагнітного поля [2].

$$\dot{E}_\theta = \frac{I_0 \cdot r \cdot \sin \theta}{j \cdot 4\pi \cdot \omega \cdot \varepsilon_a \cdot \sin kl} \cdot \left[\int_0^l \frac{1 + jkr_1 - k^2 \cdot r_1^2}{r_1^4} \cdot \sin k(l-z) \cdot e^{-jkr_1} dz + \int_{-l}^0 \frac{1 + jkr_2 - k^2 r^2}{r_2^4} \cdot \sin k(l-z) \cdot e^{-jkr_2} dz \right], \quad (1)$$

де E_θ – комплексна амплітуда меридіональної складової електричного поля;

I_0 – амплітуда гармонічного електричного струму в елементарному електричному випромінювачі довжиною l ;

r – відстань від випромінювача до зазначеної точки випромінювання;

z – ширина випромінювання в ближній зоні;

$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon$ – абсолютна діелектрична проникність середовища, яке оточує досліджуваний випромінювач;

$k = 2\pi / \lambda$ – коефіцієнт фази випромінюваної вібратором електромагнітної хвилі, λ – довжина хвилі.

$$\dot{E}_r = \frac{I_0}{j \cdot 2\pi \cdot \varpi \cdot \varepsilon_a \cdot \sin kl} \cdot \left[\int_0^l \frac{1+jkr_1}{r_1^4} \sin k(l-z) \cdot e^{-jkr_1} \cdot \sqrt{r_1^2 - r^2 \sin^2 \theta} dz + \int_{-l}^0 \frac{1+jkr_2}{r_2^4} \sin k(l+z) \cdot e^{-jkr_2} \cdot \sqrt{r_2^2 - r^2 \sin^2 \theta} dz \right], \quad (2)$$

$$\dot{H}_\phi = \frac{I_0 \cdot r \cdot \sin \theta}{4\pi \cdot \sin kl} \cdot \left[\int_0^l \frac{1+jkr_1}{r_1^3} \sin k(l-z) \cdot r^{jk_1} dz + \int_{-l}^0 \frac{1+jkr_2}{r_2^3} \sin k(l-z) \cdot e^{-jkr_2} dz \right]. \quad (3)$$

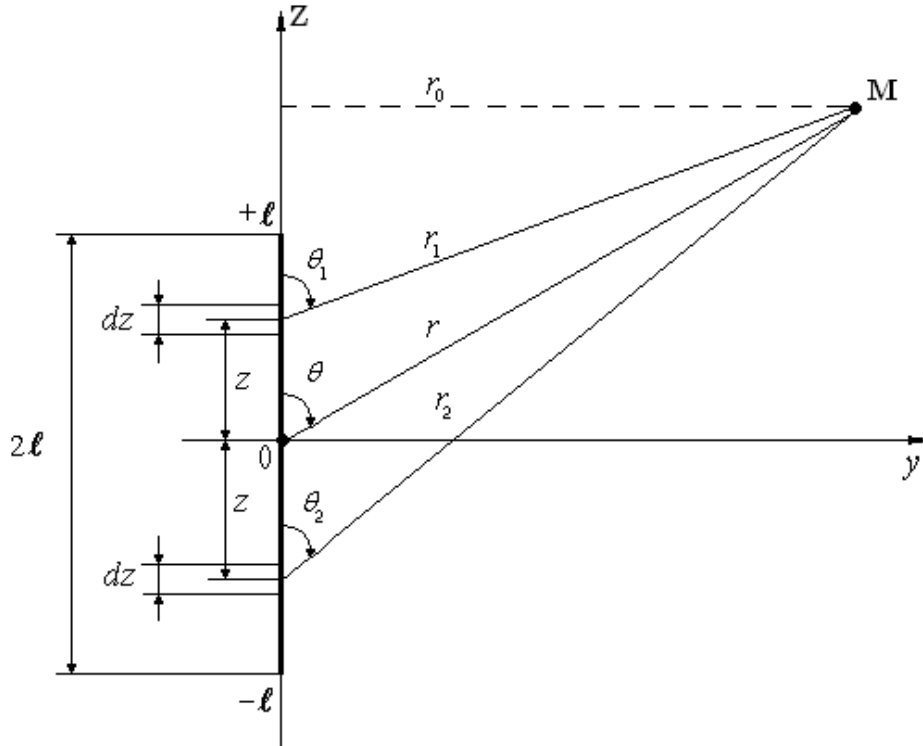


Рис. 1. Ілюстрація до спрямованості вібратора в ближній зоні

Відомо [1], що при роботі напівхвильового та хвильового симетричного вібратора у ближній зоні утворюються два потоки потужності електричного поля. Один з них визначається вектором густини цього потоку, спрямованого радіально від вібратора ($\bar{\Pi}_r$) і знаходиться за формулою:

$$\bar{\Pi}_r = [\bar{E}_\theta \bar{H}_\phi], \quad (4)$$

де \bar{E}_θ і \bar{H}_ϕ – ортогональні електричні та магнітні, відповідно, складові поля спрямованого радіально від симетричного вібратора.

Другий потік потужності електричного поля спрямований по дотичній до меридіанної координатної лінії сферичної системи координат ($\bar{\Pi}_\theta$) і знаходиться за формулою:

$$\bar{\Pi}_\theta = [\bar{E}_r \bar{H}_\phi], \quad (5)$$

де \bar{E}_r і \bar{H}_ϕ – ортогональні електричні та магнітні, відповідно, складові поля спрямовані по дотичній меридіанної координатної лінії сферичної системи координат від симетричного вібратора.

У дальній зоні меридіальним потоком потужності у порівнянні з радіальним можна знехтувати через дуже мале значення складової поля $E_r \ll E_\theta$.

Для визначення величини радіального потоку потужності використаємо вираз (5), а значення складової H_ϕ отримаємо переписавши вираз (3) для умов дальньої зони:

$$\dot{H}_\phi = j \frac{l_0 \sin \theta \cdot k \cdot e^{-jkr}}{4\pi \cdot \sin kl \cdot r} \left[\int_0^l \sin k(l-z) dz + \int_{-l}^0 \sin k(l+z) dz \right] \quad (6)$$

Оцінювання величини радіального потоку потужності будемо за значенням потоку потужності за період гармонічної електромагнітної хвилі:

$$\bar{P}_{cep} = \bar{r}_0 \frac{1}{2} R_e \left[\dot{E}_\theta \overline{H}^* \right], \quad (7)$$

де

$$\overline{H}_\phi^* = \bar{\phi}_0 j \frac{I_0 \cdot k \cdot \sin \theta \cdot e^{jkr}}{4\pi \sin kl \cdot r} \cdot \left[\int_0^l \sin k(l-z) dz + \int_{-l}^0 \sin k(l+z) dz \right]. \quad (8)$$

Таким чином

$$\bar{P}_{cep} = \bar{r}_0 \frac{1}{2} R_e \left[\dot{E}_\theta \cdot \overline{H}_\phi^* \right]. \quad (9)$$

або

$$P_{cep} = \frac{1}{2} R_e \left\{ \dot{E}_\theta \overline{H}_\phi^* \right\}. \quad (10)$$

Після підстановки значень \dot{E}_θ з виразу (1) та \overline{H}_ϕ^* з виразу (8) у вираз (10), отримаємо:

$$P_{cep} = \frac{I_0^2 \cdot k^3 \cdot \sin^2 \theta \cdot e^{jkr}}{32\pi^2 \sin^2 kl \cdot r^2 \cdot \xi_a} \left[\int_0^l \sin k(l-z) dz + \int_{-l}^0 \sin k(l+z) dz \right]^2. \quad (11)$$

Застосувавши програму MMANA-GAL здійснимо дослідження розподілу радіального потоку потужності для симетричного вібратора. Для цього перепишемо вираз (11) з урахуванням, що $k = 2\pi / \lambda$, та $k = \omega \sqrt{\mu_a \cdot \xi_a}$:

$$P_{cep} = \frac{\pi \cdot I_0^2 \cdot \sin^2 \theta}{4r^2 \cdot \lambda^3 \cdot \xi_a} \left[\int_0^{\lambda/4} \sin \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\lambda}{4} - z \right) dz + \int_{-\lambda/4}^0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\lambda}{4} + z \right) dz \right]^2. \quad (12)$$

Для прикладу, взявши $\lambda=1$ м, $I_0=1$ А, осатаній вираз матиме вигляд:

$$P_{cep} = \frac{\pi}{4r^2 \cdot \xi_a} \left[\int_0^{1/4} \sin 2\pi \left(\frac{1}{4} - z \right) dz + \int_{-1/4}^0 \sin 2\pi \left(\frac{1}{4} + z \right) dz \right]^2 \cdot \sin^2 \theta. \quad (13)$$

Вважаючи, що сухе повітря має значення $\xi \approx 1$ (оскільки $\xi = \xi_a$), то вираз (12) буде мати вид:

$$P_{cep} = \frac{9\pi^2 \cdot 10^{-9}}{r^2} \left[\int_0^{1/4} \sin 2\pi \left(\frac{1}{4} - z \right) dz + \int_{-1/4}^0 \sin 2\pi \left(\frac{1}{4} + z \right) dz \right]^2 \cdot \sin^2 \theta. \quad (14)$$

Програмний пакет MMANA-GAL [5] дозволяє дослідити діаграму спрямованості різних типів антен в залежності від довжин хвиль та геометричних розмірів антен у 3D зображенні.

Для визначення форми діаграми спрямованості напівхвильового симетричного вібратора з довжинами хвиль $0,5\lambda$, λ , 100λ побудуємо їх в середовищі MMANA-GAL. Результати імітаційного моделювання напівхвильового симетричного вібратора у відповідності до синтезованої математичної моделі значення густини потоку потужності хвильового симетричного вібратора у ближній зоні наведено на рисунках 2–4.

Результати імітаційного моделювання напівхвильового симетричного вібратора у відповідності до синтезованої математичної моделі значення густини потоку потужності хвильового симетричного вібратора у ближній зоні у середовищі MMANA-GAL показують, що зі збільшенням довжини хвилі напрямок електричного і магнітного випромінювання змінюється на 90° . Це означає, що більш небезпечне електричне випромінювання при довжині хвилі 100λ буде спрямоване не у голову, вгору і вниз від голови. Таким чином електрична складова електромагнітного поля буде в меншій мірі впливати на головний мозок людини. Але при цьому збільшиться вплив магнітної складової, яка вважається більш безпечною для організму людини.

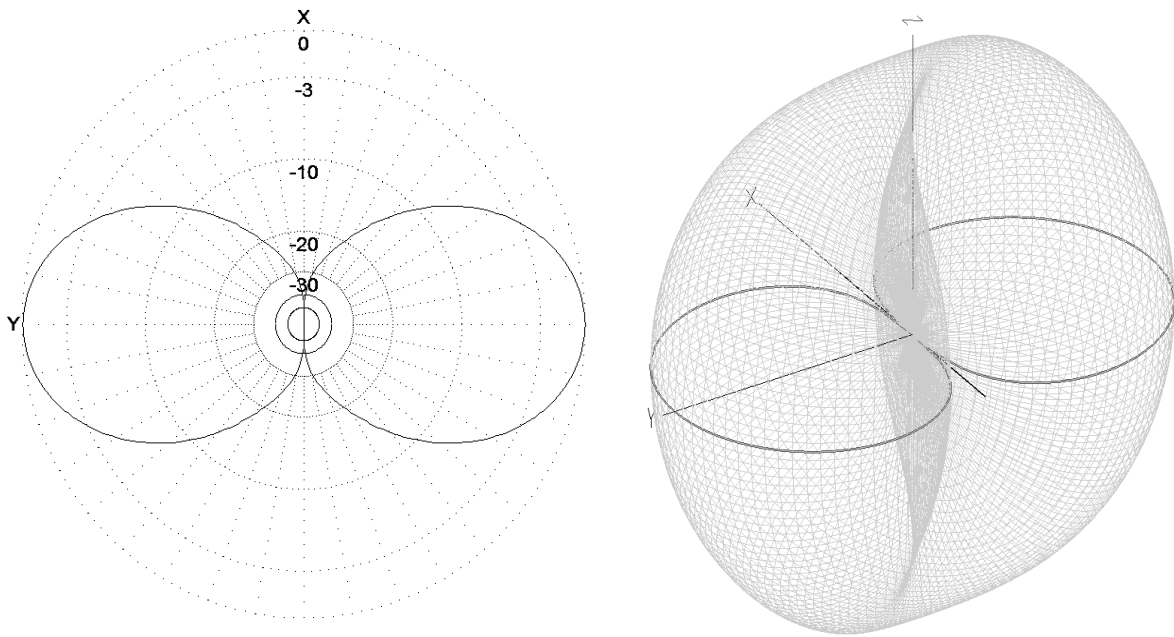


Рис. 2. Діаграма спрямованості напівхвильового симетричного вібратора для довжини хвилі $0,5\lambda$

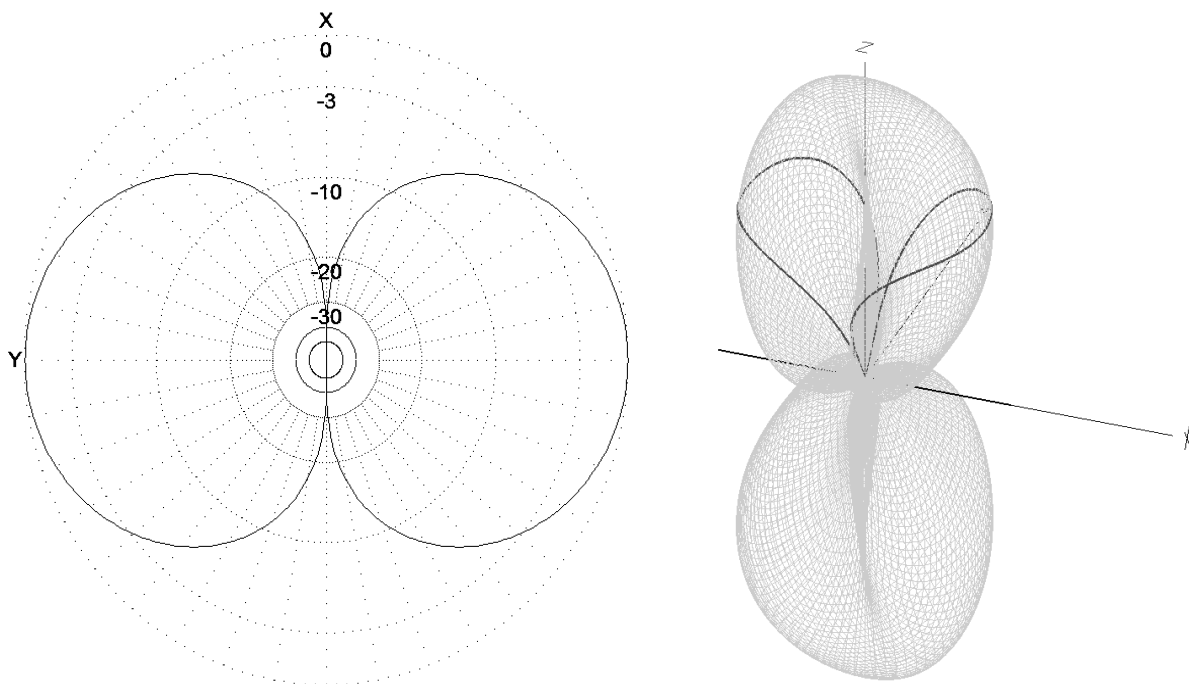


Рис. 3. Діаграма спрямованості напівхвильового симетричного вібратора для довжини хвилі λ

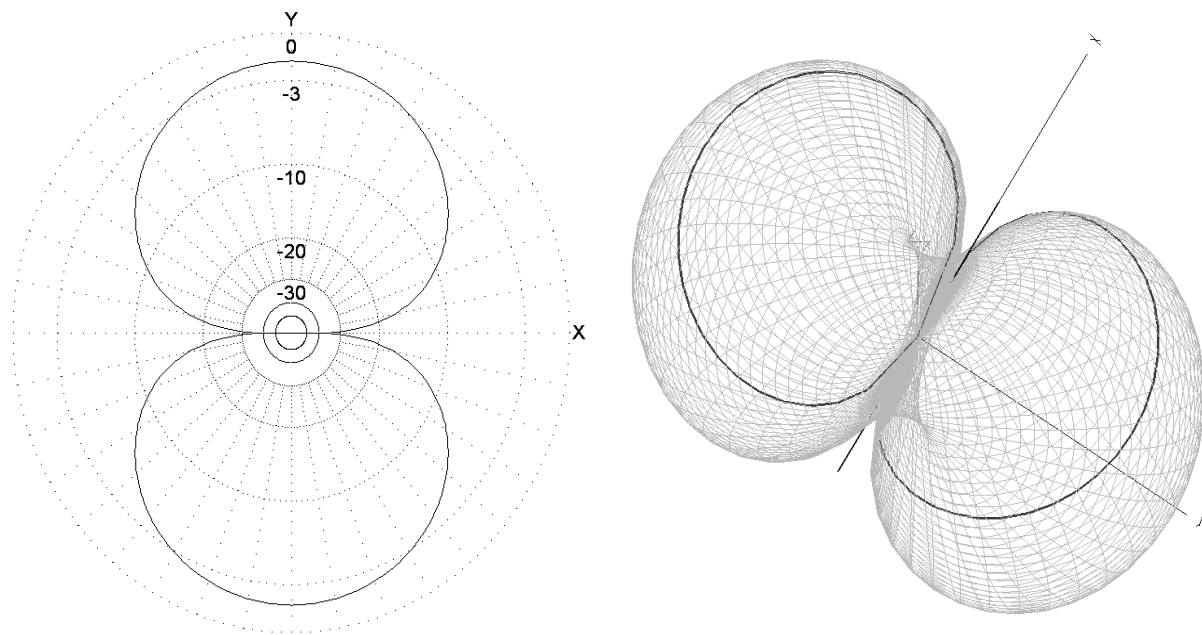


Рис. 4. Діаграма спрямованості напівхвильового симетричного вібратора для довжини хвилі 100λ .

Висновки

Отримана математична модель значення густини потоку потужності хвильового симетричного вібратора у ближній зоні дозволяє дослідити властивості електромагнітного поля у ближній зоні. Діаграми спрямованості показують, що зі збільшенням відстані до телефону вплив електромагнітного випромінювання зменшуються. Імітаційне моделювання в середовищі MMANA-GAL також показує, що зі зростанням довжин хвилі вплив електричної складової на організм людини буде менший оскільки вона буде направлена не в голову людини. Тому така математична модель є досить перспективною для подальших досліджень антен мобільних телефонів і в перспективі зменшення впливу електромагнітного випромінювання на мозок людини.

Аналіз впливу різних параметрів на значення густини потоку потужності показав, що відстань до випромінювача та довжина хвилі мають найбільший вплив на значення та форму діаграми спрямованості. Також було проведено дослідження моделі розподілу радіального потоку густини потужності, яке показало, що цей потік має максимальне значення в напрямку перпендикулярному до вібраторів та зменшується зі збільшенням відстані від них. Математична модель густини потоку потужності хвильового симетричного вібратора у ближній зоні є важливою для розуміння характеристик випромінювача електромагнітного поля. Вона дозволяє визначити оптимальні параметри для досягнення необхідної густини потоку потужності та забезпечує підґрунтя для подальшого розвитку цієї технології із забезпеченням мінімального впливу на здоров'я людини.

Література

1. Крушевський Ю. В. Дослідження структури поля і спрямованості електричного елементарного випромінювача в ближній і проміжній зонах / Ю. В. Крушевський, Ю. І. Кравцов, В. В. Чернига // Наукові праці ВНТУ. – 2008. – № 2. – 9 с. – URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/4335/61.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
2. Крушевський Ю. В. Структура електромагнітних потоків елементарного електричного випромінювача в ближній і проміжній зонах / Ю. В. Крушевський, О. М. Салямон // Наукові праці ВНТУ. – 2008. – № 3. – 9 с. – URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/52160507.pdf>
3. Крушевський Ю. В. Вплив електромагнітного випромінювання пристроїв стільникового зв'язку на людину / Ю. В. Крушевський, Ю. І. Кравцов, Я. О. Бородай // Наукові праці ВНТУ. – 2008. – № 1. – 9 с. – URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/48/48>
4. Bulashenko A., Piltyay S., Polishchuk A., Bulashenko O. New Traffic Model of M2M Technology in 5G Wireless Sensor Networks. 2020 IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT), 25-27 Nov. 2020, Kyiv, Ukraine, pp. 125-131. DOI: 10.1109/ATIT50783.2020.9349305.
5. PRO version MMANA-GAL. Professional antenna software. URL: <http://gal-ana.de/promm/index.htm>.
6. Семенов А. О. Дослідження густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах / А. О. Семенов, О. О. Семенова, Б. О. Пінаєв, О. В. Білик, О. О. Шпильовий // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Технічні науки. – 2022. – № 3 (72). – С. 13–19. – URL: http://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2022/3_2022/3_2022.pdf#page=19

7. Protsenko M.B. Interaction of model human head with the antenna of the mobile terminal / M. B. Protsenko, L.I. Stepanova, O.O. Perley, V.G. Ishchenko // Proc. of X-th International Conf. «Antenna Theory and Techniques (ICATT)», 21–24 Apr. 2015. – Kharkiv, 2015. – P. 261–263.
8. Степанова Л.І. Оцінка взаємодії електромагнітного поля антени мобільного терміналу з головою користувача / Л.І. Степанова // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – Вінниця, 2016. – № 6. – 8 с. – URL: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/issue/archive>.
9. Бойко Ю. М. Моделювання характеристик ширококугової антенної системи для пеленгації БПЛА / Ю. М. Бойко, О. І. Полікарівських, В. П. Ткачук, В. М. Авдеев, О. С. Свістунов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2022. – № 3 (309). – С. 158–167.
10. Karpova L. Synthesis of ambiguity functions for complex radar signal processing / L. Karpova, J. Boiko, O. Eromenko // 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T). – IEEE, 2019. – P. 1–6.
11. Карпова Л. В. Моделювання НВЧ пристроїв і антен в задачах їх аналізу, синтезу та оптимізації / Л. В. Карпова, О. О. Бойко, І. І. Чесановський // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький, 2019. – № 5 (277). – С. 180–188.

References

1. Krushevskiy Yu. V. Doslidzhennia struktury polia i spriamovanosti elektrychno elementarnoho vyprominiuvacha v blyzhnii i promizhnii zonakh / Yu. V. Krushevskiy, Yu. I. Kravtsov, V. V. Chernyha // Naukovi pratsi VNTU. – 2008. – № 2. – 9 s. – URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/4335/61.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
2. Krushevskiy Yu. V. Struktura elektromahnitnykh potokiv elementarnoho elektrychno vyprominiuvacha v blyzhnii i promizhnii zonakh / Yu. V. Krushevskiy, O. M. Saliamon // Naukovi pratsi VNTU. – 2008. – № 3. – 9 s. – URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/52160507.pdf>
3. Krushevskiy Yu. V. Vplyv elektromahnitnoho vyprominiuvannya prystroiv stilykovo zviazku na liudynu / Yu. V. Krushevskiy, Yu. I. Kravtsov, Ya. O. Borodai // Naukovi pratsi VNTU. – 2008. – № 1. – 9 s. – URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/48/48>
4. Bulashenko A., Piltyay S., Polishchuk A., Bulashenko O. New Traffic Model of M2M Technology in 5G Wireless Sensor Networks. 2020 IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT), 25-27 Nov. 2020, Kyiv, Ukraine, pp. 125-131. DOI: 10.1109/ATIT50783.2020.9349305.
5. PRO version MMANA-GAL. Professional antenna software. URL: <http://gal-ana.de/promm/index.htm>.
6. Semenov A. O. Doslidzhennia hustyny potoku elektromahnitnoho vyprominiuvannya vid elementarnoho elektrychno vyprominiuvacha u blyzhnii ta promizhnykh zonakh / A. O. Semenov, O. O. Semenova, B. O. Pinaiev, O. V. Bilyk, O. O. Shpylovyi // Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Tekhnichni nauky. – 2022. – № 3 (72). – S. 13–19. – URL: http://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2022/3_2022/3_2022.pdf#page=19
7. Protsenko M.B. Interaction of model human head with the antenna of the mobile terminal / M. B. Protsenko, L.I. Stepanova, O.O. Perley, V.G. Ishchenko // Proc. of X-th International Conf. «Antenna Theory and Techniques (ICATT)», 21–24 Apr. 2015. – Kharkiv, 2015. – P. 261–263.
8. Stepanova L.I. Otsinka vzaïemodii elektromahnitnoho polia anteny mobilnoho terminalu z holovoïu korystuvacha / L.I. Stepanova // Naukovi pratsi Vinnytskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. – Vinnytsia, 2016. – № 6. – 8 s. – URL: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/issue/archive>.
9. Boiko Yu. M. Modeliuvannya kharakterystyk shyrokosmuhovoi antennoi systemy dlia pelenhatsii BPLA / Yu. M. Boiko, O. I. Polikarovskiykh, V. P. Tkachuk, V. M. Avdieiev, O. S. Svistunov // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2022. – № 3 (309). – S. 158–167.
10. Karpova L. Synthesis of ambiguity functions for complex radar signal processing / L. Karpova, J. Boiko, O. Eromenko // 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T). – IEEE, 2019. – P. 1–6.
11. Karpova L. V. Modeliuvannya NVCh prystroiv i anten v zadachakh yikh analizu, syntezu ta optymizatsii / L. V. Karpova, O. O. Boiko, I. I. Chesanovskiy // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – Khmelnytskyi, 2019. – № 5 (277). – S. 180–188.

МІКРОЕЛЕКТРОННІ АВТОГЕНЕРАТОРНІ ОПТИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Запропоновано мікроелектронні автогенераторні перетворювачі оптичної потужності на основі мікроелектронних транзисторних структур з диференційним від'ємним опором та первинним фоточутливим елементом на базі біполярного і польового фототранзисторів, причому первинні фоточутливі елементи є також активними елементами самих автогенераторів, що значно спрощує конструкцію перетворювачів.

На основі розгляду фізичних процесів у первинному фоточутливому елементі та автогенераторі розроблено математичну модель мікроелектронного оптичного перетворювача, на основі якої отримано параметричні залежності функцій перетворення та чутливості. Основним фактором зміни функції перетворення та чутливості є зміна оптичної потужності. Це змінює еквівалентну ємність і диференціальний від'ємний опір коливальної системи мікроелектронного автогенераторного перетворювача оптичної потужності, змінюючи вихідну частоту пристрою. Оскільки оптична потужність змінюється в діапазоні $0...90$ мкВт/см², то чутливість оптичного перетворювача змінюється від 151,3 кГц/мкВт/см² до 215,2 кГц/мкВт/см².

Отримані аналітичні вирази параметричної залежності функції чутливості та перетворення, що демонструють можливість значно легшого розрахунку основних характеристик перетворювача, враховуючи вплив кожного параметра первинного фоточутливого елемента та параметрів автогенератора на вихідну частоту приладу у порівнянні з розрахунками цих параметрів з системами рівнянь Кірхгофа. Фоточутливі перетворювачі з частотним виходом не потребують аналого-цифрових перетворювачів або підсилювачів для подальшої обробки інформаційного сигналу, що значно знижує витрати на інформаційне та вимірювальне обладнання. Крім того, коли перетворювачі працюють на дуже високих частотах, можна передавати безпосередньо інформацію на відстань.

Ключові слова: оптичний перетворювач, диференційний від'ємний опір, частота, автогенератор, фоточутливий транзистор.

OSADCHUK IAROSLAV

Vinnytsia National Technical University

MICROELECTRONIC SELF-OSCILLATING OPTICAL POWER TRANSDUCERS

Microelectronic self-oscillating optical power transducers are proposed based on microelectronic transistor structures with differential negative resistance and a primary photosensitive element based on bipolar and field-effect phototransistors, and the primary photosensitive elements are also active elements of the self-oscillators themselves, which greatly simplifies the conversion design.

Based on the consideration of physical processes in the primary photosensitive element and self-oscillator, a mathematical model of a microelectronic optical transducer was developed, on the basis of which the parametric dependences of the conversion and sensitivity functions were obtained. The main factor in changing the conversion function and sensitivity is the change in optical power. This changes the equivalent capacitance and differential negative resistance of the oscillatory system of the microelectronic self-oscillating optical power transducer, changing the output frequency of the device. Since the optical power varies in the range of $0...90$ $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, the sensitivity of the optical transducer varies from 151.3 $\text{kHz}/\mu\text{W}/\text{cm}^2$ to 215.2 $\text{kHz}/\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Analytical expressions for the parametric dependence of the sensitivity and conversion functions are obtained, demonstrating the possibility of an easier calculation of the main characteristics of the transducer, taking into account the influence of each parameter of the primary photosensitive element and the parameters of the self-oscillator on the output frequency of the device in comparison with the calculations of these parameters with systems of Kirchhoff equations. Photosensitive transducers with frequency output do not need analog-to-digital transducers or amplifiers for further processing of the information signal, which significantly reduces the cost of information and measuring equipment. In addition, when the transducers operate at very high frequencies, it is possible to directly transmit information over a distance.

Key words: optical transducer, differential negative resistance, frequency, self-oscillator, photosensitive transistor.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

На сучасному етапі науково-технічного прогресу відбувається стрімкий розвиток аналітичного приладобудування на основі використання досягнень сучасної нано- і мікроелектронної технології та елементної бази. Це дає змогу за допомогою нових фізичних явищ і нових принципів реалізації розробляти та створювати оптичні прилади для різноманітних галузей виробництва. Вимірювання потужності оптичного випромінювання потрібно у мікроелектронній технології, сонячній енергетиці, військовій техніці, ядерній енергетиці, космічних дослідженнях, дослідженні довкілля, що потребує розробки інформаційно-вимірювальних приладів і систем високої чутливості та точності, швидкодії та стабільності [1–8].

На даний час для вимірювання інтенсивності світла використовуються напівпровідникові або мікроелектронні перетворювачі, що виконані у вигляді мікроелектронних схем на базі фототранзисторів, фотодіодів та фоторезисторів. Вони широко використовуються в системах автоматизації, як пристрої для включення освітлення доріг, тунелів, приміщень, освітлення аеропортів, пожежних і димових сповіщувачів, в системах контролю положення об'єктів, фотореле в різних промислових машинах і т.д. [1, 9, 10].

Більшість фоточутливих перетворювачів мають вихідний сигнал у вигляді напруги або струму. Це призводить до втрати інформації в каналі між виходом перетворювача і входом підсилювальної

перетворювальної апаратури, значних похибок вимірювань через малу вихідну потужність сигналу перетворювача, а також мають низьку завадостійкість і швидкодію [11, 12].

Усунути вищеперераховані недоліки можливо на основі автогенераторних мікроелектронних перетворювачів, які працюють в режимі перетворення «потужність оптичного випромінювання – частота», що значно покращує їх метрологічні показники [13, 14].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Одним з перспективних напрямків у створенні фоточутливих перетворювачів є дослідження в області перетворювачів на основі реактивних властивостей напівпровідникових транзисторних структур з диференційним від'ємним опором, що дозволяє створювати вимірювальні пристрої з частотним вихідним сигналом. Мікроелектронні автогенераторні фоточутливі перетворювачі поєднують простоту та універсальність аналогових пристроїв із точністю та надійністю пристроїв кодованого виведення. Застосування принципу перетворення «потужність оптичного випромінювання – частота» на основі мікроелектронних автогенераторних перетворювачів значно знижує вартість інформаційно-вимірювальних систем, масогабаритні показники, підвищує точність і чутливість перетворення інформативного сигналу у частоту [15–20].

Постановка завдання

Метою даної статті є створення і дослідження оптичних перетворювачів на основі мікроелектронних транзисторних структур. У цій структурі фоточутливі біполярні і польові транзистори виконують роль первинних перетворювачів оптичного сигналу і діють як активні елементи в автогенераторах, компенсуючи втрати енергії в коливальній системі. Це дозволяє перетворювати оптичний сигнал у частоту. Для досягнення поставлених цілей у роботі необхідно вирішити наступні завдання:

- 1) провести аналіз існуючих літературних джерел і обґрунтувати застосування мікроелектронних транзисторних структур з диференційним від'ємним опором для побудови оптичних перетворювачів з частотним виходом;
- 2) розробити математичні моделі оптичних перетворювачів, в яких враховано залежність параметрів автогенераторів фоточутливих елементів від дії оптичного випромінювання та вплив їх на вихідну частоту оптичних перетворювачів;
- 3) отримати аналітичні вирази для параметричної залежності передатної функції та чутливості до зміни потужності оптичного випромінювання;
- 4) зробити висновки з проведеного дослідження.

Математичні моделі мікроелектронних оптичних перетворювачів

Мікроелектронний оптичний перетворювач з частотним вихідним сигналом побудований на основі напівпровідникової транзисторної структури з диференційним від'ємним опором, в якій фоточутливим елементом є біполярний транзистор VT1. На рис. 1 зображено схему мікроелектронного оптичного перетворювача.

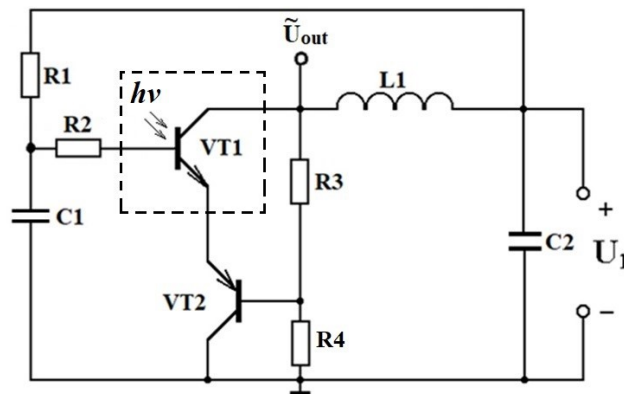


Рис. 1. Схематичне рішення мікроелектронного оптичного перетворювача

Мікроелектронний автогенераторний оптичний перетворювач складається з біполярних транзисторів VT1 і VT2 з різним типом провідності базових областей, що утворює спадну ділянку на вольт-амперній характеристиці на вихідних клеммах перетворювача. Спадній ділянці відповідає диференційний від'ємний опір. Оптичний перетворювач заживлюється джерелом постійної напруги U_1 через резистори R1, R2, R3 та R4. Конденсатор C2 виконує функцію блокування, за допомогою якого джерело постійної напруги U_1 захищається від протікання змінного струму. Резонансний контур утворений індуктивністю L1 і ємністю складовою повного опору, що існує на електродах колектор-колектор біполярних транзисторів VT1 та VT2.

При дії світла на фоточутливий біполярний транзистор VT1 здійснюється зміна активної і реактивної складових повного опору на електродах колектор-колектор приладу, що викликає зміну частоти мікроелектронного оптичного перетворювача. Фоточутливим елементом перетворювача був використаний транзистор типу ВРХ43 [21].

Перейдемо до визначення аналітичних виразів параметричних залежностей параметрів

фоточутливого біполярного транзистора за схемою із загальним емітером при дії на нього світла. Оскільки колекторний р-п-перехід працює у зворотному режимі, то його струм складається із темнового струму насичення і фотоструму, що викликаний внутрішнім фотоелементом при дії світла на базову область біполярного транзистора VT1. Якщо знехтувати струмом бази VT1, то струм колектора при дії світла описується виразом [22]

$$I_C = \frac{I_F - I_{CB0}}{1 - h_{21B}}, \quad (1)$$

де I_F – фотострум; I_{CB0} – зворотний темновий струм колекторного р-п переходу; h_{21B} – коефіцієнт передачі струму біполярного транзистора у схемі із загальною базою. Величина фотоструму має вигляд [22]

$$I_F = \frac{q\eta_i\Phi\alpha V}{h\nu}, \quad (2)$$

де q – заряд електрона, η_i – квантовий вихід фотоіонізації фотоелектронів і фотодірок, Φ – інтенсивність світла, α – коефіцієнт поглинання фотонів, $h\nu$ – енергія квантів діючого світла, V – об'єм базової області фототранзистора. Величина темнового струму насичення при $p_p \ll n_n$ описується формулою [22]

$$I_{CB0} = \frac{qSD_p p_n}{L_p}, \quad (3)$$

де S – площа перерізу колекторної області VT1, D_p – коефіцієнт дифузії дірок, p_n – концентрація неосновних носіїв заряду в колекторній області, L_p – дифузійна довжина дірок. З врахуванням, що довжина

базової області $W_0 \ll L_p$, то при підстановці значень формул (2), (3) і $h_{21B} = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{W_0}{L_p} \right)^2$ у формулу (1),

отримуємо рівняння

$$I_C = \frac{2q(\eta_i\Phi\alpha VL_p + SD_p p_n h\nu)L_p}{h\nu W_0^2}. \quad (4)$$

З врахуванням (4), залежність опору базової області фоточутливого транзистора VT1 від дії світла описується виразом

$$R_B(\Phi) = \frac{U_{CE} h\nu W_0^2}{2q(\eta_i\Phi\alpha VL_p + SD_p p_n h\nu)L_p}, \quad (5)$$

де U_{CE} – напруга на електродах колектор-емітер VT1.

Приріст опору базової області VT1 від дії світла приймає вигляд

$$\Delta R_B(\Phi) = -\frac{U_{CE} h\nu W_0^2}{2q} (\eta_i\Phi\alpha VL_p + SD_p p_n h\nu)^{-2} \eta_i\alpha VL_p \Delta\Phi. \quad (6)$$

Переходимо до визначення параметричної залежності вихідної частоти фотоперетворювача від параметрів фототранзистора та автогенератора. При вирішенні цієї задачі необхідно враховувати перетворення енергії потужності оптичного випромінювання у енергію змінного електричного поля на виході перетворювача. Для цього визначимо ККД автогенераторного перетворювача. З початку енергія оптичного сигналу перетворюється в енергію постійного електричного поля на фототранзисторі, яка є вхідною енергією для автогенератора. Далі енергія постійного електричного поля на фототранзисторі перетворюється у енергію змінного електричного поля, яка пов'язана з еквівалентною ємністю резонансного коливального контуру автогенератора оптичного перетворювача. Коефіцієнт корисної дії оптичного перетворювача має вигляд

$$K = \frac{P_{вих}}{P_{вх}}. \quad (7)$$

Вихідна потужність автогенераторного перетворювача описується виразом

$$P_{вих} = \frac{C_{ekv} U_{\sim}^2}{2t}, \quad (8)$$

де U_{\sim} – вихідна змінна напруга, C_{ekv} – еквівалентна ємність коливального контуру автогенераторного оптичного перетворювача, t – період коливань змінної вихідної напруги автогенераторного оптичного перетворювача без дії оптичного випромінювання.

Вхідна потужність автогенераторного оптичного перетворювача описується формулою

$$P_{вх} = \frac{2q(\eta_i\Phi\alpha VL_p + SD_p p_n h\nu)U_{CE}}{h\nu W_0}. \quad (9)$$

Отже, коефіцієнт корисної дії приладу приймає вигляд

$$K = \frac{C_{ekv} U_{\sim}^2 h\nu W_0}{4tU_{CE}q(\eta_i \Phi \alpha V L_p + SD_p p_n h\nu)} \quad (10)$$

З виразу (10) визначається еквівалентна ємність пристрою C_{ekv} , яка описується виразом

$$C_{ekv} = \frac{4KtU_{CE}q(\eta_i \Phi \alpha V L_p + SD_p p_n h\nu)}{U_{\sim}^2 h\nu W_0} \quad (11)$$

З іншого боку, еквівалентну ємність можна визначити за формулою резонансної частоти автогенераторного оптичного перетворювача у вигляді [23, 24]

$$F_0 = \frac{1}{2\pi R_g C_{ekv}} \left[\frac{R_g^2 C_{ekv}}{L} - 1 \right]^{1/2}, \quad (12)$$

де R_g – диференційний від’ємний опір у коливальному контурі, L – індуктивність контуру. З виразу (12) визначаємо квадратне рівняння, на підставі якого визначаємо еквівалентну ємність C_{ekv}

$$(4\pi^2 F_0^2 R_g^2 L) C_{ekv}^2 - R_g^2 C_{ekv} + L = 0 \quad (13)$$

Введемо позначення

$$b_1 = 4\pi^2 F_0^2 R_g^2 L, \quad (14)$$

$$b_2 = R_g^2, \quad (15)$$

$$b_3 = L, \quad (16)$$

$$b_4 = C_{ekv} = \frac{4KtU_{CE}q(\eta_i \Phi \alpha V L_p + SD_p p_n h\nu)}{U_{\sim}^2 W_0 h\nu} \quad (17)$$

тоді еквівалентна ємність C_{ekv} з рівняння (13) дорівнює

$$C_{ekv} = \frac{b_2 \pm \sqrt{b_2^2 - 4b_1 b_3}}{2b_1} \quad (18)$$

Прирівнявши формулу (18) до формули (11), отримуємо рівняння для визначення частоти генерації F_0 , яке має вигляд

$$b_1 = \frac{b_2}{b_4} - \frac{b_3}{b_4^2} \quad (19)$$

Підставляючи значення рівнянь (14)-(17) в рівняння (19), отримуємо рівняння

$$4\pi^2 F_0^2 R_g^2 L = \frac{U_{\sim}^2 W_0 h\nu R_g^2}{4KtU_{CE}q(\eta_i \Phi \alpha V L_p + SD_p p_n h\nu)} - \frac{U_{\sim}^4 W_0^2 (h\nu)^2 L}{16K^2 t^2 U_{CE}^2 q^2 (\eta_i \Phi \alpha V L_p + SD_p p_n h\nu)^2} \quad (20)$$

З рівняння (20) визначимо параметричну залежність вихідної частоти автогенераторного оптичного перетворювача від параметрів первинного перетворювача та параметрів автогенератора, таким чином

$$F_0 = \left[\frac{U_{\sim}^2 W_0 h\nu}{4KtU_{CE}q(\eta_i \Phi \alpha V L_p + SD_p p_n h\nu)L} - \frac{U_{\sim}^4 W_0^2 (h\nu)^2}{16K^2 t^2 U_{CE}^2 q^2 (\eta_i \Phi \alpha V L_p + SD_p p_n h\nu)^2 R_g^2} \right]^{1/2} \quad (21)$$

Отримане рівняння (21) дозволяє розрахувати функцію перетворення пристрою простим, а не складним способом по нелінійній еквівалентній схемі оптичного перетворювача на основі системи рівнянь Кірхгофа, які в подальшому можна розв’язати на комп’ютері чисельними методами.

На рис. 2 наведено теоретичні та експериментальні залежності функції перетворення автогенераторного оптичного перетворювача від зміни оптичної потужності.

Чутливість автогенераторного оптичного перетворювача визначається похідною функції (21) за параметром інтенсивності падаючого світла Φ . На підставі експериментальних досліджень, вихідна змінна напруга U_{\sim} автогенераторного оптичного перетворювача залежить від інтенсивності падаючого світла, що необхідно враховувати під час визначення чутливості пристрою. З врахуванням цього зауваження функція перетворення (21) приймає вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[U_{\sim}^2(\Phi) (\eta_i \Phi \alpha V L_p + SD_p p_n h\nu)^{-1} b_5 - U_{\sim}^4(\Phi) (\eta_i \Phi \alpha V L_p + SD_p p_n h\nu)^{-2} b_6 \right]^{1/2} \quad (22)$$

де

$$b_5 = \frac{W_0 h\nu}{4KtU_{CE}qL}, \quad (23)$$

$$b_6 = \frac{W_0^2 (h\nu)^2}{16K^2 t^2 U_{CE}^2 q^2 R_g^2} \quad (24)$$

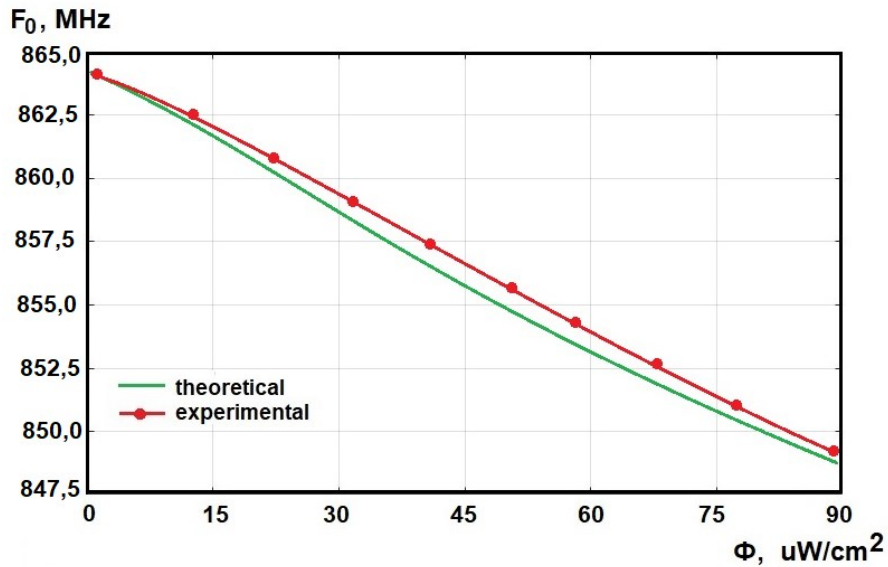


Рис. 2. Теоретичні та експериментальні залежності функції перетворення оптичного перетворювача від зміни оптичної потужності

Чутливість автогенераторного оптичного перетворювача описується формулою

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi} \left[U_-^2(\Phi) (\eta_i \Phi \alpha V L_p + S D_p p_n h \nu)^{-1} b_5 - U_-^4(\Phi) (\eta_i \Phi \alpha V L_p + S D_p p_n h \nu)^{-2} b_6 \right]^{-1/2} \times$$

$$\times \left\{ 2 U_- (\Phi) \frac{dU_- (\Phi)}{d\Phi} (\eta_i \Phi \alpha V L_p + S D_p p_n h \nu)^{-1} - U_-^2 (\Phi) (\eta_i \Phi \alpha V L_p + S D_p p_n h \nu)^{-2} \eta_i \alpha V L_p \right\} b_5 -$$

$$- \left[4 U_-^3 (\Phi) \frac{dU_- (\Phi)}{d\Phi} (\eta_i \Phi \alpha V L_p + S D_p p_n h \nu)^{-2} - 2 U_-^4 (\Phi) (\eta_i \Phi \alpha V L_p + S D_p p_n h \nu)^{-3} \eta_i \alpha V L_p \right] b_6 \} . \quad (25)$$

Графік чутливості автогенераторного оптичного перетворювача від зміни оптичної потужності наведено на рис. 3.

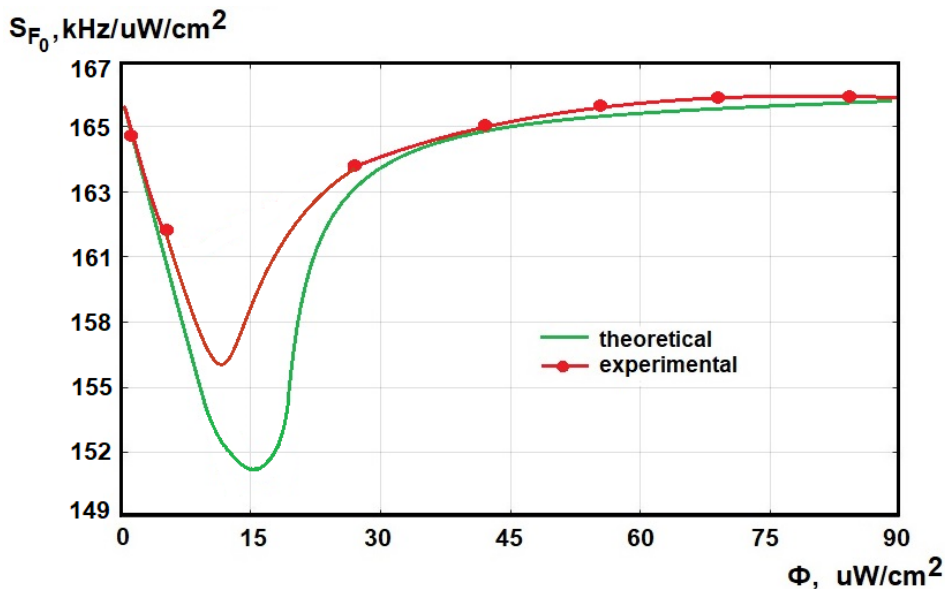


Рис. 3. Теоретична та експериментальна залежність функції чутливості автогенераторного оптичного перетворювача від зміни оптичної потужності

З графіка (рис. 3) видно, що чутливість автогенераторного оптичного перетворювача складала від 151,3 кГц/мкВт/см² до 166,2 кГц/мкВт/см² в діапазоні частот від 849 МГц до 864 МГц.

Перейдемо до розгляду параметрів оптичних перетворювачів на основі мікроелектронного автогенераторного приладу з використанням в якості первинного фоточутливого елементу – польового транзистора з індукованим каналом.

Електричну схему автогенераторного оптичного перетворювача на основі фоточутливого польового транзистора подано на рис. 4.

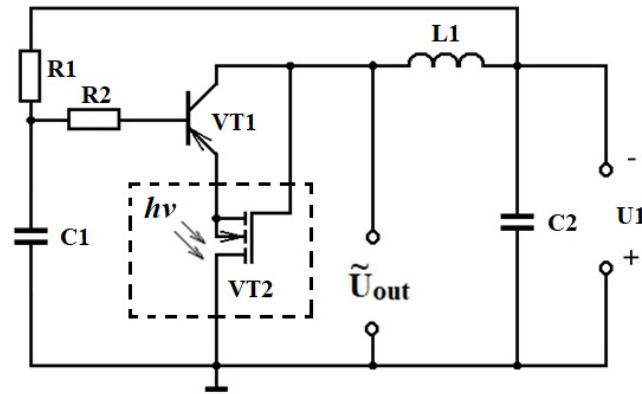


Рис. 4. Схема мікроелектронного автогенераторного оптичного перетворювача на основі фоточутливого польового транзистора

Вона побудована на основі біполярного транзистора VT1 і фоточутливого польового транзистора VT2 з індукованим каналом, який і є чутливим до оптичного випромінювання елементом. Живлення схеми з постійного струму відбувається через резистори R1 і R2 від джерела постійної напруги U1. Додатковий позитивний зворотний зв'язок у схемі здійснюється за рахунок електричного кола R1C1, що збільшує диференціальний від'ємний опір на електродах колектор VT1 і стік VT2. Ці електроди мають повний опір, активна частина якого має від'ємне значення, а реактивна носить ємнісний характер. При підключенні індуктивності L1 до колектора біполярного транзистора VT1 і верхнього виводу конденсатора C2 створюється коливальний контур, в якому компенсуються втрати енергії через диференціальний від'ємного опору. Конденсатор C2 перешкоджає проходженню змінного струму через джерело постійної напруги U1. Резонансна частота коливального контуру автогенераторного оптичного перетворювача залежить від дії світлового випромінювання на фоточутливий польовий транзистор VT2, оскільки змінюється величина струму яка протікає через нього. При цьому змінюється еквівалентна ємність автогенераторного оптичного перетворювача і диференціальний від'ємний опір коливальної системи перетворювального автогенератора.

Зміна струму у каналі транзистора VT2 відбувається за рахунок зміни рухливості фотоелектронів і зміни порогової напруги польового транзистора. Освітлення напівпровідника здійснюється через напівпрозорий електрод затвору. При дії світла на польовий транзистор VT2 утворені фотоелектрони прискорюють утворення інверсного каналу і зменшують порогову напругу. Цьому також сприяє захоплення основних нерівноважних носіїв пастками на поверхні напівпровідника [22].

Розглянемо роботу польового транзистора з індукованим каналом VT2 у режимі насичення, при цьому величина струму стоку має вигляд [22, 25]

$$I_{C_{нас}} = \frac{Z\mu_n C_0}{L_{кан}} [U_з - U_{пор}]^2, \tag{26}$$

де Z – ширина каналу, μ_n – рухливість електронів, $U_з$ – напруга на затворі польового транзистора, C_0 – ємність діелектрика затвору на одиницю площі, $U_{пор}$ – порогова напруга утворення інверсного каналу, $L_{кан}$ – довжина каналу.

З врахуванням (26), опір каналу при дії світла описується виразом

$$R_{кан}(\Phi) = \frac{U_{св} L_{кан}}{Z\mu_n(\Phi)C_0 [U_з - U_{пор}(\Phi)]^2}, \tag{27}$$

де $U_{св}$ – напруга на стоці відносно витoku. Зміна опору каналу фототранзистора при дії світла з врахуванням (27) приймає вигляд

$$\Delta R_{кан}(\Phi) = \frac{\partial R_{кан}}{\partial \mu_n(\Phi)} \Delta \mu_n(\Phi) + \frac{\partial R_{кан}}{\partial U_{пор}(\Phi)} \Delta U_{пор}(\Phi). \tag{28}$$

Виконавши диференціювання у формулі (28), отримуємо формулу

$$R_{кан}(\Phi) = -\frac{U_{св} L_{кан}}{ZC_0 [U_з - U_{пор}(\Phi)]^2} \mu_n^{-2}(\Phi) \Delta \mu_n(\Phi) + \frac{2U_{св} L_{кан}}{ZC_0 \mu_n(\Phi)} [U_з - U_{пор}(\Phi)]^{-3} \Delta U_{пор}(\Phi). \tag{29}$$

Визначивши залежність зміни опору фоточутливого польового транзистора VT2 від дії світлового випромінювання, переходимо до визначення параметричної залежності вихідної частоти автогенераторного перетворювача від зміни оптичної потужності. Дана залежність визначається аналогічним способом, як і для автогенераторного оптичного перетворювача з фоточутливим біполярним транзистором, яка розглянута вище. Вхідну потужність для автогенераторного оптичного перетворювача визначаємо на основі формул (26) і (27), таким чином

$$P_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{св}} Z \mu_n C_0 [U_3 - U_{\text{пор}}]^2}{L_{\text{кан}}} \quad (30)$$

Вихідна потужність автогенераторного оптичного перетворювача визначається виразом (8). На підставі виразів (8) і (30), коефіцієнт корисної дії автогенераторного оптичного перетворювача дорівнює

$$K = \frac{C_{\text{екв}} U_{\text{св}}^2 L_{\text{кан}}}{2U_{\text{св}} t Z \mu_n C_0 [U_3 - U_{\text{пор}}]^2} \quad (31)$$

З рівняння (31) визначається величина еквівалентної ємності автогенераторного оптичного перетворювача $C_{\text{екв}}$, яка має вигляд

$$C_{\text{екв}} = \frac{2U_{\text{св}} t K Z \mu_n C_0 [U_3 - U_{\text{пор}}]^2}{U_{\text{св}}^2 L_{\text{кан}}} \quad (32)$$

Також еквівалентна ємність коливального контуру автогенераторного оптичного перетворювача зв'язана з резонансною частотою формулою (12). Підставивши у вираз (12) формулу (32), а також провівши необхідні математичні перетворення, отримано параметричну залежність вихідної резонансної частоти автогенераторного оптичного перетворювача від параметрів фоточутливого польового транзистора і параметрів автогенератора. Дана параметрична залежність описується рівнянням

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{U_{\text{св}}^2 L_{\text{кан}}}{2K U_{\text{св}} t Z \mu_n C_0 [U_3 - U_{\text{пор}}]^2 L} - \frac{U_{\text{св}}^4 L_{\text{кан}}^2}{4K^2 U_{\text{св}}^2 t^2 Z^2 \mu_n^2 C_0^2 [U_3 - U_{\text{пор}}]^4 R_g^2} \right]^{1/2} \quad (33)$$

Формула (33) є функцією перетворення автогенераторного оптичного перетворювача. На рис. 5 представлено теоретичну та експериментальну залежності функції перетворення автогенераторного оптичного перетворювача від зміни оптичної потужності.

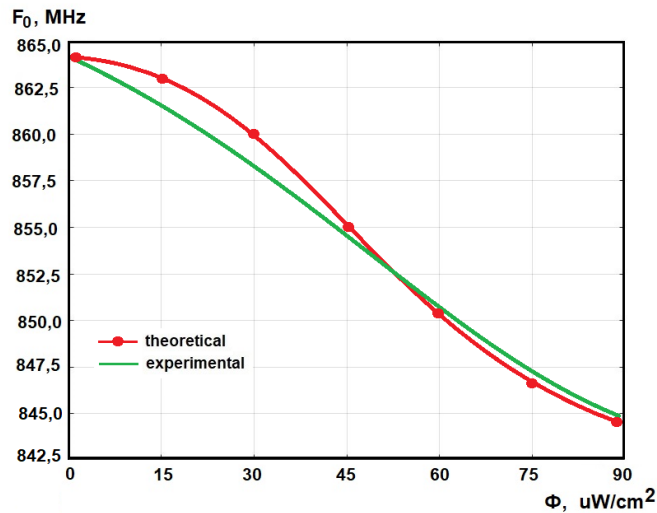


Рис. 5. Залежність функції перетворення мікроелектронного автогенераторного перетворювача на основі фоточутливого МДН транзистора від оптичної потужності

Як видно з графіка (рис. 5), вихідна частота автогенераторного оптичного перетворювача змінюється від 864,2 МГц до 844,8 МГц при зміні оптичної потужності від 0 мкВт/см² до 90 мкВт/см². Функція чутливості автогенераторного оптичного перетворювача на основі фоточутливого МДН транзистора визначається на основі виразу (33), при цьому вважається, що вихідна напруга перетворювача також залежить від зміни оптичної потужності. Таким чином, функція чутливості автогенераторного оптичного перетворювача описується формулою

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi} \left[U_{\text{св}}^2(\Phi) \mu_n^{-1}(\Phi) [U_3 - U_{\text{пор}}(\Phi)]^{-2} b_7 - U_{\text{св}}^4(\Phi) \mu_n^{-2}(\Phi) [U_3 - U_{\text{пор}}(\Phi)]^{-4} b_8 \right]^{-1/2} \times$$

$$\times \left\{ \left[2U_{\text{св}}(\Phi) \frac{dU_{\text{св}}(\Phi)}{d\Phi} \mu_n^{-1}(\Phi) [U_3 - U_{\text{пор}}(\Phi)]^{-2} - U_{\text{св}}^2(\Phi) \left(\mu_n^{-2}(\Phi) \frac{d\mu_n(\Phi)}{d\Phi} [U_3 - U_{\text{пор}}(\Phi)]^{-2} - \right. \right. \right. \quad (34)$$

$$\left. \left. - 2[U_3 - U_{\text{пор}}(\Phi)]^{-3} \frac{dU_{\text{пор}}(\Phi)}{d\Phi} \mu_n^{-1}(\Phi) \right) \right] b_7 - \left[4U_{\text{св}}^3(\Phi) \frac{dU_{\text{св}}(\Phi)}{d\Phi} \mu_n^{-2}(\Phi) [U_3 - U_{\text{пор}}(\Phi)]^{-4} - \right.$$

$$\left. \left. - U_{\text{св}}^4(\Phi) \left(2\mu_n^{-3}(\Phi) \frac{d\mu_n(\Phi)}{d\Phi} [U_3 - U_{\text{пор}}(\Phi)]^{-4} + 4[U_3 - U_{\text{пор}}(\Phi)]^{-5} \frac{dU_{\text{пор}}(\Phi)}{d\Phi} \mu_n^{-2}(\Phi) \right) \right] b_8 \right\}.$$

$$b_7 = \frac{L_{\text{кан}}}{2KtZC_0U_{\text{сб}}L}, \quad (35)$$

$$b_8 = \frac{L_{\text{кан}}^2}{4K^2t^2Z^2C_0^2U_{\text{сб}}^2R_g^2}. \quad (36)$$

На рис. 6 представлено теоретичні та експериментальні залежності функції чутливості автогенераторного перетворювача на основі фоточутливого МДН транзистора від зміни оптичної потужності.

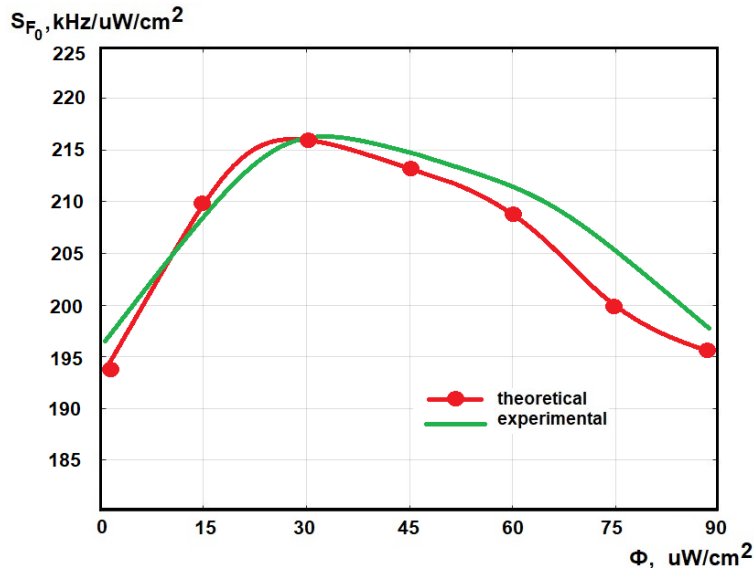


Рис. 6. Залежності функції чутливості мікроелектронного автогенераторного перетворювача на основі фоточутливого МДН транзистора від оптичної потужності

З графіка (рис. 6), видно, що чутливість розробленого автогенераторного перетворювача на основі фоточутливого МДН транзистора складає від 194 кГц/мкВт/см² до 215,2 кГц/мкВт/см² в діапазоні оптичної потужності 0...90 мкВт/см².

Висновки

1. Запропоновано мікроелектронні автогенераторні перетворювачі оптичної потужності на основі мікроелектронних транзисторних структур з диференційним від'ємним опором та первинним фоточутливим елементом на базі біполярного і польового фототранзисторів, причому первинні фоточутливі елементи є також активними елементами самих автогенераторів, що значно спрощує конструкцію перетворювачів.

2. На основі розгляду фізичних процесів у первинному фоточутливому елементі та автогенераторі розроблено математичну модель мікроелектронного оптичного перетворювача, на основі якої отримано параметричні залежності функцій перетворення та чутливості. Основним фактором зміни функцій перетворення та чутливості є зміна оптичної потужності. Це змінює еквівалентну ємність і диференціальний від'ємний опір коливальної системи мікроелектронного автогенераторного перетворювача оптичної потужності, змінюючи вихідну частоту пристрою. Оскільки оптична потужність змінюється в діапазоні 0...90 мкВт/см², то чутливість автогенераторного оптичного перетворювача змінюється від 151,3 кГц/мкВт/см² до 215,2 кГц/мкВт/см².

3. Отримані аналітичні вирази параметричної залежності функцій чутливості та перетворення, що демонструють можливість значно легшого розрахунку основних характеристик перетворювача, враховуючи вплив кожного параметра первинного фоточутливого елемента та параметрів автогенератора на вихідну частоту приладу у порівнянні з розрахунками цих параметрів з системами рівнянь Кірхгофа. Фоточутливі перетворювачі з частотним виходом не потребують аналого-цифрових перетворювачів та підсилювачів для подальшої обробки інформаційного сигналу, що значно знижує витрати на інформаційне та вимірювальне обладнання. Крім того, коли перетворювачі працюють на дуже високих частотах, можна передавати безпосередньо інформацію на відстань.

Література

1. Sabrie Soloman. Sensors. Handbook. New York: McGraw-Hill Companies. 2010. 1352 p.
2. Gilewski M. Micro-Electro-Mechanical Systems in Light Stabilization. Sensors. 2023; 23(6):2916. <https://doi.org/10.3390/s23062916>
3. Sensors and actuators: technology and applications / edited by Princeton Brown. New York: Library Press. 2017. 268 p.

4. Lu C., Dashtabi M.M., Nikbakht H., Khoshmehr M.T., Akca B.I. Sub-Nanometer Acoustic Vibration Sensing Using a Tapered-Tip Optical Fiber Microcantilever. *Sensors*. 2023; 23(2):924. <https://doi.org/10.3390/s23020924>
5. Jacob Fraden. *Handbook of Modern Sensors Physics, Designs, and Applications*. Springer New York Heidelberg Dordrecht London. 2010. 681 p.
6. Lu X., Tian G., Wang Z., Li W., Yang D, Li H., Wang Y., Ni J., Zhang Y. Research on the Time Drift Stability of Differential Inductive Displacement Sensors with Frequency Output. *Sensors*. 2022; 22(16):6234. <https://doi.org/10.3390/s22166234>
7. Wu J., Zhang X., Chen L. Research on the Dual Modulation of All-Fiber Optic Current Sensor. *Sensors*. 2022; 22(2):430. <https://doi.org/10.3390/s22020430>
8. Marrazzo V.R., Fienga F., Riccio M., Irace A., Breglio G. Multichannel Approach for Arrayed Waveguide Grating-Based FBG Interrogation Systems. *Sensors*. 2021; 21(18):6214. <https://doi.org/10.3390/s21186214>
9. Sergey Y. Yurish. *Sensors and Applications in Measuring and Automation Control Systems*, (Book Series: Advances in Sensors: Reviews, Vol. 4). IFSA Publishing, S.L. (Barcelona, Spain). 2016. 507 p.
10. *Electronics for Sensors*. Edited by Giuseppe Ferri, Gianluca Barile and Alfiero Leoni E. MDPI: Basel, Switzerland. 2021. 274 p.
11. Boyko O., Hotra Z., Fechan A. Organic optical sensors of physical quantities. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika"*. Serie: Radioelektronika ta telekomunikatsii. Lviv : Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki, 2018. No 909. P. 42–50.
12. Bastian-Querner B., Binn L.S., Böser S., Brostean-Kaiser J., Hebecker D., ... Vocke A. The Wavelength-Shifting Optical Module. *Sensors*. 2022; 22(4):1385. <https://doi.org/10.3390/s22041385>
13. Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Semenov A.O., Osadchuk I.O., Semenova O.O., Baraban S.V., Prytula M.O. Radiomeasuring Optical-Frequency Transducers Based on Reactive Properties of Transistor Structures with Negative Differential Resistance. Chapter 12. In: Radivilova T., Ageyev D., Kryvinska N. (eds) *Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol. 48, Springer, Cham. 21 June 2020. P. 229–261.
14. Osadchuk A.V., Osadchuk I.O., Semenov A.O. The Mathematical Model of Radio-measuring Frequency Transducer of Optical Radiation Based on MOS Transistor Structures with Negative Differential Resistance. *Journal of Nano- and Electronic Physics. Scientific journal*. 2021. Vol. 13 No 4, 04001(6 p.)
15. Torbus S.A., Michalski J.A. Testing of a Polarimetric Current Sensor in the Frequency Domain. *Sensors*. 2021; 21(9):3008. <https://doi.org/10.3390/s21093008>
16. Sánchez-Fraga R., Tecpoyotl-Torres M., Mejía I., Mañón J.O., Riestra L.E., Alcantar-Peña J. Optical Sensor, Based on an Accelerometer, for Low-Frequency Mechanical Vibrations. *Micromachines (Basel)*. 2022 Sep 3;13(9):1462. doi: 10.3390/mi13091462. PMID: 36144085; PMCID: PMC9502717.
17. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Ilchuk D.R., Pastushenko G.A. Solid State Radio-Measuring Optical-Frequency Transducer of Gas Flow Rate. *Physics and chemistry of solid state*. V. 22, No. 2 (2021). P. 224–232.
18. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A. Mathematical Model of the Generator on the Basis of Transistor Structure with the Negative Differential Resistance. *Proceedings of the 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering*. Lviv-Slavske, Ukraine February 20-24, 2018. ISBN (IEEE): 978-1-5386-2555-2. P. 33.
19. Assaf T. A Frequency Modulation-Based Taxel Array: A Bio-Inspired Architecture for Large-Scale Artificial Skin. *Sensors* 2021, 21, 5112. P. 1–17. <https://doi.org/10.3390/s21155112>
20. Осадчук О.В., Осадчук В.С., Осадчук Я.О. Дослідження автогенераторних параметричних оптичних сенсорів. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Том 33(72), № 3. 2022. С. 106-114. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/17>
21. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/26264/VISHAY/BPX43.html>
22. Sze S.M., Kwok K.Ng. *Physics of Semiconductor Devices*. Wiley-Interscience: Hoboken, USA, 2007. P. 435–455.
23. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Seletska O.O., Kisała P., Nurseitova K. Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Volume 11176, 2019, Article number 111761I. ISSN 0277-786X. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2538264>
24. Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Osadchuk I.O. Modern world tendencies in the development of science. Chapters 19. Gas concentration transducers with frequency output signal based on reactive properties of semiconductor structures with negative differential resistance. Volume 2: [coll.] monograph. Published by Science Publishing. LP22772, 20-22 Wenlock Road, London, United Kingdom, 2019. P. 271–285. ISBN 978-1-9993071-4-1
25. Борисов О.В. *Основи твердотільної електроніки*. Київ. Освіта України. 2011. 460 с.

References

1. Sabrie Soloman. *Sensors. Handbook*. New York: McGraw-Hill Companies. 2010. 1352 p.

2. Gilewski M. Micro-Electro-Mechanical Systems in Light Stabilization. *Sensors*. 2023; 23(6):2916. <https://doi.org/10.3390/s23062916>
3. *Sensors and actuators: technology and applications* / edited by Princeton Brown. New York: Library Press. 2017. 268 p.
4. Lu C., Dashtabi M.M., Nikbakht H., Khoshmehr M.T., Akca B.I. Sub-Nanometer Acoustic Vibration Sensing Using a Tapered-Tip Optical Fiber Microcantilever. *Sensors*. 2023; 23(2):924. <https://doi.org/10.3390/s23020924>
5. Jacob Fraden. *Handbook of Modern Sensors Physics, Designs, and Applications*. Springer New York Heidelberg Dordrecht London. 2010. 681 p.
6. Lu X., Tian G., Wang Z., Li W., Yang D, Li H., Wang Y., Ni J., Zhang Y. Research on the Time Drift Stability of Differential Inductive Displacement Sensors with Frequency Output. *Sensors*. 2022; 22(16):6234. <https://doi.org/10.3390/s22166234>
7. Wu J., Zhang X., Chen L. Research on the Dual Modulation of All-Fiber Optic Current Sensor. *Sensors*. 2022; 22(2):430. <https://doi.org/10.3390/s22020430>
8. Marrazzo V.R., Fienga F., Riccio M., Irace A., Breglio G. Multichannel Approach for Arrayed Waveguide Grating-Based FBG Interrogation Systems. *Sensors*. 2021; 21(18):6214. <https://doi.org/10.3390/s21186214>
9. Sergey Y. Yurish. *Sensors and Applications in Measuring and Automation Control Systems*, (Book Series: Advances in Sensors: Reviews, Vol. 4). IFSA Publishing, S.L. (Barcelona, Spain). 2016. 507 p.
10. *Electronics for Sensors*. Edited by Giuseppe Ferri, Gianluca Barile and Alfiero Leoni E. MDPI: Basel, Switzerland. 2021. 274 p.
11. Boyko O., Hotra Z., Fechan A. Organic optical sensors of physical quantities. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika"*. Serie: Radioelektronika ta telekomunikatsii. Lviv : Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki, 2018. No 909. P. 42–50.
12. Bastian-Querner B., Binn L.S., Böser S., Brostean-Kaiser J., Hebecker D., ... Vocke A. The Wavelength-Shifting Optical Module. *Sensors*. 2022; 22(4):1385. <https://doi.org/10.3390/s22041385>
13. Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Semenov A.O., Osadchuk I.O., Semenova O.O., Baraban S.V., Prytula M.O. Radiomeasuring Optical-Frequency Transducers Based on Reactive Properties of Transistor Structures with Negative Differential Resistance. Chapter 12. In: Radivilova T., Ageyev D., Kryvinska N. (eds) *Data-Centric Business and Applications*. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol. 48, Springer, Cham. 21 June 2020. P. 229–261.
14. Osadchuk A.V., Osadchuk I.O., Semenov A.O. The Mathematical Model of Radio-measuring Frequency Transducer of Optical Radiation Based on MOS Transistor Structures with Negative Differential Resistance. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. Scientific journal. 2021. Vol. 13 No 4, 04001(6 p.)
15. Torbus S.A., Michalski J.A. Testing of a Polarimetric Current Sensor in the Frequency Domain. *Sensors*. 2021; 21(9):3008. <https://doi.org/10.3390/s21093008>
16. Sánchez-Fraga R., Tecpoyotl-Torres M., Mejía I., Mañón J.O., Riestra L.E., Alcantar-Peña J. Optical Sensor, Based on an Accelerometer, for Low-Frequency Mechanical Vibrations. *Micromachines* (Basel). 2022 Sep 3;13(9):1462. doi: 10.3390/mi13091462. PMID: 36144085; PMCID: PMC9502717.
17. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Ilchuk D.R., Pastushenko G.A. Solid State Radio-Measuring Optical-Frequency Transducer of Gas Flow Rate. *Physics and chemistry of solid state*. V. 22, No. 2 (2021). P. 224–232.
18. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A. Mathematical Model of the Generator on the Basis of Transistor Structure with the Negative Differential Resistance. *Proceedings of the 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering*. Lviv-Slavske, Ukraine February 20-24, 2018. ISBN (IEEE): 978-1-5386-2555-2. P. 33.
19. Assaf T. A Frequency Modulation-Based Taxel Array: A Bio-Inspired Architecture for Large-Scale Artificial Skin. *Sensors* 2021, 21, 5112. P. 1–17. <https://doi.org/10.3390/s21155112>
20. Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.O. Research of self-generating parametric optical sensors. *Scientific papers of TNU named after V.I. Vernadskyi*. Series: Technical sciences. Volume 33(72), No. 3 2022. P. 106-114. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/17>
21. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/26264/VISHAY/BPX43.html>
22. Sze S.M., Kwok K.Ng. *Physics of Semiconductor Devices*. Wiley-Interscience: Hoboken, USA, 2007. P. 435–455.
23. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Seletska O.O., Kisała P., Nurseitova K. Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Volume 11176, 2019, Article number 111761I. ISSN 0277-786X. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2538264>
24. Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Osadchuk I.O. *Modern world tendencies in the development of science*. Chapters 19. Gas concentration transducers with frequency output signal based on reactive properties of semiconductor structures with negative differential resistance. Volume 2: [coll.] monograph. Published by Science Publishing. LP22772, 20-22 Wenlock Road, London, United Kingdom, 2019. P. 271–285. ISBN 978-1-9993071-4-1
25. Borysov O.V. *Fundamentals of solid-state electronics*. Kyiv. Education of Ukraine. 2011. 460 p.

ОДЕГОВ МИКОЛА

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку
<https://orcid.org/0000-0001-5526-2487>
onick_64@ukr.net

ГАДЖИЄВ МАТІН

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку
<http://orcid.org/0000-0001-7280-3863>
gadjievmm@ukr.net

ГЛАЗУНОВА ЛЮДМИЛА

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку
lvglazun@gmail.com

БУКАТА ЛЮДМИЛА

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку
ygrikluda@gmail.com

КОЧЕТКОВА МАРИНА

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку
jubdv@gmail.com

МЕТОДИКА СТРУКТУРНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ МОДЕЛЕЙ НЕСТАЦІОНАРНИХ КВАЗІПЕРІОДИЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Задача структурної ідентифікації моделей нестационарних квазіперіодичних процесів вирішуються, як правило, в умовах суттєвої апріорної невизначеності. Заздалегідь невідомо, якими функціями можна моделювати тренд процесу, скільки є приблизно періодичних компонентів, який рівень різного виду шумів спотворює закономірні у середньому процеси. Наша парадигма полягає в тому, що не існує універсального методу для вирішення подібних задач. Тому дослідники мають чітко визначити обмеження застосування методів, алгоритмів і програм обробки даних, що використовуються для вирішення конкретної прикладної задачі. Втім, етапи (кроки) досліджень практично універсальні. Вони є основою сучасних технологій Data Mining, які поєднують неформальний фаховий аналіз даних та формальні операції із застосуванням сучасних методів, алгоритмів та програмного забезпечення.

У даній роботі розглянуто конкретний варіант такого підходу, який включає етапи (кроки) неформального аналізу, формалізації моделі процесу та структурної ідентифікації цієї моделі на прикладі задачі аналізу періодичностей трафіку на великих вузлах обміну (вузлах агрегації трафіку).

Особливостями запропонованої методики є етап (крок) імітаційного моделювання на теоретично подібних до реальних моделей. Мета такого етапу – встановити характеристики ефективності формальних алгоритмів, по можливості обрати в якомусь сенсі найкращий. У формальній частині запропоновано на першому кроці обробки даних виконувати операцію диференціювання вхідного процесу з метою пригнічення регулярного повільного тренду. Шляхом імітаційного моделювання також встановлено, що у спектрах похідних суттєво підкреслюються моди «прихованих» високочастотних періодичностей. Дане положення дозволяє на основі візуального аналізу спектрів визначити частоти зрізу фільтрів нижніх частот, які ефективно пригнічують різного роду шуми, але не відсікають малопомітні регулярні частотні компоненти.

В результаті застосування запропонованої методики очевидні та неочевидні цикли трафіку: річний, піврічний (для північної півкулі), тижневий та добовий. Також виявлені зовсім неочевидні періодичності трафіку: 28 днів та 40 днів. Перший з них корелюється з циклами фаз та орбіти Місяця, до яких пристосувався організм людини на протязі еволюції. Другий поки що можна пояснити лише традиціями та древніми календарями.

Ключові слова: нестационарний квазіперіодичний процес, методи Data Mining, імітаційне моделювання, цифрова фільтрація, спектри похідних процесів, аналіз трафіку

NICK ODEGOV, MATIN HADZHYIEV, LYUDMILA GLAZUNOVA,
LYUDMILA BUKATA, MARINA KOCHETKOVA
State University of Intellectual Technologies and Communication

STRUCTURAL IDENTIFICATION METHODS OF NON-STATIONARY QUASI-PERIODIC PROCESSES MODELS

The task of structural identification of models of non-stationary quasi-periodic processes is solved, as a rule, under conditions of significant a priori uncertainty. It is not known in advance which functions can be used to model the trend of the process, how many periodic components there are, which level of various types of noise distorts regular processes on average. Our paradigm is that there is no universal method for solving such problems. Therefore, researchers should clearly define the limitations of the methods, algorithms and data processing programs used to solve a specific applied problem. However, the stages (steps) of research are practically universal. They are the basis of modern Data Mining technologies, which combine informal professional data analysis and formal operations with the use of modern methods, algorithms and software.

This paper considers a specific version of this approach, which includes stages (steps) of informal analysis, formalization of the process model and structural identification of this model using the example of the task of analyzing traffic periodicities at large exchange nodes (traffic aggregation nodes).

Features of the proposed methodology are the stage (step) of simulation modeling on theoretically similar to real models. The purpose of such a stage is to establish the characteristics of the effectiveness of formal algorithms, if possible to choose the best one in some sense. In the formal part, it is proposed to perform the differentiation operation of the input process at the first step of data processing in order to suppress the regular slow trend. Through simulation modeling, it was also established that the modes of "hidden" high-frequency periodicities are significantly emphasized in the derivative spectra. This provision allows, based on a visual analysis of the spectra, to

determine the cutoff frequencies of low-pass filters, which effectively suppress various types of noise, but do not cut off inconspicuous regular frequency components.

As a result of the application of the proposed methodology, there are obvious and non-obvious traffic cycles: annual, semi-annual (for the northern hemisphere), weekly and daily. Completely non-obvious traffic periodicities were also detected: 28 days and 40 days. The first of them correlates with the cycles of phases and the orbit of the Moon, to which the human body has adapted in the course of evolution. The second can still be explained only by traditions and ancient calendars.

Key words: non-stationary quasi-periodic process, Data Mining methods, simulation modeling, digital filtering, spectra of derivative processes, traffic analysis

Постановка проблеми та аналіз джерел

Як відомо, у строгому розумінні періодичний процес – це функція, яка відповідає залежності:

$$S(t + nT) = S(t), \quad n = 1, 2, \dots, \quad (1)$$

де T – період. Також відомо, що такі функції моделюються рядом Фур'є [1]. Зрозуміло, що у практичних задачах аналізу даних функція виду (1) – лише модель, математична абстракція, яка в окремих випадках може використовуватись для приблизного опису реального процесу (можливо, з достатньою точністю). При цьому теоретична точність обмежується нестабільністю частоти хронометрів, яка, навіть, для прецизійних засобів вимірювань обмежується порядками 10^{-17} [2]. У значній кількості задач умови залежності (1) можуть не виконуватись навіть приблизно. Типові спотворення цієї залежності: наявність аперіодичної складової (тренду) – нестаціонарність; поступові, або випадкові зміни періодів – аперіодичність; зміни фаз складових – тремтіння фаз, частотні модуляції; наявність різного роду шумів. Тому модель квазіперіодичних нестаціонарних процесів можна представити у більш загальному вигляді:

$$S(t) = Y(t) + \sum_{k=1}^K H_k(t) + \xi(t), \quad H_k(t) = (h_{k,0} + \Delta h_k(t) + \xi_{H,k}) \cos(\Theta(t) + \xi_{\Theta,k}), \quad (2)$$

де $Y(t)$ – тренд процесу; $H_k(t)$ – квазіперіодичні компоненти (КПК); $\xi(t)$ – адитивна складова шумів процесу; $\Delta h_k(t)$ – регулярна функція зміни амплітуд КПК; $\xi_{H,k}$ – випадковий процес зміни амплітуд КПК (мультиплікаційний шум); $\Theta(t)$ – регулярна функція зміни фаз КПК, яка включає можливі регулярні модуляції частоти і фази; $\xi_{\Theta,k}$ – випадкові викривлення фази (фазовий шум, або «тремтіння» фази). Зауважимо, що функції виду $\Theta(t) + \xi_{\Theta,k}$ включають всі можливі варіанти аперіодичностей.

Модель (2) може бути прийнятною для широкого класу практичних задач: від досліджень явищ мікроміру [3], що стосуються супутникової навігації до дослідження процесів космічного масштабу [4]. У масштабі Земної кулі та окремих регіонів подібні моделі застосовуються для аналізу впливу активності Сонця на формування шарів осадових порід [5], для визначення пікових відхилень атмосферних опадів від звичайних ритмів внаслідок змін клімату [6] та ін. У медичній галузі типовими є задачі автоматизованого аналізу кардіограм [7] та енцефалограм [8]. Подібні моделі також широко застосовуються у технічній сфері, наприклад у теорії складних сигналів [9].

Методи, що застосовуються для ідентифікації моделі (2) залежать від задачі досліджень. Перелічимо найбільш типові з цих задач та визначимо групи відомих методів, що застосовуються для їх вирішення.

1. Задача ідентифікації тренду з метою визначення характерних особливостей процесу та прогнозування (екстраполяції) його розвитку. Методи: ковзного середнього, регресійного аналізу, апроксимації сплайнами [10]. При апріорній невизначеності математичної форми моделі тренду застосовуються методи типу метода групового врахування аргументів [11, 12].

2. Задача спектрального аналізу: по суті, задача розкладання процесу у базисі ортогональних функцій, не обов'язково гармонічних. Методи: класичний спектральний аналіз [1], методи розкладання у базисах функцій Уолша, Хаара, Радемахера та ін. [13].

3. Відокремлення регулярних складових процесу від шумів – задача фільтрації. Методи: на даний час найчастіше використовуються відомі методи цифрової фільтрації [14, 15], а для ряду задач – відносно нові алгоритми вейвлет-аналізу [16].

4. Задача виявлення прихованих періодичностей – типова задача Data Mining [17], яка може вирішуватись, у тому числі, із застосуванням методів кластерного аналізу.

5. Задача виявлення відхилень від нормального розвитку процесу – типова задача діагностики. Методи: з початку треба мати модель «нормального» розвитку процесу, для чого використовуються практично всі перелічені вище методи.

6. Комплексна задача структурної ідентифікації моделі (2) для часткового або повного вирішення всіх названих вище задач. Як і у окремих випадках, що наведені вище, така задача в повному обсязі принципово не може вирішуватись лише за допомогою автоматичних засобів аналізу, наприклад, за допомогою бібліотек аналізу MathLab [14], Phyton [18], Scilab [19] та ін.

Методика, що розглядається у даній роботі полягає у застосуванні основних етапів та методів Data Mining [17, 20], а також відомих методів цифрової обробки даних стосовно задачі ідентифікації моделей виду (2).

Метою роботи є:

- обґрунтування конкретного варіанту послідовності операцій отримання, обробки та аналізу даних на прикладі дослідження прихованих періодичностей;
- визначення та формалізація основних обмежень застосовності запропонованої методики.

Пропонована методика вирішення задачі

В цілому, пропонований у даній роботі варіант методики полягає у послідовному або циклічному виконанні наступних кроків (етапів досліджень).

1. Неформальний експертний аналіз процесу командами фахівців. Мета: формулювання задачі досліджень та виявлення основних характеристик процесу у вигляді вербальної моделі.

2. Формалізація задачі досліджень та основних характеристик моделі.

3. Розробка або вибір алгоритму (методу) структурної ідентифікації моделі для вирішення формалізованої задачі. Розробка програмного забезпечення (ПЗ) для реалізації даного алгоритму або використання стандартних бібліотек ПЗ стосовно розробленого алгоритму.

4. Визначення параметрів точності, екстраполяційної стійкості, фільтраційних можливостей та інших характеристик алгоритму шляхом імітаційного моделювання. При необхідності повернення до кроку 3, або, навіть, до кроків 2 та 1.

5. Застосування розробленого алгоритму та ПЗ для вирішення задачі ідентифікації моделі (2) на реальних даних. Перевірка адекватності отриманих рішень за допомогою зовнішніх критеріїв [11, 12], тобто на додаткових масивах експериментальних даних [17, 20]. При необхідності – повернення до кроку 1.

Дана методика відрізняється від запропонованої раніше [21, 22] включенням додаткових етапів досліджень та врахуванням більшої кількості варіантів випадкових спотворень процесу.

Розглянемо дану методику по крокам на прикладі дослідження процесів росту та коливань трафіку на крупних міжнародних вузлах обміну даними.

Крок 1: Неформальний аналіз

Приклади залежностей трафіку бразильському вузлі (точці) обміну [23] наведені на рис.1 та рис.2 з різними періодами досліджень.

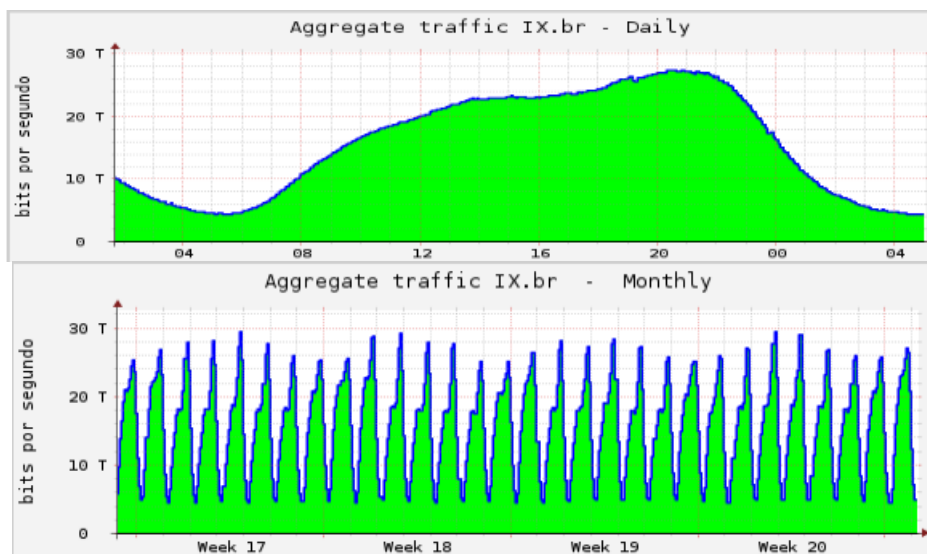


Рис. 1. Добовий та місячний трафік у точці обміну IX.br

Аналіз графіку на рис. 1 дозволяє зробити попередні висновки:

- серед КПК присутні квазіперіоди приблизно у добу та менш помітні періоди приблизно у тиждень;
- на протязі доби трафік змінюється суттєво: від 0,5 Тбіт/с до 25 Тбіт/с (приблизно у 50 разів);
- тижневий цикл менш виразний: пікові значення трафіку за добу коливаються в межах 25–30 Тбіт/с, тобто в межах приблизно 20%.

Аналіз графіків на рис. 2 дозволяє зробити висновки щодо трендів розвитку процесу:

- тренд в усіх випадках є монотонно зростаючою функцією;
- на протязі року тренд зростає приблизно лінійно;
- у більш тривалі періоди лінійний характер тренду вже не є характерним: наприклад, у точці В на рис. 2 спостерігається очевидний перегін тренду: на інтервалі АВ (приблизно 3 роки) трафік зростає приблизно від 1 до 4 Тбіт/с (з темпом приблизно 1 Тбіт/с щорічно); на інтервалі ВС (приблизно 4 роки) трафік зріс приблизно з 4 до 16 Тбіт/с (тобто з темпом приблизно 4 Тбіт/с щорічно).

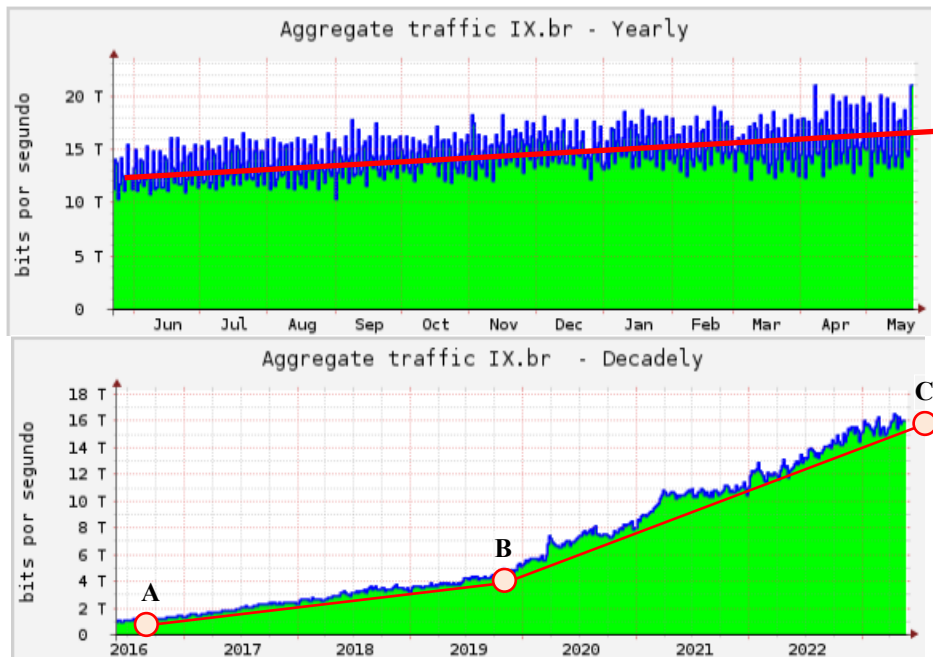


Рис. 2. Трафік у точці обміну IX.br за рік та за 7 років

Зауважимо, що слова типу «приблизно», «на перший погляд» та т. ін. є типовими на даному етапі застосування методики. Надалі ми їх будемо опускати. Також зауважимо, що виявлення особливостей графіків вже на цьому етапі вже дають інформацію для фахівців з прикладних задач. У даному випадку аналіз графіку дозволяє зробити висновки щодо зростання економіки тієї чи іншої держави, щодо розвитку національних мереж передачі даних, або щодо масового втілення новітніх технологій доступу до цих мереж.

Для порівняння наведемо також приклад процесів коливань трафіку у берлінській точці обміну [24]. На рис. 3 показані графіки статистики трафіку за місяць та за рік.

Аналіз графіків на рис. 3 дозволяє зробити висновки, аналогічні до попередніх;

- наявність квазіперіодів тривалістю доба та тиждень; при цьому амплітуда тижневого циклу суттєво менша, ніж добового;
- тренд також має характер зростаючої функції і, можливо, може апроксимуватись поліномом невисокого ступеню.

Втім, помітні і відмінності:

- темпи зростання трафіку значно менше, ніж у бразильській точці (що може свідчити про сталий характер економіки та насичення ринку послуг передачі даних);
- на річному графіку можна помітити цикли, менші, ніж рік, але більші, ніж місяць (сезонні ефекти).

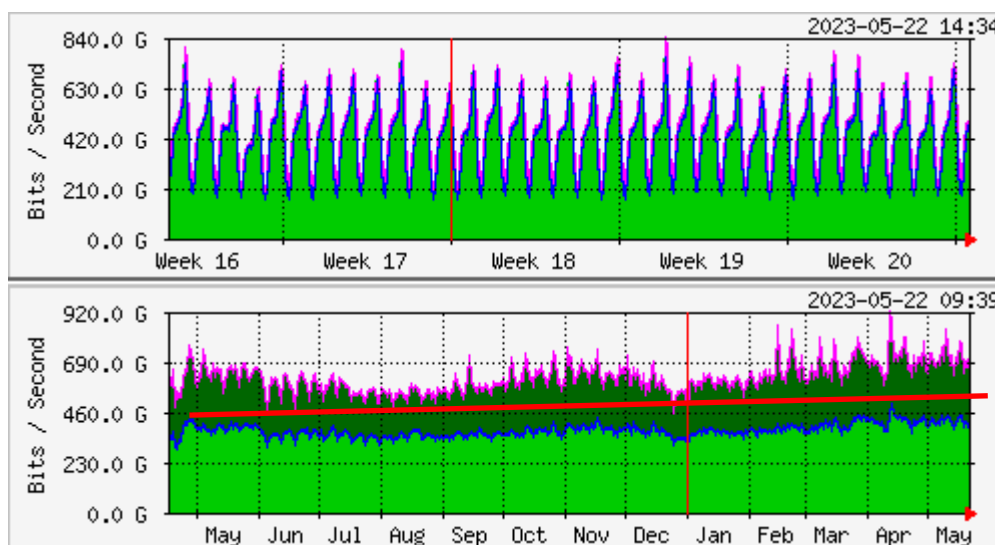


Рис. 3. Трафік у точці обміну BCIX.de за місяць та за рік

Останнє положення характерно для держав, які знаходяться далеко від екватору, як, наприклад Німеччина: соціальні цикли корегуються з природними, а трафік також корегується з цими циклами.

В цілому, аналіз графіків у точках обміну [23, 24], та прикладів для інших точок обміну [21, 22] дозволяє вже при візуальному аналізі зробити висновки про темпи зростання трафіку у середньому (зростання тренду) та визначити найбільш характерні квазіперіоди – добовий та?... А скільки взагалі і які вони хоча б приблизно ці квазіперіоди? На це питання важко відповісти без застосування формальних методів обробки даних, які дозволяють при виконанні певних умов виявити приховані періодичності.

Крок 2: Формалізація задачі та основних характеристик моделі

Для декомпозиції складових моделі (2) на тренд, КПК та адитивний шум треба, щоб у моделі і, відповідно, у даних вимірювань вони якось розрізнялись. Саме від характеристик, які можуть відокремити ці складові і залежить алгоритм, що застосовується для структурної ідентифікації. Для відокремлення тренду та КПК будемо вважати, що тренд є досить повільною функцією часу. Термін «повільний» можна формалізувати по різному. Наприклад, для визначення ступені повільності амплітудних, частотних та фазових коливань пропонувалось використовувати похідні фази [25]. Так, для визначення вузько смугового сигналу пропонувалась оцінка, яку ми уточнимо у термінах та позначеннях задачі, що вирішується:

$$\left| \frac{d^2 \Theta_k(t)}{dt^2} \right| \ll \frac{1}{2\pi} \omega_{0,k}^2, \quad \omega_{0,k} = 2\pi f_{0,k}, \quad f_{0,k} = \frac{1}{T_{0,k}}, \quad T_{0,k} = \frac{1}{p_k} T, \quad (3)$$

де $\omega_{0,k}$ – центральна кутова частота, $f_{0,k}$ – центральна циклічна частота, $T_{0,k}$ – відповідно середній період КПК з номером k ; p_k – середня кількість періодів (не обов'язково ціле число) даної КПК за період спостережень T .

Для ступені повільності тренду використаємо аналогічне визначення: повільним трендом порядку n з параметром ε будемо називати таку функцію $Y(t)$, для якої виконується умова:

$$\frac{\eta(Y^n)}{\eta(Y)} < \varepsilon, \quad Y^n = \frac{d^n Y(t)}{dt^n}, \quad (4)$$

де η – символ оператора норми, яку можна визначити різними способами, як то:

$$\eta_1(Y) = \int_0^T |Y(t)| dt, \quad \eta_2(Y) = \int_0^T Y^2(t) dt, \quad \eta_m(Y) = \max_{t \in [0, T]} |Y(t)|, \quad (5)$$

де η_1 та η_2 – відповідно норми у просторах L_1 та L_2 ; η_m - норма Чебишева.

Всі визначення норм (5) є важливими для задачі, що вирішується. Перші дві з них характеризують відповідно середній розмах значень функцій та їх «енергетичні» характеристики, а норма Чебишева дозволяє порівнювати пікові значення компонентів моделі (2). При необхідності у даній роботі використання тієї чи іншої норми буде уточнюватись.

Якщо теоретично тренд має форму функції, яка допускає розкладання у ряд Тейлора, то параметр ε буде мати сенс максимально можливої норми остатку ряду при отриманні членів включно до ступеню n . Кажучи інакше, тренд можна апроксимувати ступеневим поліномом порядку n з точністю ε незалежно від способу нормування простору.

Операція диференціювання принципово дозволяє відокремити повільний тренд від КПК, які мають приблизно гармонійний характер. При цьому особливо ефективним може бути диференціювання парних порядків: другого, четвертого і т. д. Похідні другого порядку «пригнічують» лінійні складові тренду, похідні 4-го порядку зводять нанівець складові поліномів до 3-го ступеню включно. Навпаки, норми гармонійних складових лише зростають.

Розглянемо простий випадок моделі з трендом у формі поліному другого ступеню та двома гармонійними складовими:

$$S(t) = y_0 + y_1 t + y_2 t^2 + h_{0,1} \cos(\Theta_{0,1} + \omega_{0,1} t) + h_{0,2} \cos(\Theta_{0,2} + \omega_{0,2} t), \quad (6)$$

де модуляційні параметри визначимо так:

$$y_2 = h_{0,1} = h_{0,2} = 1, \quad \omega_{0,1} = 2\pi \frac{1}{T_{0,1}}, \quad T_{0,1} = \frac{1}{4} T, \quad \omega_{0,2} = 2\pi \frac{1}{T_{0,2}}, \quad T_{0,2} = \frac{1}{8} T. \quad (7)$$

Залежності (6) та (7) можуть моделювати процес, який спостерігається 4 роки. При цьому є значні коливання з періодом у рік ($p_1 = 4$ цикли) та півроку ($p_2 = 8$ циклів). Після диференціювання отримаємо значення норм Чебишева похідних всіх складових процесу:

$$\begin{cases} \eta_m(Y^{[2]}) = 2T, & \eta_m(H_1^{[2]}) = 4^2 (2\pi/T)^2, & \eta_m(H_2^{[2]}) = 8^2 (2\pi/T)^2 \\ \eta_m(Y^{[4]}) = 0, & \eta_m(H_1^{[4]}) = 4^4 (2\pi/T)^4, & \eta_m(H_2^{[4]}) = 8^4 (2\pi/T)^4 \end{cases} \quad (8)$$

Залежності (8) показують, що к даному випадку норма другої похідної тренда пропорційна модулю коефіцієнта y_2 , а норма четвертої похідної зведена до нуля (тренд повністю подавлений). На відміну від

цього, норми гармонійних компонентів лише зростають: норми других похідних цих компонентів відрізняються у 4 рази, а норми четвертих похідних – вже у 16 разів. Дане положення тривіальне, але це лише частковий випадок відомих загальних властивостей перетворення Фур'є [1]. Тобто, якщо позначити оператор перетворення Фур'є $F[x]$ якоїсь функції часу $x(t)$, то для похідних цієї функції справедливо: $F[x^{[n]}] = (j\omega)^n F[x]$. Тоді для норми спектру похідних, які зосереджені у локальній полосі $[\omega_k \pm \Delta\omega_k]$ справедливі приблизні оцінки:

$$\eta_1(F[x^{[n]}]) \approx |\omega_k|^n \int_{\omega_k - \Delta\omega_k}^{\omega_k + \Delta\omega_k} |F[x]| d\omega, \quad \eta_2(F[x^{[n]}]) \approx |\omega_k|^n \int_{\omega_k - \Delta\omega_k}^{\omega_k + \Delta\omega_k} (F[x])^2 d\omega, \quad \eta_m(F[x^{[n]}]) \approx |\omega_k|^n \max_{\omega_k \pm \Delta\omega_k} |F[x]|,$$

тобто, **незалежно від способу** визначення норми спектрів КПК будуть пропорційні n -ий ступені частоти для похідних порядку n . Саме дана властивість перетворювання Фур'є і може бути використана для виявлення непомітних на око «прихованих» високочастотних КПК.

Дана властивість похідних високих порядків також дозволяє вирішувати задачу фільтрації шумів. Як відомо, ефективним методом відокремлення «корисного» сигналу від шуму є застосування фільтрів нижніх частот (ФНЧ) [14-16]. Незалежно від функції ФНЧ важливо встановити значення частоти зрізу $\pm \omega_H$ і відповідної ефективної ширини пропускання цього фільтру. Зрозуміло, що у випадку, коли середня частота теоретично найвищої КПК $\omega_{0,K} < \omega_H$, то ФНЧ видалить інформаційні складові з цією частотою:

так би мовити, з водою виплесне ще й дитину. Навпаки, якщо $\omega_{0,K} \gg \omega_H$, то значна доля енергії шумів зостанеться після фільтрації і буде заважати подальшому вирішенню комплексної задачі структурної ідентифікації. Тому візуальне дослідження спектрів **похідних** (кажучи дуже «науково»), метод Visual Mining [17, 20]) може допомогти у вирішенні задачі встановлення оптимальних значень частоти зрізу ФНЧ.

Яка може бути максимальна частота, що принципово можна надійно виділити? Теорема Котельникова-Найквіста стверджує, що сигнал у полосі частот шириною Δf можна однозначно відтворити відліками, які відстоять один від одного на $1/2\Delta f$. У реальних застосуваннях частота відліків береться більшою. Наприклад, модуляції голосу людини мають межу верхньої границі частот 3,5-4 КГц. За згаданою теоремою достатньо відліків з частотою 7-8 Кбіт/с. Втім, у цифровий телефонії обрано стандарт 64 Кбіт/с, що у 8 разів перевищує оцінку Найквіста-Котельникова. З урахуванням можливих шумів різної природи дане значення: 8 відліків на найкоротший період коливань слід прийняти як найменше допустиме значення.

Також для відокремлення залишків енергії тренду після диференціювання корисним може бути фільтрація за допомогою фільтрів вищих частот (ФВЧ) з частотою зрізу $\pm \omega_H$. Якщо похідну тренду певного порядку можна представити приблизно як константу (приклад другої похідної моделі (6)) на інтервалі $[0, T]$, то її амплітудний спектр (надалі – спектр) буде мати вигляд функції $\sin(\omega T/2)/(\omega T/2)$. Найближчі до центру (відповідно, до максимуму) нулі цієї функції будуть у точках $\pm 2\pi/T$ та $\pm 4\pi/T$. При цьому найбільш значна доля енергії похідної тренду буде зосереджена саме на інтервалі $\pm 4\pi/T$, що відповідає двом циклам за час спостережень T . Таким чином, найнижча частота КПК, яку можна відокремити від тренду дорівнює 3-м циклам ($\pm 6\pi/T$).

Таким чином, встановлені основні формальні обмеження застосування пропонуваніх алгоритмів. Вкажемо також обмеження, які важко формалізувати, але легко визначити на інтуїтивному рівні:

- КПК повинні бути відокремлені одна від іншої, хоча б в частині смуги основної енергії;
- для візуального аналізу спектри КПК мають бути приблизно унімодальними;
- тренд має бути повільною функцією порядку n з дуже малим для даної задачі параметром ε ;
- шуми не повинні мати регулярних складових (трендів, помітних кореляцій та ін.).

Втім, природа не повинна підкорятись нашим про неї уявленням. Тому немає іншого способу перевірки адекватності моделей, аніж перевірка їх на додаткових масивах експериментальних даних.

Крок 3: Розробка алгоритму

Операції алгоритму логічно слідує з формального аналізу на кроці 2 та в значній частині включають операції, що було раніше використано [21, 22]. У даній статті ми пропонуємо удосконалений алгоритм.

1. За даними вимірювань отримується масив значень $S(t)$, імовірно у формі залежності (2).
2. Методами чисельного диференціювання знаходиться похідна $S^{[2]}(t)$, або похідні більш високих порядків.
3. Виконується операція перетворення Фур'є, зазвичай алгоритмами швидкого перетворення (ШПФ) $F[S^{[2]}]$. В отриманому спектрі за допомогою візуального аналізу або методами кластерного аналізу Data Mining знаходяться моди КПК з мінімальним квазіперіодом $T_{0,K}$, який включає не менше як 8

відліків. Встановлюється середня частота даної КПК: $\omega_{0,K} = 2\pi/T_{0,K}$ та приблизний інтервал частот, у якому зосереджена більша частина енергії даної КПК: $\omega_{0,K} \pm \Delta\omega_K$. Як правило, для вузько смугових КПК можна обмежитись значеннями $\Delta\omega_K = 0,1\omega_{0,K} \div 0,2\omega_{0,K}$. Встановлюється частота зрізу ФНЧ: $\omega_H \geq \omega_{0,K} + \Delta\omega_K$.

4. Виконується операція ШПФ над *вхідним масивом* значень $F[S]$ та над результатом виконується операція фільтрації ФНЧ, після чого отримується спектр з подавленими вищими частотами: $\Phi_{\text{ФНЧ}}(F[S]) = F^*[S]$. Зворотнім ШПС отримується значення вхідної функції з частково подавленими шумами: $S^*(t) = F^{-1}\{F^*[S]\}$.

5. Шляхом диференціювання отриманої функції додатково подавляються повільні компоненти (очищення від тренду), в результаті чого отримується приблизна оцінка КПК: $H^*(t) = \sum_{k=1}^K H_k^*(t)$.

6. Заключна операція – приблизна оцінка тренду: $Y^*(t) = S^*(t) - H^*(t)$.

Крок 4: Імітаційне моделювання

Ефективність метода імітаційного моделювання полягає в тому, що поряд з еталонною (ідеальною) моделлю процесу є також спотворена шумами, викривлена модель. Тому можна вирішувати зворотню задачу аналізу: застосувавши запропонований алгоритм ідентифікації до викривленої моделі, визначити параметри відхилень результату від еталонної моделі.

Для моделювання на основі залежності (2) визначимо загальний вид моделі, передбачаючи, що «вимірювання» виконувались на протязі 3-х років з кроком у добу (приблизно 1095 відліків). При цьому в ідеалі спостерігались річний (3 цикли), піврічний (6 циклів) та тижневий (приблизно 160 циклів) періоди.

Позначимо: $r(t)$ – значення датчика псевдовипадкових чисел, рівномірно розподілених на інтервалі ± 1 ; $tr(t)$ – значення датчика псевдовипадкових чисел з трикутним розподіленням також на інтервалі ± 1 . Визначимо параметричний вид моделі:

$$\begin{cases} Y(t) = V_0(1+q)^{t/T} \\ H(t) = \sum_{k=1}^3 (h_k + \Delta h_k t/T) \cos(\Theta_{0,k} + 2\pi\Delta\Theta_k r(t) + 2\pi t T/T_k) \\ \xi(t) = A_\xi tr(t) \end{cases} \quad (9)$$

Значення параметрів еталонної та спотвореної моделі за формулами (9) наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Значення параметрів моделей

| Параметр | Значення для еталонної моделі | Значення для спотвореної моделі |
|--|-------------------------------|---------------------------------|
| T | 1095 | 1095 |
| q | 1 | 1 |
| h_1, h_2, h_3 | 0,25; 0,125; 0,01 | 0,25; 0,125; 0,01 |
| $\Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3$ | 0,15; 0,25; 0 | 0,15; 0,25; 0 |
| $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$ | 0; 0,5 π ; 0 | 0; 0,5 π ; 0 |
| $\Delta\Theta_1, \Delta\Theta_2, \Delta\Theta_3$ | 0; 0; 0 | 0,125; 0; 0,01 |
| T_1, T_2, T_3 | 365; 182,5; 7,0 | 365; 182,5; 7,0 |
| A_ξ | 0 | 0,15 |

Із табл. 1 видно, що спотворення еталонної моделі включають фазові шуми та адитивний шум. При цьому розмах коливань адитивного шуму у 15 разів перевищує амплітуду тижневої КПК. Також моделі включають амплітудні модуляції КПК, при цьому суттєві: на протязі інтервалу досліджень амплітуда річного циклу збільшується від 0,25 до 0,40, а піврічного від 0,125 до 0,375 – практично, втричі.

Графіки складових еталонної моделі та сумарний графік спотвореної моделі показані на рис. 4.

У варіанті масштабу на рис. 4 досить легко встановлюється наявність річного та піврічного циклу. Тижневий цикл візуально не помітний на обох графіках. Якщо відобразити фрагмент процесу в іншому масштабі, наприклад, за перші 2 місяці «спостережень» (рис. 5), то на графіку КПК еталонної моделі тижневий цикл добре виражений візуально, а ось на графіку спотвореної моделі даний цикл зовсім не можна побачити на око.

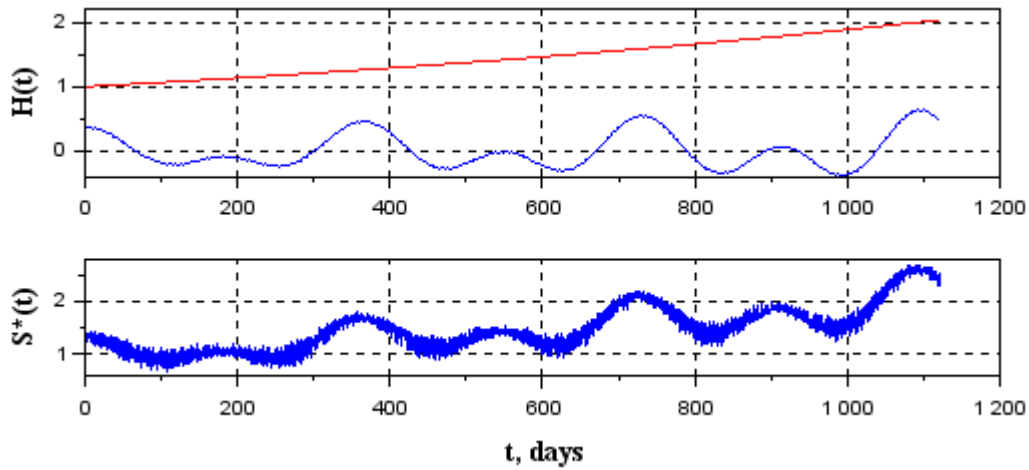


Рис. 4. Тренд та КПК еталонної моделі; сумарний графік спотвореної моделі

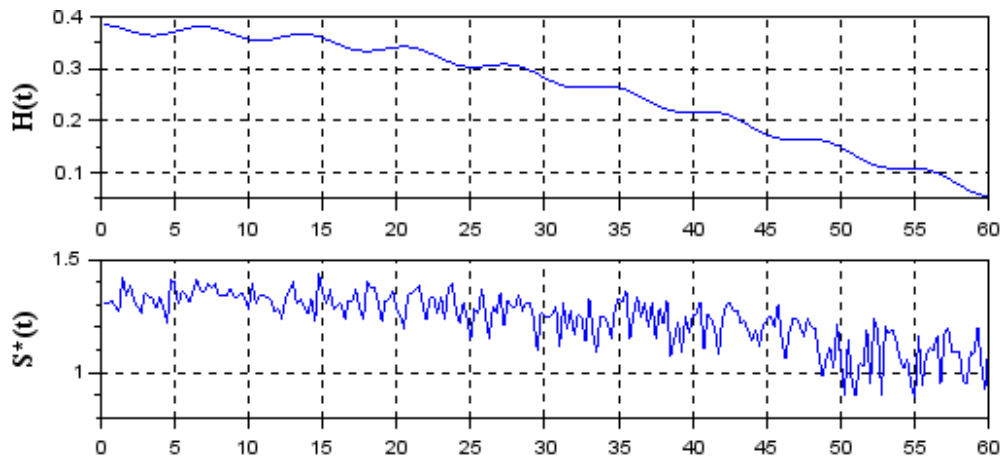


Рис. 5. КПК еталонної моделі та сумарний графік спотвореної моделі за 2 місяці

Таким чином, у даному випадку виявлення тижневої періодичності є типовою задачею Data Mining – задачею виявлення «прихованих» періодичностей. Саме цю задачу і будемо вирішувати за допомогою запропонованого алгоритму.

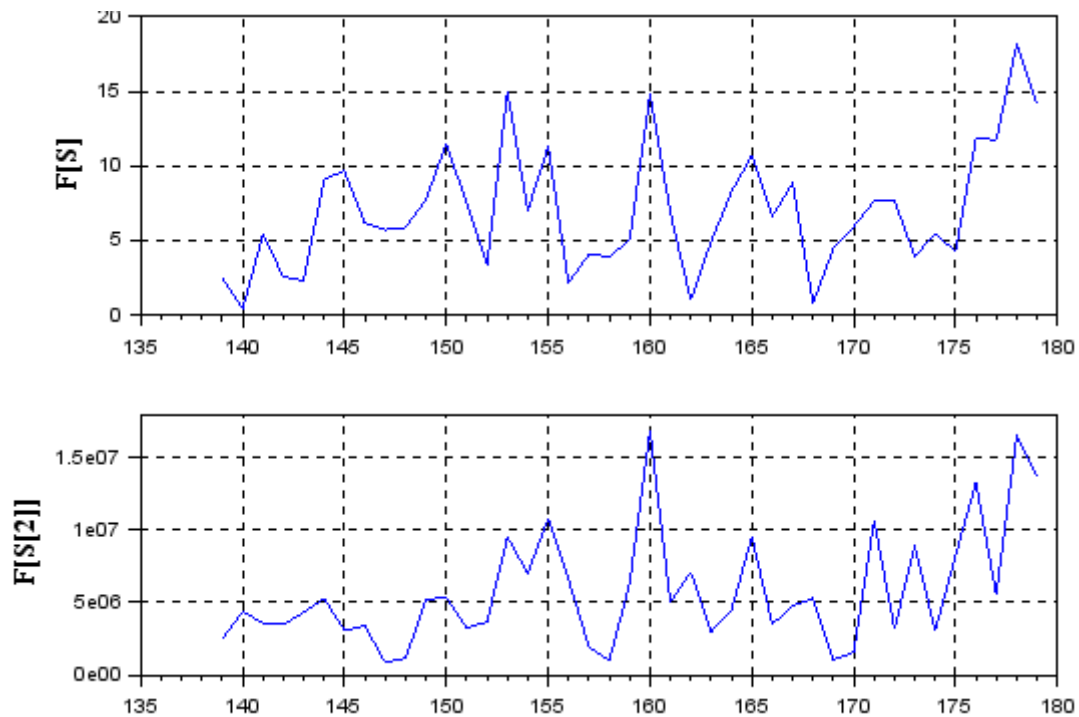


Рис. 6. Спектри спотвореної моделі та її другої похідної в області тижневого циклу

Графіки фрагменту спектру спотвореної моделі $S(t)$ та спектру другої похідної $S^{[2]}(t)$ показані на рис. 6. На цих графіках частота дана у циклах за період досліджень: 160 циклів приблизно відповідає тижневному циклу, який і треба виявити.

Як видно з рис. 6, пік на частоті 160 для $F[S^{[2]}]$, превалює над сусідніми значеннями, які обумовлені спектром шумів. Поряд з цим, у спектрі $F[S]$ є моди, які перевищують значення піку на частоті 160. Втім, це лише одна реалізація випадкового процесу. Для статистичного аналізу треба виконати багаторазове моделювання. Так, на рис. 7 показано результати 20-кратного вирішення тієї ж задачі.

Візуальний аналіз графіків на рис. 7 вже показує, що у середньому пік тижневого циклу більш виражений у спектрі другої похідної. Для статистичного аналізу модальності у даному випадку можна використати показник відносних середніх значень. Для цього відокремимо цикли поблизу тижневої моди 160 ± 2 та цикли більш широкої полоси 160 ± 20 . Позначимо: F_n – амплітуди спектральних складових для відповідних частот. Тоді показник модальності буде визначатись формулою:

$$\eta = \left(\frac{1}{4} \sum_{n=160-2}^{160+2} F_n \right) / \left(\frac{1}{40} \sum_{n=160-20}^{160+20} F_n \right). \quad (10)$$

Значення показника (10) для різних варіантів співвідношення амплітуди тижневого циклу та розмаху значень адитивного шуму дано у табл. 2.

Таблиця 2

Значення показника модальності

| Співвідношення A_ξ / h_3 | Показник для $F[S]$ | Показник для $F[S^{[2]}]$ |
|------------------------------|---------------------|---------------------------|
| 10 | 2,46 | 5,75 |
| 15 | 2,02 | 4,23 |
| 20 | 1,78 | 3,42 |

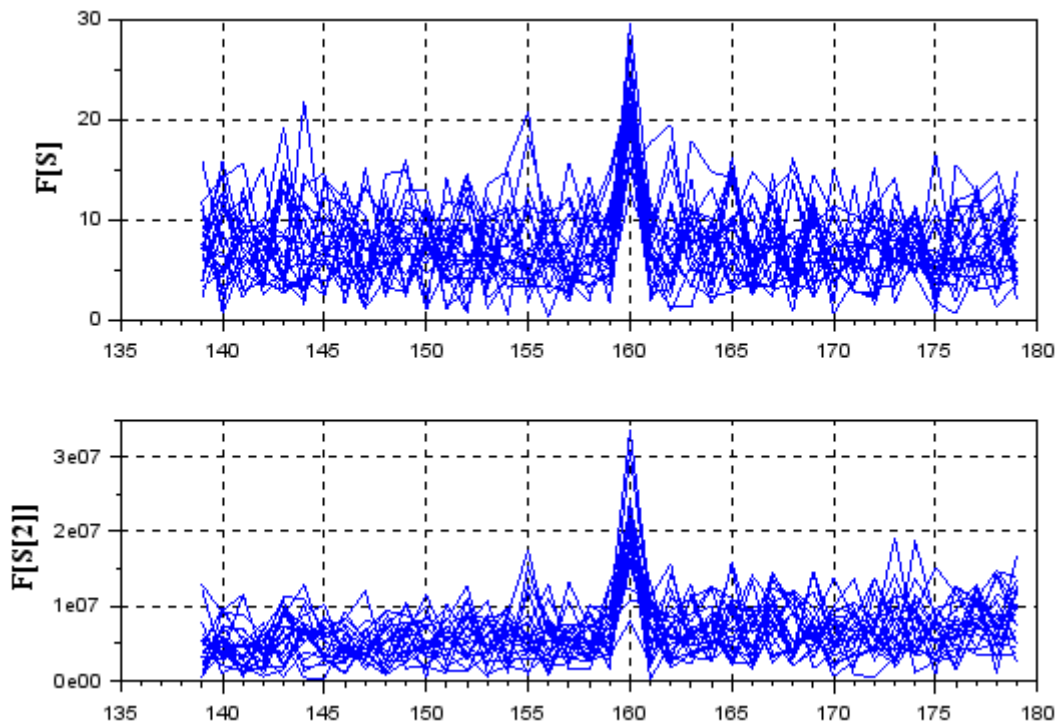


Рис. 7. Спектри спотвореної моделі та її другої похідної в області тижневого циклу

Аналіз даних у табл. 2 дозволяє зробити важливий висновок: показник модальності для спектру другої похідної приблизно вдвічі більший, ніж для спектру самої моделі. Таким чином, операція диференціювання дозволяє підвищити роздільну здатність методів спектрального аналізу у даному випадку.

Після встановлення найвищої частоти «корисних» та значущих КПК виконується крок фільтрації ФНЧ, що показано на рис. 8.

У випадку значень, що відповідають табл. 1, дисперсія адитивного шуму після фільтрації зменшена приблизно у 30 разів. При цьому ефективно визначено моду тижневого циклу. Коментарі зайві.

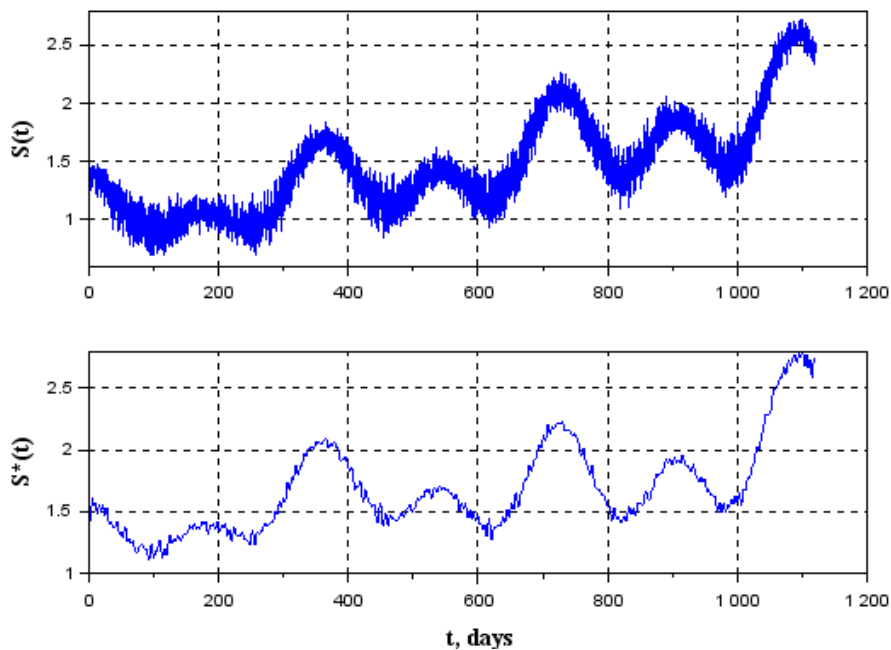


Рис. 8. Спотворена модель до і після фільтрації ФНЧ

Крок 5: Застосування розробленого алгоритму

Дана робота, по суті, є продовженням досліджень, виконаних раніше [21, 22] з урахуванням особливостей використаної методики, а саме: визначення полос фільтрації за допомогою подвійного диференціювання процесів та обов'язкового використання методів імітаційного моделювання на кроці дослідження ефективності алгоритмів вирішення прикладної задачі. Тому опустимо ряд проміжних кроків даної методики і розглянемо лише результати дослідження «прихованих» квазіперіодичних нестационарних процесів на прикладі аналізу трафіку на великих вузлах обміну [23, 24].

Результати спектрального аналізу КПК реальних процесів показані на рис. 9. Для отримання цих результатів виконано попередні операції за кроками методики 1-3 та КПК відокремлені від тренду після фільтрації шумів за допомогою ФНЧ з частотою зрізу, яка на 10% перевищує частоту тижневого циклу. За допомогою ФВЧ додатково подавлені рештки похідних «повільного» тренду порядку більше 2, а також очевидний річний цикл. Графіки показані для досліджень на протязі 3-х років. По вісі ординат показані значення відносно максимуму функцій (умовний масштаб), а по вісі абсцис – частота у циклах на рік.

Порівняльний аналіз графіків на рис. 9 дозволяє зробити певні висновки:

- тижневий цикл (приблизно 52 цикли у рік) помітний на обох графіках;
- піврічний цикл (2 цикли у рік) помітний лише для трафіку у Берліні та на око практично не виражений у бразильській точці обміну;

Втім, особливо цікавими є близькі періодичності у 9 циклів та 13 циклів на рік. Відповідно – приблизно 40 днів та 28 днів. Умовно – місячні цикли. Цікаво, що цикл тривалістю у календарний місяць (30-31 день, або приблизно 12 циклів у рік) на обох графіках зовсім не простежується. Чому? Для цього існують, на наш погляд, як історичні (соціальні) причини, так і природні цикли функціонування організму людини.

Цикл тривалістю приблизно 28 днів можна вважати природнім. Відомі основні періоди місячних циклів: синодичний місяць (проміжок часу між двома фазами Луни) – приблизно 29,5 діб та аномалістичний місяць (проміжок часу між положеннями Луни на орбіті навколо Землі у перигеї або апогеї) – приблизно 27,5 діб. У середньому ці два періоди як раз і дають умовний місяць у 28 днів. Даний період співпадає з середньою тривалістю менструального циклу у жінок, а чоловіки, мабуть, підтягнулись: тому пік у 28 днів (13 циклів на рік) виглядає абсолютно логічно.

Інший виявлений пік у 40 днів важко пояснити природними явищами. Втім, закономірності трафіку, які, зрозуміло, корелюються з біологічними циклами людини та соціальними циклами чомусь вказують, що така «прихована» періодичність існує і якимось впливає на людське суспільство. Причини наявності даного циклу залишимо фахівцям з небесної механіки та фізіології людини. Лише зауважимо, що саме цикл у 40 днів був у календарі древніх слов'ян [26], а також нагадаємо, що день Піднесення християни відмічають на 40-й день після Пасхи. І ще одна (сумна) традиція: другий раз поминати близьких, що пішли, на 40-й день.

Виконаний аналіз дає ще один цікавий факт: у країнах, близьких до екватору, піврічні цикли не спостерігаються на відміну від країн північної півкулі. Дійсно, найкрупніші міста Бразилії (Сан-Пауло та Ріо-де-Жанейро) знаходяться приблизно на 23⁰ південної широти, тоді як Берлін – вже на 52,31⁰ північної широти. Особливості клімату викликають і особливості навантаження на мережі передачі даних: міське населення Європи влітку відпочиває, взимку працює в посиленому режимі або просиджує осінні та весняні дощі за комп'ютером, а сільське населення влітку працює з особливим навантаженням. Що тім, що другим

влітку не до Інтернету. Поряд з цим, у екваторіальних країнах такого різкого сезонного завантаження мережі не спостерігається: банани та кофе плодносять круглий рік і відпочити людям немає часу, оскільки ніякого літа там не існує, як і зими.

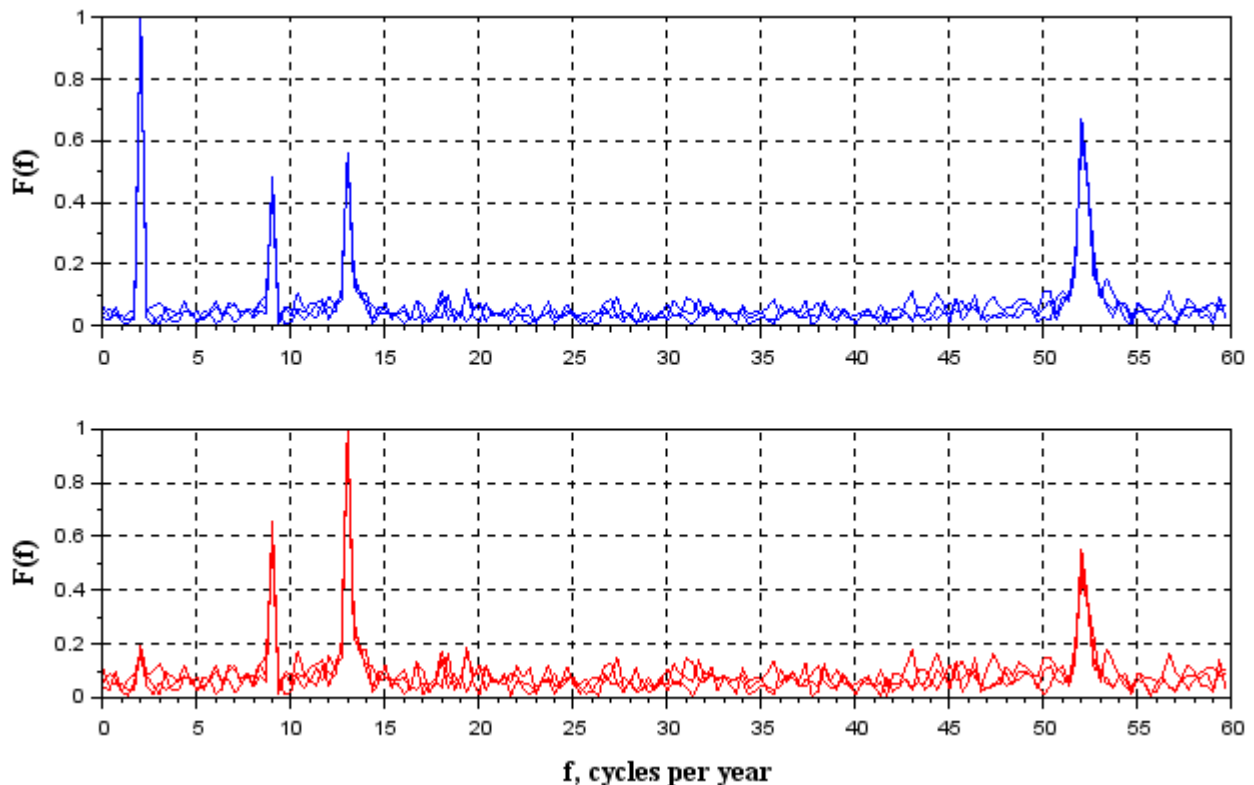


Рис. 9. Порівняння спектрів трафіку у Берліні (зверху) та Бразилії (знизу) на протязі досліджень за останні три роки

Оскільки дослідження у даній роботі продовжують ті, що було розпочато ще у 2019 році [21, 22], то у даному випадку реалізовано найважливіший етап досліджень: перевірку адекватності моделей та ефективності алгоритмів на додаткових наборах даних. Оскільки в основному раніше отримані результати підтверджуються, то можна вважати запропоновану методіку досить ефективною, а моделі досить коректними. А саме важливе: за чотири роки у циклах життя людини принципово нічого не змінилось. Про це образно сказав Леонардо да Вінчі в одній зі своїх байок: *«Істина була єдиною дочкою часу»*.

Цікаво було б дослідити цикли у житті людини років так 20000 – 40000 тому методом екстраполяції назад. Чи підтверджувались би тоді визначені періодичності? Нажаль, Інтернету тоді ще не було...

Висновки

У роботі дано основи методіки структурної ідентифікації моделей нестационарних квазіперіодичних процесів, яка включає етапи (кроки) неформального фахового аналізу, формалізації задачі та моделі, імітаційного моделювання, застосування розроблених алгоритмів і програм для вирішення прикладної задачі та аналізу адекватності моделі і ефективності алгоритмів на незалежних масивах даних.

Особливістю методіки є попереднє диференціювання вхідного процесу з метою пригнічення повільного тренду та визначення слабо виражених «прихованих» компонентів у високочастотному діапазоні. Дана операція сприяє розпізнаванню прихованих мод квазіперіодів та налаштуванню фільтрів нижніх частот для селекції регулярних складових процесу на фоні шумів незалежно від їх особливостей (адитивні, мультиплікативні, фазові).

Застосування даної методіки до задачі ідентифікації моделей трафіку на великих вузлах обміну дає очевидні результати наявності періодичностей:

- добовий цикл;
- річний цикл;
- менш очевидних періодичностей:
- піврічний цикл;
- тижневий цикл;
- та зовсім неочевидних періодичностей:
- цикл у 28 днів;
- цикл у 40 днів.

В цілому, запропонована методіка дозволяє ефективно вирішувати задачі методіки структурної

ідентифікації моделей нестационарних квазіперіодичних процесів при певних обмеженнях:

- основний тренд процесу має бути повільною функцією, похідні якої зменшуються до незначних величин в результаті операції диференціювання;
- характер тренду (приблизна функція, що його моделює) не повинен змінюватись на інтервалі спостережень;
- спектри квазіперіодичних компонентів повинні мати виражені моди та бути сконцентровані у відносно вузьких полосах;
- квазіперіодична складова з мінімальною частотою, що може бути виявлена, повинна мати як найменше 3 періоди за час спостережень;
- квазіперіодична складова з максимальною частотою, що може бути надійно виявлена, повинна бути представлена не менш як 8-ю відліками.

Для виконання моделювання та розрахунків у даній роботі було використано платформу Scilab, яка відрізняється від платформи MatLab принципово тим, що доступна безкоштовно.

Література

1. Харкевич А.А. Спектры и анализ / А.А. Харкевич. – М.: ЛИБКОМ, 2009. – 240 с.
2. A. Golovizin, D. Tregubov, M. Yaushev, D. Mishin, D. Provorchenko, N. Kolachevsky. Absolute frequencies of cooling and pumping transitions for Thulium optical lattice clock and cold gas studies. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 306, 2023, 108629, ISSN 0022-4073. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2023.108629>.
3. Wei Xie, Guanwen Huang, Le Wang, Pingli Li, Bobin Cui, Haohao Wang, Yu Cao. Long-term performance detection and evaluation of GLONASS onboard satellite clocks. *Measurement*, Volume 175, 2021, 109091, ISSN 0263-2241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109091>.
4. J. P. Sánchez Arias, Orlagh L. Creevey. Light curves and frequency analysis of hybrid SCT- dor stars. *Astronomical Journal of Azerbaijan*, 2022, Vol. 17, No. 2, P. 100 – 108.
5. Miruo Lin, Kelai Xi, Yingchang Cao, Rukai Zhu, Xiaobing Niu, Honggang Xin, Weijiao Ma. Cyclicity related to solar activity in lacustrine organic-rich shales and their significance to shale-oil reservoir formation. *Geoscience Frontiers*, Vol. 14, Issue 5, 2023, 101586, ISSN 1674-9871. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101586>.
6. Tue M. Vu, Ashok K. Mishra. Nonstationary frequency analysis of the recent extreme precipitation events in the United States. *Journal of Hydrology*, Vol. 575, 2019, P. 999-1010, ISSN 0022-1694. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.090>.
7. Liang-Yu Shyu, Yuh-Shii Lin, Chun-Peng Liu, Wei-Chih Hu. The detection of impedance cardiogram characteristic points using wavelet transform. *Computers in Biology and Medicine*, Volume 34, Issue 2, 2004, P. 165-175, ISSN 0010-4825. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-4825\(03\)00040-4](https://doi.org/10.1016/S0010-4825(03)00040-4).
8. Jean-Philippe Lachaux, Mario Chavez, Antoine Lutz/ A simple measure of correlation across time, frequency and space between continuous brain signals. *Journal of Neuroscience Methods*, Volume 123, Issue 2, 2003, P. 175-188, ISSN 0165-0270. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0165-0270\(02\)00358-8](https://doi.org/10.1016/S0165-0270(02)00358-8).
9. Варакин Л.Е. Теория сложных сигналов. – М.: Сов. радио, 1970. – 376 с.
10. Поллард Дж. Справочник по вычислительным методам статистики / Дж. Поллард. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 344 с.
11. Ивахненко А.Г., Степашко В.С. Помехоустойчивость моделирования / А.Г. Ивахненко, В.С. Степашко. – Киев: Наукова думка, 1985. – 216 с.
12. Левин С. Ф. Теория стохастической компактности / С. Ф. Левин // Статистический анализ и синтез систем технического обеспечения эксплуатации. – Одесса: ОВВКИУ ПВО, 1984. – С. 40-178.
13. Залманзон Л.А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях / Л.А. Залманзон. – М.: Наука, 1989. – 496 с.
14. Оппенгейм А.В., Шафер Р.В. Цифровая обработка сигналов / А.В.Оппенгейм, Р.В.Шафер. – М.: Связь, 1979. – 426 с.
15. Рибальченко М.О., Єгоров О.П., Зворикін В.Б. Цифрова обробка сигналів. Навчальний посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2018. – 79 с.
16. Воскобойников Ю.Е., Гочаков А.В., Колкер А.Б. Фильтрация сигналов и изображений: Фурье и вейвлет алгоритмы (с примерами в Mathcad) / Ю.Е. Воскобойников, А.В. Гочаков, А.Б. Колкер. – Новосибирск : НГАСУ, 2010. – 188 с.
17. Марченко О.О., Россада Т.В. Актуальні проблеми Data Mining: Навчальний посібник для студентів факультету комп'ютерних наук та кібернетики / О.О. Марченко, Т.В. Россада. – Київ: КНУ ім. Тараса Шевченка, 2017. – 150 с.
18. Анісімов А. В., Дорошенко А. Ю., Погорілий С. Д., Дорогий Я. Ю. Програмування числових методів мовою Python : підруч. / А. В. Анісімов, А. Ю. Дорошенко, С. Д. Погорілий, Дорогий Я. Ю. – К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2014. – 640 с.
19. Дьяконов, В.П. Scilab: полный самоучитель / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
20. Чубукова І.О. Data Mining / І.О. Чубукова. Київ: КНЕУ ім. В. Гетьмана, 2016. – 326 с.

[електронний ресурс] – Режим доступу: http://kist.ntu.edu.ua/textPhD/Chubukova-Data_Mining.pdf.

21. Odegov N.A. Analysis of non-stationary quasi-periodic internet traffic by the method of instant spectra / Odegov N.A., Bahachuk D.H., Hordiienko O.O. // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2019, № 1. – С. 121 – 134.

22. Одегов М.А. Метод селекції гармонійних складових нестационарної моделі трафіку на великих вузлах обміну / Одегов М.А., Горієднко О.О., Юр'єва О.В. // Матеріали XIV міжнародної наук.-техн. конференції "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах" (ВОТТП-19), 14-19 червня 2019 р., Одеса (Затока). – С. 47 – 49.

23. Статистика трафіку у бразильській точці обміну [електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ix.br/agregado/>.

24. Статистика трафіку у берлінській точці обміну [електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.bcix.de/bcix/traffic/>.

25. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы / И.С. Гоноровский. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.

26. Славянский календарь: месяц 40 дней, неделя 9 дней [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://derzhavarus.ru/kalendar-let-mesyac-nedelya.html>.

References

1. Harkevich A.A. Spektry i analiz / A.A. Harkevich. – М.: LIBKOM, 2009. – 240 с.
2. A. Golovizin, D. Tregubov, M. Yaushev, D. Mishin, D. Provorchenko, N. Kolachevsky. Absolute frequencies of cooling and pumping transitions for Thulium optical lattice clock and cold gas studies. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, Vol. 306, 2023, 108629, ISSN 0022-4073. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2023.108629>.
3. Wei Xie, Guanwen Huang, Le Wang, Pingli Li, Bobin Cui, Haoao Wang, Yu Cao. Long-term performance detection and evaluation of GLONASS onboard satellite clocks. Measurement, Volume 175, 2021, 109091, ISSN 0263-2241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109091>.
4. J. P. Sanchez Arias, Orlagh L. Creevey. Light curves and frequency analysis of hybrid SCT- dor stars. Astronomical Journal of Azerbaijan, 2022, Vol. 17, No. 2, R. 100 – 108.
5. Miruo Lin, Kelai Xi, Yingchang Cao, Rukai Zhu, Xiaobing Niu, Honggang Xin, Weijiao Ma. Cyclicity related to solar activity in lacustrine organic-rich shales and their significance to shale-oil reservoir formation. Geoscience Frontiers, Vol. 14, Issue 5, 2023, 101586, ISSN 1674-9871. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101586>.
6. Tue M. Vu, Ashok K. Mishra. Nonstationary frequency analysis of the recent extreme precipitation events in the United States. Journal of Hydrology, Vol. 575, 2019, P. 999-1010, ISSN 0022-1694. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.090>.
7. Liang-Yu Shyu, Yuh-Shii Lin, Chun-Peng Liu, Wei-Chih Hu. The detection of impedance cardiogram characteristic points using wavelet transform. Computers in Biology and Medicine, Volume 34, Issue 2, 2004, P. 165-175, ISSN 0010-4825. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-4825\(03\)00040-4](https://doi.org/10.1016/S0010-4825(03)00040-4).
8. Jean-Philippe Lachaux, Mario Chavez, Antoine Lutz/ A simple measure of correlation across time, frequency and space between continuous brain signals. Journal of Neuroscience Methods, Volume 123, Issue 2, 2003, P. 175-188, ISSN 0165-0270. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0165-0270\(02\)00358-8](https://doi.org/10.1016/S0165-0270(02)00358-8).
9. Varakin L.E. Teoriya slozhnykh signalov. – М.: Sov. radio, 1970. – 376 с.
10. Pollard Dzh. Spravochnik po vychislitel'nykh metodam statistiki / Dzh. Pollard. – М.: Finansy i statistika, 1982. – 344 с.
11. Ivahnenko A.G., Stepashko V.S. Pomehoustojchivost modelirovaniya / A.G. Ivahnenko, V.S. Stepashko. – Kiev: Naukova dumka, 1985. – 216 с.
12. Levin S. F. Teoriya stohasticheskoy kompaktnosti / S. F. Levin // Statisticheskij analiz i sintez sistem tehniceskogo obespecheniya ekspluatatsii. – Odessa: OVVKIU PVO, 1984. – С. 40-178.
13. Zalmanzon L.A. Preobrazovaniya Fure, Uolsha, Haara i ih primenenie v upravlenii, svyazi i drugih oblastyah / L.A. Zalmanzon. – М.: Nauka, 1989. – 496 с.
14. Oppengejm A.V., Shafer R.V. Cifrovaya obrabotka signalov / A.V.Oppengejm, R.V.Shafer. – М.: Svyaz, 1979. – 426 с.
15. Ribalchenko M.O., Yegorov O.P., Zvorikin V.B. Cifrova obrobka signaliv. Navchalnij posibnik. – Dnipro: NMetAU, 2018. – 79 с.
16. Voskobojnikov Yu.E., Gochakov A.V., Kolker A.B. filtraciya signalov i izobrazhenij: Fure i vejjvlet algoritmy (s primerami v Mathcad) / Yu.E. Voskobojnikov, A.V. Gochakov, A.B. Kolker. – Novosibirsk : NGASU, 2010. – 188 с.
17. Marchenko O.O., Rossada T.V. Aktualni problemi Data Mining: Navchalnij posibnik dlya studentiv fakultetu komp'yuternih nauk ta kibernetiki / O.O. Marchenko, T.V. Rossada. – Kiyiv: KNU im. Tarasa Shevchenka, 2017. – 150 с.
18. Anisimov A. V., Doroshenko A. Yu., Pogorilij S. D., Dorogij Ya. Yu. Programuvannya chislovih metodiv movoyu Python : pidruch. / A. V. Anisimov, A. Yu. Doroshenko, S. D. Pogorilij, Dorogij Ya. Yu. – К.: VidavnicHO-poligrafichnij centr "Kiyivskij universitet", 2014. – 640 с.
19. Dyakonov, V.P. Scilab: polnyj samouchitel / V.P. Dyakonov. – М.: DMK Press, 2012. – 768 с.
20. Chubukova I.O. Data Mining / I.O. Chubukova. Kiyiv: KNEU im. V. Getmana, 2016. – 326 с. [електронний ресурс] – Rezhim dostupu: http://kist.ntu.edu.ua/textPhD/Chubukova-Data_Mining.pdf.
21. Odegov N.A. Analysis of non-stationary quasi-periodic internet traffic by the method of instant spectra / Odegov N.A., Bahachuk D.H., Hordiienko O.O. // Naukoviyi праці ONAZ ім. О.С. Попова, 2019, № 1. – С. 121 – 134.
22. Odegov M.A. Metod selekciyi harmonijnih skladovih nestacionarnej modeli trafiku na velikih vuzlah obminu / Odegov M.A., Goriyednko O.O., Yur'yeva O.V. // Materiali XIV mizhnarodnoyi nauk.-tehn. konferenciyi "Vimiryuvalna ta obchislyuvalna tehnika v tehnologichnih procesah" (VOTTP-19), 14-19 chervnya 2019 r., Odessa (Zatoka). – С. 47 – 49.
23. Statistika trafiku u brazil'skij tochci obminu [elektronnij resurs] – Rezhim dostupu: <https://ix.br/agregado/>.
24. Statistika trafiku u berlinskij tochci obminu [elektronnij resurs] – Rezhim dostupu: <https://www.bcix.de/bcix/traffic/>.
25. Gonorovskij I.S. Radiotekhnicheskie cepi i signaly / I.S. Gonorovskij. – М.: Radio i svyaz, 1986. – 512 с.
26. Slavjanskij kalendar: mesyac 40 dnei, nedelya 9 dnei [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://derzhavarus.ru/kalendar-let-mesyac-nedelya.html>.

ПОЛІЩУК АНДРІЙ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7887-7169>e-mail: andrepol215@gmail.com**ПОЛІЩУК ОЛЕГ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-6623-2523>e-mail: opolishchuk71@gmail.com**ЛІСЕВИЧ СВІТЛАНА**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-5501-9038>e-mail: lisevichsv@gmail.com**ГОРЯЩЕНКО СЕРГІЙ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-6623-2523>e-mail: gsl7@ukr.net**УРБАНЮК ЄВГЕН**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-8713-501X>e-mail: urbanjuk@gmail.com

ТЕХНОЛОГІЯ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ ШВЕЙНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ У ВИТРАТНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ 3D-ДРУКУ

У статті описано перспективи використання полімерних відходів швейної промисловості для виготовлення готових виробів методом 3D-друку. Наведено загальну інформацію про відходи, що утворюються в процесі виготовлення готових виробів, зокрема про поліестер та нейлон. Дані матеріали використовуються у різних галузях промисловості для виготовлення готових виробів. Розглянуто їх різновиди та описано характеристики, переваги та недоліки. Наведено існуючі способи переробки відходів полімерних матеріалів, а також етапи виробництва з них полімерних гранул. Зазначено, що механічний рециклінг полімерів є одним із самих перспективних способів переробки відходів полімерних матеріалів. Запропоновано технологію переробки полімерних відходів у готову продукцію методом 3D-друку, яка скорочує кількість операцій для отримання готового виробу порівняно з існуючими. З метою подальших експериментальних досліджень підібрано текстильні матеріали з поліестеру та нейлону для подальшої переробки. Зазначено про актуальність розробки ефективних пристроїв для подрібнення відходів швейної промисловості та методик його проектування. Здійснено подрібнення полімерних відходів швейної промисловості з використанням експериментальної установки, яка дозволяє врахувати всі фактори, які мають вплив на даний процес. Наведено зразки подрібнених полімерних матеріалів. Здійснено підбір обладнання для екструзії подрібнених полімерів. Розроблено та виготовлено конструкцію шнеку екструзійної машини для подачі подрібненого полімеру у вигляді волокон, або малих кусків текстильного матеріалу. Проведено експериментальні дослідження по виготовленню філаменту для 3D-друку з подрібнених полімерів. Визначено оптимальні режими виконання даної технологічної операції на зазначеному устаткуванні. Підтверджено експериментально можливість повторної переробки подрібнених відходів полімерних матеріалів у готові вироби з використанням 3D-принтерів, що використовують в якості вихідної сировини гранули або подрібнені відходи полімерів.

Ключові слова: полімер, рециклінг, поліестер, екструзія, екструдер, 3D-друк, 3D-принтер.

POLISHCHUK ANDRII, POLISHCHUK OLEH, LISEVICH SVITLANA,
HORIASHCHENKO SERHIY, URBANIUK YEVENH
Khmelnytskyi National University

TECHNOLOGY OF WASTE PROCESSING OF THE CLOTHING INDUSTRY INTO CONSUMABLE MATERIALS FOR 3D PRINTING

The article describes the prospects of using polymer waste from the clothing industry for the manufacture of finished products by 3D printing. General information about waste generated in the process of manufacturing finished products, in particular about polyester and nylon, is provided. These materials are used in various industries for the manufacture of finished products. Their varieties are considered and their characteristics, advantages and disadvantages are described. The existing methods of processing waste polymer materials, as well as the stages of production of polymer granules from them, are given. It is noted that mechanical recycling of polymers is one of the most promising methods of processing waste polymer materials. The technology of processing polymer waste into finished products by the 3D printing method is proposed, which reduces the number of operations for obtaining a finished product compared to the existing ones. For the purpose of further experimental research, polyester and nylon textile materials were selected for further processing. The importance of developing effective devices for shredding garment industry waste and its design methods is noted. Grinding of polymer waste from the clothing industry was carried out using an experimental installation that allows taking into account all factors that have an impact on this process. Samples of crushed polymer materials are given. Selection of equipment for extruding crushed polymers has been carried out. The design of the screw of the extrusion machine for feeding crushed polymer in the form of fibers or small pieces of textile material was developed and manufactured. Experimental studies on the production of filament for 3D printing from crushed polymers have been conducted. The optimal modes of performing this technological operation on the specified equipment are determined. It has been experimentally confirmed the possibility of re-processing crushed polymer material waste into finished products using 3D printers that use

granules or crushed polymer waste as raw materials.

Keywords: polymer, recycling, polyester, extrusion, extruder, 3D printing, 3D printer

Вступ

Полімери - найпопулярніші матеріали у виробництві тари, упаковки, скотчу, пакувальної плівки, одягу, взуття та інших виробів. Широке застосування пластику створило проблему його накопичення, впоратися з якою можна лише налагодивши вторинну переробку, яка є основним, скоріше навіть єдиним, способом вирішення проблеми забруднення навколишнього середовища.

Сьогодні ця глобальна проблема може стати значним джерелом доходу та справжнім порятунком для всього живого. Важливо розуміти, що якщо не налагодити своєчасний процес збирання, сортування та переробки пластикових відходів, уже дуже скоро вони вийдуть далеко за межі сміттєвих полігонів.

Накопичення полімерних відходів - основний негативний вплив людини на довкілля. Прагнучи зробити сучасне життя простим і комфортним, про шкоду для природи люди замислюються в останню чергу. Проблема накопичення полімерних відходів сьогодні є особливо гострою через їх згубний вплив на довкілля та його мешканців (у тому числі й саму людину).

Без вирішення проблеми рециклінгу полімерних матеріалів неможливо вирішити екологічні проблеми будь-якої країни, більше того, інші способи утилізації таких відходів можуть лише погіршити ситуацію. Спалювання пластику в примітивних низькотемпературних установках і просто на звалищах призводить до виділення вкрай небезпечних для здоров'я речовин, насамперед діоксинів. Сучасні сміттєспалювальні заводи, що використовують піроліз, частково вирішують цю проблему. Кардинальним, і до того ж економічно вигідним її вирішенням є лише рециклінг.

Більше того, в результаті переробки різними методами утворюються додаткові продукти для інших галузей промисловості, природа забруднюється значно менше, а використання вторинних відходів дозволяє істотно скоротити використання первинної невідновлюваної сировини - нафти і газу, знизити споживання електроенергії і зменшити викиди вуглекислого газу. Таким чином, вторинна переробка полімерних матеріалів вносить свій внесок у протидію глобальному потеплінню.

Згідно зі статистичними даними, використання вторинної сировини у світі неухильно зростає. Це не дивно – запаси вторинної сировини за деякими показниками вже перевищують кількість наявних первинних матеріалів. Тому вчені всіх країн докладають значних зусиль до створення, розвитку та вдосконалення технологій переробки різних видів відходів.

Метою роботи є розробка технології переробки використаних виробів та відходів швейної промисловості у витратні матеріали для 3D-друку [1-5].

Об'єкт та методи дослідження

Об'єктом досліджень є процеси, що протікають під час подрібнення і екструзії подрібнених полімерних відходів швейної промисловості для виготовлення філаменту для 3D-друку. Теоретичні дослідження базуються на основних положеннях технології виробництв полімерних матеріалів.

Постановка завдання

Враховуючи актуальність питання створення нових технологій швидкого виробництва продукції, завданням досліджень є розробка вузлів та деталей обладнання для виготовлення готових виробів з подрібнених відходів швейної промисловості.

Результати та їх обговорення

Пластик – матеріал, який легко піддається переробці і може використовуватися в другому циклі без втрати основних властивостей. З вторинного пластику виробляють безліч предметів, необхідних у повсякденному житті. З них виготовляють: будівельні матеріали (черепицю, тротуарну плитку тощо); сумки, валізи та рюкзаки, які нічим не поступаються виробам із первинної сировини; спортивний інвентар, велосипеди тощо; пакети, пакувальні матеріали; одяг (костюми, куртки, футболки), взуття (спортивні кросівки); меблі (столи, стільці, лавки); дорожні покриття тощо.

Легка промисловість використовує для виготовлення одягу і предметів побуту різноманітні типи сировини. Лідируючі позиції у світі серед синтетичних полімерів займає поліестер (Polyester) та нейлон (Nylon).

Поліестер - волокна, які з'явилися завдяки активній еволюції нафтопереробної галузі. Це різновид синтетичного матеріалу. Ззовні він нагадує тонку вовну, але за споживчими властивостями є ближчим до бавовни. Даний матеріал виготовляється з розплаву поліетилентерефталату – міцного, зносостійкого термопластика, що є гарним діелектриком.

Одним із різновидів поліестерного волокна є лавсан.

Поліестер є найпоширенішим та сучасним матеріалом, який використовується для створення синтетичних тканин різних видів. Цей матеріал почали активно використовувати в легкій промисловості лише на початку 60-х років XX століття. Його використовують при пошитті повсякденного одягу та аксесуарів: штанів, спідниць, суконь, плащів, пальто, курток, спортивних костюмів, футболок, шортів, нашивок, краваток тощо. З поліестеру виготовляють домашній текстиль, в тому числі постільну білизну, фіранки, скатертини. Тканина підходить і для перетягування меблів. Це економічно вигідно, так як поліестер коштує недорого – дешевше, ніж інші матеріали для оббивання.

Багато предметів туристичного та рибальського спорядження, починаючи з захисних чохлах і

закінчуючи лежаками, виготовляються саме з цього матеріалу. З нього виробляють тенти, намети та спальні мішки.

З цієї ж тканини, тільки іншої щільності, виготовляються медичні плівки і укривні матеріали для садівників. У харчовій промисловості застосовується як матеріал для фільтрування розчинів. Затребуваний даний синтетичний матеріал у взуттєвій промисловості, а також при виробництві спецодягу.

Нейлон – це тривіальна назва синтетичного волокна, яке виготовляють із поліаміду (ПА). Це загальна назва сімейства синтетичних полімерів, що складаються з поліаміду, які являють собою ланки, що повторюються, пов'язані амідними зв'язками. Представляє собою термопластичний матеріал, який зазвичай виготовляється з нафти. Його можна переробляти у розплавленому вигляді у волокна, плівки або формувати у формі необхідні вироби. Нейлонові полімери можна змішувати з різними добавками для отримання матеріалів із заданими властивостями.

Існує багато типів нейлонових полімерів серед яких найбільш поширеними є: нейлон 1.6; нейлон 4.6; нейлон 510; нейлон 6; нейлон 6.6 та інші.

Нейлон 1.6. Має високу вологопоглинаючу здатність через значну щільність амідних залишків у полімері. Нейлон 1.6 зазвичай не використовується для виготовлення тканин.

Нейлон 4.6. Має більш високу температуру плавлення в порівнянні з іншими типами нейлону. В основному його використовують як компоненти двигунів (трансмисії, гальма, системи повітряного охолодження). Його перевагами є більш висока температура теплової деформації, більш висока кристалічність в порівнянні з деякими типами нейлону.

Нейлон 510. Він має чудові властивості, але його виробництво є коштовнішим. Виробництво тканин із цього полімеру не здійснюється. Використовується в більшості випадків в машинобудівній промисловості та в виготовленні різноманітних дослідних зразків. До його переваг можна віднести міцність і довговічність. До недоліків відноситься висока вартість виробництва.

Нейлон 6. Волокна нейлону 6 міцні, мають високу міцність на розтяг, еластичність і блиск. Його температура плавлення становить 215 °С. Застосовується у багатьох галузях промисловості, зокрема: автомобільній, електронній, електротехнічній, авіабудуванні, швейній промисловості тощо.

Переваги нейлону 6 полягають у тому, що його волокна не зминаються і мають високу стійкість до стирання та впливу хімічних речовин, таким як кислоти та луги. Недоліком є те, що його відносно важко переробляти через виключно низьку в'язкість розплаву.

Нейлон 6.6. Він є більш кристалічною версією нейлону 6. Його також називають поліамідом 66 або ПА 66. Він має поліпшені механічні властивості завдяки його більш впорядкованій молекулярній структурі. Нейлон 6.6 для механічної обробки має покращену термостійкість і нижчі показники водопоглинання порівняно зі стандартним нейлоном 6. Застосування нейлону 6.6 включає зносостійкі накладки, напрямні колеса та підшипники ковзання. Його переваги полягають у тому, що межа текучості вище, ніж у нейлону 6 і нейлону 610. Він має високу міцність, ударну в'язкість, жорсткість і низький коефіцієнт тертя в широкому діапазоні температур. Крім того, він стійкий до впливу мастил, хімічних реагентів та розчинників. Недоліками нейлону 6.6 є його висока гігроскопічність, знижена в'язкість в сухому середовищі, складність контролю процесу формування.

Нейлон 66 (анід), зазвичай, випускається у вигляді моноволокна або комплексних ниток. Використовується при виготовленні панчішно-шкарпеткових виробів, штучного хутра тощо. Щільність нейлону даного типу становить 1.14. Це найпоширеніший поліамід, об'єм якого на ринку становить понад 40 %.

Найчастіше для лиття пластмас під тиском використовується нейлон типу PA6 і PA66. Нейлон має гарну міцність, жорсткість, термостійкість, зносостійкість і змашувальні властивості, а також хімічну стійкість до вуглеводнів.

Крім того, нейлон має відносно низьку вартість порівняно з характеристиками технічних полімерів, простий в обробці і може бути армований скловолокном або вуглецевим волокном для підвищення механічних і термічних властивостей.

Через широкий спектр властивостей даний матеріал знайшов використання в різних галузях промисловості. В швейній промисловості, завдяки різній щільності, жорсткості та призначенню використовуються різні марки нейлону.

Розглянемо основні види поліамідних тканин, що використовуються:

- нейлон 7 – властивості тканини можна порівняти з попереднім різновидом, а саме нейлоном 66, проте цей вид більш еластичний та міцний. Відомий як енант;
- капрон – еластичний різновид, що знайшов широке застосування у виробництві одягу та аксесуарів. Температура плавлення - 215 °С;
- ундекан або рильсан – еластичне поліамідне волокно, що широко використовується при виготовленні плащів;
- нейлон 4 або 40d – відомий як ріпстоп. Комбінована тканина з армованої нитки із нейлоном. Має високу міцність на розрив;
- балістичний нейлон – різновид ріпстопу. Виготовляється з 1050D або 840D ниток. Використовується при виготовленні військового одягу та бронежилетів. Балістик захищає військових від осколкових поранень та вибухової хвилі. На сьогодні все більше замінюється кевларом;
- нейлон 600D – тонкий і легкий різновид. Використовується переважно для пошиття рюкзаків;

- нейлон PA12 – покращений різновид аніду, відомий як нейлон водонепроникний. Нейтральний до дії розчинників та солей. Міцний та зносостійкий, але має меншу температуру плавлення – 178 °С;

- шовний нейлон - матеріал, що використовується в хірургії. З нього виготовляють нитки, якими скріплюють рани та постопераційні шви;

- спандекс – повністю синтетичний матеріал, за основу якого береться нейлон, ацетат та інші полімери. Цей легкий, еластичний матеріал використовується у багатьох сферах, починаючи від оббивки меблів та закінчуючи медичними рукавичками;

- велсофт – міцна тканина, виготовлена із поліаміду. Для синтетичних виробів нового покоління було розроблено та протестовано нову технологію виробництва надтонких волокон з максимальним діаметром 0,06 міліметрів.

Широка гамма готових виробів із поліестеру та нейлону піднімає питання їх подальшої утилізації після періоду експлуатації чи переробки у готові вироби.

Поліестерні волокна не піддаються біологічному розкладанню. Наприклад, в одязі їх кількість складає близько 16%. Однією з переваг таких волокон є те, що їх можна переробити в первинні (нові) волокна.

Більшість виробів легкої промисловості досі викидають та спалюють на сміттєспалювальних заводах, або вони потрапляють на сміттєзвалища. Серед них є вироби, які вміщують поліестерні (лавсанові) та нейлонові волокна.

Переробка також стикається з низкою проблем, а це означає, що в усьому світі лише менше одного відсотка всіх матеріалів, які використовуються в одязі, переробляються знову в одяг. Це відображає відсутність технологій їх подальшої переробки. Крім того, існуючі технології, які дозволяють переробляти одяг на первинні волокна, все ще недосконалі. Тому актуальною задачею є створення технології переробки виробів, що вміщують поліестерні або нейлонові волокна у нові готові вироби.

Однією із переваг є те, що при нагріванні поліестер та нейлон плавляться, і якщо їх пропускати через дрібні отвори, то виходять тоненькі цівки. При охолодженні вони застигають і утворюють нитки.

На сьогодні існує п'ять способів переробки полімерних матеріалів.

Піроліз – вплив на речовину температурою з киснем або без нього.

Гідроліз – спосіб переробки за допомогою екстремально високих температур та тиску. На виході виходить якісніша сировина, ніж при використанні піролізу.

Гліколіз – спосіб, в якому застосовуються дуже високі температури та тиск з використанням етиленгліколю та каталізатора, що допомагає отримати чистий та якісний продукт.

Метаноліз – переробка пластикових відходів за допомогою метанолу. Цей спосіб найпоширеніший.

Механічний рециклінг – це метод, суть якого полягає в механічному подрібненні пластикових відходів з метою подальшої термічної обробки.

Всі ці способи мають загальну мету – отримання якісної сировини, яку можна було б використовувати у виробництві. Однією з затребуваних форм сировини є пластикова гранула.

Вторинна гранула – це результат переробки первинного пластику, тобто пластикових відходів. Сьогодні пластикова гранула – це основний матеріал для виробництва різних пластикових виробів. Технологія гранулювання пластику досить проста і не надто затратна, тому багато компаній спеціалізуються на переробці пластику в гранули.

Переробка пластику в гранули відбувається поетапно:

1. Сортування. Відходи поділяються за виглядом та кольором – цей етап, як правило, виконується вручну.

2. Дроблення. Подрібнення відсортованих відходів у спеціальному дробильному устаткуванні.

3. Очищення та промивання. Отриману подрібнену сировину ретельно промивають та очищують від домішок.

4. Сушіння. Отримана на попередніх етапах суміш добре просушується.

5. Нагрівання. Суху масу нагрівають до відповідної температури. Температура нагрівання залежить від виду полімеру.

6. Формування. Маса витискається через спеціальні ниткоподібні отвори методом екструзії.

7. Охолодження. Після витискання маса відразу поміщається у холодну воду.

8. Формування гранул. Отримані після охолодження нитки нарізуються на гранули.

Альтернативний спосіб – це метод гарячого різання, в якому відразу після витискання масу нарізають на гранули, минаючи етап охолодження.

9. Виготовлення готового виробу.

Необхідність переробки пластикових відходів викликана не лише великою кількістю сміття, а й потребою багатьох сучасних підприємств у вторинній сировині. Таким чином, бізнес, побудований на переробці пластикових відходів та виготовленні вторинної сировини, сьогодні є одним із найперспективніших.

Завдяки своїм фізичним та хімічним властивостям, пластик, як вже зазначалося вище, може проходити нескінченну кількість циклів виробництва та переробки. Розробка нових технологій та обладнання для переробки допоможуть вирішити проблему надлишків пластикових відходів, а в перспективі, усунути необхідність виробництва нового пластику.

Пропонується нова технологія переробки полімерних відходів у готові вироби методом 3D-друку, що включає в себе:

1. Сортування.
2. Дроблення.
3. Очищення та промивання.
4. Сушіння.
5. Нагрівання подрібненого матеріалу в екструдері 3D-принтера та екструзія розплавленого полімеру.
6. Формування готового виробу. Маса витискається через сопло екструдера та пошарово формується готовий виріб.

Деякі подрібнені матеріали можуть не потребувати виконання операцій 3 і 4. Таким чином скорочується кількість операцій для отримання готового виробу.

З метою подальших експериментальних досліджень було підібрано текстильні матеріали з поліестеру та нейлону.

Розробка ефективного подрібнюючого пристрою для переробки відходів легкої промисловості і надалі залишається актуальною. Існують багато пристроїв для переробки вторинних відходів, але всі вони мають свої недоліки, що не дозволяє зробити процес подрібнення простим та ефективним. Основною проблемою проєктування подрібнюючих пристроїв є недосконалість розроблених методик розрахунку конструкцій обладнання, а також технологічного процесу.

Для подрібнення полімерних відходів легкої промисловості використано експериментальну установку, яка дозволяє реалізувати процес подрібнення текстильних матеріалів з можливістю врахування всіх факторів, які впливають на даний процес. Конструкція установки допускає змінювати, в певних межах, технологічні та конструктивні параметри, що дозволяє досліджувати їх вплив на процес подрібнення і здійснити необхідні вимірювання. Але основним є те, що вона дозволяє регулювати величину волокна, яке буде отримане після процесу подрібнення. Це питання є актуальним при використанні в якості вихідної величини для 3D-друку.

В якості зразків при проведенні експериментальних досліджень процесу подрібнення волокнистих полімерних відходів використовувалися відходи із текстильних матеріалів, які утворилися методом розкרוю деталей виробів із настилу. Для подрібнення було використано зразки таких матеріалів як лавсан та нейлон.

Використовуючи експериментальну установку, що представлена на рис.4, було проведено подрібнення вибраних матеріалів. Отримані зразки представлено на рис.1.



а



б

Рис. 1. Зразки подрібнених полімерів: а - поліестер (лавсан); б - нейлон

З метою проведення пошукового експерименту для підтвердження того, що подрібнені відходи полімерних матеріалів піддаються повторному розплавленню було використано машину для екструзії, що представлена на рис.2.

Екструзійна машина складається з наступних частин: корпусу із системою нагріву (1) до необхідної температури плавлення полімеру; вузла завантаження (2) через який попередньо підготовлений подрібнений полімер поступає в порожнину корпусу; порожнини корпусу із шнеком для переміщення сировини від вузла завантаження до формуючої насадки; приводу шнека; екструзійної головки (рис.3); системи охолодження і намотування філаменту (рис.4); системи контролю і керування, яка підтримує необхідний технологічний режим.



Рис. 2. Екструзійна машина: 1 - корпус з системою нагріву; 2 - блок завантаження



Рис. 3. Екструзійна головка



Рису. 4. Системи охолодження та намотування полімерної нитки

Було розроблено та виготовлено конструкцію шнеку для подачі подрібненого полімеру у вигляді волокон, або малих кусків текстильного матеріалу.

Система контролю і керування включає в себе: кнопку вмикання живлення екструдера; кнопку подачі живлення на нагрівач; кнопку запуску мотор-редуктора шнека для подачі гранул із бункера в камеру плавлення; кнопку вмикання системи подачі та намотування полімерної нитки. В систему керування пристрою також входить термоконтролер, що регулює температуру сопла та зони плавлення. Система дозволяє регулювати частоту обертання шнека, швидкість підтягування та намотування нитки.

Принцип роботи екструдера полягає в наступному. Після нагріву до потрібної температури екструзії вибраного подрібненого полімерного матеріалу здійснюється витримка 5-10 хвилин з метою прогрівання матеріального циліндра зсередини. Після цього вмикається мотор-редуктор. Полімерний матеріал у вигляді подрібнених відходів попередньо висушується для видалення вологи в сушильній шафі, а потім засипається у бункер екструдера. Пластик з наповненого бункера захоплюється шнеком і надходить в робочу зону корпусу екструдера, де під дією тиску, тертя і тепла, що надходить ззовні нагрівається і плавиться до стану необхідного за умовами технологічного процесу. Розплавлений полімер шнеком подається в бік фільтри. За рахунок форми шнека у циліндрі в зоні виходу розплавленого полімеру створюється тиск, що спонукає матеріал «набухати» після виходу із екструдера. Вихідний отвір екструзійної головки регулює діаметр полімерної нитки.

Витиснена нитка подається через примусову систему охолодження і рівномірно намотується на

катушку (рис.4).

Серед інших параметрів, що характеризують подрібнені полімерні матеріали, а саме лавсан і нейлон є їх температура плавлення. Температура плавлення - це температура, при якій матеріал подається з фільтри екструзійної машини. Ця температура є індивідуальною для кожного матеріалу. При екструзії необхідно як можна точніше притримуватися відповідного значення, щоб отримати вироби з очікуваними фізичними, механічними і температурними властивостями. Для цього в литевій машині чи 3D-принтері повинна бути правильно задана температура плавлення.

З метою визначення оптимальної температури плавлення полімерів, що розглядаються було проведено експериментальні дослідження.

Невідповідність температури в екструдері оптимальній температурі плавлення полімеру приводило до виникнення різноманітних дефектів: недоплавлення; перегріву; забивання фільтри тощо (рис.5).



Рис. 5. Дефекти нагріву полімерів

В результаті досліджень було визначено оптимальні температури плавлення для: поліестеру - 235 °С; для нейлону – 245 °С.

Приклад якісного видавлювання розплавленого нейлону через фільтру екструзійної машини



Рис. 6. Видавлювання розплавленого нейлону через фільтру екструзійної машини

Висновки

Проведені експериментальні дослідження підтвердили можливість повторної переробки подрібнених відходів полімерних матеріалів у готові вироби з використанням 3D-принтерів, що використовують в якості вихідної сировини гранули або подрібнені відходи полімерів [1, 5].

З цією метою необхідно розробити конструкцію 3D-принтера, провести процес друку на ньому готових виробів та дослідити їх властивості.

Література

1. Зозуля П.Ф., Поліщук О.С., Поліщук А.О. Перспективи застосування 3D-друку в легкій промисловості. Вісник Хмельницького національного університету. 2017. № 4. – С. 102-104, (Україна).
2. Зозуля П.Ф., Поліщук О.С., Неймак В.С., Поліщук А.О. Застосування технології 3D-друку у взуттєвій промисловості. Наукові нотатки. Луцький національний університет, 2019. – Випуск №67. – С.48-52, (Україна).
3. O. Polishchuk, M. Bonek, M. Skyba, A. Polishchuk, S. Lisevich Prospects of using composite filaments with high metal content for manufacture of industrial machine building products method of 3d printing. Monograph: editer by Musial J., Polishchuk O., Skyba M. Bydgoszcz, Poland, 2021. – P.390-396, (in Poland).
4. Zozulia P., Pyshcheniuk N., Skyba M., Polishchuk O., Malec M. General classification of 3D printing. Analytical study of a device for loading of pet bottles in rotary crushers. Actual problem of modern science. Monograph: editer by Musial J., Polishchuk O., Sorokatyi R. Bydgoszcz, Poland, - 2017. - P.413-421, (in Poland)
5. Поліщук О.С., Зозуля П.Ф., Поліщук А.О. Узагальнена класифікація філаментів для 3D-друку, Вісник Хмельницького національного університету. 2017. № 6. – С. 51-59,(Україна).

References

1. Zozulya P.F., Polishchuk O.S., Polishchuk A.O. Prospects for the use of 3D printing in light industry. Bulletin of Khmelnytskyi National University, 2017. № 4. – P. 102-104, (in Ukraine).
2. Zozulya P.F., Polishchuk O.S., Nejmak V.S., Polishchuk A.O. Application of 3D printing technology in the footwear industry. Scientific notes. Lutsk National University, 2019. – Issue №67. – P.48-52, (in Ukraine).
3. O. Polishchuk, M. Bonek, M. Skyba, A. Polishchuk, S. Lisevich Prospects of using composite filaments with high metal content for manufacture of industrial machine building products method of 3d printing. Monograph: editer by Musial J., Polishchuk O., Skyba M. Bydgoszcz, Poland, 2021. – P.390-396, (in Poland).
4. Zozulia P., Pyshcheniuk N., Skyba M., Polishchuk O., Malec M. General classification of 3D printing. Analytical study of a device for loading of pet bottles in rotary crushers. Actual problem of modern science. Monograph: editer by Musial J., Polishchuk O., Sorokatyi R. Bydgoszcz, Poland, - 2017. - P.413-421, (in Poland)
5. Polishchuk O.S., Zozulya P.F., Polishchuk A.O. Generalized classification of filaments for 3D printing. Bulletin of Khmelnytskyi National University, 2017. № 6. – P. 51-59.

ПІЩУН ОЛЕГ

Західноукраїнський національний університет
ORCID ID: [0000-0003-0280-8786](https://orcid.org/0000-0003-0280-8786)
o.pitsun@wunu.edu.ua

ПРИШЛЯК КАТЕРИНА

Західноукраїнський національний університет
ORCID ID: [0000-0002-0351-3528](https://orcid.org/0000-0002-0351-3528)
katyapryshliak@gmail.com

КАЛІНОВСЬКИЙ РОМАН

Західноукраїнський національний університет
ORCID ID: [0000-0002-6119-6807](https://orcid.org/0000-0002-6119-6807)
asp20_kalinovskui_rm@asp.ua

ПОВОРОЗНИК ВІТАЛІЙ

Західноукраїнський національний університет
ORCID ID: [0009-0006-5325-1585](https://orcid.org/0009-0006-5325-1585)
asp21_povoroznyk_vs@mm.com

МІКРОСЕРВІСНА АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ ОПРАЦЮВАННЯ ІМУНОГІСТОХІМІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Процес діагностування захворювань раку є складним та трудомістким. Додатково даний процес потребує організації взаємодії між декількома командами лікарів-діагностів. Підходів до постановки діагнозу також є декілька, тому розробка системи підтримки прийняття рішень, що дозволяє взаємодіяти декільком учасникам є актуальною задачею. На даний момент широко використовується постановка діагнозу на основі імуногістохімічних та гістологічних зображень з використанням наперед визначених правил діагностування. Ключову роль в даному процесі відіграє лікар-діагност, який володіє необхідними знаннями, вміннями та компетенцією. Розробка автоматизованої системи визначення кількісних характеристик імуногістохімічних зображень, таких як відносна площа ядер клітин та інтенсивність забарвленості цих клітин дозволить пришвидшити процес опрацювання стеку зображень. Розробка зручного графічного інтерфейсу для лікарів дозволить зробити систему підтримки прийняття рішень більш зручною та інтуїтивно зрозумілою. При розробці комп'ютерних систем для діагностування захворювань на основі зображень необхідно враховувати велику кількість обмежень, зокрема потужності робочих станцій, механізми спільного захищеного доступу тощо. Використання мікросервісної архітектури стало активно впроваджуватись останнім часом, особливо в системах що потребують значних обчислювальних ресурсів та ресурсів пам'яті. Принцип мікросервісної архітектури полягає у розділенні програми або системи на сукупність невеликих сервісів, які об'єднані між собою з допомогою мережових технологій.

У даній роботі авторами розроблено і представлено мікросервісну архітектуру веб-системи для перегляду досліджень на основі імуногістохімічних зображень, що складається з окремих модулів для безперервної та надійної роботи в межах лабораторії. Ключовою особливістю даної розробки є наявність сучасного графічного інтерфейсу для лікарів без необхідності наявності спеціальних навиків для керування дослідженнями та наявність модулю автоматичного опрацювання імуногістохімічних зображень.

Ключові слова: імуногістохімічні зображення, мікросервіси, веб-система.

PITSUN OLEH Y., PRYSHLIAK KATERYNA M., KALINOVSKYI ROMAN M., POVOROZNYK VITALIY S.
West Ukrainian National University

MICROSERVICE ARCHITECTURE OF THE IMMUNOHISTOCHEMICAL IMAGE PROCESSING SYSTEM

The process of diagnosing cancer is complex and time-consuming. In addition, this process requires the organization of interaction between several teams of doctors - diagnosticians. There are also several approaches to making a diagnosis, so the development of a decision support system that allows several participants to interact is an urgent task. Currently, diagnosis based on immunohistochemical and histological images using predetermined diagnostic rules is widely used. A key role in this process is played by a diagnostician who has the necessary knowledge, skills and competence. The development of an automated system for determining the quantitative characteristics of immunohistochemical images, such as the relative area of cell nuclei and the intensity of staining of these cells, will allow speeding up the image stack processing process. The development of a user-friendly graphical interface for doctors will make the decision support system more convenient and intuitive. A large number of constraints must be taken into account when developing computer systems for image-based disease diagnosis, including workstation capacities, shared secure access mechanisms, etc. The use of microservice architecture has been actively implemented recently, especially in systems that require significant computing and memory resources. The principle of microservice architecture consists in dividing programs or systems into a set of small services that are connected to each other using network technologies.

In this work, the authors developed and presented a microservice architecture of a web system for viewing studies based on immunohistochemical images, consisting of separate modules for continuous and reliable work within the laboratory. The key feature of this development is the presence of a modern graphical interface for doctors without the need for special skills to manage studies and the presence of a module for automatic processing of immunohistochemical images.

Keywords: immunohistochemical images, microservices, web system.

Постановка проблеми

Сучасні медичні комп'ютерні системи характеризуються використанням комплексу програмних

частин, які виконують завдання на різних платформах залежно від задач. Також останнім часом стало все популярніше використовувати RESTfull API інтерфейс у складних системах. Наразі найзручнішим підходом до візуалізації результатів дослідження є використання веб-інтерфейсу, однак обробку великих масивів даних краще здійснювати не на веб серверах, а на окремих станціях чи принаймні персональних комп'ютерах. Також вагомим фактором є наявність спільної бази даних для можливості керування записами в системах телемедицини.

Об'єкт досліджень – мікросервісна архітектура обміну даними в системі діагностування на основі зображень.

Предмет досліджень – методи організації передачі даними в багатоклієнтській медичній системі.

Для досягнення мети необхідно виконати такі завдання:

- дослідити існуючі системи діагностування на основі біомедичних зображень;
- розробити окремі модулі для опрацювання імуногістохімічних зображень, формування результатів та візуалізації;
- розробити підхід до спільного доступу до ресурсу учасниками комп'ютерної системи;

Аналіз останніх джерел

Із розвитком та появою бібліотек машинного навчання для опрацювання великої кількості даних різко зросла кількість нових програмних комплексів для допомоги лікарям у діагностування захворювань. Розглянемо програмні та програмно-апаратні комплекси, які використовуються в медицині для діагностування ракових захворювань. Стан та перспективи розвитку систем автоматизованої мікроскопії наведено у роботі [1].

Аналіз сучасних підходів до розробки систем опрацювання зображень в медицині, зокрема в системах підтримки прийняття рішень розглянуто у роботах [2–5]. Особливістю даних програмних засобів є необхідність у розробці алгоритмів для опрацювання зображень в ручному та автоматизованому режимах. Програмний комплекс Visiopharm розроблено для виявлення пухлини на препаратах молочної залози, пофарбованих ER, PR і Ki-67. Ця програма автоматично визначає та чітко окреслює ділянки пухлини на слайдах тканини молочної залози, пофарбованих ER, PR та Ki-67. Програма заснована на технології штучного інтелекту/поглибленого навчання та була навчена обробляти великі варіації слайдів зображень, включаючи дані з різних сайтів, сканерів, маркерів, постачальників і клонів. Дані для розробки було створено за допомогою захищеного патентом Visiopharm методу VirtualDoubleStaining™ (VDS), і таким чином було ідентифіковано справжні ділянки пухлини на основі онкомаркера, що усуває суб'єктивність [6].

Augmentiqs дозволяє користувачам інтегрувати та розгортати бажане програмне забезпечення на основі штучного інтелекту та аналізу зображень безпосередньо в мікроскопії як плагін без необхідності попереднього опрацювання зображення, сканування чи оцифровки предметного скла. Структура Open API, унікальна для Augmentiqs, у поєднанні з концепцією платформи наразі підтримує алгоритми ImageJ, QuPath, Mindpeak і AIRA Matrix, але розроблена для розгортання будь-якої програми III або аналізу зображень безпосередньо з мікроскопа [7]. Augmentiq відкриває можливість покращити клінічні результати використовуючи зразки тканини молочної залози ER/PR, Ki67 та Her2/neu.

Leicabiosystems [8] надають можливості для розгортання лабораторії діагностування раку на основі опрацювання зображень. Розробники роблять акцент на використанні алгоритмів комп'ютерного зору.

Breast AI надає хмарні рішення штучного інтелекту для виявлення раку молочної залози та персоналізованої оцінки ризику [9]. Це рішення надає радіологам ключову інформацію, таку як надійність виявлення ураження та показники випадків, що допомагає визначити пріоритетність пацієнтів, прийняти клінічне рішення та може допомогти зменшити виснаження лікаря.

Компанія «EpreDia» [10] надає програмні рішення та оснащує патологів і вчених у доклінічних і клінічних лабораторіях потужною технологією глибокого навчання та хмарними технологіями для вдосконалення завдань аналізу зображень і робочих процесів. Надає додаткову інформацію з цифрових слайдів, щоб допомогти патологам і вченим виконувати діагностичну роботу.

Програмний комплекс HIAMS [11] володіє функціоналом для опрацювання гістологічних та цитологічних зображень на основі елементів глибокого навчання, зокрема згорткових нейронних мереж.

Метою роботи є розробка веб-модуля діагностування на основі імуногістохімічних зображень з елементами мікросервісної архітектури.

Основний матеріал

Порівняльний аналіз сучасних систем що використовуються для діагностування, використовуючи імуногістохімічні дослідження наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз систем діагностування на основі імуногістохімічних зображень
(+ наявний функціонал, +/- функціонал не присутній в базовій комплектації, - відсутній функціонал)

| Критерій | Visiopharm | Augmentiqs | Leicabiosys tems | epredia | ImageJ | HIAMS |
|--|------------|------------|---------------------|---------|--------|-------|
| Алгоритми попереднього оброблення | + | + | + | + | + | + |
| Алгоритми сегментації | + | + | + | + | + | + |
| Ручна обробка зображень | + | + | + | + | + | + |
| Цитологія | + | + | + | + | +/- | + |
| Eg (біомаркер естроген) | + | + | +/- | +/- | - | - |
| Pg (біомаркер прогестерон) | + | + | +/- | +/- | - | - |
| KI-67 | + | + | +/- | +/- | - | - |
| HER2/n | + | + | +/- | +/- | - | - |
| API для взаємодії зі сторонніми сервісами | + | + | +/- | +/- | - | +/- |
| Наявність графічного інтерфейсу виводу результатів | + | + | + | + | +/- | + |

З вищенаведеної таблиці можна зробити висновок, що не всі сучасні системи діагностування мають у своєму складі необхідний функціонал для аналізу імуногістохімічних зображень.

Мікросервісна архітектура системи діагностування

У даному підрозділі запропоновано мікросервісну архітектуру для розробленої системи діагностування на основі імуногістохімічних зображень. Використання мікросервісної архітектури стало активно впроваджуватись останнім часом, особливо в системах що потребують значних обчислювальних ресурсів та ресурсів пам'яті. Принцип мікросервісної архітектури полягає у розділенні програми або системи на сукупність невеликих сервісів, які об'єднані між собою з допомогою мережових технологій. Найчастіше взаємодія між сервісами відбувається на основі технологій HTTP, gRPC, AMQP.

Активне впровадження та використання мікросервісної архітектури сприяло появі DevOps – спеціаліст, які займають розгортанням та супроводом програмного забезпечення. Використання мікросервісів дозволяє значно скоротити час внесення змін в програмний код, зокрема немає необхідно оновлювати весь проект на сервері, можна оновити конкретний модуль, наприклад модуль опрацювання біомедичних зображень.

Мікросервісна архітектура особливо актуально застосовувати в системах діагностування захворювань. Адже, в більшості випадків такі системи включають в себе функціонал для зручного керування дослідження у вигляді веб-ресурсу, а також програмні модулі для опрацювання вхідних даних, наприклад широкоформатних зображень. До того ж зараз практично не можливо уявити програму без елементів штучного інтелекту, а такі модулі вимагають наявності великого набору обчислювальних ресурсів. На рисунку 1 наведено структуру мікросервісної архітектури для системи діагностування на основі імуногістохімічних зображень.

Графічний інтерфейс для керування дослідженнями розроблено у вигляді веб-сайту з розподілом доступу до ресурсів. Такий підхід дозволяє забезпечувати безпеку до систему та надавати спільний доступ до бази записів. На рівні веб сервера реалізовано RESTfull API, що дозволяє передавати дані із підпрограм, які можуть знаходитись на інших комп'ютерах. На рівні веб-сервера знаходиться база даних для зберігання усіх записів та результатів досліджень.

Модуль опрацювання зображень встановлюється на кожному комп'ютер у лабораторії для проведення обчислень над імуногістохімічними зображеннями. Процес опрацювання зображень потребує багато ресурсів, тому здійснювати обчислення над ними практично неможливо реалізувати на одному сервері.

Модуль штучного інтелекту встановлюється на окремі машини для здійснення класифікації та автоматичної сегментації. Механізм обміну даними із модулем керуваннями дослідженнями також реалізовано з допомогою RESTfull API.

Застосунок опрацювання імуногістохімічних зображень

Даний застосунок розміщується на персональному комп'ютері кожного лаборанта, таким чином використовуючи ресурси кожної робочої станції не навантажуючи основний сервер. Основні функції застосунку:

- завантаження стеку імуногістохімічних зображень;
- попереднє оброблення зображень (покращення якості);

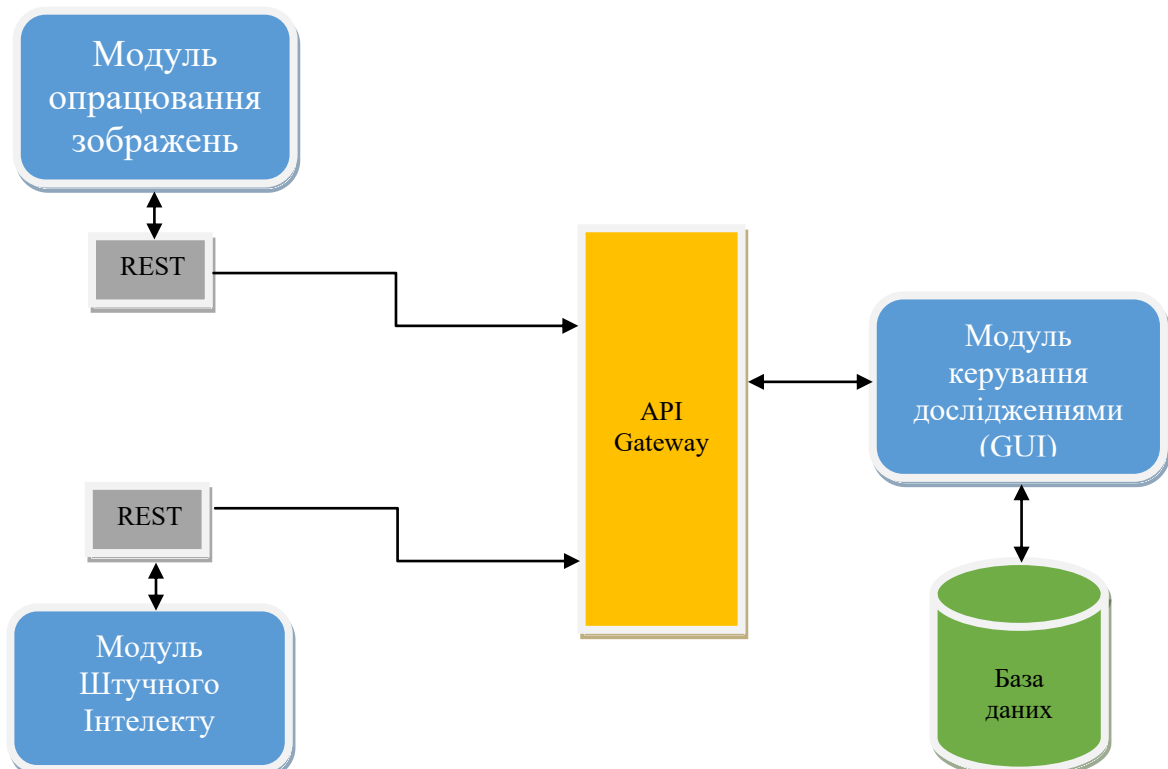


Рис. 1. Мікросервісна архітектура системи діагностування на основі імуногістохімічних зображень

- автоматична сегментації для відділення ядер клітин від фону;
- обчислення кількісних характеристик ядер клітин (відносна площа, рівень насиченості);
- формування результату;
- відправлення даних про дослідження на сервер з допомогою RESTfull API.

Приклади імуногістохімічних зображень наведено на рисунку 2.

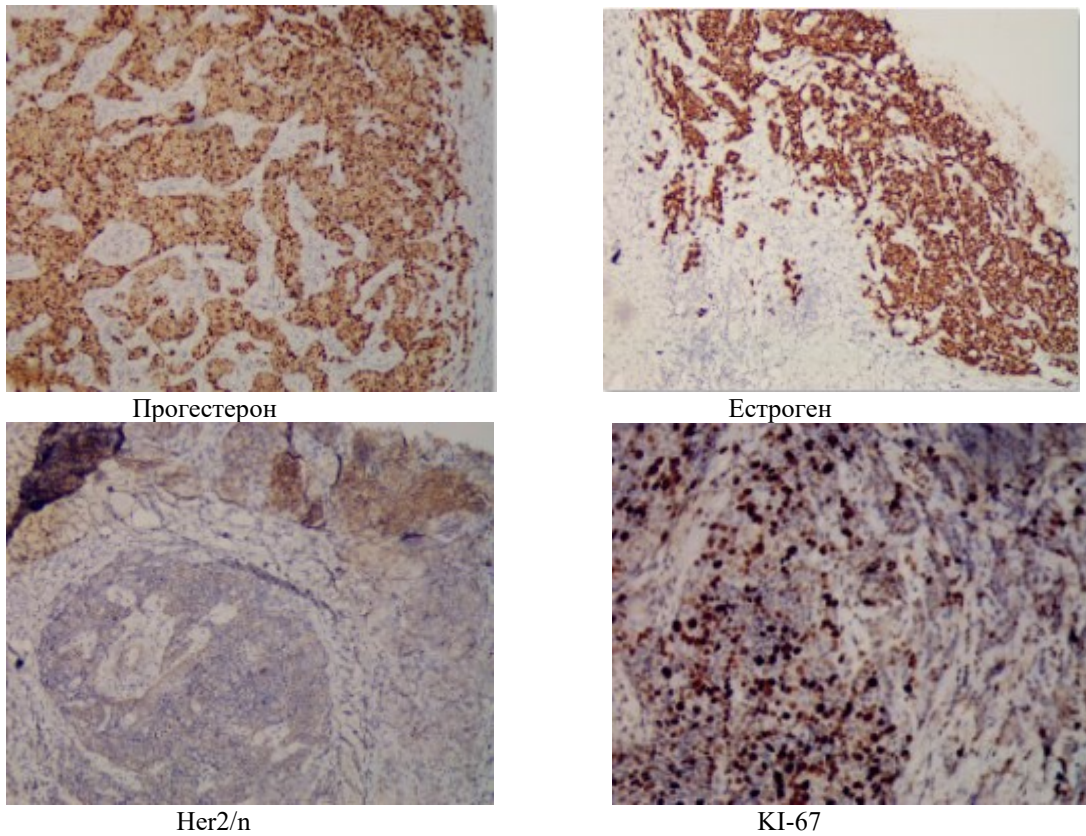


Рис. 2. Приклади імуногістохімічних зображень

Розглянемо процес сегментації зображень. Представимо сегментацію методом водорозподілу так:

$$Im^I = \alpha * Im$$

де Im – вхідне зображення, Im^I – результуюче зображення.

Кожний тип зображення унікальний, тому експериментальним чином підібрано нижній (T_L) і верхній (T_H) поріг сегментації для конкретного типу зображень.

На наступному етапі відбувається обчислення відношення площі позитивних клітин в полі зору до площі вікна поля зору.

$$\delta_s = \frac{S_p}{S_w}, 0 \leq \delta_s \leq 1$$

де S_p – площа позитивних клітин в полі зору, S_w – площа вікна поля зору.

На наступному етапі потрібно обчислити коефіцієнт інтенсивності забарвлення ядер клітин. Для цього необхідно накласти зображення, отримане після сегментації на вхідне зображення і обчислити інтенсивність виділених областей (ядер клітин).

На основі чотирьох біомаркерів визначається молекулярно-генетичний підтип раку молочної залози. Детальніше алгоритм описано в роботі [12].

На рисунку 3 наведено діаграму класів застосунку для опрацювання зображень.

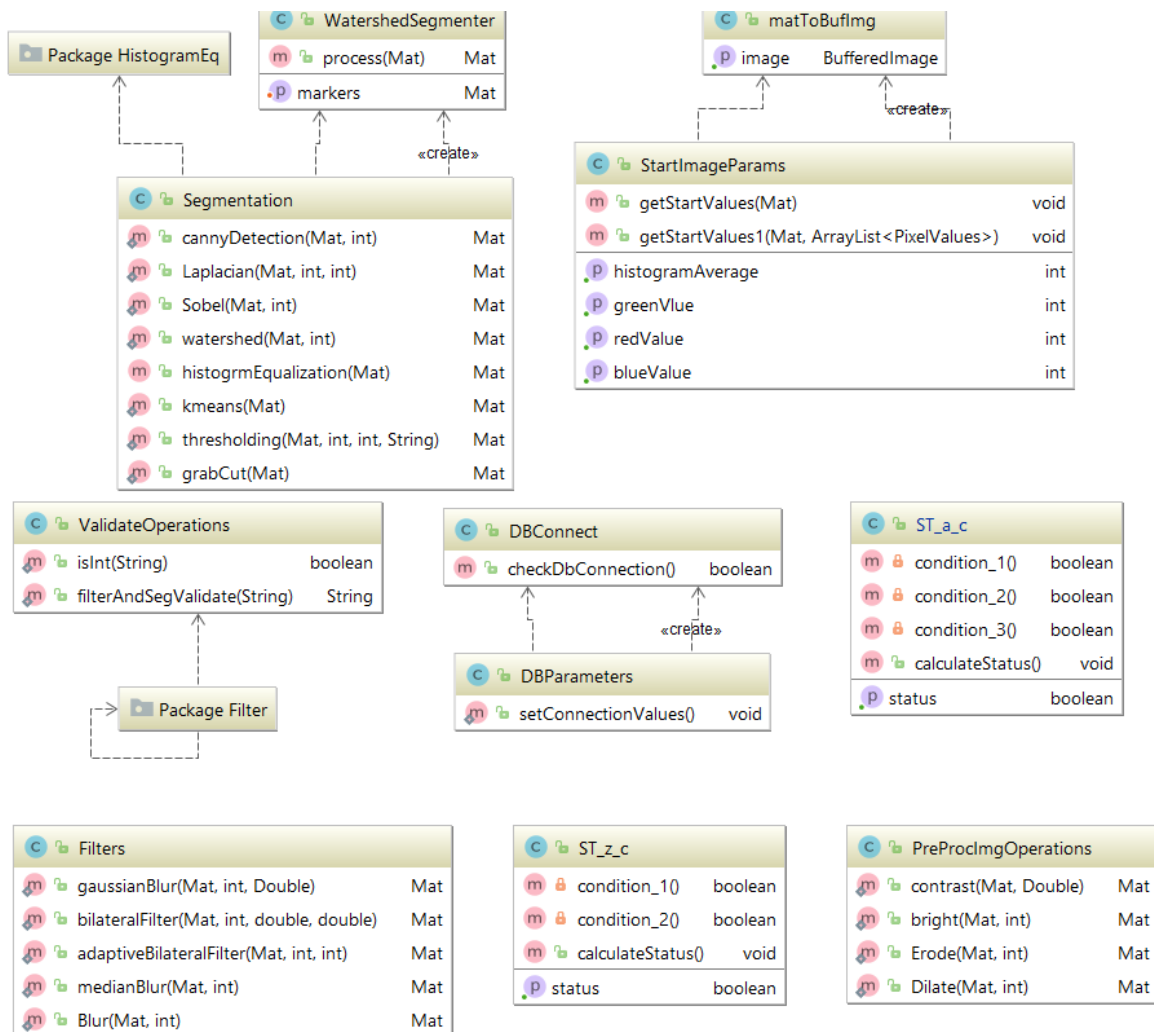


Рис. 3. Діаграма класів застосунку для опрацювання зображень

Приклад програмного коду для відправлення запитів до основного веб-сервера з результатами опрацювання зображень:

```

URL url = new URL("http://www.diagnosis.ai-tern.in.ua/api/posts/store");
URLConnection http = (URLConnection)url.openConnection();
http.setRequestMethod("POST");
http.setDoOutput(true);
http.setRequestProperty("Authorization", "Bearer <<Code>>");
http.setRequestProperty("Content-Type", "application/x-www-form-urlencoded");
    
```


Для формування результатів дослідження необхідно використовувати прикладне програмне забезпечення, написане на мові програмування Java. Такий підхід обумовлено такими причинами:

- Обробка великої кількості зображень потребує наявності значних ресурсів, а веб-браузер не дозволяє цього.
- Імуногістохімічні зображення є великими за розміром, що унеможлиблює їх опрацювання у веб-браузері.
- Веб інтерфейс відповідає за відображення результатів досліджень та їх менеджмент, а прикладна програма за обробку зображень

Результати досліджень

Розроблена система для моніторингу та зберігання результатів діагностування підтипу раку працює таким чином:

1. На сторінці відображаються проведені дослідження

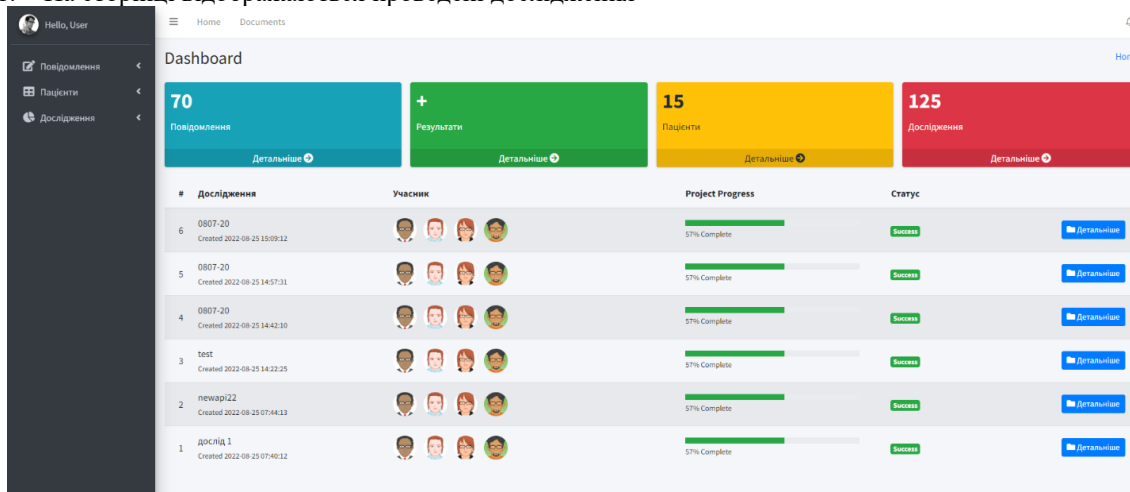


Рис. 7. Головна сторінка перегляду досліджень

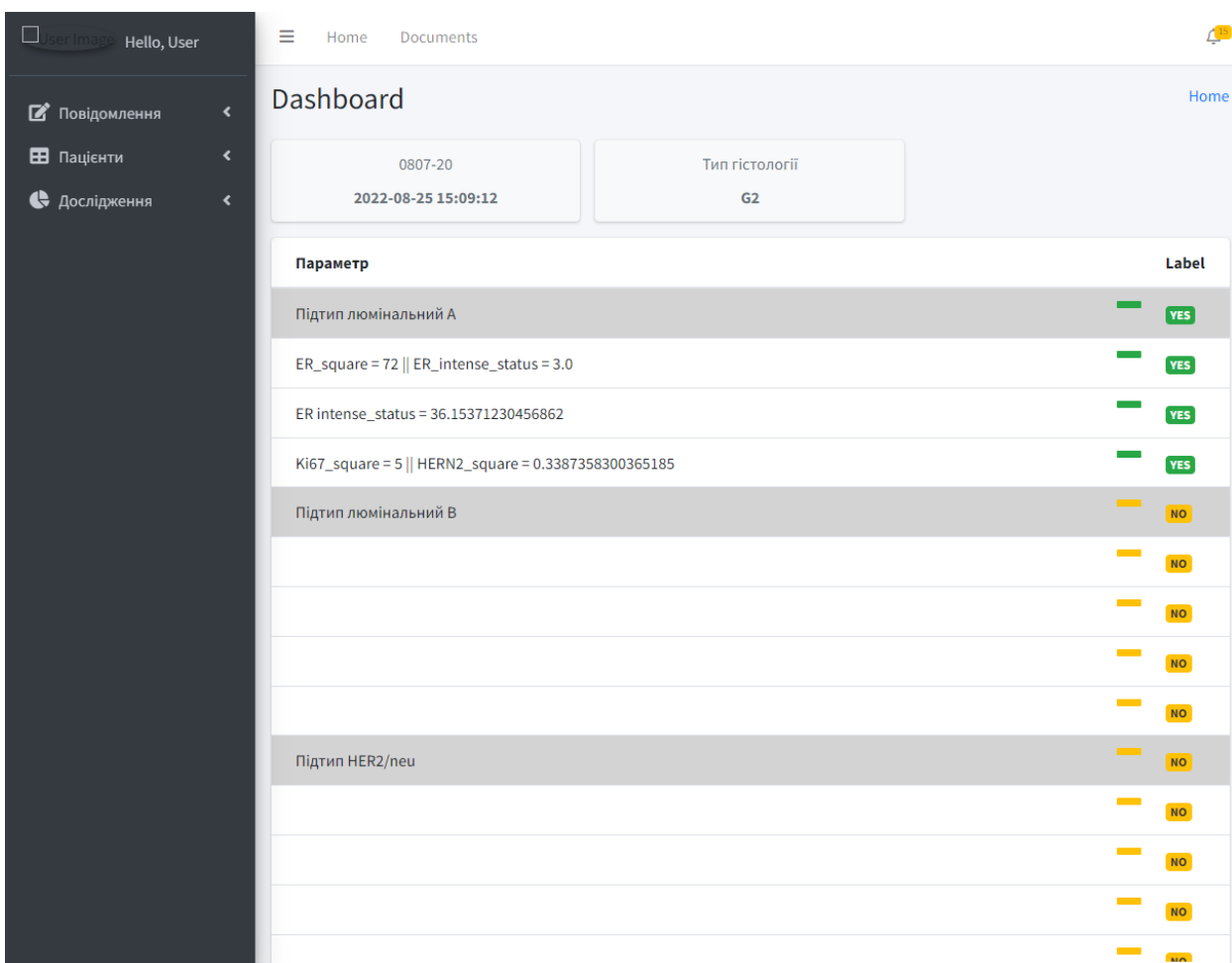


Рис. 8. Сторінка детального перегляду досліджень

На даній сторінці відображається бокове меню зі списком доступних опцій. У верхній частині сторінки відображається блок з інформацією про роботу системи, зокрема про кількість проведених досліджень тощо. Також у системі передбачено можливість обміну повідомленнями між учасниками. Кожне дослідження має власну назву, унікальний ідентифікатор, дату формування дослідження, список учасників, посилання на сторінку детального перегляду.

2. Переглянути детальний результат проведення досліджень можна перейшовши за посиланням «Детальніше»

На даній сторінці відображається бокове меню із списком доступних опцій. У головній частині сторінки відображається інформація про назву дослідження та час його створення. Також відображається інформація про тип гістології (G1, G2, G3).

У головній частині сторінки відображається інформація про підтипу раку та умови за якими визначають підтип раку детального висвітлення показників, у стрічці відображаються значення параметри, наприклад ER_sqaure – це відносна площа зафарбованої області зображення до загальної площі зображення. Приставка «ER» означає, що задіяно естроген, «PR» – прогестерон. Приставка «ER_intense_status» характеризує значення інтенсивності зображення.

У правій частині кожного дослідження відображено його статус: «зелений» – результат відповідає умові правил, тобто наприклад площа входить в діапазон допустимих значень; «жовтий» – результат не відповідає умові.

Таке візуальне представлення результатів дослідження допоможе візуально відділити позитивні результати від негативних.

Висновки

Отже, у даній роботі на основі аналітичного підходу проведено аналіз сучасних програмно-апаратних комплексів для діагностування захворювань раку на основі біомедичних, зокрема імуногістохімічних зображень, що дозволило виділити їх переваги та недоліки та врахувати при розробці власної веб-системи. Порівняльний аналіз показав що найширшим функціоналом володіють програми Visiopharm та Augmentiqs.

Розроблено структуру мікросервісної архітектури, що включає модуль веб-інтерфейсу для зручного керування дослідженнями, модуль опрацювання імуногістохімічних зображень з елементами попереднього оброблення, сегментації, виділення кількісних ознак із зображень.

Розроблено механізм автоматичного обміну даними між модулем опрацювання зображень, який працює на рівні персонального комп'ютера в лабораторії та передає дані на веб-сервер для зручного виводу інформації про дослідження зі спільним доступом. Додатково передбачено механізм захисту даних (результатів досліджень) на основі технології JWT токенів.

Література

1. Березький О.М., Піцун О.Й., Вербовий С.О. Системи автоматизованої мікроскопії: стан та перспективи розвитку. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2016. № 2 (235). С. 61–68.
2. Zebari, D. A., Ibrahim, D. A., Zeebaree, D. Q., Haron, H., Salih, M. S., Damaševićius, R., & Mohammed, M. A. (2021). Systematic review of computing approaches for breast cancer detection based computer aided diagnosis using mammogram images. *Applied Artificial Intelligence*, 35(15), 2157-2203.
3. Moon, W. K., Lee, Y. W., Ke, H. H., Lee, S. H., Huang, C. S., & Chang, R. F. (2020). Computer - aided diagnosis of breast ultrasound images using ensemble learning from convolutional neural networks. *Computer methods and programs in biomedicine*, 190, 105361.
4. Tanaka, H., Chiu, S. W., Watanabe, T., Kaoku, S., & Yamaguchi, T. (2019). Computer-aided diagnosis system for breast ultrasound images using deep learning. *Physics in Medicine & Biology*, 64(23), 235013.
5. Raghavendra, U., Gudigar, A., Rao, T. N., Ciaccio, E. J., Ng, E. Y. K., & Acharya, U. R. (2019). Computer-aided diagnosis for the identification of breast cancer using thermogram images: A comprehensive review. *Infrared Physics & Technology*, 102, 103041.
6. Visiopharm. URL: <https://visiopharm.com/>
7. Augmentiqs.Main page. URL: <https://www.augmentiqs.com/>
8. Leicabiosystems. URL: <https://www.leicabiosystems.com/digital-pathology/>
9. Arterys. Breast AI. URL: <https://www.arterys.com/breast-women-radiology-ai-platform>
10. EpreDia. Digital Pathology. URL: <https://epredia.com//digital-pathology-workflow/>
11. Batko Y., Melnyk G., Pitsun O. Graphical interface of hybrid intelligent systems for biomedical imaging analysis. *Proceedings of the 2016 IEEE First International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP) 23-27 August, 2016, Lviv, Ukraine*, pp. 121-124 doi: 10.1109/DSMP.2016.7583521
12. Berezsky, Oleh, Oleh Pitsun, Grygoriy Melnyk, Tamara Datsko, Ivan Izonin, and Bohdan Derysh. 2023. An Approach toward Automatic Specifics Diagnosis of Breast Cancer Based on an Immunohistochemical Image. *Journal of Imaging* 9, no. 1: 12. <https://doi.org/10.3390/jimaging9010012>

References

1. Berezkyi O.M., Pitsun O.I., Verbovyi S.O. Systemy avtomatyzovanoi mikroskopii: stan ta perspektyvy rozvytku. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. 2016. № 2 (235). S. 61–68.
2. Zebari, D. A., Ibrahim, D. A., Zeebaree, D. Q., Haron, H., Salih, M. S., Damaševičius, R., & Mohammed, M. A. (2021). Systematic review of computing approaches for breast cancer detection based computer aided diagnosis using mammogram images. *Applied Artificial Intelligence*, 35(15), 2157-2203.
3. Moon, W. K., Lee, Y. W., Ke, H. H., Lee, S. H., Huang, C. S., & Chang, R. F. (2020). Computer-aided diagnosis of breast ultrasound images using ensemble learning from convolutional neural networks. *Computer methods and programs in biomedicine*, 190, 105361.
4. Tanaka, H., Chiu, S. W., Watanabe, T., Kaoku, S., & Yamaguchi, T. (2019). Computer-aided diagnosis system for breast ultrasound images using deep learning. *Physics in Medicine & Biology*, 64(23), 235013.
5. Raghavendra, U., Gudigar, A., Rao, T. N., Ciaccio, E. J., Ng, E. Y. K., & Acharya, U. R. (2019). Computer-aided diagnosis for the identification of breast cancer using thermogram images: A comprehensive review. *Infrared Physics & Technology*, 102, 103041.
6. Visiopharm. URL: <https://visiopharm.com/>
7. Augmentiqs. Main page. URL: <https://www.augmentiqs.com/>
8. Leicabiosystems. URL: <https://www.leicabiosystems.com/digital-pathology/>
9. Arterys. Breast AI. URL: <https://www.arterys.com/breast-women-radiology-ai-platform>
10. EpreDia. Digital Pathology. URL: <https://epredia.com/digital-pathology-workflow/>
11. Batko Y., Melnyk G., Pitsun O. Graphical interface of hybrid intelligent systems for biomedical imaging analysis. Proceedings of the 2016 IEEE First International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP) 23-27 August, 2016, Lviv, Ukraine, pp. 121-124 doi: 10.1109/DSMP.2016.7583521
12. Berezsky, Oleh, Oleh Pitsun, Grygoriy Melnyk, Tamara Datsko, Ivan Izonin, and Bohdan Derysh. 2023. An Approach toward Automatic Specifics Diagnosis of Breast Cancer Based on an Immunohistochemical Image. *Journal of Imaging* 9, no. 1: 12. <https://doi.org/10.3390/jimaging9010012>

РОМАНЕНКО АНТОН

Національний технічний університет України
«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID ID: [0009-0007-9266-0207](https://orcid.org/0009-0007-9266-0207)
e-mail: anton.romanenko14@gmail.com

КОРОТКИЙ ЄВГЕН

Національний технічний університет України
«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID ID: [0000-0001-8302-4873](https://orcid.org/0000-0001-8302-4873)
e-mail: korotkiy.eugene@gmail.com

КОНТРОЛЕР ВУЗЛА APRS МЕРЕЖІ

Запропоновано рішення на основі APRS технології для альтернативного зв'язку між користувачами в умовах "блекауту", за відсутності покриття глобального зв'язку. Описано структуру та принцип дії технології APRS. Розглянуто процес проектування та конфігурування контролера вузла мережі APRS, а також використання APRS для передачі даних між мобільними пристроями. Запропоноване рішення являє собою блок контролера вузла APRS мережі, що приєднується до рації через аудіо гарнітуру. Взаємодія розробленого контролера вузла мережі APRS з мобільними пристроями користувача виконується через бездротове з'єднання з застосуванням послідовного порту Bluetooth. Апаратна частина реалізована на базі доступного мікроконтролера серії ESP32, що знижує час впровадження рішення, завдяки доступності та низькій вартості складових. Проєкт реалізовано на базі відкритого програмного забезпечення, що дозволяє модифікувати алгоритм роботи під визначені задачі, зокрема адаптувати контролер для керування віддаленими системами.

Ключові слова: APRS, ESP32, AFSK, частотна маніпуляція, радіо гарнітура.

ROMANENKO ANTON

National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

KOROTKIY IEVGEN

National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

TERMINAL NODE CONTROLLER FOR APRS NETWORK

A solution based on APRS technology is proposed for alternative communication between users in "blackout" conditions, in the absence of global communication coverage. The structure and operation principle of APRS technology are described. The process of designing and configuring the controller of the APRS network node is considered, as well as the use of APRS for data transmission between mobile devices. In particular, the frame format of the AX.25 protocol used in APRS, the KISS protocol for data transmission from the client mobile device through the serial interface, and the implementation of the physical layer of APRS, including AFSK modulation/demodulation and scrambling, are discussed. The proposed solution is an APRS network node controller, which is connected to the walkie-talkie radio via an audio headset port. Interaction between the developed APRS network node controller and user mobile devices is carried out via a wireless connection using a Bluetooth serial port. The hardware is based on the affordable ESP32 microcontroller series, which reduces the time of solution implementation due to the availability and low cost of components. The schematic solutions used to connect to the walkie-talkie's headset are described. The project is implemented based on the open-source ESP32TNC software, which allows modifying the operation algorithm for specific tasks, including adapting the controller for remote system control. A prototype of the proposed solution has been created. Oscillogram and spectrum measurements of the AFSK-modulated signal were performed for the developed prototype. Using the developed solution, maximum communication distance was measured in a densely built-up city, namely in the Dniprovskiy District of Kyiv. During the research, APRSdroid was used as client software, and Baofeng UV-5R was used as the walkie-talkie radio with a declared transmission power of 5 W.

Keywords: APRS, ESP32, AFSK, frequency-shift keying, walkie-talkie.

Постановка проблеми

Людство у значній мірі залежить від електроенергії. На сьогодні це сучасний стандарт життя, без якого неможливо уявити світ. Ми використовуємо енергоресурси в будь-якій галузі, від побутових потреб до виробництва та науки.

Від наявності електроенергії залежать безпека та комфорт людей. Якщо електроживлення відключається на тривалий час, можуть виникнути серйозні проблеми, такі як відсутність водопостачання, відсутність опалення та кондиціонування повітря, зупинка роботи лікарень, промислових підприємств та інші негативні наслідки. Саме із такою проблемою населення України зіштовхнулося восени 2022-го року.

Наслідки ворожих атак по енергетичній інфраструктурі країни привели до проблем зв'язку. Відсутність резервного живлення у інтернет провайдерів позбавляє на час «блекауту» (англ. Blackout – аварійні відключення електроживлення) людей доступу до глобальної мережі інтернет. У регіонах з аварійними відключеннями електроенергії базові станції операторів мобільного зв'язку або знеструмлюються і вимикаються, або перевантажуються внаслідок надмірної кількості запитів від абонентів.

У відновленні комунікацій допомагають термінали супутникового зв'язку. Так у великому попиті стали системи Starlink компанії "SpaceX". Їх використання значно полегшило проблему передачі інформації

на час відсутності послуг зв'язку від інтернет провайдерів та мобільних операторів. Єдиною проблемою такого рішення є висока ціна: вартість терміналу від 500\$ та місячна абонплата порядку 100\$. Для постійного зв'язку з глобальною мережею Інтернет це один із найдоступніших варіантів. Однак якщо потрібне з'єднання із декількома абонентами, що можуть знаходитись у радіусі району або міста, на допомогу приходять радіоаматорські технології. Сучасні можливості дозволяють будувати радіомережі як на локальному, так і на глобальних рівнях. Однією із таких технологій є APRS.

Метою даної роботи є дослідження технології радіозв'язку APRS та розробка базового терміналу для побудови локальних радіомереж (рис. 1). Запропоноване рішення дозволить реалізувати зв'язок з віддаленим терміналом у іншої людини шляхом передачі цифрових повідомлень з використанням доступних аматорських радіостанцій.



Рис. 1. Приклад використання APRS в умовах відсутності глобального зв'язку. Комунікація трьох APRS станцій у місті, коли внаслідок щільної забудови та низької потужності антени передавача одна з рацій не може встановити зв'язок з іншими клієнтами

Аналіз APRS технології

APRS[1] – це акронім до назви Automatic Packet Reporting System, що є системою автоматичного пакетного обміну інформацією через радіоканал. Кожен пакет має у своїй структурі системну інформацію про адреси приймача та передавача, тип пакету (інформаційний чи системний), тип протоколу, що лежить в основі пакету, безпосередньо дані та контрольну суму для перевірки цілісності даних.

Особливість пакетного радіо полягає в тому, що воно дозволяє передавати данні в повітрі з високою точністю та надійністю. Технологія дозволяє передавати інформацію на великі відстані, що досягається збільшенням потужності радіостанції і стає у нагоді в ситуаціях, коли потрібно забезпечити зв'язок на віддалених територіях, де немає іншого доступного зв'язку. Технологія дозволяє передавати дані будь-якого формату. Зазвичай APRS використовують для передачі місцезнаходження та метеоданих, але протокол AX.25, що лежить в основі пакетної передачі APRS дозволяє передавати будь-які дані. Для цивільного населення можлива передача у відкритому радіочастотному діапазоні від 144 до 148 МГц, та від 430 до 450 МГц.

Протокол передачі AX.25 [2] – це протокол каналного рівня за моделлю OSI, що призначений для встановлення з'єднання між вузлами, виявлення помилок передачі, інкапсуляції корисної інформації. У структурі кадру протоколу містяться поля преамбули та постамбули, які використовуються для синхронізації та повідомлення про початок передачі даних чи кінець кадру. Поле адреси містить інформацію про приймач та передавач кодування яких можливе літерами та цифрами. Часто використовують радіоаматорські позивні на зразок DP0MIR, UZ3AK. Поле керування визначає тип кадру (інформаційний, керування, нумерований). У інформаційному кадрі присутнє поле протоколу, для визначення наявності мережевого рівня. Корисна інформація містить дані прийняті від користувача для передачі. Присутня також контрольна сума, за алгоритмом шістнадцятибітного циклічного надлишкового коду для перевірки цілісності переданого кадру.

У випадку передачі байту, який відповідає коду преамбули чи постамбули, для уникнення помилок комунікації у випадку коли передавач фіксує передачу послідовності з п'яти одиниць, додається додатковий нульовий біт, тим самим дозволяючи уникнути послідовності 0x7E що відповідає початку чи кінцю кадру. У приймачі після отримання послідовності п'яти бітів логічної одиниці видаляється наступний біт, тим самим повертаючи інформацію у початкову послідовність.

Таблиця 1

Формат кадру протоколу AX.25

| Тип кадру | Структура кадру | | | | | | |
|-----------------|-----------------|---------|----------------|---------------------------|--------------------|-----------------|------------|
| | Преамбула | Адреса | Поле керування | Поле визначення протоколу | Корисна інформація | Контрольна сума | Постамбула |
| Кадр інформації | 0x7E | 112 біт | 8 біт | 8 біт | N * 8 біт | 16 біт | 0x7E |
| Кадр керування | Преамбула | Адреса | Поле керування | | Корисна інформація | Контрольна сума | Постамбула |
| | 0x7E | 112 біт | 8 біт | | N * 8 біт | 16 біт | 0x7E |

Для налагодження радіомережі користувачу необхідна рація та пристрій, що забезпечує інтерфейс між клієнтом та радіоапаратурою. Таким пристроєм виступає контролер вузла APRS мережі (англ. terminal node controller, TNC)[4]. У провідних раціях, наприклад Motorola (DP4800E) та Anytone (AT-D878UVII), наявний вбудований термінал, що дозволяє використовувати лише рацію для передачі APRS повідомлень. В бюджетних варіантах рацій існує можливість імплементувати TNC, як додатковий зовнішній модуль. Зазвичай TNC під'єднують до комп'ютера (або мобільного пристрою) через послідовний порт. Рацію під'єднують до TNC через інтерфейс аудіо гарнітури. Задача TNC контролера приймати дані від клієнту (комп'ютера), переформатувати їх у відповідний пакет AX.25, забезпечити модуляцію, кодування і скремблювання та видати на аудіо гарнітуру рації. А також забезпечити приймання модульованого сигналу з аудіо гарнітури рації, демодуляцію/декодування бітового потоку прийнятого повідомлення і його передачу на клієнт. В TNC підтримуються наступні типи модуляції: Frequency Shift Keying (FSK), Phase Shift Keying (PSK) та Audio Frequency Shift Keying (AFSK), які використовують для передачі цифрових даних через радіоканал.

Передачу даних на TNC термінал від клієнту можливо реалізувати через протокол KISS TNC [3]. Протокол реалізований для стандартизації процесу передачі даних та інтерфейсу зв'язку клієнту та контролера вузла. Стандарт протоколу відповідає передачі кадрів AX.25 через послідовний порт (наприклад, UART, RS-232). Протокол може працювати у двох режимах: керування та передача. Початок кадру (преамбула) передається для синхронізації та інформування контролера вузла про початок передачі нового кадру. Поле команди передається для визначення типу кадру, та порту передачі TNC. Далі передається корисна інформація у вигляді кадру протоколу AX.25, а саме поля адреси, керування та даних. Постамбула визначає кінець кадру.

Таблиця 2

Формат кадру передачі інформації протоколу KISS TNC

| Структура кадру | | | |
|-----------------|---------|----------------------|------------|
| Преамбула | Команда | Корисна інформація | Постамбула |
| 0xC0 | 1 байт | Кадр протоколу AX.25 | 0xC0 |

Передача інформації на фізичному рівні

Для передачі інформації через радіоканал використовується модуляція несучого гармонічного сигналу корисними даними. У APRS системах на фізичному рівні використовується частотна маніпуляція (англ. Frequency Shift Keying) (рис. 2).

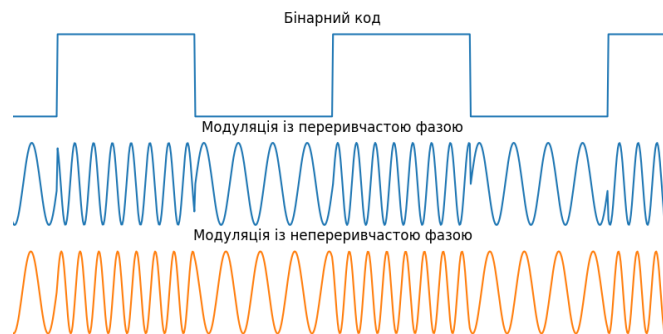


Рис. 2. Форма FSK модульованого сигналу отримана із вхідного бінарного коду

Даний метод цифрової модуляції полягає у зміні частоти несучої радіо хвилі для передачі цифрових повідомлень. У FSK дві різні частоти гармонічного коливання використовуються для кодування двох цифрових значень (0 та 1). У APRS застосовано стандарт аудіо частотної маніпуляції (англ. Audio Frequency Shift Keying, AFSK), кодування відбувається у двох аудіо тонах з різними частотами (1200 Гц та 2200 Гц), оскільки передача модульованих сигналів виконується через інтерфейс аудіо гарнітури рації.

Реалізувати FSK модулятор можна використовуючи два окремих генератори гармонічного сигналу, налаштованих на частоти логічного нуля та одиниці. Шляхом мультиплексування сигналів від генераторів відповідно до значень бітів модулюючої послідовності формується сигнал на виході модулятора. Такий підхід відомий, як частотний модулятор із переривчастою фазою (рис. 3). Також існує реалізація із непереривною фазою на єдиному генераторі з цифровим керуванням (англ. Numerically-controlled oscillator, NCO), інкремент фази якого змінюється залежно від значення біту, що передається. Для радіо зв'язку важливим аспектом є обмеження ширини спектру випромінюваного сигналу. В реалізації модулятора з розривом фази має місце розширення спектру сигналу, тоді як генератор на базі NCO дозволяє звужити спектр модульованого сигналу.

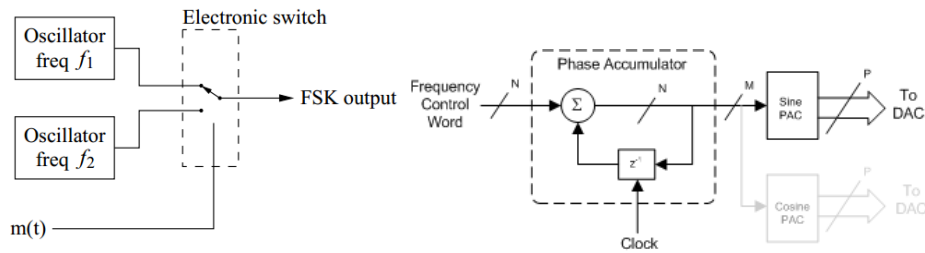


Рис. 3. Два типи FSK модуляторів: у лівій частині FSK модулятор з розривами фази, у правій частині FSK модулятор з неперервною фазою на основі гармонічного осцилятора з цифровим керуванням

Існує ряд методів демодуляції FSK модульованого сигналу. Найбільш поширеними є синхронний та асинхронний демодулятори (рис. 4).

Ідея асинхронного методу полягає у відсутності синхронізації із несучою частотою прийнятого радіо сигналу. Отриманий сигнал пропускають через два смугових фільтри для виділення гармонічних сигналів, що відповідають логічному нулю та логічній одиниці. Далі обробка ділиться на дві гілки: обробка гармонічного сигналу, що відповідає логічній одиниці, з виходу відповідного смугового фільтру та обробка гармонічного сигналу, що відповідає логічному нулю з виходу відповідного смугового фільтру. Сигнал з виходу кожного смугового фільтру проходить через відповідний детектор огинаючої для перетворення гармонічного сигналу в постійний рівень сигналу. На кінцевому етапі знаходять значення демодульованого біту, як різницю значень на виходах детекторів огинаючої обох гілок. Перевагою асинхронного демодулятора є простота реалізації.

У синхронному демодуляторі виконується підлаштування до несучої частоти прийнятого модульованого сигналу, що дозволяє підвищити якість демодуляції врахувавши відстройку по частоті викликану не ідеальністю генераторів опорної частоти передавача і приймача. Підлаштування по частоті зазвичай реалізується з використанням блоку фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ). Синхронний демодулятор складніший в реалізації, однак дозволяє зменшити кількість бітових помилок для випадків високого рівня завад в каналі зв'язку та низької потужності прийнятого сигналу.

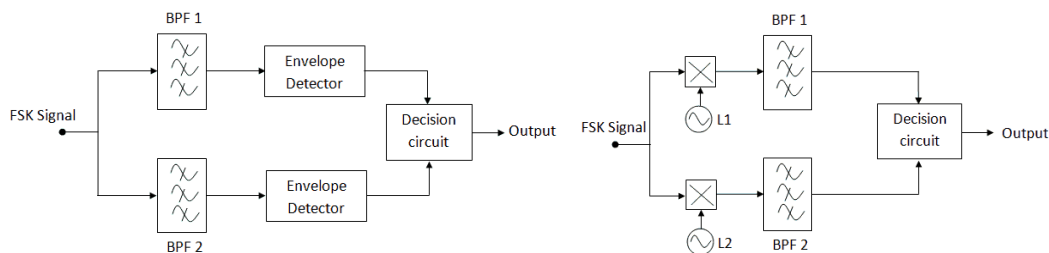


Рис. 4. Два типи FSK демодуляторів: зліва асинхронний демодулятор, справа синхронний демодулятор

Для зменшення ймовірності помилок передачі бітів можливе використання додаткового кодування інформації [8]. Під час радіопередачі сигнал може зазнавати різноманітних спотворень, таких як відбивання від поверхонь, розсіювання, згасання та інші ефекти, що можуть призвести до помилок під час демодуляції. Для зменшення впливу згаданих ефектів можливе застосування кодування. Зокрема, до методів підвищення завадостійкості відносять скремблювання (англ. Scrambling) та інвертоване кодування без повернення до нуля (англ. Non-Return-to-Zero Inverted). У випадку застосування кодування результуючий бітовий потік змінюється залежно від використаного способу кодування. У приймачі відповідно потрібно забезпечити декодування демодульованої бітової послідовності.

Принцип скремблювання полягає у кодуванні кадру даних у псевдо-випадкову послідовність бітів тієї ж довжини, що дозволяє підвищити якість синхронізації передавача і приймача. Існує два основних типи скремблерів: адитивний, мультиплікативний (рис. 5).

Адитивні скремблери виконують додавання за модулем два вхідного біту даних із бітом отриманим з генератора псевдо-випадкової послідовності бітів, побудованого, наприклад, на основі регістру зсуву з лінійним зворотним зв'язком (англ. Linear Feedback Shift Register, LFSR). У генератор завантажується початкове значення яке потім є і ключем для декодування (дескремблювання) інформації на приймачі. Особливістю такого підходу є уникнення залежності генератора від вхідного біту, що знижує вплив інформаційних бітів на згенеровану псевдовипадкову послідовність. При роботі з таким типом генератора потрібно зберігати ключ генерації та постійно завантажувати згаданий ключ в LFSR на початку операцій кодування/декодування.

Мультиплікативне скремблювання полягає у відсутності потреби зберігати ключ генерації, оскільки псевдовипадкова послідовність визначається бітами вхідного потоку даних. Такий тип скремблерів використовується у сфері телекомунікацій (мобільний зв'язок, супутниковий зв'язок, цифрове телебачення, тощо). У випадку бітових помилок при демодуляції є ймовірність хибного декодування сигналу.

Додатковою перевагою кодування є захист від несанкціонованого доступу до інформації, оскільки

не знаючи алгоритм кодування стає складно декодувати кадр інформації.

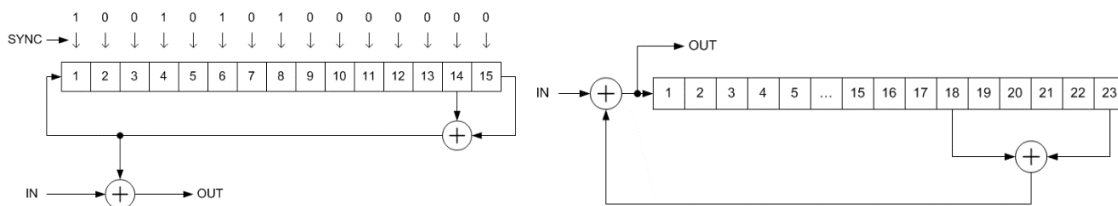


Рис. 5. Приклади схем адитивного та мультиплікативного скремблерів, що використовуються у телекомунікаційних протоколах модемного зв'язку

Структурна схема апаратного забезпечення пристрою

Структура розробленого пристрою складається із аудіоінтерфейсу, та програмної реалізації на базі мікроконтролера ESP32 для обробки даних (Рис. 8). Використаний мікроконтролер доступний і має низьку ціну, що дозволяє знизити собівартість пристрою. Мікроконтролер має двоядерну архітектуру Tensilica Xtensa LX6 (існує також серія на відкритій архітектурі RISC-V) [5], що дозволяє розділити навантаження поміж двома ядрами. В мікроконтролері присутній вбудований інтерфейс Bluetooth, який можливо налаштувати на профіль послідовного порту для комунікації з клієнтом. Дана серія мікроконтролерів відома суттєвою підтримкою серед спільноти розробників та широким переліком оціночних плат для прототипування. Для проекту обрана відлагоджувальна плата ESP-WROOM-32 у якій реалізована схема живлення на базі перетворювача напруги AMS1117, що дозволяє жити пристрій від павербанку у разі відсутності живлення з мережі, перетворювач рівнів CP2102 для зручного з'єднання із ПК для програмування мікроконтролера без використання зовнішніх програматорів, реалізована антена на друкованій платі для комунікації через протокол Bluetooth, Wi-Fi (рис. 6).



Рис. 6. Плата розробки ESP-WROOM-32

Аудіоінтерфейс – аналогова частина проекту, призначена для передачі AFSK модульованого звукового сигналу між мікроконтролером та аудіо інтерфейсом рації, а також для керування тангентою (Push-to-talk вхід) рації (рис. 7). Напруга з аудіо виходу рації обмежується для уникнення збоїв у роботі аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера. Аудіо вхід рації потребує фільтрації сигналу з цифро-аналогового перетворювача мікроконтролера та регулювання амплітуди AFSK модульованого сигналу, що передається на мікрофон рації. У якості рації обрано бюджетну модель Baofeng UV-5R. Із дослідження аудіо гарнітури рації визначено, що перехід між станом прийому та станом передачі відбувається підтяжкою входу тангенти до “землі”.

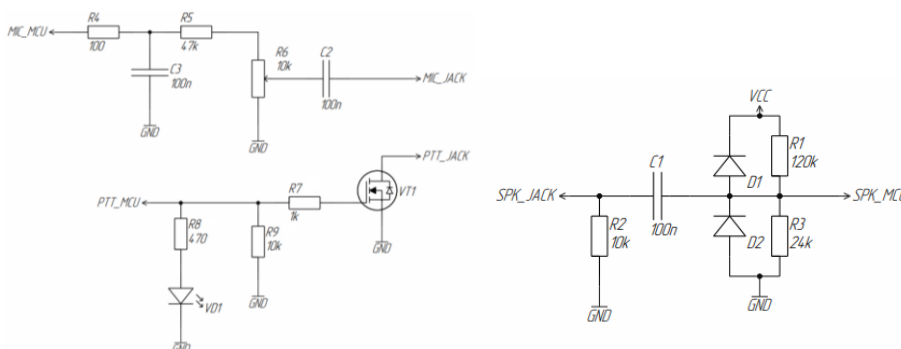


Рис. 7. Схемотехнічне рішення для аудіоінтерфейсу пристрою

Таблиця 3

Виходи аудіоінтерфейсу

| Контакт схеми | Призначення |
|---------------|---|
| MIC MCU | Контакт мікроконтролера для передачі аудіо сигналу на рацію |
| PTT MCU | Контакт керування режимом прийому/передачі рації |
| SPK MCU | Контакт АЦП мікроконтролера |
| MIC JACK | Вхід на мікрофон рації |
| PTT JACK | Вхід керування тангент рації |
| SPK JACK | Вихід динаміку рації |

Програмно реалізовані блоки:

- FSK модулятор/демодулятор - програмно реалізований модуль обробки аналогового сигналу. Даний

модуль потрібен для модуляції/демодуляції даних протоколу AX.25. Принцип AFSK модуляції/демодуляції описаний вище.

- Блок AX.25 - програмно реалізований модуль для обробки даних на рівні протоколу AX.25.
- Блок KISS TNC - програмно реалізований модуль обробки даних на рівні протоколі KISS. Застосування полягає у підготовці пакету відповідно стандарту протоколу до відправки на клієнт, декапсуляції даних прийнятих з клієнта та відправці їх на перетворення у пакет протоколу AX.25.
- Інтерфейс взаємодії - програмно реалізований модуль передачі-прийому даних з клієнта користувача. Для даного проєкту обрано Bluetooth з'єднання. На ринку радіо компонентів можливо за низьку ціну знайти готові модулі [7], налаштовані на режим Bluetooth SPP (Serial Port Profile), що є заміною дротового послідовного інтерфейсу та дозволяє віддалено користуватись станцією (в залежності від потужності бездротового модулю). Bluetooth інтерфейс наявний як у використаному мікроконтролері, так і в мобільних пристроях, що виступають клієнтами. Також Bluetooth інтерфейс все частіше доступний у ноутбуках та персональних комп'ютерах.

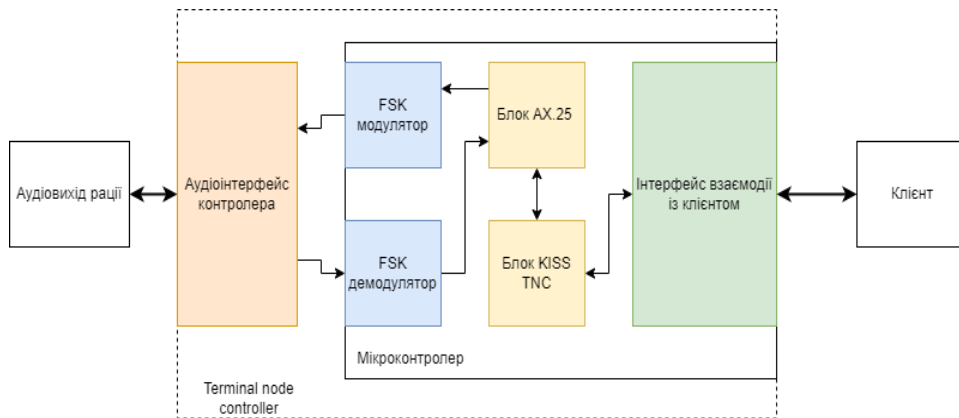


Рис. 8. Структура пристрою

Програмне забезпечення проєкту

Для контролера вузла обрано відкрите програмне забезпечення ESP32TNC (рис. 9) [6]. Проєкт побудований на базі офіційних бібліотек Espressif IoT Development Framework з використанням операційної системи реального часу FreeRTOS, що дозволяє реалізувати багатозадачність у програмі та збільшити ефективність використання ресурсів мікроконтролера. У файлі main.c відбувається виклик функцій ініціалізації модулів.

Таблиця 4

Модулі програмного забезпечення

| № | Назва модулю | Призначення модулю програмного забезпечення |
|----|--------------|---|
| 1 | uart.c | Інтерфейс взаємодії з клієнтом. Реалізоване налаштування комунікації через послідовний порт UART чи TCP/UDP з'єднання. |
| 2 | kiss.c | Обробка прийнятих даних на відповідність протоколу KISS TNC, визначення типу кадру, передача поля інформації у буфер даних у випадку інформаційного кадру, керування налаштуваннями з'єднання контролера вузла у випадку кадру керування. |
| 3 | tnc.c | Модуль зчитування даних з буферу аналогового-цифрового перетворювача, декодування прийнятих бітів. |
| 4 | decode.c | Модуль для декодування даних інвертованого кодування без повернення до нуля та кадру протоколу AX.25. Передача отриманої інформації у буфер даних для інтерфейсу взаємодії з користувачем. |
| 5. | filter.c | Смуговий нерекурсивний фільтр прийнятих дискретних відліків аналогового сигналу з АЦП. |
| 6. | send.c | Модуль формування кадру каналного рівня протоколу AX.25 для передавача. Керування входом тангенти рації для налаштування на передачу у радіоефір. |
| 7. | i2s_adc.c | Модуль налаштування аналогового-цифрового перетворювача. |
| 8. | timer.c | Модуль налаштування модулятора AFSK сигналу. |

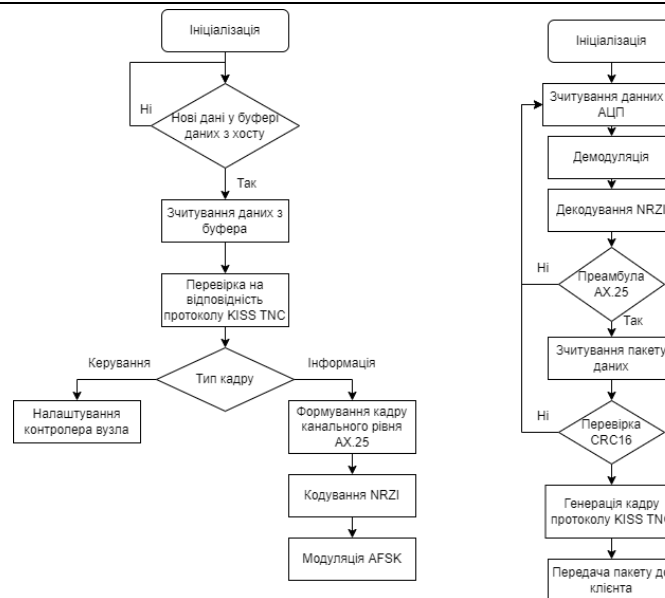


Рис. 9. Спрощений алгоритм прийому та передачі даних

Апробація результатів роботи пристрою

Після збирання двох тестових прототипів пристрою була досліджена передача модульованого AFSK сигналу на рацію та визначення відповідності його спектру до специфікації. Виміри проводились завдяки цифровому осцилографу та аналізатору спектру у складі Analog Discovery 2 (рис. 10, 11).

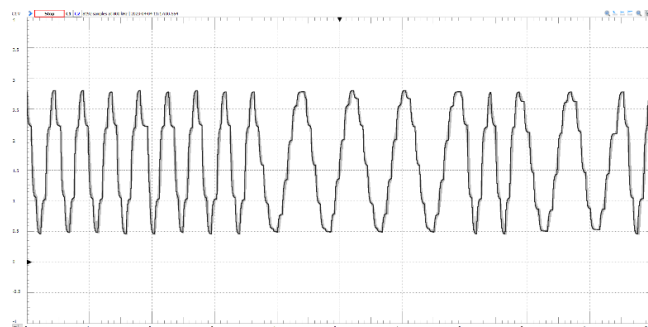


Рис. 10. Осцилограма модульованого AFSK сигналу. Можна спостерігати відсутність розриву фази при зміні значень бітів, що передаються

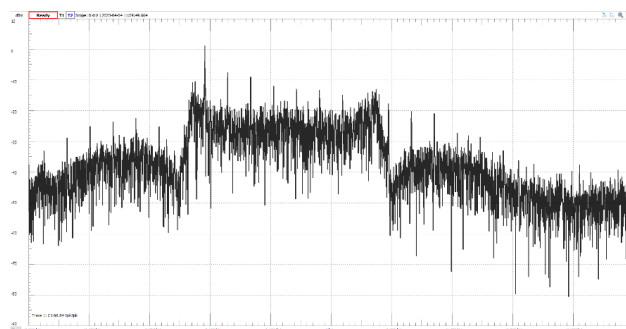


Рис. 11. Спектр AFSK модульованого сигналу. Спостерігаються піки на частотах 1.2 КГц та 2.2 КГц, що відповідають тонам AFSK модульованого сигналу

Також було проведено практичне вимірювання максимальної відстані комунікації двох вузлів. Дослідження відбувалось в умовах міської забудови. Однією з умов досліду була наявність великої кількості перешкод, таких як високі будівлі, електромагнітні поля, транспорт тощо. У документації на рації Baofeng UV-5R була заявлена відстань передачі до 5 км, однак виходячи із відгуків на штатні антени, що йдуть у комплекті до рації, в умовах міського простору досягти таких відстаней доволі проблематично. Тест проводився за принципом віддалення від стаціонарної станції (на мапі CENTER-1), яка завдяки функціоналу записувала передачу координат від користувача (на мапі USER-2) та відображала історію пересування на вбудованій мапі (рис. 12). З отриманих результатів була визначена максимальна відстань у 2.88 км. На застосованих APRS терміналах було використано програмне забезпечення APRSdroid.

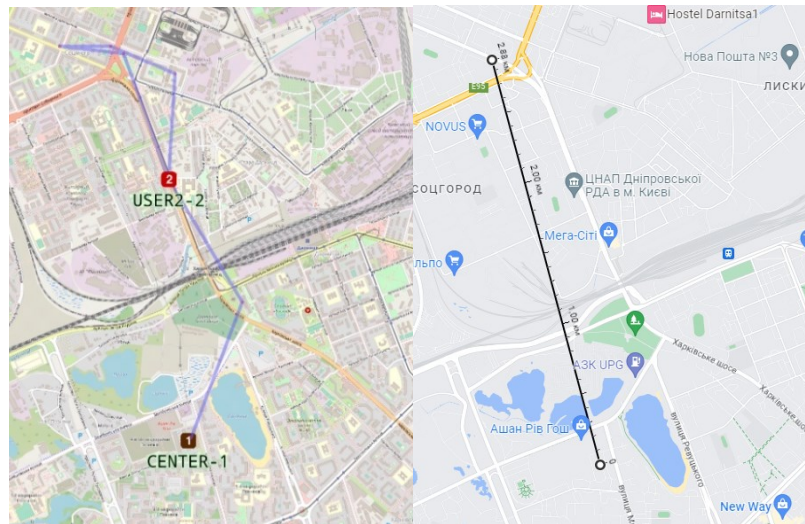


Рис. 12. Виміри максимальної відстані приймання пакету даних з координатами користувача

Висновки

Дослідження розробленого рішення показало, що при використанні бюджетних рацій Baofeng UV-5R можливо забезпечити передачу цифрових повідомлень у радіусі порядку 3 км. Відстань залежить від ряду факторів і при встановленні станцій у найвищій точці будинку імовірно збільшення покриття. Заміна антени приймача і додавання підсилювачів також збільшує радіус зв'язку. У випадку втрати зв'язку, мережа на базі APRS технології дозволяє відновити комунікацію шляхом повторного пересилання повідомлень. Використовуючи програмне забезпечення APRSdroid можлива передача координат користувача, що може бути корисно для отримання інформації про поточне місцезнаходження вузла. Запропоноване рішення може бути корисним для контролю за віддаленими пристроями на великій відстані. Зона покриття більшою мірою залежить від характеристик використаної радіостанції і за умови застосування потужної радіостанції, підсилювачів радіо сигналу та високо розміщеної антени можлива побудова аварійного зв'язку у межах міста.

References

1. Wade I. APRS Protocol Reference Protocol Version 1.0. Tucson, AZ: Tucson Amateur Packet Radio Corp, 2000. 128 p. (APRS Working Group).
2. Beech W., Nielsen D., Taylor J. AX.25 Link Access Protocol for Amateur Packet Radio. Tucson, AZ: Tucson Amateur Packet Radio Corp, 1998. 143 p. (Tucson Amateur Packet Radio Corporation).
3. Chepponis M., Karn P. The KISS TNC: A simple Host-to-TNC communications protocol. 1997. URL: <http://www.ax25.net/kiss.aspx>.
4. Langner J. Dire Wolf Software TNC. 2018. URL: <https://github.com/wb2osz/direwolf-presentation>.
5. ESP32 Series Datasheet/ China: Espressif Systems, 2023. 70 p. (Espressif Systems).
6. ESP32TNC. 2022. URL: <https://github.com/amedes/ESP32TNC>.
7. HC-08 BLUETOOTH UART COMMUNICATION MODULE V3.1 USER MANUAL. China: HC, 2017. 15 p.
8. HDLC/AX.25. Not Black Magic. 2023. URL: <https://notblackmagic.com/bitsnpieces/ax.25>.

ТОМУСЯК АНДРІЙ

Хмельницький національний університет

e-mail: av.tomysak15@gmail.com

МЕТОД ТА ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНИЙ ЗАСІБ ГЕНЕРУВАННЯ КЛЮЧІВ АУТЕНТИФІКАЦІЇ

В роботі наведено результати дослідження і розробки методу та програмно-технічного засобу генерування ключів аутентифікації.

Ключові слова: аутентифікація, безпека, генерація ключів, комп'ютерні системи, криптографія, шифрування, захист даних, захищені системи.

TOMUSYAK ANDRII

Khmelnitskyi National University

METHOD AND SOFTWARE TOOLS FOR AUTHENTICATION KEY GENERATION

The need to ensure secure user authentication in computer systems is an ongoing concern that requires the development of new approaches and technologies. This paper reviews the latest research and publications on this topic, identifying areas where progress has been made and unsolved parts of the problem that require further attention. The objective of this article is to present novel methods and software tools for generating secure authentication keys. The study involved the development of a new approach to generate keys, a system architecture to support the key generation process, and various methods used in key generation. The results of the study demonstrate the efficacy of the developed software tools in generating secure authentication keys. The proposed methods in this research contribute to the ongoing work in the field of computer security by presenting new techniques for generating secure authentication keys. Organizations can adopt these methods to significantly improve the security of their computer systems and safeguard their users' sensitive information.

The paper presents a detailed explanation of the developed approach, including the design and implementation of the key generation system, the architecture of the system, and the methods used to generate keys. The software tools developed through this study are presented in the form of an application, which can be used to generate secure authentication keys. In conclusion, this article highlights the importance of secure authentication key generation and presents a novel approach for generating these keys. The developed software tools represent a significant step forward in the field of computer security, and there is potential for further research and development in this area. The proposed techniques can be adopted by organizations to improve the security of their computer systems, and the results of this study can serve as a basis for further research in the field.

Keywords: authentication, security, key generation, computer systems, software tools, cryptography, encryption, data protection, secure systems.

Постановка проблеми

Проблема забезпечення безпеки при передачі даних через відкриті мережі є важливим науковим та практичним завданням у сфері інформаційної безпеки. Зокрема, виникає потреба в розробці методів та програмно-технічних засобів, що забезпечують аутентифікацію користувачів та захист даних від несанкціонованого доступу. Одним зі способів розв'язання цієї проблеми є використання ключів аутентифікації [1]. Однак, існує проблема надійності та ефективності генерування ключів аутентифікації. У зв'язку з цим, необхідна розробка методів та програмно-технічних засобів, що забезпечують надійну та ефективну генерацію ключів аутентифікації, які відповідають вимогам сучасних стандартів із захисту інформації [2].

Генерація ключів аутентифікації є важливим аспектом забезпечення безпеки мереж Wi-Fi, включаючи мережі Інтернету Речей (IoT), що забезпечують підключення різноманітних пристроїв до мережі.

В локальній мережі, яка складається з маршрутизатора і пристроїв IoT, ключі аутентифікації є важливим елементом забезпечення безпеки мережі. При підключенні нового пристрою до мережі, маршрутизатор генерує унікальний ключ аутентифікації, який передається до пристрою [3, 4]. Цей ключ використовується для перевірки автентичності пристрою, що підключається до мережі.

Однією з основних проблем забезпечення безпеки в мережах Wi-Fi є можливість зламування ключів аутентифікації [5]. Наприклад, якщо ключі аутентифікації генеруються занадто простими або повторюваними методами, то зломисники можуть легко зламати ці ключі і отримати несанкціонований доступ до мережі.

Тому важливо використовувати сильні та унікальні ключі аутентифікації, які не можна легко зламати. Для цього можна використовувати різні методи генерації ключів, включаючи методи, які базуються на випадковому руху мобільного пристрою. Наприклад, деякі маршрутизатори використовують метод генерації ключів, який базується на фізичних параметрах та випадкових подіях, таких як шум, який генерується мобільним пристроєм [6, 7].

Отже, генерація ключів аутентифікації є важливим аспектом забезпечення безпеки мереж Wi-Fi, зокрема, в локальних мережах.

Аналіз останніх джерел

Останніми роками було проведено багато досліджень в області генерації ключів аутентифікації в

мережах Wi-Fi з метою поліпшення їх безпеки. Деякі з цих досліджень були опубліковані в наукових журналах та конференціях.

Один з таких досліджень був проведений у 2020 році науковцями з Університету Оклахоми та Макгіллівського університету в Канаді. У дослідженні було запропоновано новий метод генерації ключів аутентифікації на основі глибокого навчання. Цей метод дозволяє створювати унікальні ключі для кожного підключеного пристрою з високим рівнем захисту. У дослідженні було продемонстровано, що запропонований метод генерації ключів є надійним та забезпечує високий рівень безпеки мережі Wi-Fi.

Інше дослідження було проведено в 2021 році науковцями з Університету Південної Каліфорнії. У дослідженні було запропоновано новий метод генерації ключів аутентифікації на основі використання штучних нейронних мереж. Цей метод дозволяє генерувати унікальні ключі для кожного підключеного пристрою з високим рівнем захисту. У дослідженні було показано, що запропонований метод генерації ключів є більш ефективним і має вищий рівень безпеки порівняно з існуючими методами.

Загалом, останні дослідження підтверджують важливість використання сильних та унікальних ключів аутентифікації для забезпечення безпеки мереж Wi-Fi. Крім того, нові методи генерації ключів на основі глибокого навчання та штучних нейронних мереж показують обіцяні результати в покращенні безпеки мереж Wi-Fi. Однак, враховуючи поширеність інтернету речей та підключення їх до мереж Wi-Fi, виникає потреба у вдосконаленні методів генерації ключів аутентифікації [8].

Наприклад, в 2020 році в Індії було проведено дослідження, в якому було показано, що багато з пристроїв Інтернету речей, що підключені до мереж Wi-Fi, мають слабкий рівень безпеки та вразливі до атак зловмисників. Це може призвести до несанкціонованого доступу до пристроїв та можливості крадіжки конфіденційної інформації [9, 10].

Також, у 2021 році було проведено дослідження в Університеті Техасу, в якому було показано, що методи генерації ключів аутентифікації, які використовують фізичні характеристики пристроїв, такі як відбитки пальців чи сканування обличчя, можуть бути уразливими до атак з використанням зображень та інших форм шахрайства.

Отже, аналіз останніх джерел показує, що хоча було запропоновано нові методи генерації ключів аутентифікації, використання мереж Wi-Fi продовжує бути вразливим до атак зловмисників, особливо з пристроями Інтернету речей [11, 12]. Тому необхідно постійно удосконалювати методи генерації ключів та захисту мереж Wi-Fi для забезпечення безпеки користувачів.

Метою роботи є дослідження і розробка методу та програмно-технічного засобу генерування ключів аутентифікації.

Формулювання цілей

Інфрачервона технологія (IR) є однією з можливих альтернатив для безпечної передачі ключів аутентифікації в мережі Wi-Fi. Використання IR дозволяє передавати дані безпосередньо між двома пристроями за допомогою інфрачервоних променів, що не піддаються перехопленню з боку зловмисників, як це може бути в разі передачі даних через Wi-Fi [13–15].

Для використання IR в якості методу генерації ключів аутентифікації може бути розроблений спеціальний програмно-технічний засіб, який дозволяє генерувати унікальний ключ аутентифікації для кожного підключеного пристрою. При цьому ключ може бути збережений у пам'яті пристрою, що забезпечує зручний та швидкий доступ до мережі без необхідності повторного введення ключа.

За для вирішення цієї проблеми, потрібно виконати наступні задачі:

1. Дослідити існуючі методи генерування ключів аутентифікації та визначити їх недоліки та шляхи вирішення.
2. Розробити модель процесу генерування ключів аутентифікації.
3. Розробити метод генерування ключів аутентифікації.
4. Розробити програмно-технічний засіб генерування ключів аутентифікації з застосуванням нового методу.
5. Підвести підсумки про необхідність розробки системи у майбутньому.
6. Провести експериментальне дослідження функціонування розробленого програмно-технічного засобу генерування ключів аутентифікації та оцінити його ефективність.

Виклад основного матеріалу

Для реалізації проекту були обрані такі дизайн та обладнання:

– IoT Node, для цього обрано розробну плату NodeMCU на основі мікросхеми ESP8266, версії AI Thinker. На нього прямо підключено приймач ІЧ-сигналів моделі TL1838В до GPIO-піна та два ІЧ світлодіоди в послідовності за допомогою підсилювальної схеми. Після інтенсивних випробувань виявлено, що світлодіоди не отримували достатньої кількості струму, що призвело до занадто високого рівня помилок і втрати багатьох пакетів.

– IoT Controller, на основі мікросхеми ESP8266, нарешті був обраний Heltec Wi-Fi Kit 8. В практиці використовуються як OLED екран, так і порт батареї, були спаяні світлодіод ІЧ та приймач ІЧ-сигналів моделі TL1838В, що безпосередньо підключений до GPIO PIN плати. Не потрібно проектувати



Рис. 1. Плата ESP8266 NodeMCU

додаткову підсилювальну схему для світлодіода, оскільки струм, що подається до PIN, є вищим, ніж в платі NodeMCU.



Рис. 2. Плата Heltec Wi-Fi Kit 8

Функції IoT Router та Firewall нарешті були реалізовані за допомогою Raspberry Pi Model 3b+. З серед усіх альтернатив, що використовувалися для завантаження Private Wi-Fi Key, обрано ту, яка використовує USB Serial Port з однієї причини: вона не вимагає додаткового обладнання або схеми, що призводить до зниження як вартості, так і складності.

- Зчитування QR-коду за допомогою камери мобільного пристрою: використовується програма ZBar на Raspberry Pi для зчитування QR-коду, створеного на IoT Контролері. Цей метод є дуже зручним та доступним для користувачів.

- Wi-Fi Protected Setup (WPS): цей метод, який можна використовувати на деяких маршрутизаторах, дає можливість підключити пристрій до мережі Wi-Fi за допомогою одного натискання кнопки на маршрутизаторі та на пристрої. Хоча цей метод може здаватися корисним для деяких користувачів, він не є надійним, оскільки може бути вразливий до атак перехоплення зв'язку.

Після порівняння всіх варіантів, було вирішено використовувати перший метод, зчитування QR-коду за допомогою камери мобільного пристрою, який є найзручнішим та найбезпечнішим методом завантаження ключа в мережу.

Цей метод вимагає, щоб користувач відсканував QR-код на OLED екрані IoT Контролера за допомогою мобільного пристрою з вбудованою камерою. QR-код містить інформацію про ім'я та пароль Wi-Fi мережі, а також про хеш ключа. Після сканування QR-коду, мобільний пристрій відправляє отриману інформацію до IoT Маршрутизатора, який додає ключ до свого списку дозволених пристроїв. Цей метод є безпечним та користувацький доступним, а також дозволяє використовувати мобільні пристрої, які вже є у користувачів, замість додаткових пристроїв, які можуть бути дорогими та складними у використанні.

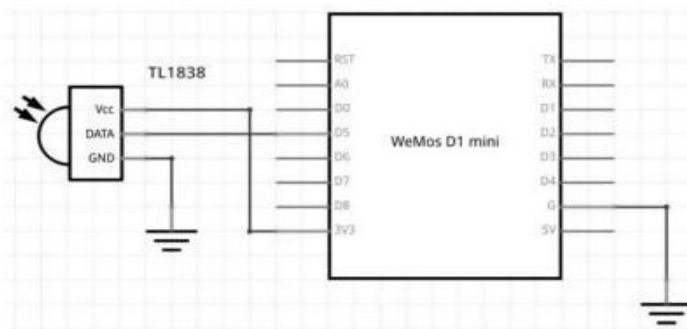


Рис. 3. Схема ІЧ-приймача

В підсумку, ми визначили основний матеріал щодо обладнання та програмного забезпечення для нашої системи IoT. Вибране обладнання та програмне забезпечення мають необхідний набір функціональності для реалізації нашої системи IoT. Крім того, вони підтримують бездротові технології, такі як Wi-Fi та Bluetooth, що дозволить збирати дані з сенсорів та передавати їх до хмарного сервісу для аналізу та обробки.

Незважаючи на те, що основна ідея проекту полягає в протоколах безпечної передачі ІЧ-сигналів, апаратне забезпечення, що діє як пристрій Інтернету речей, є лише простий пристрій, що служить прикладом того, яким є вузол Інтернету речей. Тому пристрій, що використовується для цього проекту, за замовчуванням не має функціональності, що, в основному, означає, що він буде працювати як фіктивний вузол.

Висновки

Підсумовуючи дослідження, було виявлено недоліки в існуючих методах генерування ключів аутентифікації, що призводить до загрози безпеці користувача. Розроблений метод генерування ключів аутентифікації, який використовує інфрачервону технологію та шифрування на основі Diffie-Hellman key exchange protocol, дозволяє створити повну безпеку та конфіденційність користувача. Програмно-технічний

засіб на основі цього методу генерування ключів аутентифікації забезпечує ефективний захист та виключає зовнішні атаки, надаючи повну безпеку під час етапу ініціалізації пристроїв IoT. Таким чином, розроблений метод та програмно-технічний засіб мають високий потенціал для застосування в сфері безпеки пристроїв Інтернету речей.

Однак, використання IR також має свої обмеження, такі як обмежена дальність передачі даних та необхідність наявності прямої видимості між двома пристроями. Також, відповідність IR залежить від рівня освітленості, тому використання цієї технології може бути складним у нічний час або в умовах обмеженої освітленості.

Отже, використання IR для генерації ключів аутентифікації може бути одним з варіантів для забезпечення безпеки мереж Wi-Fi, зокрема у випадках, коли існує ризик перехоплення даних або вразливості звичайних методів генерації ключів. Однак, при використанні цієї технології необхідно враховувати її обмеження та недоліки, щоб забезпечити надійність та безпеку мережі Wi-Fi

Література

1. Liu, J., Zhang, X., Zhou, C., & Zeng, Y. (2021). A low-energy and secure user authentication scheme for wireless sensor networks based on infrared communication. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 12(5), 5579-5592.
2. Gao, J., Sun, H., Yang, B., & Ren, K. (2019). An efficient IoT device authentication scheme based on ECC and IR-UWB technology. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(5), 8781-8793.
3. Chai, S., Wang, S., Li, L., & Jia, W. (2020). A novel key establishment scheme for industrial internet of things based on infrared communication. *Future Generation Computer Systems*, 105, 90-100.
4. Liao, Y., Li, F., Zhang, L., & Wang, X. (2019). A user authentication scheme for IoT devices based on elliptic curve cryptography and infrared communication. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 15(2), 1550147718821647.
5. Zhang, J., Wen, Q., & Liu, J. (2019). An efficient mutual authentication protocol for smart homes based on infrared communication. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 15(2), 1550147719828939.
6. Петренко А. Ю., Ковалев В. В. Розробка програмного засобу генерації ключів аутентифікації для захисту пристроїв Інтернету речей. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*. 2020. № 2 (95). С. 95-101.
7. Гавриленко О. М., Чуба О. В. Метод генерування ключів аутентифікації для систем Інтернету речей // *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2019. № 4 (70). С. 86-96.
8. Коваль О. В., Ковальчук В. Є. Метод генерування ключів аутентифікації на основі інфрачервоних технологій для систем Інтернету речей. *Системні технології*. 2020. Т. 8, № 1. С. 15-24.
9. Іванов А. В., Черниш В. В. Аналіз методів генерування ключів аутентифікації для пристроїв Інтернету речей. *Технічні науки та технології*. 2018. Т. 3, № 1. С. 9-18.
10. Мельник В. Г., Кондратюк О. М. Метод генерації ключів аутентифікації для систем Інтернету речей на основі Diffie-Hellman key exchange protocol. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. 2020. Вип. 1 (912). С. 129-134.
11. Клименко І., Шуляр В. Методи інформаційної безпеки в системах Інтернету речей. *Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. 2019. № 12(242). С. 50-57. URL: <https://doi.org/10.32627/kit.2019.12.050>
12. Горбатенко О., Кузнецова І. Інформаційна безпека систем Інтернету речей: проблеми та можливості. Київ: КНУТД, 2017. 188 с.
13. Гончаренко В. І., Клименко Є. Є. Методи створення безпеки в системах Інтернету речей. *Технології Інтернету речей та кіберфізичних систем*. 2018. Т. 3, № 4. С. 4-12. URL: http://tiirs.org.ua/wp-content/uploads/2019/02/3_4_2018.pdf
14. Подольчак О., Голубович Л. Аналіз питань безпеки Інтернету речей та шляхи їх вирішення. *Збірник наукових праць Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки. Серія: "Комп'ютерні науки та інформаційні технології"*. 2019. Вип. 13 (263). С. 92-98. URL: <https://cyberleninka.org/article/n/analiz-pytan-bezpeky-internetu-rechei-ta-shlyakhy-yikh-vyreshennia>
15. Міщенко І. В. Методи аутентифікації користувача в IoT-системах. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2018. 1(55), 82-88.
16. Шинкарук О. О., Корж І. І., Стеблій М. І. Захист від кіберзагроз в системах Інтернету речей на основі методів аутентифікації та шифрування. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, 2020. 3(63), 83-90.
17. Петренко В. В. Методи та засоби захисту інформації в системах Інтернету речей. *Системні технології*. 2017. 1(76), 27-35.
18. Литвиненко В. С. Методи та засоби аутентифікації в системах Інтернету речей. *Вісник Чернігівського національного технологічного університету*. 2019. 2(97), 57-61.
19. Кудрявцев С. М., Гальчинський А. В., Мартинюк І. В. Методи та засоби забезпечення безпеки в системах Інтернету речей. *Технічна електродинаміка*. 2019. 5(6), 52-61.

References

1. Liu, J., Zhang, X., Zhou, C., & Zeng, Y. (2021). A low-energy and secure user authentication scheme for wireless sensor networks based on infrared communication. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 12(5), 5579-5592.
2. Gao, J., Sun, H., Yang, B., & Ren, K. (2019). An efficient IoT device authentication scheme based on ECC and IR-UWB technology. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(5), 8781-8793.
3. Chai, S., Wang, S., Li, L., & Jia, W. (2020). A novel key establishment scheme for industrial internet of things based on infrared communication. *Future Generation Computer Systems*, 105, 90-100.
4. Liao, Y., Li, F., Zhang, L., & Wang, X. (2019). A user authentication scheme for IoT devices based on elliptic curve cryptography and infrared communication. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 15(2), 1550147718821647.
5. Zhang, J., Wen, Q., & Liu, J. (2019). An efficient mutual authentication protocol for smart homes based on infrared communication. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 15(2), 1550147719828939.
6. Petrenko A. Yu., Kovalev V. V. Rozrobka programnoho zasobu heneratsii kluchiv avtentyfikatsii dlia zakhystu prystroiv Internetu rechei. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu*. 2020. № 2 (95). S. 95-101.
7. Havrylenko O. M., Chuba O. V. Metod heneruvannia kluchiv avtentyfikatsii dlia system Internetu rechei // *Systemni doslidzhennia ta informatsiini tekhnolohii*. 2019. № 4 (70). S. 86-96.
8. Koval O. V., Kovalchuk V. Ye. Metod heneruvannia kluchiv avtentyfikatsii na osnovi infrachervonykh tekhnolohii dlia system Internetu rechei. *Systemni tekhnolohii*. 2020. T. 8, № 1. S. 15-24.
9. Ivanov A. V., Chernysh V. V. Analiz metodiv heneruvannia kluchiv avtentyfikatsii dlia prystroiv Internetu rechei. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*. 2018. T. 3, № 1. S. 9-18.
10. Melnyk V. H., Kondratiuk O. M. Metod heneratsii kluchiv avtentyfikatsii dlia system Internetu rechei na osnovi Diffie-Hellman key exchange protocol. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika"*. 2020. Vyp. 1 (912). S. 129-134.
11. Klymenko I., Shuliar V. Metody informatsiinoi bezpeky v systemakh Internetu rechei. *Kompiuterni nauky ta informatsiini tekhnolohii*. 2019. № 12(242). S. 50-57. URL: <https://doi.org/10.32627/ktit.2019.12.050>
12. Horbatenko O., Kuznetsova I. *Informatsiina bezpeka system Internetu rechei: problemy ta mozhlyvosti*. Kyiv: KNUTD, 2017. 188 s.
13. Honcharenko V. I., Klymenko Ye. Ye. Metody stvorennia bezpeky v systemakh Internetu rechei. *Tekhnolohii Internetu rechei ta kiberfizychnykh system*. 2018. T. 3, № 4. S. 4-12. URL: http://tiirs.org.ua/wp-content/uploads/2019/02/3_4_2018.pdf
14. Podolchak O., Holubovych L. Analiz pytan bezpeky Internetu rechei ta shliakhy yikh vyrishennia. *Zbirnyk naukovykh prats Skhidnoevropeiskoho natsionalnoho universytetu imeni Lesi Ukrainky. Seriia: "Kompiuterni nauky ta informatsiini tekhnolohii"*. 2019. Vyp. 13 (263). S. 92-98. URL: <https://cyberleninka.org/article/n/analiz-pytan-bezpeky-internetu-rechei-ta-shlyakhy-yikh-vyreshennia>
15. Mishchenko I. V. Metody avtentyfikatsii korystuvacha v IoT-systemakh. *Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna inzheneriia*. 2018. 1(55), 82-88.
16. Shynkaruk O. O., Korzh I. I., Steblii M. I. Zakhyst vid kiberzahroz v systemakh Internetu rechei na osnovi metodiv avtentyfikatsii ta shyfruvannia. *Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna inzheneriia*, 2020. 3(63), 83-90.
17. Petrenko V. V. Metody ta zasoby zakhystu informatsii v systemakh Internetu rechei. *Systemni tekhnolohii*. 2017. 1(76), 27-35.
18. Lytvynenko V. S. Metody ta zasoby avtentyfikatsii v systemakh Internetu rechei. *Visnyk Chernihivskoho natsionalnoho tekhnolohichnoho universytetu*. 2019. 2(97), 57-61.
19. Kudriavtsev S. M., Halchynskiy A. V., Martyniuk I. V. Metody ta zasoby zabezpechennia bezpeky v systemakh Internetu rechei. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2019. 5(6), 52-61.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-321-3-188-194
UDK 004.7:519.87(043.3):621.391

TOROSHANKO OLEKSANDR

Taras Shevchenko Kyiv National University, Kyiv
<https://orcid.org/0000-0002-2354-0187>
e-mail: toroshanko@gmail.com

AFANASIEV PAVLO

State University of Telecommunications, Kyiv
E-mail: Afanasiyevpv@ukr.net

ISHCHUK IHOR

State University of Telecommunications, Kyiv
e-mail: Petrovka@i.ua

TOROSHANKO YAROSLAV

State University of Telecommunications, Kyiv
<https://orcid.org/0000-0002-9053-7156>
e-mail: toroshanko@ukr.net

SECURITY OF COMPUTER NETWORK FUNCTIONING BASED ON A NEURON MODEL OF OVERLOAD CONTROL

The method of ensuring the operation security of computer network based on the proposed overload prediction and detection scheme is considered. Congestion management is performed by adjusting the incoming data flow and analyzing the network performance sensitivity function. The gradient of the sensitivity function characterizes the rate of change of this function and provides the optimal direction for adjusting the speed of the data source.

The results of a comparative analysis of congestion control methods based on the analysis of the queue length and the sensitivity indicator with 1- and 3-step horizons by predicting the state of the network are presented.

Key words: telecommunication network, safety of operation congestion prediction, sensitivity function, gradient, neural system, queue management, prediction horizon

ТОРОШАНКО ОЛЕКСАНДР

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ
АФАНАСЬЄВ ПАВЛО, ІЩУК ІГОР, ТОРОШАНКО ЯРОСЛАВ
Державний університет телекомунікацій, Київ

БЕЗПЕКА ФУНКЦІОНУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ НЕЙРОННОЇ МОДЕЛІ КОНТРОЛЮ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ

Запропонований спосіб забезпечення безпеки функціонування комп'ютерної мережі на основі схеми прогнозування і виявлення перевантажень. Керування перевантаженням здійснюється шляхом регулювання вхідного потоку даних і аналізу функції чутливості продуктивності мережі. Градієнт функції чутливості характеризує швидкість зміни даної функції і надає оптимальний напрям для налаштування швидкості джерела даних. Для визначення функції чутливості запропоновано використання простої нейронної мережної моделі динамічної системи. Визначення градієнту за поточним значенням знаку функції чутливості показника продуктивності здійснюється на основі алгоритму адитивного збільшення / множинного зменшення. Даний алгоритм є альтернативою системи прогнозування перевантаження і керування потоком, заснованої на контролі поточного значення величини вхідної черги у порівнянні з заданим порогом. Розглянута нейронна модель для багатокрокового передбачення стану черги на стороні приймача телекомунікаційної мережі.

Представлені результати порівняльного аналізу способів контролю перевантаження на основі аналізу довжини черги і на основі аналізу показника чутливості з 1-кроковим та 3-кроковим горизонтами передбачення стану мережі. Дослідження проведено для синусоїдальної та випадкової функцій вузького місця черги. Показано, що ключові показники ефективності мережі для схеми на основі функції чутливості кращі, ніж для схеми на основі аналізу довжини вхідної черги. Для систем на основі аналізу функції чутливості схема з трикроковим горизонтом передбачення стану забезпечує кращу продуктивність і меншу величину черги на обслуговування ніж схема з однокроковим горизонтом.

Ключові слова: комп'ютерна мережа, безпека функціонування, прогнозування перевантаження, функція чутливості, градієнт, нейронна система, управління чергою, горизонт передбачення.

Introduction

Efficiency and safety of functioning of a computer (telecommunications) network are largely determined by the methods used to manage data flows and routing. The key task of ensuring the necessary quality of information system functioning is forecasting and prevention of overloads. Data traffic management should ensure the avoidance or minimization of the appearance of congestion [1-3], which contributes to reducing the risk of data loss, safe operation and minimization of data delay - key indicators of network efficiency. Note that a computer network is a complex system used by competing users [3-6].

Devices and network resources (processor time, bandwidth, name space, logical channels) have limited (finite) capabilities, which leads to conflicts between users. This can cause a significant decrease in system performance and data loss. Bandwidth decreases and can lead to network collapse, i.e. bandwidth drops to zero and a complete loss of data occurs. This is typical behavior of "competing" systems.

In scientific literature by definition [7-9]: congestion is defined as "user data loss caused by increased network load". There are also other definitions of overload, but they do not contradict each other.

Congestion has the most significant effect on the key performance indicators of the computer network and

the quality of user service. The above determines the relevance and necessity of conducting research in this direction.

Statement of the ensuring security problem of information exchange Based on overload management systems

A fairly detailed classification of congestion forecasting methods is proposed in the works [10-11], in which the RED, TSR Veno, Tail Drop, WRED, etc. algorithms were analyzed. It is shown that the task of data flow and overload management is one of the areas of ensuring cyber security of information exchange in the telecommunications network. These works are more of a review nature, quantitative evaluations of the effectiveness of the considered methods are not provided. The reason for this, obviously, is the lack of statistical data of a sufficiently large volume.

In [12], the methods of overload forecasting based on the analysis of the sensitivity indicators of the initial characteristics of the computer network as a mass service system are considered. However, the asymptotic characteristics of the sensitivity functions have not been definitively determined in the work, and the analytical expressions for the functional relationship between the parameters of the sensitivity functions and the corresponding parameters of the queue management system have not been obtained.

The aim of this research is the improvement and development of a method of overload control and forecasting using feedback on the sign of the sensitivity function of computer network performance, as well as modeling and conducting a comparative analysis of known and proposed solutions for various functions of maintaining the incoming data flow.

Adjustment of the input flow of data based on the neural network model

In [13], the use of a simple neural network model of a dynamic system with the use of feedback on the sign of the sensitivity function of network performance is proposed for congestion prediction. The proposed algorithm of additive increase / multiple decrease determines the change in the speed of the data source depending on the sign of the sensitivity function of the performance indicator. This algorithm is an alternative to the system based on threshold filling of the queue, i.e. congestion control based on the queue length indicator.

The algorithm and regulation rule of additive increase / multiple decrease of source speed is defined in the form of an analytical expression

$$\Delta J(t) = \frac{\partial J}{\partial R(t)} = -E(t+i\tau) \frac{\partial \hat{G}(t+i\tau)}{\partial R(t)}, \quad i=1,2,\dots,L, \quad (1)$$

where $J(t)$ – estimated data on the presence or threat of overloading;

$\Delta J(t)$ – the gradient of the congestion assessment system at a moment in time t ;

$G(t)$ – the length of the queue or service delay at a point in time t ;

$\hat{G}(t+i\tau)$ – the predicted length of the queue or service delay at a point in time $t+i\tau$, neural network output;

$R(t)$ – the instantaneous rate of the queue at the entrance at the instant of time t ;

$E(t)$ – monitored parameter deviation function (error);

τ – timing period, system clock frequency period;

L – prediction horizon.

Note that the derivative $\frac{\partial \hat{G}(t+i\tau)}{\partial R(t)}$ in our case, it represents the network sensitivity parameter -

the gradient of the system efficiency indicator [7].

Based on the expression (1), the parameter is determined R_{qs} – speed of queue service.

Cost function), as the objective function of the presence of congestion is defined as follows:

$$J = \frac{1}{2} e^2(t+i\tau) = \frac{1}{2} \left[Q - \hat{G}(t+i\tau) \right]^2, \quad i=1,2,\dots,L$$

Here Q is the maximum permissible value $G(t)$.

Control signal in (1) for $R(t)$ must provide the minimum value of the quantity J . The control variable is determined according to the gradient descent rule [14]:

$$R(t+\tau) = R(t) + \Delta R(t) = R(t) - \eta \frac{\partial J}{\partial R(t)}$$

Overload indicator $B(t)$ is formed depending on the gradient of the system $\Delta J(t)$ at a moment in time t [13]:

$$\left\{ \begin{array}{l} B(t) = 0 \text{ if } J(t) < 0 \\ B(t) = 1 \text{ if } J(t) \geq 0 \end{array} \right\}. \quad (2)$$

In work [13], the scheme of regulation of the input flow based on the analysis of the sensitivity indicator is presented. However, it does not provide a complete picture of the guaranteed overload prediction based on the analysis of the sensitivity index.

It should be noted that the tasks of flow control and congestion prevention have certain differences. Congestion prevention ensures that the network can handle the proposed traffic. To do this, it is necessary to analyze the behavior of all routers, data forwarding and storage processes, as well as take into account many other factors that reduce the bandwidth of the network [15, 16].

Flow control, on the contrary, refers to the traffic between two specific stations - the sender and the receiver. The task of flow control is to match the transmission speed of the sender with the speed at which the receiver is able to receive the flow of packets. Flow control is usually implemented using feedback between the receiver and the sender.

It should be noted that congestion control algorithms also use feedback in the form of special messages regarding slowing down of data transmission rates by various senders. Thus, a host can receive a slow transmission message in two cases: when the stream being transmitted cannot be handled by the receiver, or when the entire network cannot handle it.

In fig. 1 shows the overload detection scheme based on the analysis of the sensitivity indicator and the regulation of the incoming data flow (RIDF) from data sources $D_1...D_s$, based on sensitivity index analysis.

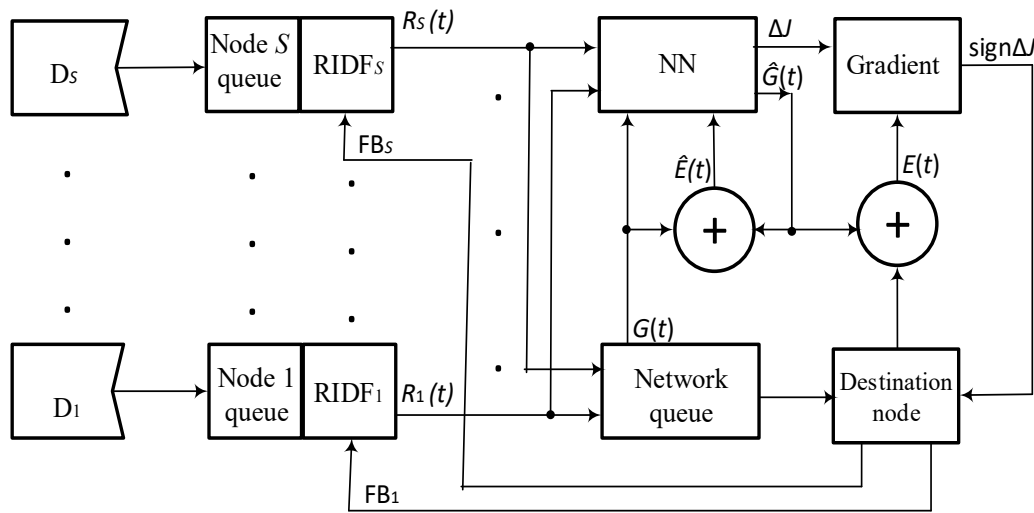


Fig. 1. Overload detection scheme based on the analysis of the sensitivity indicator

Note that at the points of formation of deviations is real $G(t)$ and the predicted parameter $\hat{G}(t)$ calculated by the neural network NN is counted with different signs.

The analytical presentation of the control algorithm for additive increase / multiple decrease of source speed is as follows [13]:

$$R(t + \tau) = \begin{cases} R(t) + F^+, & \Delta J(t - \tau) < 0 \\ R(t) - F^-, & \Delta J(t - \tau) \geq 0 \end{cases}$$

The value of quantities $R_1(t)...R_s(t)$ (rates of regulated input streams from data sources $D_1...D_s$) enter the input layer of the neural network NN, and incoming streams from sources to the network queue. Based on the analysis of the received data and the current value of the network queue length $G(t)$ the output layer of the neural network tracks the value of the function J (presence or threat of overloading) and its deviation. The sign of the magnitude of the deviation $sgn\Delta J$ is taken into account by the destination node when forming the feedback signal and the threat of overload.

The considered overload detection circuit can also be built using parameters feedback $FB_1...FB_s$ and adjusting the input flow based on the analysis of the sensitivity indicator [13].

4. Comparative analysis of the efficiency of overload detection schemes

In work [17], a connection was considered in which the numerical value of the bottleneck is determined by a sinusoidal function integer $[35(1+\sin(2\pi\tau/T))+10]$ packets/unit of time (integer - whole part of a number). The connection is characterized by the following set of parameters:

- peak velocity of the source $R_{max}=100$ packets/unit of time;
- minimum speed $R_{min}=0$ packets/unit of time;
- unit of time $\tau=0,25$ mc;
- the overload threshold is set at $Q = 500$ packets;
- coefficient of additive increase $F^+=R_{max}/16$;
- coefficient of multiplicative reduction $F^-=15/16$;

For comparative analysis, we will choose a connection in which the bottleneck of the queue is characterized by a "random" service speed. The set of connection parameters is the same as for the sinusoidal function.

As in work [17], we will present the simulation results based on the following overload control methods:

- a) analysis of queue length (Fig. 2);
- b) analysis of the sensitivity indicator with 1-step prediction of the network state (Fig. 3);
- c) analysis of the sensitivity indicator with a 3-step prediction of the network state (Fig. 4).

The graphs have the following designations:

- real values of the parameters are given by the dashed line, predicted by the solid line;
- G – queue size (number of requests);
- R_{qs} – speed of queue service, (requests/sec);
- R_{ds} – speed of the data source, (requests/sec).

Let's determine the following performance indicators for modeling:

– $G_{\max} = \max\{G(t), 0 \leq t \leq T\}$: – maximum value $G(t)$ represents the buffer size required by the bottleneck to avoid packet loss, T – simulation execution time;

– average queue size and source speed, defined as $\hat{f} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$;

– the variance of the queue size and the source speed, defined as $\sigma^2 = \frac{1}{T} \int_0^T [f(t) - \hat{f}]^2 dt$.

As mentioned above, the overload indicator $B(t)$ according to (2) is formed depending on the gradient of the system $\Delta J(t)$. Therefore, for the completeness of the comparative analysis of the systems, it is advisable to consider the graphs of the gradients $\Delta J(t)$ systems for connections with sinusoidal and random service functions.

Such graphs for systems based on the analysis of the sensitivity indicator are shown in fig. 5 with 1-step and in fig. 6 with 3-step network status prediction.

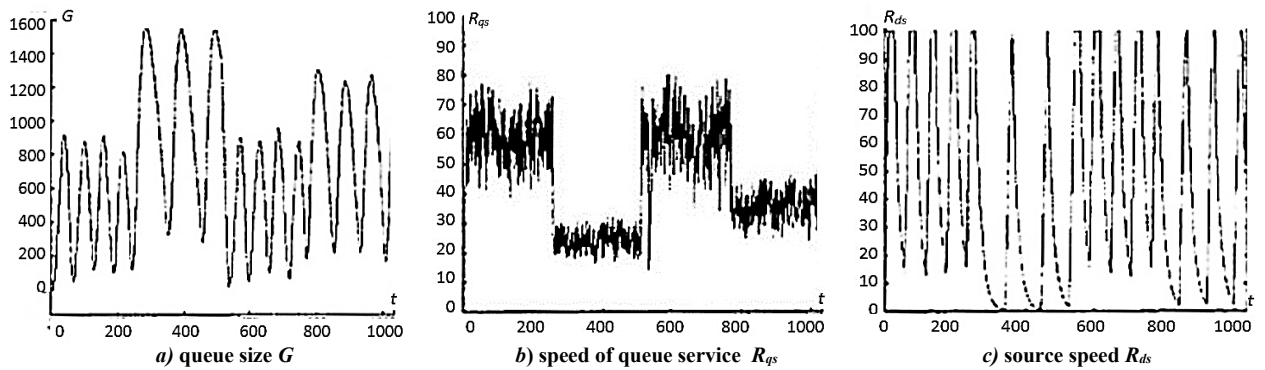


Fig. 2. Congestion control based on queue length analysis

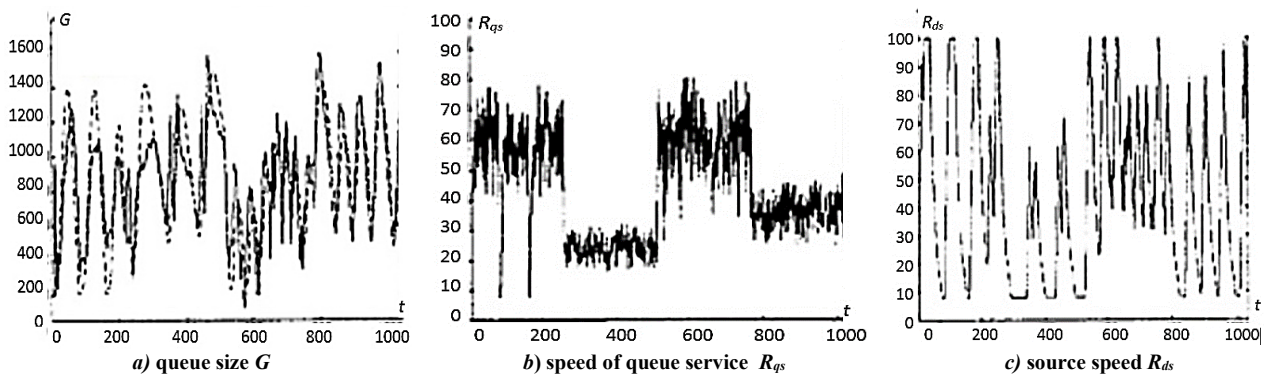


Fig. 3. Circuit-based overload control with 1-step prediction

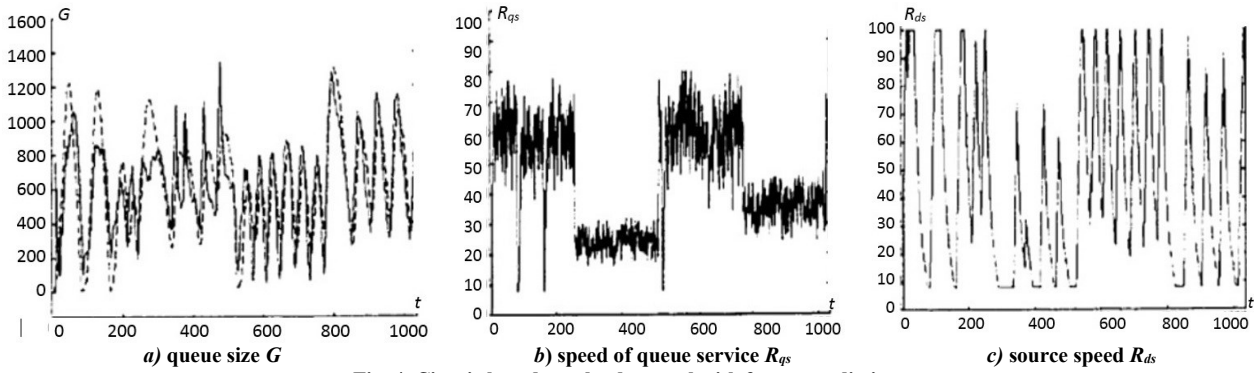


Fig. 4. Circuit-based overload control with 3-step prediction

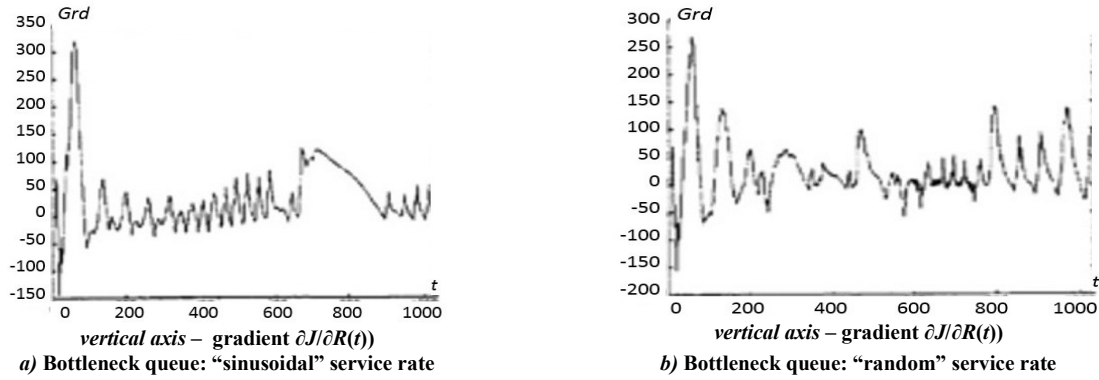


Fig. 5. Graphs of gradients of systems with 1-step network state prediction

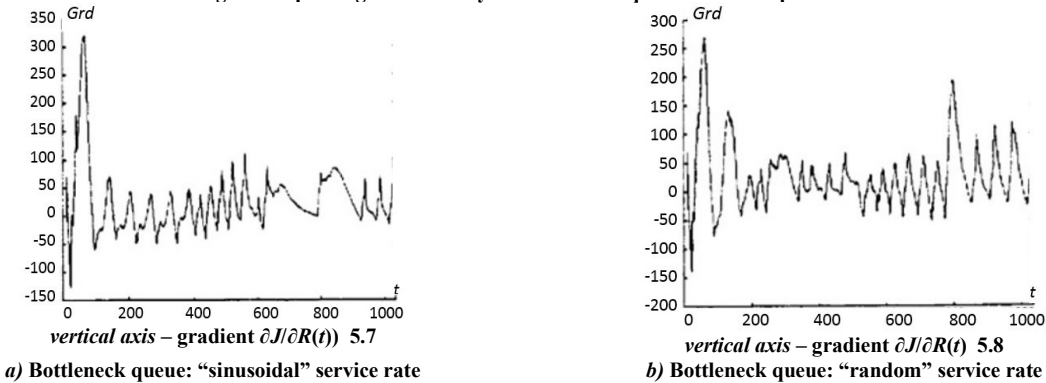


Fig. 6. Graphs of gradients of systems with 3-step network state prediction

A short list of simulation results is given in Table 1, where G_{av} and R_{av} denote the time-averaged queue size and source speed.

Table 1

List of simulation results

| Approach | Type of service | G_{max} | G_{av} | $\sigma^2(G)$ | Index G_{max} | R_{av} | $\sigma^2(R)$ |
|------------------|-----------------|-----------|----------|---------------|-----------------|----------|---------------|
| On a queue basis | Random | 1560 | 724.5 | 187569.3 | 757 | 45.1 | 1370.1 |
| | Sinusoidal | 1556 | 713.8 | 179305.5 | 281 | 45.7 | 1211.4 |
| Gradient: 1-Step | Random | 1293 | 666.2 | 108986.4 | 481 | 44.4 | 878.3 |
| | Sinusoidal | 1428 | 653.3 | 86115.5 | 48 | 44.4 | 1066.9 |
| Gradient: 3-Step | Random | 1307 | 622.9 | 88526.7 | 800 | 44.2 | 929.9 |
| | Sinusoidal | 1443 | 628.7 | 89936.5 | 49 | 44.5 | 1139.7 |

Analysis of the given graphs shows the following:

- 1) Key indicators of network efficiency and the quality of congestion prediction are practically independent of the functions of servicing the incoming data flow (requests).
- 2) Queue size G is smaller for the sensitivity-based scheme than for the queue-based scheme. However, the sensitivity-based scheme with 3-step state prediction provides better performance, i.e., lower service queue size, than the corresponding 1-step prediction scheme.
- 3) A scheme based on queue size analysis is more sensitive to changes in the queue service rate than sensitivity-based schemes. It should be noted that in the scheme based on the queue, with a significant decrease in

the service speed, the size of the queue increases extensively beyond the previously observed values. The increase in queue size is more stable under the same conditions for sensitivity-based schemes.

4) Source speed fluctuations R_{ds} are smaller for the sensitivity-based scheme than for the queue-based scheme. Analyzing the schemes based on sensitivity, we note that for the 3-step prediction, the feedback control signals (ie, the binary congestion bit) received in the data source from the network queue are insignificant in age and more closely reflect the network conditions compared to the 1-step prediction process. In feedback-based congestion control schemes with significant propagation delays, the control signals received at the sources may be outdated, and as a result, the control response will take effect only after some delay. The disadvantage of prediction based on the analysis of the state of the queue is that the longer the delay we make the prediction, the more difficult it is to obtain predictions with small errors.

Note that the results of the analysis according to p. 2, 3, 4 are valid for both functions of maintenance of the incoming flow of data (requests).

In this work, in contrast to traditional overload control systems for the maintenance of incoming data flow (requests) based on changes in the status and parameters of queues, the proposed system works according to optimal algorithms for setting weight parameters. Thanks to this, the accuracy of determining the control signals is increased, the impact of their delay is reduced and, as a result, the average resource consumption is minimized.

The elaborated telecommunication network control system essentially represents a static neural network, which includes feedback via a delay element for one cycle [13, 17]. This assumption for packet telecommunications networks is very logical.

Conclusions

The conducted studies show that the sensitivity-based approach is able to reduce the magnitude of queue fluctuations (as shown by the variance value in Table 1), but cannot completely eliminate fluctuations. Using the sensitivity of the system's performance function allows timely detection of congestion, and this leads to a timely feedback control response to the data sources. The use of neural architecture to implement the sensitivity function and the gradient of the objective function while increasing the prediction horizon provides acceptable values of the delay of feedback messages and thus improves the accuracy of prediction and detection of congestion in telecommunication networks.

A method of managing telecommunications network overloads using a neural network as a monitoring and control system has been developed. A proposed and substantiated scheme for multi-step prediction of the state of the queue. For prediction and early detection of overload, the apparatus of the general theory of sensitivity with indirect feedback and control of the activity of message sources is used. The results of this theory are used to build a control system with indirect feedback, which allows saving channel and computing resources.

As a result of the verification of theoretical results by means of computer simulation, quantitative comparative evaluations of the efficiency (accuracy and required computing resource) of the developed method and previously existing methods were obtained. It can be argued that with the perfect architecture of the neural network, suitable for modeling the dynamics of the system, it is possible to obtain a completely satisfactory performance of the telecommunication system as an object of control.

The resulting solutions make it possible to predict the appearance of congestion and, as a result, significantly reduce the risk of data loss during information exchange in the network.

Література

1. Tanenbaum A.S., Wetherall David J. Computer Networks, 5thed. PrenticeHall, Cloth, 2011. 960 p.
2. Stallings W. Foundations of Modern Networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and Cloud. Pearson Education, Inc., OldTappan, New Jersey, 2016. 544 p.
3. Mao G. Connectivity of Communication Networks. Springer International Publishing AG, 2017. 435 p.
4. Vinogradov N.A., Savchenko Alina S. Comparative Analysis of the Functionals of Optimal Control Corporate Computer Network. Journal of Qafqaz University: Mathematics and Computer Science. 2013, Vol. 1, Nr. 2. P. 156-167.
5. Kennedy G., Davis B., Prasanna S. R. M. Electronic Communication Systems, 6th ed. McGraw Hill Education, 2017. 704 p.
6. Bonaventure O. Computer Networking: Principles, Protocols and Practices. cnp3book, 2018. 272 p.
7. Keshav S. Congestion Control in Computer Networks. Ph.D. Thesis, University of California, 1991.
8. Kurose J.F., Ross Keith W. Computer Networking: A Top-Down Approach, 7th Ed. Pearson Education, Inc., 2017. 864 p.
9. Göransson P., Chuck Black, Timothy Culver. Software Defined Networks: A Comprehensive Approach, 2nd ed. Morgan Kaufmann, US, 2017. 409 p.
10. Максимов В.В. Класифікація алгоритмів боротьби з перевантаженнями / В.В. Максимов, С.О. Чмихун // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2014. – № 5(33). – С. 73-79.
11. Максимов В.В. Дослідження алгоритму боротьби з перевантаженнями TCP VENO / В.В. Максимов, С.О. Чмихун // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2015. – № 4. – С. 30-36.
12. Торошанко Я.І. Аналіз чутливості систем масового обслуговування на основі моделі адаптації і регулювання зовнішнього трафіка / Я.І. Торошанко // Вісник Хмельницького національного університету. –

2016. – № 6(243). – С. 171-175.

13. Vinogradov N., Stepanov M., Toroshanko Ya., Cherevyk V., Savchenko A. ... Uvarova T. Development of the Method to control Telecommunication Network Congestion Based on a Neural Model. Східно-Європейський журнал передових технологій. 2019. № 2(9). P. 67-73.

14. Lu Z., Qi Pan, Luhan Wang, Xiangming Wen Overload Control for Signaling Congestion of Machine Type Communications in 3GPP Networks. PLOS ONE. December 9, 2016. 11 p. DOI: 10.1371/journal.pone.0167380.

15. Гладких В.М. Ієрархічна маршрутизація з балансуванням навантаження в сенсорних мережах / В.М. Гладких, О.С. Торошанко // Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2017. – № 885. – С. 68-75.

16. Климаш М.М. Тензорне подання алгоритмів маршрутизації / М.М. Климаш, Б.М. Стрихалюк, М.В. Кайдан // Зв'язок. – 2010. – № 1. – С. 33-35.

17. Торошанко О.С. Порівняльний аналіз ефективності схем виявлення перевантаження телекомунікаційної мережі / О.С. Торошанко, Ю.М. Щєбланін // Безпека інформаційних систем і технологій. – 2022. – № 2(6). – С. 64-77.

References

1. Tanenbaum A.S., Wetherall David J. Computer Networks, 5th ed. PrenticeHall, Cloth, 2011. 960 p.
2. Stallings W. Foundations of Modern Networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and Cloud. Pearson Education, Inc., OldTappan, New Jersey, 2016. 544 p.
3. Mao G. Connectivity of Communication Networks. Springer International Publishing AG, 2017. 435 p.
4. Vinogradov N.A., Savchenko Alina S. Comparative Analysis of the Functionals of Optimal Control Corporate Computer Network. Journal of Qafqaz University: Mathematics and Computer Science. 2013, Vol. 1, Nr. 2. P. 156-167.
5. Kennedy G., Davis B., Prasanna S. R. M. Electronic Communication Systems, 6th ed. McGraw Hill Education, 2017. 704 p.
6. Bonaventure O. Computer Networking: Principles, Protocols and Practices. cnp3book, 2018. 272 p.
7. Keshav S. Congestion Control in Computer Networks. Ph.D. Thesis, University of California, 1991.
8. Kurose J.F., Ross Keith W. Computer Networking: A Top-Down Approach, 7th Ed. Pearson Education, Inc., 2017. 864 p.
9. Göransson P., Chuck Black, Timothy Culver. Software Defined Networks: A Comprehensive Approach, 2nd ed. Morgan Kaufmann, US, 2017. 409 p.
10. Maksymov V.V. Klasyfikatsiia alhorytmiv borotby z perevantazhenniamy / V.V. Maksymov, S.O. Chmykhun // Naukovi zapysky Ukrainskoho naukovo-doslidnoho instytutu zviazku. – 2014. – № 5(33). – S. 73-79.
11. Maksymov V.V. Doslidzhennia alhorytmu borotby z perevantazhenniamy TCP VENO / V.V. Maksymov, S.O. Chmykhun // Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnolohii. – 2015. – № 4. – S. 30-36.
12. Toroshanko Ya.I. Analiz chutlyvosti system masovoho obsluhovuvannia na osnovi modeli adaptatsii i rehuliuвання zovnishnoho trafika / Ya.I. Toroshanko // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. – 2016. – № 6(243). – S. 171-175.
13. Vinogradov N., Stepanov M., Toroshanko Ya., Cherevyk V., Savchenko A. ... Uvarova T. Development of the Method to control Telecommunication Network Congestion Based on a Neural Model. Skhidno-Yevropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii. 2019. № 2(9). P. 67-73.
14. Lu Z., Qi Pan, Luhan Wang, Xiangming Wen Overload Control for Signaling Congestion of Machine Type Communications in 3GPP Networks. PLOS ONE. December 9, 2016. 11 p. DOI: 10.1371/journal.pone.0167380.
15. Hladkykh V.M. Ієрархічна маршрутизація з балансуванням навантаження в сенсорних мережах / V.M. Hladkykh, O.S. Toroshanko // Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika»: Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2017. – № 885. – С. 68-75.
16. Klymash M.M. Tenzorne podannia alhorytmiv marshrutyzatsii / M.M. Klymash, B.M. Strykhaliuk, M.V. Kaidan // Zviazok. – 2010. – № 1. – S. 33-35.
17. Toroshanko O.S. Porivnialnyi analiz efektyvnosti skhem vyavlennia perevantazhennia telekomunikatsiinoi merezhi / O.S. Toroshanko, Yu.M. Shebblanin // Bezpeka informatsiinykh system i tekhnolohii. – 2022. – № 2(6). – S. 64-77.

ХРУЛЬОВ МИКОЛА

Черкаський державний технологічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-8532-0967>e-mail: m.khrulov@chdtu.edu.ua

КРИВОУС ГЕННАДІЙ

Черкаський державний технологічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-5589-9020>e-mail: h.v.kryvous.asp@chdtu.edu.ua

СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ ЛІНІЙНОЇ ШВИДКОСТІ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЗАГОТОВКИ ЗА ДОПОМОГОЮ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТИПУ ІНДУКТОСИН

У статті розглянуто спосіб виміру лінійної швидкості переміщення заготовки за допомогою вимірювального перетворювача типу індуктосин. Вимірювання лінійної швидкості переміщення заготовки пропонується проводити шляхом вимірювання кутової швидкості ротора індуктосину відносно магнітного поля, що створюється ортогональними статорними обмотками.

Застосування запропонованого способу вимірювання лінійної швидкості переміщення заготовки дозволить суттєво підвищити точність вимірювання за рахунок компенсації динамічної похибки та знизити вартість вимірювачів переміщення на основі індуктосину за рахунок реалізації функції визначення швидкості на основі 8-розрядних мікроконтролерів.

Ключові слова: метод вимірювання, вимірювання швидкості переміщення, вимірювальний перетворювач, індуктосин.

KHRULOV MYKOLA, KRYVOUS HENNADIY

Cherkasy State Technological University

THE LINEAR SPEED OF THE WORKPIECE MOVEMENT MEASURING METHOD THAT AN INDUCTOSYN-TYPE MEASURING TRANSDUCER USING

The article considers a method for measuring the linear speed of movement of the workpiece using an inductosyn-type measuring transducer. To ensure the implementation of technological processes, it is required to maintain the values of technological parameters within the specified limits. One of the important parameters of many technological processes is the speed of movement of the working body relative to the workpiece. One of the areas of application of speed sensors are numerical control systems, in which speed sensors are used to control the electric drive. Currently, a significant amount of CNC equipment is in operation, in which movement meters that use the transformation of angular displacement into phase and are made on the basis of primary transducers such as inductosyn, resolver, rotating transformer or selsyn are used.

It is proposed to measure the linear speed of the workpiece movement using an inductosyn type measuring transducer by measuring the angular velocity of the inductosyn rotor, which is defined as the difference of the angular velocity of the rotating magnetic field created by the stator windings and the angular velocity of the rotor, relative to the rotating magnetic field of the stator. It is noted that if the direction of rotation of the magnetic field and the direction of rotation of the rotor is matching, and if the angular velocities of rotation of the magnetic field and the rotor are equal, the proposed method for measuring the linear velocity of the workpiece cannot be used. The application of the proposed method will allow to eliminate additional devices, that is necessary to determine the speed of movement of the workpiece, for example, tachometers, which will significantly reduce the cost of movement speed meters based on inductosyn.

Keywords: measurement method, movement speed measurement, transducer, inductosyn.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Для забезпечення виконання технологічних процесів потрібно підтримувати значення технологічних параметрів у заданих межах. Одним із важливих параметрів багатьох технологічних процесів є швидкість переміщення робочого органу відносно заготовки.

Однією з сфер застосування датчиків швидкості є системи числового програмного управління (ЧПУ), в яких датчики швидкості застосовуються для керування електроприводом. У той же час датчики швидкості можуть застосовуватися для компенсації динамічної похибки вимірювання переміщення робочого органу відносно заготовки [1]. В даний час в експлуатації знаходиться значна кількість обладнання з ЧПУ, в якому застосовуються вимірювачі переміщення, що використовують перетворення кутового переміщення у фазу і виконані на основі первинних перетворювачів типу індуктосин, резольвер, трансформатор що обертається або сельсин. Таким чином, завдання вимірювання лінійної швидкості переміщення за допомогою вимірювального перетворювача типу індуктосин актуальне і представляє певний науковий і практичний інтерес.

Аналіз досліджень та публікацій

Принцип роботи вимірювального перетворювача типу індуктосин описаний в [2–4]. В [5] пропонується використовувати резольвер для визначення положення ротора відносно статора і подальшого обчислення швидкості на підставі виконаних вимірювань. В [6] для визначення малих швидкостей обертання пропонується використовувати резольвер в режимі пульсуючого поля.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є розробка способу вимірювання лінійної швидкості переміщення заготовки за допомогою вимірювального перетворювача типу індуктосин.

Виклад основного матеріалу

Вимірювання лінійної швидкості переміщення заготовки за допомогою вимірювального перетворювача типу індуктосин пропонується проводити шляхом вимірювання кутової швидкості ротора індуктосину.

Можливі два режими роботи індуктосину, режим пульсуючого поля і режим поля, що обертається. У другому режимі статорні обмотки живляться синусоїдальними і косинусоїдальними напругами рівної амплітуди [3], за рахунок чого створюється магнітне поле, що обертається. У випадку, що розглядається в цій статті, індуктосин працює в режимі поля, що обертається.

Відомо, що при обертанні рамки в постійному магнітному полі магнітний потік, що проходить через рамку, періодично змінюється [8], при цьому в рамці, що обертається, виникає синусоїдальна Е.Р.С.

Е.Р.С., що виникає в рамці, визначається так [8]:

$$e(t, \omega) = B \cdot S \cdot N \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) \quad (1)$$

де $e(t, \omega)$ – Е.Р.С., що виникає в рамці внаслідок зміни магнітного потоку, що проходить через рамку;

B – магнітне поле;

S – площа рамки;

N – кількість витків рамки;

ω – кутова швидкість обертання рамки відносно магнітного поля;

t – час.

Позначимо добуток $B \cdot S \cdot N \cdot \omega$ через $e_{\max}(\omega)$ [8]:

$$e_{\max}(\omega) = B \cdot S \cdot N \cdot \omega, \quad (2)$$

де $e_{\max}(\omega)$ – амплітудне значення синусоїдальної Е.Р.С., що виникає в рамці.

Тоді вираз (1) [8] можна подати у вигляді:

$$e(t, \omega) = e_{\max}(\omega) \cdot \sin(\omega t) \quad (3)$$

На кінцях рамки виникає напруга $U(t, \omega)$ [8], що відповідає Е.Р.С. $e(t, \omega)$ і збігається з нею за фазою:

$$U(t, \omega) = U_{\max}(\omega) \cdot \sin(\omega t), \quad (4)$$

де $U(t, \omega)$ – напруга, що виникає на кінцях рамки;

$U_{\max}(\omega)$ – амплітудне значення напруги, що виникає на кінцях рамки.

Розглянемо спосіб виміру кутової швидкості ротора індуктосину, що пропонується. Магнітне поле індуктосину, що обертається, створюється за рахунок живлення двох ортогонально розташованих статорних обмоток індуктосину напругами, що реалізують функції:

$$U_{\sin}(t) = U_A \sin(\omega_s t)$$

$$U_{\cos}(t) = U_A \cos(\omega_s t),$$

де $U_{\sin}(t)$ – напруга живлення синусної статорної обмотки;

$U_{\cos}(t)$ – напруга живлення косинусної статорної обмотки;

U_A – амплітуда напруги живлення статорних обмоток;

ω_s – кутова частота напруги живлення статорних обмоток і, відповідно, кутова швидкість обертання магнітного поля, що створюється статорними обмотками.

Відносно статора обертається ротор індуктосина з кутовою швидкістю ω_r . Осі обертання магнітного поля та ротора збігаються. Кутова частота обертання ротора відносно магнітного поля визначиться як:

$$\omega_{rs} = \omega_s - \omega_r, \quad (5)$$

де ω_{rs} – кутова швидкість обертання ротора відносно магнітного поля, що обертається, і відповідно, кутова частота вихідної синусоїдальної напруги ротора;

ω_s – кутова частота напруги живлення статорних обмоток, і, відповідно, кутова швидкість обертання магнітного поля відносно статора;

ω_r – кутова швидкість обертання ротора відносно статора..

Оскільки $\omega = 2\pi f$ [7], вираз (5) можна подати у вигляді:

$$f_{rs} = f_s - f_r, \quad (6)$$

де f_{rs} – частота обертання рамки відносно магнітного поля, що обертається, і відповідно, частота вихідної синусоїдальної напруги ротора;

f_s – частота напруги живлення статорних обмоток, і, відповідно, частота обертання магнітного поля відносно статора;
 f_r – частота обертання ротора відносно статора.

За рахунок обертання ротора відносно магнітного поля, що обертається (рис. 1) відповідно до (4), в роторній обмотці створюється вихідна напруга $U_{out}(t, \omega_{rs})$:

$$U_{out}(t, \omega_{rs}) = U_{max}(\omega_{rs}) \cdot \sin(\omega_{rs} t + \varphi)$$

де $U_{out}(t, \omega_{rs})$ – напруга вихідного сигналу роторної обмотки;

φ – зсув фази напруги вихідного сигналу роторної обмотки по відношенню до напруги живлення статорної обмотки, наприклад, синусної. Визначається положенням ротора відносно статорних обмоток.

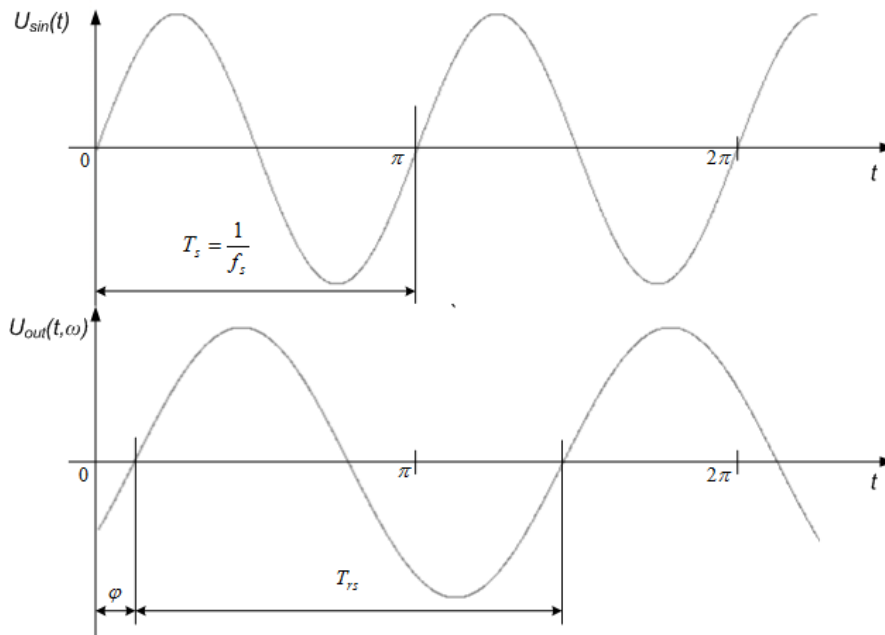


Рис. 1. Вимірювання швидкості заготовки за допомогою вимірювального перетворювача типу індуктосин

Лінійна швидкість переміщення заготовки може бути визначена таким чином:

$$V_{лин} = k_v f_r, \tag{7}$$

де $V_{лин}$ – лінійна швидкість переміщення заготовки;

k_v – коефіцієнт, що зв'язує лінійну швидкість переміщення заготовки та частоту обертання ротора, визначається конструкцією механічної частини верстатного обладнання.

Частота напруги живлення статорних обмоток f_s протягом часу не змінюється, тобто є константою.

Тоді на основі формул (6) та (7) лінійну швидкість переміщення заготовки можна визначити як:

$$V_{лин} = k_v (C - f_{rs}) \tag{8}$$

де C – константне значення, що дорівнює частоті напруги живлення статорних обмоток f_s .

З урахуванням $f = \frac{1}{T}$ [8], вираз (8) можна подати у вигляді:

$$V_{лин} = k_v \left(C - \frac{1}{T_{rs}} \right), \tag{9}$$

де T_{rs} – період вихідної синусоїдальної напруги роторної обмотки.

Таким чином, для визначення лінійної швидкості переміщення заготовки за допомогою вимірювального перетворювача типу індуктосин, достатньо виміряти період T_{rs} вихідної напруги синусоїдальної роторної обмотки і виконати розрахунок відповідно до формули (8) або (9).

Зазначимо, що при збігу напрямку обертання магнітного поля та напрямку обертання ротора, і при $\omega_r \rightarrow \omega_s$, або інакше $\omega_{rs} \rightarrow 0$, відповідно до (2), буде мати місце $\lim_{\omega_r \rightarrow \omega_s} e(t, \omega) = 0$. Тобто при рівності кутової швидкості магнітного поля, що обертається, і кутової швидкості роторної обмотки, кутова швидкість роторної обмотки відносно магнітного поля дорівнюватиме 0, тоді, в силу (2), амплітудне значення Е.Р.С. $e_{max}(\omega)$, що виникає в роторній обмотці, і, відповідно, амплітудне значення напруги

$U_{\max}(\omega)$ на кінцях роторної обмотки дорівнюватимуть 0. Це накладає обмеження на використання способу визначення лінійної швидкості переміщення заготовки за допомогою вимірювального перетворювача типу індуктосин, що пропонується. Пропонований спосіб дозволяє забезпечити необхідну точність вимірювання швидкості переміщення заготовки за виконання умови $\omega_s \gg \omega_r$.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку

Розглянутий спосіб вимірювання лінійної швидкості переміщення заготовки може бути застосований для компенсації динамічної похибки методу виміру переміщення за допомогою вимірювального перетворювача типу індуктосин [1], що дозволить підвищити точність вимірювання переміщення заготовки.

В [9] запропоновано на основі 8-розрядних мікроконтролерів, наприклад, сімейства AVR або PIC реалізувати функції формування живлення статорних обмоток та вимірювання положення заготовки по відповідній осі координат. Додатково мікроконтролер може виконувати і функцію вимірювання швидкості переміщення заготовки.

Використання розглянутого способу дозволить виключити додаткові пристрої, необхідні для визначення швидкості переміщення заготовки, наприклад, тахометри, що дозволить істотно знизити вартість систем керування рухом заготовки.

Література

1. Хрулев Н.В., Кривоус Г.В. Способ компенсации динамической погрешности метода измерения перемещения при помощи измерительного преобразователя типа индуктосин, основанного на измерении сдвига фазы. Вісник Черкаського державного технологічного університету (Технічні науки). 2021. № 2. С. 39–48.
2. Robert W. Tripp, James L. Winget United States Patent US2799835 Position measuring transformer. May 18, 1955.
3. Устройство 2С42–65 : руководство по эксплуатации 3.035.090 РЭ. 1991. Ч. 1.
4. Synchro/resolver conversion: handbook. Data Device Corporation 105 Wilbur Place, Bohemia, New York 11716-2482. URL: <https://www.ddc-web.com/documents/synhdbk.pdf>
5. Russ Ether, Mark B. Hanson United States Patent US7578185B2. Resolver-based wheel speed sensor and method of using same. Aug. 25, 2009.
6. Günter Schwesig, Albrecht Donat United States Patent US005260650A Method and apparatus for detecting low rotational speeds using a resolver. Nov. 9, 1993.
7. Бойко В.С., Бойко В.В., Видолоб Ю.Ф. Теоретичні основи електротехніки 6 підручник : у 3 т. Т. 1: Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами К. : ІВЦ "Видавництво «Політехніка»", 2004. 272 с.
8. Соколович Ю.А., Богданова Г.С. Фізика : навчально-практ. довідник. Х. : Видавництво «Ранок», 2010. 384 с.
9. Хрулев Н. В. Структура микроконтроллерного измерителя перемещения на основе индуктосина. Вісник Хмельницького національного університету (Технічні науки). 2015. № 1. С. 136–139.

References

1. Hrulev N.V., Krivous G.V. Sposob kompensacii dinamicheskoy pogreshnosti metoda izmerenija peremeshhenija pri pomoshhi izmeritel'nogo preobrazovatelja tipa induktosin, osnovannogo na izmerenii sdviga fazy. Visnik Cherkas'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu (Tehnichni nauki). 2021. № 2. S. 39–48..
2. Robert W. Tripp, James L. Winget United States Patent US2799835 Position measuring transformer. May 18, 1955.
3. Ustroistvo 2S42–65 : rukovodstvo po ekspluatatsyy 3.035.090 RЭ. 1991. Ch. 1.
4. Synchro/resolver conversion: handbook. Data Device Corporation 105 Wilbur Place, Bohemia, New York 11716-2482. URL: <https://www.ddc-web.com/documents/synhdbk.pdf>
5. Russ Ether, Mark B. Hanson United States Patent US7578185B2. Resolver-based wheel speed sensor and method of using same. Aug. 25, 2009.
6. Günter Schwesig, Albrecht Donat United States Patent US005260650A Method and apparatus for detecting low rotational speeds using a resolver. Nov. 9, 1993.
7. Boiko V.S., Boiko V.V., Vydolob Yu.F. Teoretychni osnovy elektrotekhniki 6 pidruchnyk : u 3 t. T. 1: Ustaleni rezhymy liniinykh elektrychnykh kil iz zoseredzhenymy parametramy K. : IVTs "Vydavnytstvo «Politekhnika»", 2004. 272 s.
8. Sokolovych Yu.A., Bohdanova H.S. Fizyka : navchalno-prakt. dovidnyk. Kh. : Vydavnytstvo «Ranok», 2010. 384 s.
9. Hrulev N. V. Struktura mikrokontrolernogo izmeritelja peremeshhenija na osnove induktosina. Visnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu (Tehnichni nauki). 2015. № 1. S. 136–139.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-321-3-199-Помилка! Закладку не визначено.

УДК: 66.047.45

РУТКЕВИЧ ВОЛОДИМИР

Вінницький національний аграрний університет

ORCID ID: [0000-0002-6366-7772](https://orcid.org/0000-0002-6366-7772)e-mail: y_rut@ukr.net

ШАПОВАЛЮК СЕРГІЙ

Вінницький національний аграрний університет

e-mail: Shapovaluk@ukr.net

АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В АДАПТИВНОМУ ГІДРАВЛІЧНОМУ ПРИВОДІ ВИВАНТАЖУВАЧА СТЕБЛОВИХ КОРМІВ

Розглядається питання підвищення ефективності роботи гідравлічного привода вивантажувача стеблових кормів в умовах нестабільності параметрів кормового масиву та змінного технологічного навантаження на робочих органах. Зазначено, що практично на всіх технологічних машинах та обладнанні сільськогосподарського призначення в основному використовується ручне керування силовими та кінематичними параметрами технологічного процесу, а наявне адаптивне керування в таких машинах і обладнанні або відсутнє або використовує спеціальні, складні адаптивні системи.

Показано, що в більшості випадків методика проектування гідроприводів робочого обладнання навантажувачів базуються на розгляданні плоских розрахункових схем. В якості зовнішніх навантажень розглядається гранична статична сила, або сила, що відповідає стандартним робочим навантаженням.

Дослідження перехідних процесів, пов'язаних з різким зростанням навантаження на робочому обладнанні при інтенсивному заглибленні робочого обладнання, показує, що динамічні зусилля можуть в 1,2–1,5 рази перевищувати їх статичний рівень. Подібне пікове навантаження призводить до аналогічних перевантажень гідропривода.

Таким чином, процес формування навантажень, діючих на робоче обладнання машин при виконанні технологічних операцій, носить складний характер.

Проведений аналіз показав, що створення приводів машин і обладнання, володіючих певними адаптивними можливостями можливе на принципах внутрішніх диференціальних зв'язків елементів їх структури. Метою процесу адаптації гідропривода є стабілізація змінного технологічного навантаження на робочому органі і узгодження параметрів руху робочого органу технологічної машини: головного руху і руху подачі.

В результаті аналізу перехідних процесів, що отримані при обчислювальному експерименті було встановлено, що при певних параметрах адаптивний гідравлічний привод вивантажувача стеблових кормів працює стійко, а при деяких з'являються нестійкі режими роботи, що призводить до коливань тиску, швидкості та подачі робочого органу. Можуть з'являтися вібраційні процеси, які можуть завадити виконанню функціональних можливостей.

Зазначено актуальність даного типу досліджень на початковому етапі, яке дозволить значно розширити коло інженерних досліджень при проектуванні, а також сприяє суттєвому скороченню об'єму експериментальних робіт, що в свою чергу призводить до зниження матеріальних витрат на розроблення нових гідравлічних систем.

Ключові слова: адаптивний гідравлічний привод, математична модель, перехідний процес, гідроциліндр, гідромотор, змінне навантаження, тиск, витрата.

RUTKEVYCH VOLODYMYR, SHAPOVALUK SERHIY

Vinnytsia National Agrarian University

ANALYSIS OF TRANSIENT PROCESSES IN THE ADAPTIVE HYDRAULIC DRIVE OF THE STEM FORAGE UNLOADER

The issue of increasing the efficiency of the hydraulic drive of the stalk fodder unloader in conditions of instability of the parameters of the fodder array and variable technological load on the working bodies is considered. It is noted that almost all agricultural technological machines and equipment mainly use manual control of power and kinematic parameters of the technological process, and the existing adaptive control in such machines and equipment is either absent or uses special, complex adaptive systems.

It is noted that in most cases, the methods of designing hydraulic drives of the working equipment of loaders are based on the consideration of flat calculation schemes. As external loads, the ultimate static force, or the force corresponding to standard working loads, is considered.

The study of transient processes associated with a sharp increase in the load on the working equipment during intensive deepening of the working equipment shows that dynamic efforts can exceed their static level by 1.2–1.5 times. A similar peak load leads to similar overloads of the hydraulic drive.

Thus, the process of forming loads acting on the working equipment of machines during technological operations is complex in nature.

The conducted analysis showed that the creation of drives of machines and equipment with certain adaptive capabilities is possible based on the principles of internal differential connections of the elements of their structure. The purpose of the adaptation process of the hydraulic drive module is to stabilize the variable technological load on the working body and coordinate the movement parameters of the working body of the technological machine: the main movement and the feed movement.

As a result of the analysis of the transient processes obtained during the computational experiment, it was established that with certain parameters of the adaptive hydraulic drive of the stalk fodder unloader, it works stably, and with some, unstable modes of operation appear, which leads to fluctuations in pressure, speed, and supply. Vibration processes may appear that may interfere with the performance of functional capabilities.

The relevance of this type of research at the initial stage is indicated, which will allow to significantly expand the range of engineering research during design, and also contributes to a significant reduction of the volume

experimental work with proving devices on a test bench, which in turn leads to a decrease in material costs for the development of new hydraulic systems.

Key words: adaptive hydraulic drive, mathematical model, transitional process, hydraulic cylinder, hydraulic motor, variable load, pressure, consumption.

Постановка проблеми

Пріоритетними напрямками розвитку України є перехід до передових цифрових, інтелектуально-виробничих технологій, роботизованих адаптивних систем керування [1, 2].

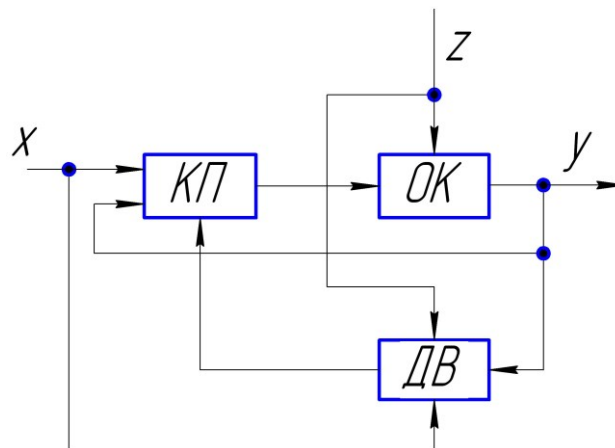
Крім цього, в даний час досить велика потреба в автоматизації багатофункціональних і комбінованих технологічних машин, які використовуються малими підприємствами, фермерськими господарствами, де їх експлуатаційна ефективність і вартість пов'язані з низькою функціональною взаємозамінністю, уніфікацією використовуваних агрегатів та приводів. Тому, створення простих і одночасно функціонально уніфікованих приводів або їх підсистем з функцією адаптації до змінних властивостей оброблюваного середовища є актуальною проблемою.

Аналіз останніх джерел

Майже у всіх технологічних машинах і обладнанні сільськогосподарського призначення, в основному використовується ручне керування силовими і кінематичними параметрами технологічного процесу. Адаптивне керування в цих машинах і обладнанні зустрічається дуже рідко, при цьому використовується спеціальні, складні адаптивні системи [3].

Адаптивні системи підрозділяються по класифікаційним показникам: по зміні структури і параметрів керуючих пристроїв (самонастроювальні, самоорганізуючі); по якості керування (зі стабілізацією або оптимізацією якості); по способу змінених параметрів керуючих пристроїв (аналітичні, пошукові); по способу настройки (за зовнішнім впливом, за характером об'єкта керування). При цьому використовуються різні підходи до побудови і системи реалізації структури системи: ідентифікаційний та безідентифікаційний [3-6].

У загальному випадку (рис. 1) адаптивні системи включають керуючий пристрій (КП), датчик (ДВ) відхилення вихідної величини (y) від заданого значення вхідної величини (x), зовнішнього впливу (z). Обов'язковою умовою адаптації системи є наявність в системі адаптивних зв'язків [5].



КП – керуючий пристрій, ОК – об'єкт керування, ДВ – датчик відхилення
Рис. 1. Структурна схема адаптивної системи керування

Датчик відхилень (ДВ) виробляє сигнал, який дозволяє визначити зміни відповідних параметрів системи і відповідно до цього, оптимізувати керуючий вплив.

Відомо багато підходів до зменшення енерговитрат в системах гідропривода. Наприклад, в гідроприводах, які працюють нетривало використовують схеми з розвантаженням насоса від тиску. Завдяки цьому зменшуються експлуатаційні витрати, збільшується ККД системи та підвищується довговічність насосного агрегата [3].

Одним із напрямків удосконалення адаптивних систем є створення та дослідження технічних систем з функцією адаптації по навантаженню з використанням принципу саморегуляції.

В різних галузях техніки використовують системи керування роботою приводів, які забезпечують адаптацію режимів їх роботи до зміни значень параметрів стану технологічної системи. В галузі металообробки широко використовуються методи керування процесами різання матеріалів, розроблені Б.С. Балакшиним та його учнями, які передбачають стабілізацію сил різання шляхом зміни в процесі обробки параметрів режиму різання. Високу ефективність даного метода керування технологічним процесом підтверджує його широке розповсюдження в практиці верстатобудування та інших машин, призначених для обробки різанням різних матеріалів.

Сутєвим вкладом в розвитку ідеї створення приводів з елементами саморегулювання в залежності від приймаючого навантаження з'явилося теоретичне обґрунтування і практичне використання систем типу Load Sensing з пропорційним керуванням роботою гідроапаратури [6].

Принцип роботи цієї системи полягає в тому, що «митєвий тиск навантаження слугить сигналом зворотного зв'язку для керуючого пристрою, який в свою чергу встановлює необхідний тиск насоса». За

допомогою компенсаторів підтримується постійний тиск перепад тиску на керуючих дроселях, що і визначає відсутність залежності швидкості руху робочого органу від його навантаження.

Усунення недоліків пропорційного керування параметрами руху робочого органу в залежності від навантаження шляхом використання пристрою клапанного типу і принципу адаптації присвячені роботи Сидоренка В.С. та його учнів [5].

На практиці поширено ряд способів узгодження роботи насосного агрегата та системи приводів: дроселювання, розвантаження через розподільник, використання регульованих насосів з різними типами регуляторів (регулятор витрати, регулятор тиску, регулятор тиску і витрати, регулятор потужності), використання гідроаккумуляторів, штучне «голодування» насоса, машинне регулювання, ступінчасте регулювання, введення штучних витоків та інше. Але відсутні факти впровадження в практику сільськогосподарського машинобудування систем приводів, які дозволяють змінювати режим роботи відповідно зміни стану технологічної системи.

Відомі наукові дослідження і практичні розробки в області створення систем адаптації по навантаженню, до них можна віднести гідросистему з комбінованим принципом адаптації до навантаження та гідропривод з адаптацією до навантаження.

Технологічні процеси, що виконуються багатьма машинами і технологічним обладнанням різного призначення, передбачають необхідність наявності двох узгоджених рухів робочого органу: руху подачі і руху обертання або руху подачі і руху обертання і руху обертання [6]. До таких технологічних машин і обладнання з гідроприводом: відносяться мобільні дорожньо-будівельні, сільськогосподарські і комунальні машини; мінітехніка, каналокопачі; мобільні бурові установки для буріння скважин та інше технологічне обладнання з двома рухами робочого органу. У більшості випадків силові навантаження та властивості кінематичних параметрів передаються від гідропривода до виконавчого органу без їх безперервної узгодженої адаптації до змінних властивостей, значенням параметрів опору середовища. Це узгодження здійснюється або вручну або періодично при досягненні граничних значень навантаження або швидкості подачі на робочому органі. Відсутність автоматичної невідповідності кінематичних і силових параметрів, що сприймаються робочим органом машин і обладнанням, призводить до порушення техніко-технологічних параметрів технологічного процесу, поломкам інструмента, робочого органу, аварійних ситуацій.

Мета роботи – підвищення ефективності роботи адаптивного гідравлічного привода вивантажувача стеблових кормів в умовах нестабільності параметрів кормового моноліту і зміни технологічного навантаження на робочих органах, шляхом моделювання, попереднього розрахунку та проєктування.

Виклад основного матеріалу

Дослідження процесів роботи адаптивного гідравлічного привода вивантажувача стеблових кормів виконувалось шляхом проведення обчислювального експерименту [6]. В результаті розв'язання задачі на ПЕОМ визначалися перехідні процеси, які виникають в процесі роботи адаптивного гідравлічного привода вивантажувача стеблових кормів. Алгоритм визначення перехідних процесів в зазначеній системі враховує змінне навантаження на вихідних ланках виконавчих гідродвигунів, яке власне є причиною виникнення перехідних процесів.

Початок роботи адаптивного гідравлічного привода вивантажувача стеблових кормів відбувається при нульовому навантаженні на виконавчих гідродвигунах, що в цілому відповідає процесу підведення П-подібної рамки до поверхні моноліту стеблових кормів, коли навантаження на вихідних ланках виконавчих гідродвигунів мінімальне або відсутнє.

На 400 мс від початку роботи передбачено зростання навантаження на вихідних ланках виконавчих гідродвигунів до значення, яке відповідає реальним значенням момента навантаження на валу гідромотора $M_{зм}=100$ Н·м та сили $F_{рез}=1200$ Н на штоці гідроциліндра. При подальшому дослідженні процесу роботи системи гідроприводів момент від сил різання стеблових кормів та зусилля на подолання сили опору при подачі П-подібної рамки відповідало значенням, визначеним експериментально при дослідженні процесу відокремлення блок-порції корму від стеблових кормів моноліту [6].

На рис. 2 показано отримані розрахункові перехідні процеси в адаптивному гідравлічному приводі вивантажувача, викликані зміною навантаження на виконавчих ланках приводних гідродвигунів.

Показані на рис. 2 перехідні процеси розраховані при наступних початкових значеннях параметрів адаптивного гідравлічного привода вивантажувача стеблових кормів [6]:

- об'ємна подача насоса $Q_n=2,38 \cdot 10^{-4}$ м³/с, що відповідає об'ємній подачі шестеренного насоса типу НШ-10 при потужності привода насоса 5 кВт;
- ширина робочих кромок золотника роздільника потоку $a=1$ мм;
- величина початкового відкриття робочих вікон золотника роздільника потоку $l_1=6$ мм, $l_2=2$ мм;
- коефіцієнт витрати робочої рідини через дросельні отвори $\mu=0,62$;
- номінальний тиск в гідросистемі $p_0=10,0$ МПа;
- густина робочої рідини $\rho=850$ кг/м³;
- коефіцієнт податливості порожнин системи гідроприводів, заповнених робочою рідиною, $K=0,6 \cdot 10^{-9}$ м²/Н [7];
- діаметр золотника роздільника потоку $d_{зол}=25$ мм;

- зведений до вала гідромотора момент інерції частин, що обертаються, $I=100 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$;
- зведена до П-подібної рамки маса рухомих частин вивантажувача стеблових кормів $m_{np}=45 \text{ кг}$;
- коефіцієнт в'язкого тертя $\beta=2,5\cdot 10^3 \text{ Н}\cdot\text{с}$ [8];
- діаметр виконавчого гідроциліндра подачі П-подібної рамки, $D_u=63 \text{ мм}$;
- об'єм гідроліній, які з'єднують виконавчі гідродвигуни із роздільником потоку $W_1= W_2= W_4=100 \text{ см}^3$;
- об'єм гідролінії, яка з'єднує дросель із підторцевою порожниною роздільника потоку $W_3=25 \text{ см}^3$;
- величина переміщення золотника роздільника потоку вліво до упора, $b_1=1 \text{ мм}$;
- величина переміщення золотника роздільника потоку вправо до упора, $b_2=2 \text{ мм}$;
- жорсткість пружини, установленної в підторцевій порожнині золотника роздільника потоку, $C_{np}=0,5 \text{ Н/мм}$.

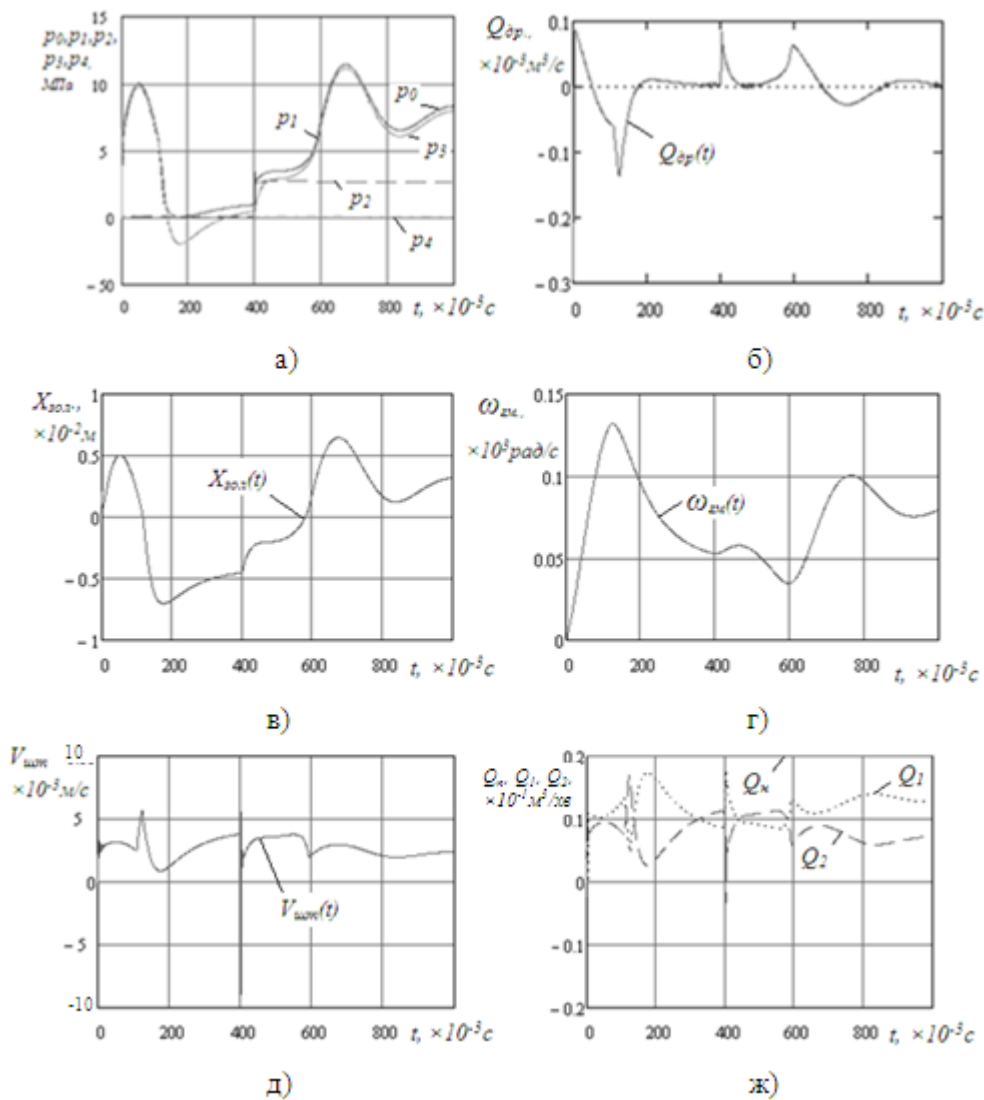


Рис. 2. Перехідний процес в адаптивному гідравлічному приводі вивантажувача стеблових кормів при початкових значеннях параметрів: а) зміна тиску в порожнинах гідросистеми, б) витрата рідини крізь дросель, в) переміщення золотника роздільника потоку, г) кутова швидкість вала гідромотора, д) швидкість подачі штока гідроциліндра, ж) витрати рідини, які споживаються гідромотором (Q_1) та гідроциліндром (Q_2)

На рис. 2 показано зміну параметрів вивантажувача стеблових кормів – витрат рідини, переміщення золотника роздільника потоку, кутової швидкості гідромотора та швидкості штока гідроциліндра, які відбуваються під час перехідного процесу, що викликаний зміною навантажень на виконавчих гідродвигунах за зазначеним вище алгоритмом.

На рис. 2 а зображено перехідний процес зміни тиску у наступних гідролініях: тиск на виході насоса p_0 , тиск на вході гідромотора p_1 , тиск на вході гідроциліндра p_2 , тиск у підторцевій порожнині золотника роздільника потоку p_3 , тиск на виході гідроциліндра p_4 . Згідно складеної програми початок роботи системи гідроприводів відбувається при нульових значеннях тиску у всіх гідролініях та порожнинах. Відповідно до цієї граничної умови початок роботи системи гідроприводів характеризується значним ростом тисків p_0, p_1, p_2, p_3 – об'ємна подача насоса миттєво зростає при тому, що початкова швидкість гідромотора та

гідроциліндра дорівнювала в цей момент нулю. Далі значення указаних тисків зменшуються до величини, необхідної для подолання інерційного навантаження та опору сил в'язкого тертя.

На чотирьохсотій мілісекунді момент на валу гідромотора та зусилля на штоці гідроциліндра за ступінчастою залежністю зростають до указаних вище значень.

Відповідно зростають тиски p_0 , p_1 , p_3 . При цьому процес зміни величини тиску має коливальний характер, пікове значення указаних тисків наближається до 12 МПа, але амплітуда коливань з часом швидко зменшується і, таким чином, система набуває стану стійкої рівноваги. Час виходу системи в стан стійкої рівноваги знаходиться на рівні 600 мс, що свідчить про високий рівень швидкодії, який в повній мірі відповідає вимогам до динамічних характеристик системи гідроприводів більшості сільськогосподарських машин.

Витрата рідини крізь дросель (рис. 2, б) характеризується зміною напрямку, викликаною зміною напрямку руху золотника (рис. 2, в). В момент пуску системи гідроприводів, коли тиск p_3 зменшується до мінімального значення, пружина роздільника потоку штовхає золотник вправо, витісняючи рідину з підторцевої порожнини золотника крізь дросель. При подальшому русі золотника вліво рідина надходить до підторцевої порожнини – витрата крізь дросель має додатне значення. Відповідно змінюється положення золотника. Наприкінці першої секунди (рис. 2, в) золотник переміщується у фіксоване положення, при якому він зміщений з початкового положення на 3 мм.

При цьому в процесі навантаження робочих органів адаптивного гідропривода при $t=400$ мс частота обертання зростає від $\omega_{2m}=0,053 \times 10^3$ рад/с до $\omega_{2m}=0,08 \times 10^3$ рад/с (рис. 2, г), що відповідає підвищенню швидкості різання на 33 %. Швидкість подачі штока гідроциліндра зменшується від $V_{um}=3,75 \times 10^{-3}$ м/с до $V_{um}=2,5 \times 10^{-3}$ м/с (рис. 2, д), що відповідає зменшенню швидкості подачі П-подібної рамки на 33 % [9, 10].

Зміна швидкості обертання вала гідромотора та швидкості подачі П-подібної рамки виникла в результаті зміщення золотника роздільника потоку робочої рідини на 3 мм в бік збільшення відкриття першого робочого вікна, яке з'єднує насос із гідромотором, та зменшення відкриття другого робочого вікна. Відповідно змінюються витрати робочої рідини у відповідні порожнини гідромотора та гідроциліндра (рис. 2, ж). Об'ємна подача робочої рідини Q_1 , яка споживається гідромотором, збільшується від $0,088 \times 10^{-1}$ м³/хв до

$0,136 \times 10^{-1}$ м³/хв, що відповідає підвищенню швидкості різання силосного моноліту на 57 %. В той же час подача робочої рідини Q_2 , яка споживається гідроциліндром, зменшується від $0,113 \times 10^{-1}$ м³/хв до $0,075 \times 10^{-1}$ м³/хв, що відповідає зменшенню швидкості подачі П-подібної рамки на 43 %.

Таким чином, показані на рис. 2 осцилограми свідчать, що запропонований адаптивний гідравлічний привод вивантажувача стеблових кормів працює в усталеному режимі, при цьому забезпечується широкий діапазон регулювання швидкості виконавчих ланок приводів, що дозволяє стабілізувати сили різання при зміні умов різання і, таким чином, використовувати резерви зниження потужності застосованих гідроприводів.

На рис. 3 зображено перехідний процес у адаптивному гідроприводі вивантажувача стеблових корму, розрахований при зміні настройки упора золотника роздільника потоку, який обмежує його рух вліво. В даному випадку прийнято, що величина настройки становить $b_2=4$ мм. Значення інших параметрів відповідають початковим, зазначеним вище, в тому числі діаметр золотника дорівнює $d_{зол}=25$ мм, жорсткість пружини $C_{пр}=0,5$ Н/мм.

В результаті зміни настройки упорів золотника тиск в лінії нагнітання зменшується приблизно на 25 %. Відповідно змінюються в бік зменшення тиски p_1 , p_2 , p_3 . Так пікове значення тиску p_1 не перевищує 7,5 МПа. Переміщення золотника роздільника потоку x в бік закриття другого робочого вікна значно збільшується, але при цьому зміна витрат у гідролініях, за якими робоча рідина надходить до гідромотора та гідроциліндра, не відрізняється від попередніх. При цьому перехідний процес характеризується значно меншою коливальністю та завершується виходом на усталене значення параметрів приблизно на 250 мс після подачі на робочі органи відокремлювача навантаження, що свідчить про підвищення швидкодії адаптивного гідравлічного привода вивантажувача стеблових корму. Зміна швидкостей гідромотора та штока гідроциліндра відбувається аналогічно до показаної на рис. 2. Таким чином, дана комбінація значень параметрів адаптивного гідравлічного привода вивантажувача стеблових корму забезпечує стійку роботу гідросистеми при високій якості її динамічних характеристик.

На рис. 4 зображено перехідні процеси, отримані при дослідженні математичної моделі адаптивного гідропривода вивантажувача при умові, що в даному випадку у порівнянні із започаткованими значеннями параметрів гідросистеми змінено настройку упора золотника $b_2=4$ мм, а також зменшено діаметр золотника до значення $d_{зол}=19,5$ мм, а жорсткість пружини до значення $C_{пр}=0,3$ Н/мм.

Аналіз процесів, які відбуваються в даному випадку, свідчить, що динамічний стан гідросистеми має граничний характер. При запуску адаптивного гідравлічного привода вивантажувача стеблових корму процес протікає керовано, відхилення параметрів не перевищує припустимих значень. Але в момент подачі навантаження на робочі органи процес набуває нестійкого характеру – амплітуда коливань параметрів, які визначають роботу гідросистеми постійно зростає до виходу на режим автоколивань. В результаті указаних коливань пікові значення тиску досягають 15 МПа, значними по величині амплітудами відрізняються

коливання переміщень золотника (рис. 4, в) і, відповідно, кутової швидкості вала гідромотора (рис. 4, г), а також витрат на вході гідромотора та гідроциліндра (рис. 4, ж).

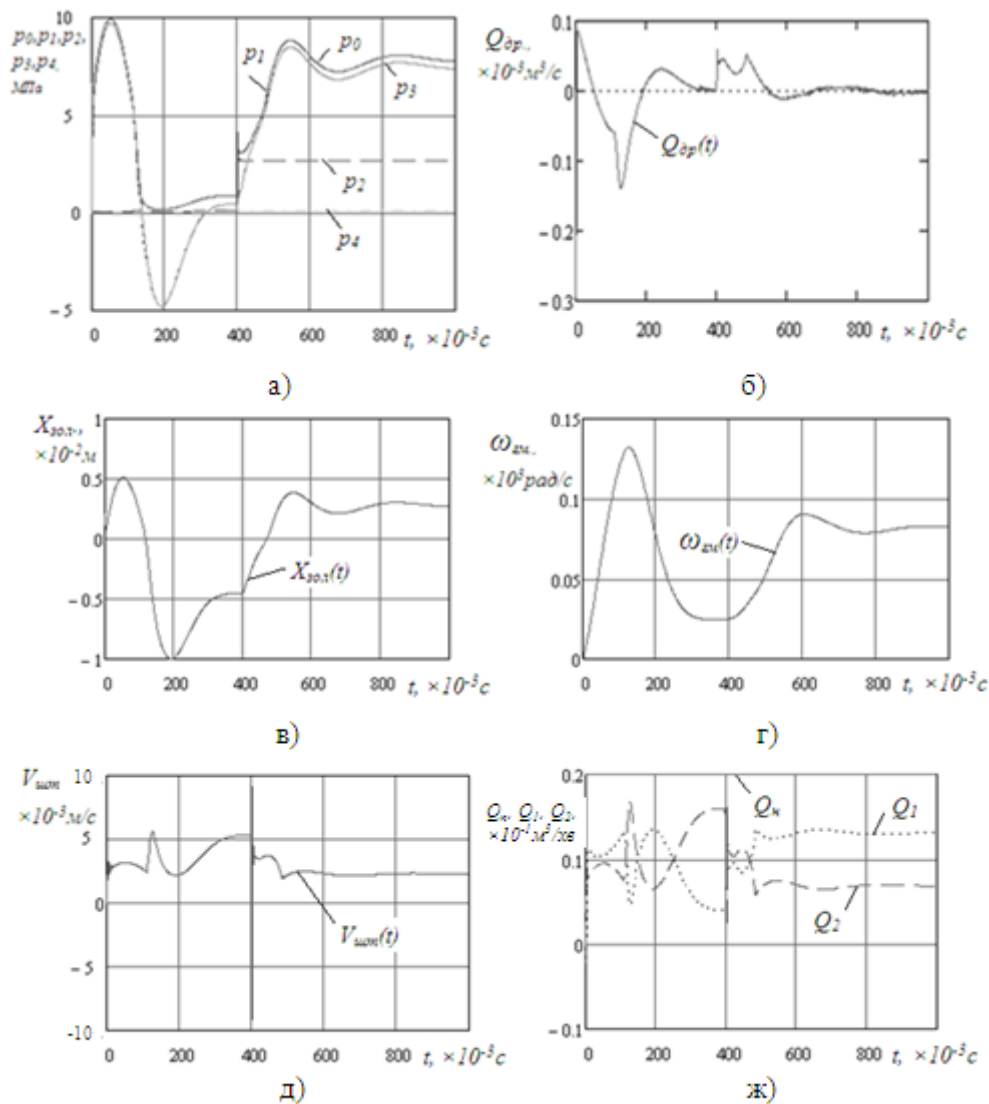


Рис. 3. Перехідний процес в адаптивному гідравлічному приводі вивантажувача стеблових кормів при значенні настройки упора $b_2=4$ мм: а) зміна тиску у порожнинних гідросистеми; б) витрата рідини крізь дросель; в) переміщення золотника роздільника потоку; г) зміна кутової швидкості гідромотора; д) зміна швидкості подачі П – подібної рамки; ж) витрати рідини, які споживаються гідромотором (Q_1) та гідроциліндром (Q_2)

Нестійкий процес роботи адаптивного гідравлічного привода вивантажувача стеблових кормів є неприйнятним з точки зору працездатності гідросистеми. Автоколивання, які збуджуються в гідросистемі, можуть бути причиною вібрацій машин, що можуть заважати виконанню нею свого службового призначення.

Таким чином, в процесі розроблення систем гідроприводів сільськогосподарських машин важливим критерієм вибору параметрів є необхідність забезпечення стійкого режиму роботи, оскільки дане дослідження свідчить про можливість виникнення нестійких режимів роботи при певній комбінації параметрів адаптивного гідравлічного привода вивантажувача стеблових кормів.

Проведено також розрахунок перехідних процесів при роботі систем гідроприводів блочно-порційного відокремлювача з метою дослідження впливу на якість динамічних характеристик відстані b_1 до упора, що обмежує переміщення золотника вправо. На рис. 5 показано перехідний процес, отриманий при значенні установки упора $b_1=3$ мм. При цьому вибрано золотник, діаметр якого дорівнює $d_{зол}=32$ мм при жорсткості пружини $C_{пр}=0,5$ Н/мм. Інші параметри адаптивного гідравлічного привода вивантажувача стеблових кормів відповідають початковим.

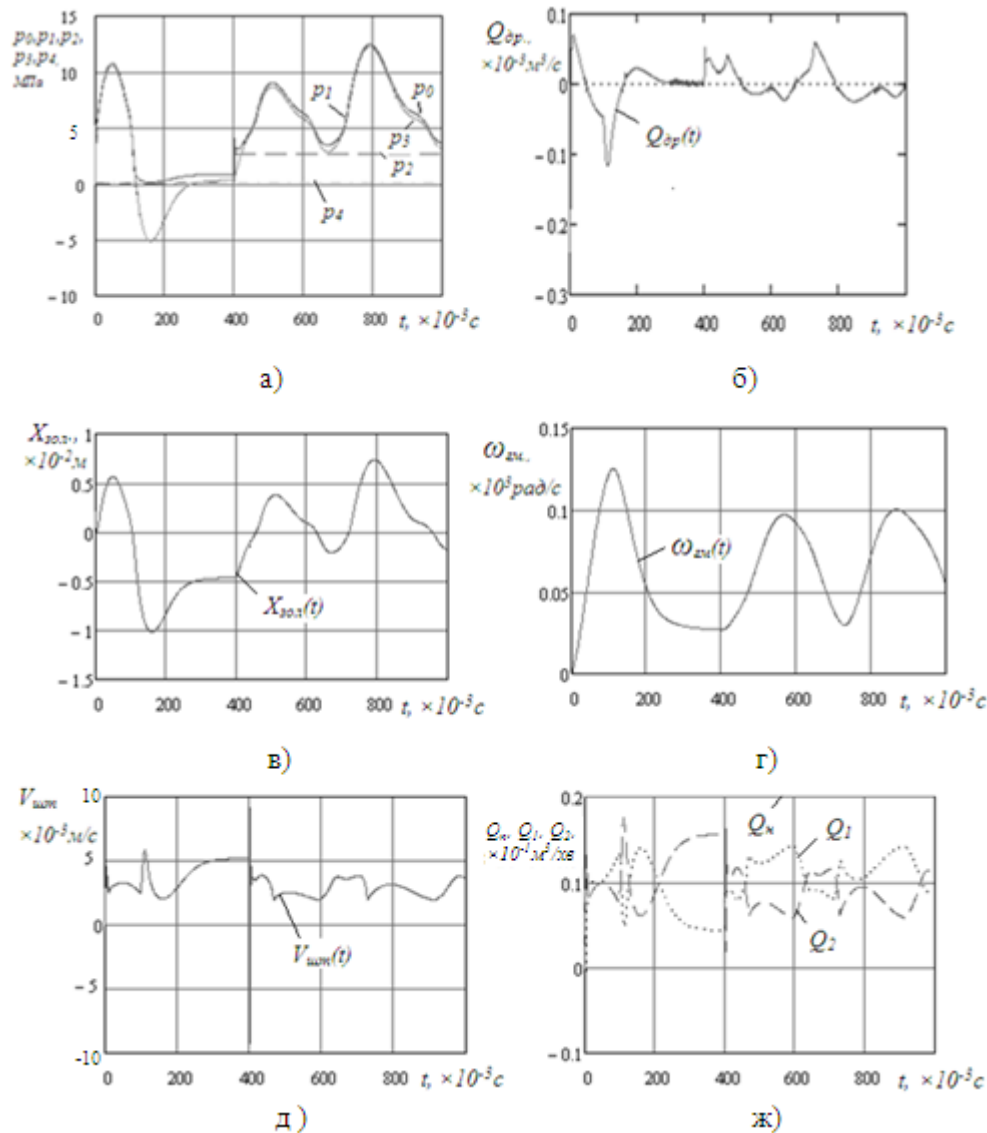


Рис. 4. Перехідний процес в адаптивному гідравлічному приводі вивантажувача стеблових кормів при настройці упора $b_2=4$ мм, діаметра золотника $d_{зол}=19,5$ мм, жорсткості пружини $C_{пр}=0,3$ Н/мм:
 а) зміна тиску у порожнинах гідросистеми; б) витрата рідини крізь дросель;
 в) переміщення золотника роздільника потоку; г) зміна кутової швидкості гідромотора; д) зміна швидкості подачі П-подібної рамки; ж) витрати рідини, які споживаються гідромотором (Q_1) та гідроциліндром (Q_2)

Збільшення діаметра золотника призводить до суттєвого збільшення сили на правому торці золотника роздільника потоку. В результаті цього зростає переміщення золотника вліво в напрямку додатних значень його координати (рис. 5, в). В свою чергу це викликає значне збільшення відкриття першого робочого вікна, яке з'єднує напірну гідролінію від насоса із гідромотором, та практично перекриває друге робоче вікно. В результаті, як показано на рис. 5, ж весь потік рідини від насоса спрямовується до гідромотора, швидкість обертання якого набуває максимального значення. В той же час швидкість подачі П-подібної рамки падає до нуля, що виключає можливість відокремлення блок-порції стеблових кормів від моноліту.

Такий режим роботи адаптивного гідравлічного привода вивантажувача стеблових кормів, який також відрізняється значною коливальністю (рис.5 а, в, г), неприйнятний з точки зору виконання устаненого технологічного процесу. В зв'язку з цим відповідно до потужності насосної станції необхідно обмежувати максимальне переміщення золотника, яке може виникати при запуску або зміні навантаження на виконавчих органах.

На рис. 6 зображені перехідні процеси в адаптивному гідроприводі вивантажувача стеблових кормів, які розраховані при зменшенні ширини робочих кромок золотника до $a=0,5$ мм. При цьому діаметр золотника дорівнює $d_{зол}=27$ мм, жорсткість пружини $C_{пр}=0,5$ Н/мм. Згідно із висновками за результатами аналізу впливу настройки лівого упора золотника її величину зменшено до значення $b_1=1$ мм.

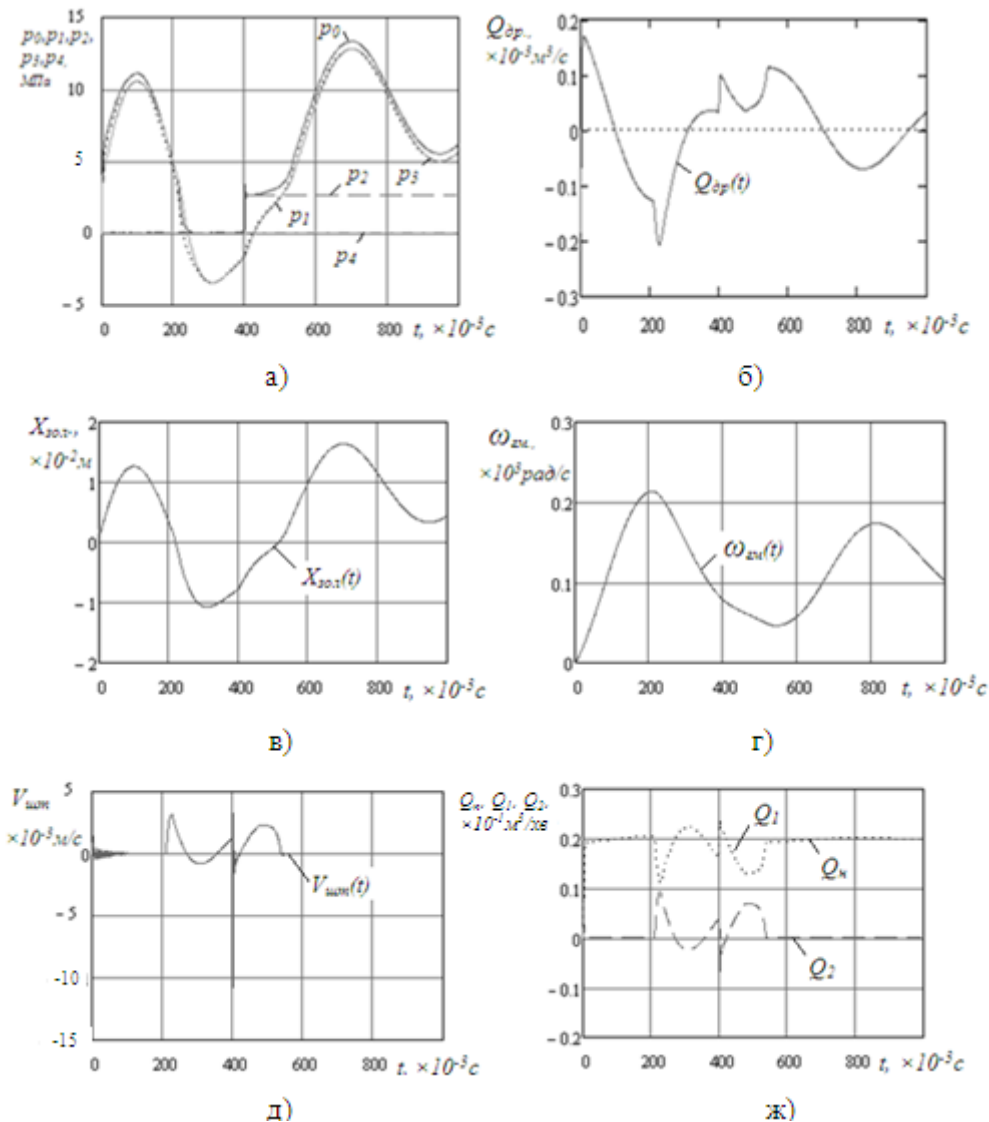


Рис. 5. Перехідний процес в адаптивному гідравлічному приводі вивантажувача стеблових кормів при настройці упора $b_1=3$ мм, діаметрі золотника $d_{зол}=32$ мм, жорсткості пружини $C_{пр}=0,5$ Н/мм:
 а) зміна тиску у порожнинах гідросистеми; б) витрата рідини крізь дросель;
 в) переміщення золотника роздільника потоку; г) зміна кутової швидкості гідромотора; д) зміна швидкості подачі П-подібної рамки; ж) витрати рідини, які споживаються гідромотором (Q_1) та гідроциліндром (Q_2)

Перехідний процес, який виникає при пускові адаптивного гідравлічного привода, завершується достатньо швидко, завершуючись до чотирьохсоті мілісекунди з виходом на усталені значення – система працює стійко (рис. 6 а, б, в, ж). Причому в даному випадку система гідроприводів в процесі пуску виходить на рівні значення подачі робочої рідини до гідромотора та гідроциліндра подачі П – подібної рамки – $Q_1=Q_2=0,10 \times 10^{-1} \text{ м}^3/\text{хв}$.

Після навантаження вихідних ланок гідродвигунів моментом різання та зусиллям подачі на 400 мс перехідний процес також має характер затухання, що свідчить про те, що адаптивний гідропривод не втрачає стійкості при навантаженні (рис. 6, в,г,д,ж).

В той же час слід зазначити, що при зміні навантаження на вихідних ланках гідромотора і гідроциліндра подачі П-подібної рамки зміна швидкості обертання вала гідромотора та швидкості подачі П-подібної рамки відбувається в більш широких межах, ніж у випадку, коли ширина робочих кромek дорівнювала $a=0,2$ мм (рис. 6, ж). Так, подача рідини до гідромотора збільшується на 50 % і дорівнює $Q_1=0,16 \times 10^{-1} \text{ м}^3/\text{хв}$, при цьому кутова швидкість вала гідромотора становить $\omega_{зол}=0,1 \times 10^3 \text{ рад/с}$ (рис. 6 г). Згідно рис. 6, ж подача робочої рідини до гідроциліндра привода подачі П-подібної рамки зменшується до значення $Q_2=0,05 \times 10^{-1} \text{ м}^3/\text{хв}$, що відповідає зниженню швидкості подачі на 50 %, при цьому швидкість подачі П-подібної рамки становить $V_{ум}=2,8 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$.

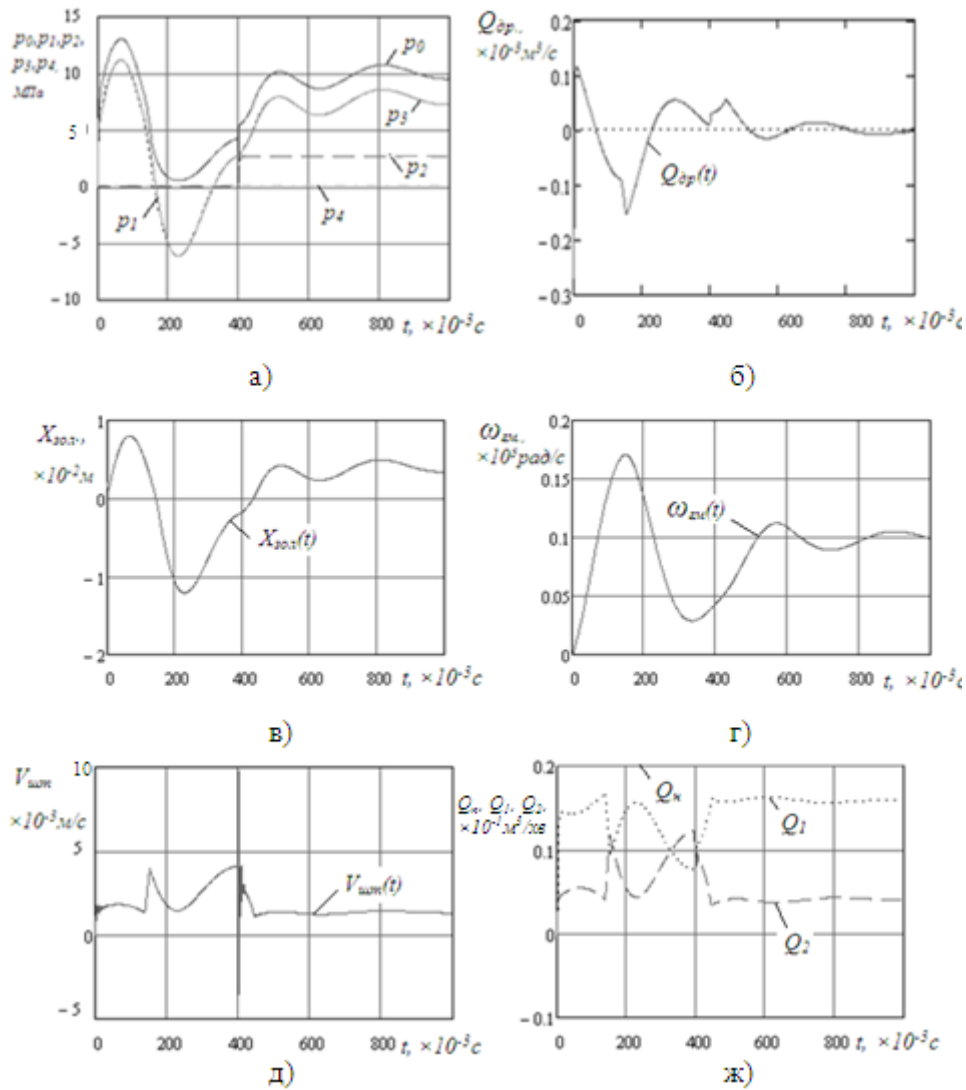


Рис. 6. Перехідні процеси в адаптивному гідравлічному приводі вивантажувача стеблових кормів при наступних значеннях параметрів: настройка упора $b_f=1$ мм, діаметр золотника $d_{зол}=27$ мм, ширина робочої кромки $a=0,5$ мм, жорсткість пружини $C_{пр}=0,5$ Н/мм: а) зміна тиску у порожніх гідросистемах; б) витрата рідини крізь дроселі; в) переміщення золотника роздільника потоку; г) зміна кутової швидкості гідромотора; д) зміна швидкості подачі П-подібної рамки; ж) витрати рідини, які споживаються гідромотором (Q_1) та гідроциліндром (Q_2)

Аналогічний ефект спостерігається також і при умові зменшення діаметра золотника до значення $d_{зол}=22,5$ мм, жорсткості пружини до значення $C_{пр}=0,3$ Н/мм. (рис. 7). Ширина робочої кромки має значення $a=0,5$ мм. Інші параметри адаптивного гідравлічного привода вивантажувача стеблових кормів залишаються незмінними і відповідають початковим значенням.

В даному випадку коливальність перехідного процесу збільшується, але він має затухаючий характер, що свідчить про стійкий режим роботи системи гідроприводів (рис. 7, д). Збільшення коливальності та пікових значень тиску (рис. 7, а) значною мірою визначається зменшенням жорсткості пружини, що знижує якість динамічних характеристик.

В той же час по завершенню перехідного процесу в адаптивному гідроприводі вивантажувача стеблових кормів виходить на той рівень вихідних параметрів, що і у попередньому випадку: витрата $Q_1=0,16 \times 10^{-1}$ м³/хв, кутова швидкість вала гідромотора $\omega_{зм}=0,1 \times 10^3$ рад/с, витрата $Q_2=0,05 \times 10^{-1}$ м³/хв, швидкість подачі П-подібної рамки $V_{ум}=2,8 \cdot 10^{-3}$ м/с (рис. 7, ж).

Таким чином, зміна діаметра золотника та жорсткості пружини впливають на якість перехідного процесу, а саме, дещо збільшують коливальність процесу, але характеристики регулювання швидкості різання стеблових кормів та подачі П-подібної рамки залежать тільки від геометрії та розмірів робочої кромки золотника. В даному випадку зменшення ширини робочої кромки фактично вдвічі збільшує діапазон регулювання швидкостей виконавчих ланок гідродвигунів адаптивного гідропривода вивантажувача стеблових кормів [10-12].

Висновки та пропозиції

Розроблено алгоритм проведення розрахунку на основі системи диференціальних рівнянь в середовищі Mathcad перехідних процесів, які визначають якість роботи адаптивного гідравлічного привода вивантажувача стеблових кормів.

Отриманні при різних комбінаціях параметрів перехідні процеси засвідчили наявність різних за характером режимів роботи адаптивної системи гідравлічного привода вивантажувача стеблових кормів.

При відповідних комбінаціях параметрів математичної моделі можливе виникнення нестійких режимів роботи, що дозволяє прогнозувати можливість нестійкого режиму роботи реального адаптивного гідравлічного привода вивантажувача стеблових кормів.

Показано, що запропонований адаптивний гідропривод вивантажувача стеблових кормів при умові стійкої роботи забезпечує виконання сформульованого принципу узгодженої зміни швидкостей вихідних ланок гідродвигунів при зміні навантаження на різальному механізмі. Зміна швидкостей відбувається пропорційно до величини моменту навантаження на валу гідромотора привода різального механізму, що дозволяє реалізувати принцип адаптації системи гідроприводів до зміни режимів навантаження.

Виявлено, що розширення діапазону регулювання швидкостей виконавчих гідродвигунів та, відповідно підвищення чутливості адаптивного гідропривода можливо шляхом відповідного вибору параметрів золотникового роздільника. Найбільш ефективно розширення діапазону регулювання швидкостей гідромотора різального механізму та гідроциліндра привода П-подібної рамки забезпечується шляхом зменшення ширини робочих кромок золотника.

Література

1. Шмат С. І. Тенденції сталого розвитку сучасного сільськогосподарського машинобудування в Україні і за рубежом [Електронний Ресурс] / С. І. Шмат, П. Г. Лузан, С. В. Колісник // КНТУ. – 2010. Режим доступу: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/4971>
2. Ratushna N. Методичні підходи до створення нової сільськогосподарської техніки у відповідності з вимогами ринку наукоємної продукції / N. Ratushna, I. Mahmudov, A. Kokhno // MOTROL. – 2007. – № 9А. С. 119–123.
3. Панченко А.І. Перспективи гідрофікації мобільної сільськогосподарської техніки / А.І. Панченко, О.Ю. Золотарьов, А.А. Волошина, Д.С. Тітов // Промислова гідравліка і пневматика. – 2003. – №1 – С. 71-74.
4. Shargorodskiy S. Modeling of working processes of an adjustable APN type PVC 1.85 taking into account parametric oscillations / S. Shargorodskiy, V. Rutkevych, V. Zakrevskiy // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2021. – Вип. 4 (35). С. 33–43.
5. Поліщук Л.К. Вмонтовані гідравлічні приводи з гнучким тяговим органом, чутливі до зміни навантаження: монографія [текст] / Л. К. Поліщук, О. О. Адлер // Вінниця, ВНТУ, 2010 р. – 184 с.
6. Руткевич В.С. Адаптивний гідравлічний привод блочно-порційного відокремлювача консервованого корму/ В.С. Руткевич // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2017. – №4(99). С. 108–113.
7. Руткевич В.С. Математичне моделювання роботи гідравлічного привода секцій широкозахватного культиватора з послідовним спрацюванням гідроциліндрів / В.С. Руткевич // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2018. – № 2 (101). С. 37 – 47.
8. Фінкельштейн З.Л. Експлуатація, обслуговування та надійність гідравлічних машин і гідроприводів / Фінкельштейн З.Л., Андренко П.М., Дмитрієнко О.В.; навч. посіб. Харків: Видавничий центр. НТУ “ХПІ”– 2014. 308 с.
9. Shargorodskiy S. Investigation of drive power of the mechanism for separation of stem feed from feed monolith / S. Shargorodskiy, V. Rutkevych // Slovak international scientific journal. – 2021. – № 54. С. 10–20.
10. Ivanov M.I. Research on the block-portion separator parameters influence on the adjustment range of operating elements speed / M.I. Ivanov, V.S. Rutkevych, O.M. Kolisnyk, I.O. Lisovoy // INMATEH - Agricultural Engineering. – 2019. – Vol. I, № 1 (57). P. 37 – 44.
11. Rutkevych V. Numerical simulation of the liquid distribution problem by an adaptive flow distributor / V. Rutkevych, I. Kupchuk, V. Yaropud, V. Hraniak, S. Burlaka // Przegląd Elektrotechniczny. – 2022. – № 2 (98). P. 64 – 69.
12. Руткевич В.С. Імітаційне моделювання та дослідження роботи гідропривода відокремлювача стеблових кормів з траншейних сховищ / В.С. Руткевич, В.М. Яропуд, І.М. Купчук, О.О. Остапчук // Вібрації в техніці та технологіях. – 2021. – № 3 (102). С. 88–99.

References

1. Shmat S. I. Tendentsii staloho rozvytku suchasnoho silskohospodarskoho mashynobuduvannya v Ukraini i za rubezhem [Elektronnyi Resurs] / S. I. Shmat, P. H. Luzan, S. V. Kolisnyk // KNTU. – 2010. Rezhym dostupu: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/4971>
2. Ratushna N. Metodychni pidkhody do stvorennia novoi silskohospodarskoi tekhniki u vidpovidnosti z vymohamy rynku naukoiemnoi produktsii / N. Ratushna, I. Mahmudov, A. Kokhno // MOTROL.–2007. – № 9А. S. 119–123.

3. Panchenko A.I. Perspektivy hidrofikatsii mobilnoi silskohospodarskoi tekhniki / A.I. Panchenko, O.Iu. Zolotarov, A.A. Voloshyna, D.S. Titov // Promyslova hidravlika i pnevmatyka. – 2003. – №1 – S. 71-74.
4. Shargorodskiy S. Modeling of working processes of an adjustable APN type PVC 1.85 taking into account parametric oscillations / S.Shargorodskiy, V. Rutkevych, V. Zakrevskiy // Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannya, avtomatyzatsiia. –2021. – Vyp. 4 (35). C. 33–43.
5. Polishchuk L.K. Vmontovani hidravlichni pryvody z hnuchkym tiahovym orhanom, chutlyvi do zminy navantazhennia: monohrafiia [tekst] / L. K. Polishchuk, O. O. Adler // Vinnytsia, VNTU, 2010 r. – 184 s.
6. Rutkevych V.S. Adaptivnyi hidravlichnyi pryvod blochno-portsiinoho vidokremlivacha konservovanoho kormu / V.S. Rutkevych // Tekhnika, enerhetyka, transport APK. – 2017. – № 4 (99). S. 108–113.
7. Rutkevych V.S. Matematyчне modeliuвання roboty hidravlichnoho pryvoda sektsii shyrokozakhvatnoho kultyvatora z poslidovnym spratsiuванням hidrotsylindriv / V.S. Rutkevych // Tekhnika, enerhetyka, transport APK. – 2018. – № 2 (101). S. 37–47.
8. Finkelshtein Z.L. Ekspluatatsiia, obsluhovuvannya ta nadiinist hidravlichnykh mashyn i hidropryvodiv / Finkelshtein Z.L., Andrenko P.M., Dmytriienko O.V. //: navch. posib. Kharkiv: Vydavnychiy tsentr. NTU “KhPI” – 2014. 308 s.
9. Shargorodskiy S. Investigation of drive power of the mechanism for separation of stem feed from feed monolith / S. Shargorodskiy, V. Rutkevych // Slovak international scientific journal. – 2021. – № 54. S. 10–20.
10. Ivanov M.I. Research on the block-portion separator parameters influence on the adjustment range of operating elements speed / M.I. Ivanov, V.S. Rutkevych, O.M. Kolisnyk, I.O. Lisovoy // INMATEH - Agricultural Engineering. – 2019. – Vol. I, № 1 (57). S. 37–44.
11. Rutkevych V. Numerical simulation of the liquid distribution problem by an adaptive flow distributor / V. Rutkevych, I. Kupchuk, V. Yaropud, V. Hraniak, S. Burlaka // Przegląd Elektrotechniczny. – 2022. – № 2 (98). S. 64–69.
12. Rutkevych V.S. Imitatsiine modeliuвання ta doslidzhennia roboty hidropryvoda vidokremlivacha steblovykh kormiv z transheinykh skhovyshch / V.S. Rutkevych, V.M. Yaropud, I.M. Kupchuk, O.O. Ostapchuk // Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh. – 2021. – № 3 (102). C. 88–99.

ФЕДУШКО СОЛОМІЯ

Національний університет «Львівська політехніка»

ORCID ID: [0000-0001-7548-5856](https://orcid.org/0000-0001-7548-5856)e-mail: solomiia.s.fedushko@lpnu.ua

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ДОСЛІДЖЕННЯ КІБЕРБЕЗПЕКИ ТА КІБЕРГІГІЄНИ В УМОВАХ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ СУСПІЛЬСТВА

У сучасному цифровому суспільстві кібербезпека та кібергігієна стали вирішальними для захисту людей, організацій та держав від кіберзагроз. У цій статті обговорюється важливість досліджень у галузі кібергігієни та кібербезпеки, які включають розробку нових методів захисту інформаційних технологій та навчання користувачів щодо важливості кібербезпеки. Належні практики кібергігієни, такі як регулярна зміна паролів, використання антивірусного програмного забезпечення та уникнення підозрілих вебсайтів, можуть запобігти несанкціонованому доступу до конфіденційної інформації та зменшити поширення шкідливих програм і вірусів. Представлено всебічний огляд досліджень у галузі кібергігієни та кібербезпеки, які набувають все більшої актуальності в сучасному технологічному світі.

Ключові слова: кібергігієна, кібербезпека, цифрове суспільство, веб-технології, соціальна комунікація.

FEDUSHKO SOLOMIIA

Lviv Polytechnic National University

MODERN APPROACHES TO THE STUDY OF CYBERSECURITY AND CYBER HYGIENE IN THE FRAMEWORK OF DIGITAL TRANSFORMATION OF SOCIETY

In today's digital society, cybersecurity and cyber hygiene have become crucial for safeguarding individuals, organizations, and states from cyber threats. This scientific paper discusses the significance of cyber hygiene and cybersecurity research, which involves developing new methods to protect information technology and educating users on the importance of cybersecurity. The paper highlights the consequences of negative digital technology impacts on human health and the environment and emphasizes the need to develop prevention methods. Good cyber hygiene practices such as changing passwords regularly, using antivirus software, and avoiding suspicious websites can prevent unauthorized access to sensitive information and reduce the spread of malware and viruses. This study stresses the importance of maintaining cyber health for the integrity of computer systems and networks. This paper aims to emphasize the importance of cyber hygiene and cybersecurity research, which is increasingly relevant in today's rapidly developing technological world. The paper highlights the consequences of negative digital technology impacts on human health and the environment, emphasizing the need for developing prevention methods. Additionally, the paper emphasizes the importance of cybersecurity at the cultural and educational levels to ensure protection against cyber threats. This paper provides practical recommendations for individuals and organizations to practice good cyber hygiene, including changing passwords regularly, using antivirus software, avoiding suspicious websites, keeping software up to date, and avoiding opening suspicious emails or attachments. Implementing these practices helps protect sensitive information, prevent the spread of malware and viruses, and maintain the overall integrity of computer systems and networks.

Keywords: cyber hygiene, cyber security, digital society, web technology, social communication.

Постановка проблеми

У сучасному світі, що характеризується швидким технологічним розвитком, кібербезпека та кібергігієна стають все більш актуальними питаннями. Це пов'язано зі зростаючою кількістю кібератак, витоку даних, шахрайства в Інтернеті та інших кіберзлочинів, які можуть значно пошкодити як окрему людину, так і велику компанію або державу в цілому. Один з ключових підходів до дослідження кібербезпеки полягає у розробці та впровадженні нових методів захисту інформаційних технологій. Такі методи можуть включати в себе застосування криптографічних технологій, розробку систем ідентифікації та аутентифікації користувачів, а також забезпечення безпеки мережевих протоколів. Інший підхід полягає у забезпеченні кібербезпеки на рівні культури та освіти користувачів інформаційних технологій. Цей підхід передбачає навчання користувачів правилам безпеки в інтернеті, забезпечення їх доступу до інформації про кіберзагрози та методи їх запобігання.

Велика увага приділяється дослідженню кібергігієни [1] – поняттю, яке описує можливі наслідки негативного впливу цифрових технологій на здоров'я людей та навколишнє середовище. Дослідження в цій галузі дозволяють зрозуміти наслідки використання цифрових пристроїв та програм на здоров'я людей та довкілля, а також розробляти методи їх запобігання. Зі зростанням розвитку цифрових технологій кібергігієна [2] та кібербезпека [3] стали важливими аспектами життя сучасного суспільства.

Кібергігієна стосується практик і заходів, яких особи та організації застосовують для підтримки кіберздоров'я [4], тоді як кібербезпека стосується захисту комп'ютерних систем і мереж від несанкціонованого доступу або атак. У цьому дослідженні висвітлюється важливість кібергігієни та кібербезпеки в цифровому суспільстві. Кібергігієна важлива з кількох причин. По-перше, вона допомагає окремим особам та організаціям захистити свої конфіденційні дані та інформацію.

У сучасну цифрову епоху інформація – це влада, і кіберзлочинці завжди шукають способи отримати її для своїх зловмисних цілей. Дотримання належної кібергігієни, наприклад, регулярна зміна паролів, використання антивірусного програмного забезпечення та уникнення підозрілих веб-сайтів, може запобігти

несанкціонованому доступу до конфіденційної інформації. По-друге, кібергігієна також може допомогти запобігти поширенню шкідливих програм і вірусів [5]. Шкідливе програмне забезпечення та віруси можуть завдати значної шкоди комп'ютерним системам і мережам, а також легко поширюватися через незахищені системи. Дотримуючись належної кібергігієни, наприклад, оновлюючи програмне забезпечення та уникаючи відкриття підозрілих електронних листів чи вкладень, окремі особи та організації можуть зменшити ризик зараження шкідливим програмним забезпеченням та вірусами.

Кібергігієна важлива для підтримки загальної цілісності комп'ютерних систем і мереж. Неналежні практики кібергігієни можуть послабити безпеку системи, роблячи її вразливою до атак. Впроваджуючи належні практики кібергігієни, окремі особи та організації можуть мінімізувати ризик кібератак і зменшити тяжкість наслідків будь-яких успішних атак, які можуть статися. Кібербезпека також має вагоме значення в цифровому суспільстві. По-перше, кібербезпека допомагає захистити людей та організації від кібератак [6, 7]. Кіберзлочинці постійно розробляють нові способи атак на комп'ютерні системи та мережі, а заходи кібербезпеки, такі як брандмауери, системи виявлення вторгнень та шифрування, можуть допомогти запобігти несанкціонованому доступу або пом'якшити наслідки атаки. По-друге, кібербезпека допомагає підтримувати доступність і функціональність комп'ютерних систем і мереж. Кібератаки можуть спричинити значні перебої в роботі систем і мереж, що призводить до простоїв і зниження продуктивності.

Впроваджуючи ефективні заходи кібербезпеки, організації можуть гарантувати, що їхні системи та мережі залишатимуться працездатними та доступними для користувачів. Кібербезпека важлива для захисту репутації окремих осіб та організацій. Кібератаки можуть завдати шкоди репутації організації, особливо якщо викрадено конфіденційну інформацію або скомпрометовано дані клієнтів. Впроваджуючи ефективні заходи кібербезпеки, організації можуть захистити свою репутацію та зберегти довіру клієнтів.

Метою статті є представлення всебічного огляду досліджень у галузі кібергігієни та кібербезпеки, які набувають все більшої актуальності в сучасному технологічному світі.

Аналіз останніх джерел

Сучасні підходи до дослідження кібербезпеки та кібергігієни є надзвичайно актуальними в умовах швидкого розвитку цифрової трансформації суспільства. У зв'язку з цим, виникає необхідність вивчення та аналізу нових технологій та методів захисту від кіберзагроз. У зв'язку з цим, науковці та фахівці з усього світу працюють над розробкою нових підходів до дослідження кібербезпеки та кібергігієни. Одним з найважливіших напрямків є вивчення цих проблем в умовах цифрової трансформації суспільства, яка відбувається в останні роки. Для знаходження прогалів у дослідженні кібергігієни та кібербезпеки проведено ґрунтовний аналіз наукових публікацій у наукометричній базі Scopus. Результатом аналізу є відбір 93 наукові публікації (рис. 1) за ключовим словом TITLE-ABS-KEY (cyber AND hygiene, AND cyber AND security) [8].

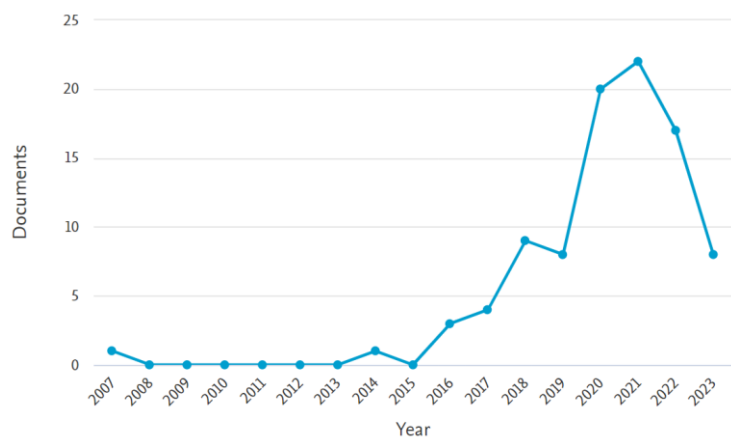


Рис. 1. Статика аналізу досліджень у Scopus за ключовими словами “cyber hygiene”, “cyber security”

Результатом аналізу є відбір 93 наукові публікації (рис. 1) за ключовим словом TITLE-ABS-KEY (cyber AND hygiene, AND cyber AND security) [8].

На основі аналізу створено візуальну карту цитувань наукових статей [9] у Scopus з тематики кібербезпеки та кібергігієни (рис. 2).

Кібергігієна та кібербезпека є міждисциплінарними галузями, які охоплюють різні дисципліни та напрямки досліджень, включи такі галузі [10]:

- Комп'ютерні науки – вивчення комп'ютерних систем, програмного забезпечення та алгоритмів. Комп'ютерні вчені працюють над розробкою безпечних систем і мереж, а також розробляють нові методи запобігання кібератакам.
- Інформаційні технології – вивчення та використання систем і програмного забезпечення для зберігання, пошуку та передачі інформації. IT-спеціалісти працюють над впровадженням заходів безпеки, управлінням мережами та захистом конфіденційних даних.
- Кібербезпека – захист комп'ютерних систем і мереж від несанкціонованого доступу та кібератак. Фахівці з кібербезпеки працюють над розробкою та впровадженням заходів безпеки, проводять оцінку ризиків та реагують на інциденти, пов'язані з безпекою.
- Криптографія – вивчення кодів і шифрів, що використовуються для забезпечення безпеки комунікації та захисту конфіденційних даних. Криптографи працюють над розробкою нових методів шифрування та аналізують існуючі системи шифрування на наявність вразливостей.
- Управління ризиками – виявлення, оцінку та зменшення ризиків для комп'ютерних систем та мереж. Фахівці з управління ризиками працюють над розробкою політик і процедур для управління та реагування на загрози безпеці.

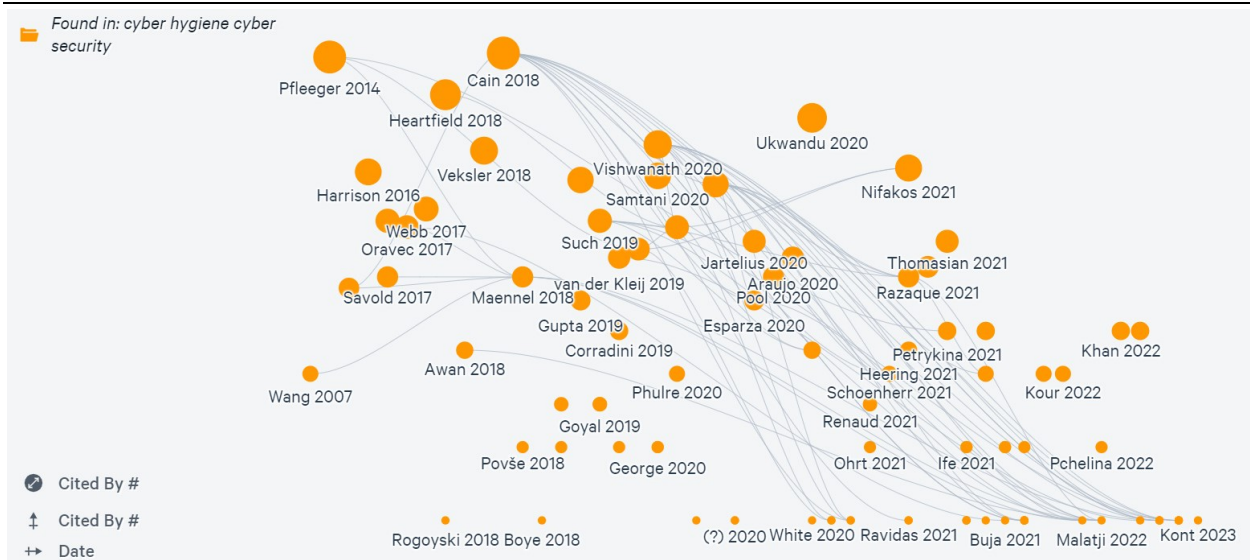


Рис. 2. Візуальна карта цитувань наукових статей у Scopus з тематики кібербезпеки та кібергігієни

- Правоохоронна діяльність – розслідування та переслідування кіберзлочинців. Фахівці правоохоронних органів працюють над розробкою стратегій запобігання кіберзлочинам, а також над виявленням і арештом кіберзлочинців.
- Психологія – вивчення та пізнання людської поведінки. Фахівці з кібербезпеки співпрацюють з психологами, щоб зрозуміти поведінку і мотивацію кіберзлочинців і розробити стратегії запобігання атакам.

Кібергігієна та кібербезпека є міждисциплінарними галузями, які включають різні напрямки досліджень та експертизи. Для ефективного захисту комп'ютерних систем і мереж від кіберзагроз необхідний комплексний підхід.

Виклад основного матеріалу

Кібергігієна та кібербезпека є важливими аспектами сучасного суспільства. Приватні особи та організації повинні впроваджувати належні практики кібергігієни, щоб захистити свою конфіденційну інформацію, запобігти поширенню шкідливих програм і вірусів та підтримувати цілісність своїх комп'ютерних систем і мереж. Вони також повинні впроваджувати ефективні заходи кібербезпеки для запобігання кібератакам, підтримки доступності та функціональності своїх систем і мереж, а також захисту своєї репутації. Оскільки цифрове суспільство продовжує розвиватися, важливість кібергігієни та кібербезпеки буде тільки зростати. Кібергігієна та кібербезпека – це два споріднені поняття у сфері цифрової безпеки, але вони стосуються різних аспектів захисту комп'ютерних систем та мереж від кіберзагроз. Кібергігієна – це сукупність практик і заходів, яких вживають окремі особи та організації для підтримки здоров'я і цілісності своїх цифрових систем і даних. Це включає такі заходи, як оновлення програмного забезпечення та операційних систем, регулярне резервне копіювання важливих даних, використання надійних паролів, уникнення підозрілих електронних листів і веб-сайтів, а також впровадження брандмауерів та інших заходів безпеки. Належна кібергігієна допомагає запобігти кібератакам і мінімізувати шкоду, заподіяну в разі їх здійснення. З іншого боку, кібербезпека стосується ширшої сфери захисту комп'ютерних систем і мереж від зловмисників і кіберзагроз. Сюди входить все – від розробки безпечного програмного та апаратного забезпечення до захисту від спроб хакерських атак, вірусів та інших видів кібератак. Кібербезпека – це безперервний процес, який включає управління ризиками, оцінку вразливостей, планування реагування на інциденти, а також постійний моніторинг і вдосконалення. Таким чином, хоча кібергігієна та кібербезпека (таблиця 1) тісно пов'язані між собою, вони відрізняються за сферою застосування та фокусом. Кібергігієна стосується конкретних практик і заходів для підтримки працездатності цифрових систем, тоді як кібербезпека охоплює ширшу мету захисту комп'ютерних систем і мереж від широкого спектру загроз. Обидва поняття є важливими компонентами комплексного підходу до цифрової безпеки.

Кібергігієна та кібербезпека є критично важливими компонентами забезпечення безпеки в Інтернеті. Кібергігієна зосереджена на індивідуальній поведінці та звичках користувачів, а кібербезпека зосереджена на захисті комп'ютерних систем і мереж від зовнішніх загроз. Обидва важливі для запобігання кібератакам, захисту від витоку даних і крадіжки, а також підтримки загальної безпеки комп'ютерних систем і мереж.

Порівняння характеристик кібергігієни та кібербезпеки

| Характеристика | Кібергігієна | Кібербезпека |
|----------------------|--|--|
| Визначення | Практика підтримки хороших звичок і поведінки для забезпечення безпеки в інтернеті. | Захист комп'ютерних систем, мереж і даних від крадіжки, пошкодження або несанкціонованого доступу. |
| Область застосування | Зосереджено на індивідуальній поведінці та звичках користувачів. | Зосереджено на захисті комп'ютерних систем і мереж від зовнішніх загроз. |
| Важливість | Допомагає запобігти кібератакам і поширенню шкідливих програм. | Захищає від витоку даних, крадіжок та інших кіберзлочинів. |
| Приклади | Оновлюйте програмне забезпечення та антивірусні програми, створюйте надійні паролі та уникайте підозрілих електронних листів або веб-сайтів. | Встановлення систем виявлення вторгнень і програмного забезпечення для шифрування, проведення регулярних перевірок безпеки та впровадження заходів контролю доступу. |
| Мета | Щоб зменшити ризик кібератак і запобігти поширенню шкідливих програм або вірусів. | Для захисту комп'ютерних систем і даних від несанкціонованого доступу, крадіжки або пошкодження. |
| Ключові фактори | Регулярні оновлення та технічне обслуговування, освіта та обізнаність, а також відповідальна поведінка у веб. | Оцінка та управління ризиками, планування реагування на інциденти та використання передових заходів безпеки та технологій. |

Висновки

Кібергігієна та кібербезпека є критично важливими аспектами цифрового суспільства. Належні практики кібергігієни можуть допомогти окремим особам і організаціям захистити свої конфіденційні дані та запобігти поширенню шкідливих програм і вірусів. Ефективні заходи кібербезпеки можуть запобігти кібератакам, підтримувати доступність і функціональність комп'ютерних систем і мереж, а також захистити репутацію окремих осіб і організацій. Оскільки технології продовжують розвиватися, важливо, щоб окремі особи та організації надавали пріоритет кібергігієні та кібербезпеці, щоб забезпечити цілісність, безпеку та надійність цифрових систем і мереж. Для дослідження кібергігієни та кібербезпеки використовують декілька підходів. Один із підходів полягає в тому, щоб вивчати кібербезпеку та кібергігієну як складові частини більш широкої концепції кібербезпеки та кіберзахисту. Цей підхід дозволяє розглядати ці проблеми з точки зору технологій, процедур та людей, що є складовими частинами кібербезпеки та кібергігієни. Крім того, вивчення цих проблем у контексті більш широкої концепції кібербезпеки дозволяє визначити більш ефективні підходи до їх вирішення. Інший підхід полягає у вивченні кібербезпеки та кібергігієни як соціально-психологічних проблем, та різних аспектів поведінки користувачів в Інтернеті.

References

1. Maennel K., Mäses S., Maennel O. Cyber Hygiene: The Big Picture. Lecture Notes in Computer Science. 11252 LNCS. 2018. pp. 291-305. DOI: 10.1007/978-3-030-03638-6_18
2. Neubukezi T., Mwansa L., Rocaries F. A Review of the Current Cyber Hygiene in Small and Medium-sized Businesses. 2020 15th International Conference for Internet Technology and Secured Transactions. ICITST 2020. DOI: 10.23919/ICITST51030.2020.9351339
3. Meshkat L., Miller R. A Systems Approach for Cybersecurity Risk Assessment. Proceedings - Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2022. DOI: 10.1109/RAMS51457.2022.9893966
4. Gupta S., Furnell S. From Cybersecurity Hygiene to Cyber Well-Being. Lecture Notes in Computer Science. 13333. 2022. pp. 124-134. DOI: 10.1007/978-3-031-05563-8_9
5. Vishwanath A., Neo L. Cyber hygiene: The concept, its measure, and its initial tests. Decision Support Systems. 2020. pp. 128. DOI: 10.1016/j.dss.2019.113160
6. Patel S., Doshi N. Internet of Behavior in Cybersecurity: Opportunities and Challenges. Lecture Notes in Electrical Engineering. 936. 2022. pp. 219–227. DOI: 10.1007/978-981-19-5037-7_14
7. Fedushko S., Benova E. Semantic analysis for information and communication threats detection of online service users. Procedia Computer Science. Volume 160. 2019. pp. 254-259. DOI: 10.1016/j.procs.2019.09.465
8. Scopus. URL: <https://www.scopus.com>.
9. Litmaps. URL: <https://app.litmaps.com/map>.
10. Cain A., Edwards M., Still J. An exploratory study of cyber hygiene behaviors and knowledge. Journal of Information Security and Applications. 42. 2018. pp. 36–45. DOI: 10.1016/j.jisa.2018.08.002

ЛЕЖНІЮК ПЕТРО

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-9366-3553>lezhp@gmail.com

КОЗАЧУК ОЛЕГ

“Хмельницькобленерго”

<https://orcid.org/0000-0001-7143-3530>kozachuk.o@hoe.com.ua

ГАЛУЗІНСЬКИЙ ОЛЕКСАНДР

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0008-2576-3609>galuzinskiy.sasha13@gmail.com

ВИКОРИСТАННЯ АКТИВНИХ СПОЖИВАЧІВ ДЛЯ БАЛАНСУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ

В роботі розглянуто проблему балансування потужності та електроенергії в електричній мережі, в якій споживання електроенергії та її генерування відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) співрозмірні між собою. Частина споживачів електроенергії в електричній мережі є активними, які традиційно використовуються для вирівнювання графіків навантаження за багатоставковим тарифом. Розбудова ВДЕ в електричних мережах змінює умови їх експлуатації і ставить нові задачі. Електричні мережі зі значною кількістю ВДЕ в балансі потужності та електроенергії мають всі ознаки локальної електроенергетичної системи (ЛЕС) з характерними проблемами. Зокрема це стосується нестабільності генерування вітрових і фотоелектричних станцій (ВЕС, ФЕС), створення системи способів і засобів резервування ВДЕ для надійного і якісного електропостачання, регулювання параметрів електроенергії у відповідності до стандартів, забезпечення самоорганізації і самовідновлення як необхідних елементів Smart Grid технологій тощо. Показано, що в першу чергу для компенсації нестабільності генерування ВДЕ рекомендується використати можливості узгодження в електричній мережі графіків генерування і споживання електроенергії активними споживачами. На значення електроенергії, що залишилася незбалансованою після такого узгодження, для повного балансування доцільно використати інші способи і засоби: доступні маневрені потужності ЕЕС, електрохімічні накопичувачі, вироблений в мережі водень. Комплексне узгодження графіків генерування і споживання в електричній мережі для балансування в ній електроенергії здійснюється з використанням морфометричного апарату, в основі якого лежить перехід від декартової до полярної системи координат.

Ключові слова: електричні мережі, відновлювані джерела енергії, нестабільність генерування, резервування, узгодження графіків генерування і споживання.

LEZHNIUK PETRO, KOZACHUK OLEG, GALUZINSKIY OLEKSANDER
Vinnytsia National Technical University

USE OF ACTIVE CONSUMERS FOR BALANCE OF ELECTRICITY IN THE ELECTRIC GRID

The article considers the problem of balancing power and electricity in an electric grid, in which electricity consumption and its generation by renewable energy sources (RES) are commensurable to each other. Some of the electricity consumers in the electric grid are active, which are traditionally used to level load schedules at a multi-rate tariff. The development of RES in electric grids changes the conditions of their operation and poses new tasks. Electric grids with a significant amount of RES in the balance of power and electricity have all the signs of a local electric system (LES) with characteristic problems. In particular, this concerns the instability of the generation of wind and photovoltaic power plants (WPP, PV), the creation of a system of ways and means of reserving RES for reliable and high-quality electricity supply, regulation of electricity parameters in accordance with standards, ensuring self-organization and self-recovery as necessary elements of Smart Grid technologies, etc. It is shown that, first of all, in order to compensate for the instability of RES generation, it is recommended to use the possibilities of coordination in the electric grid of electricity generation and consumption schedules by active consumers. It is advisable to use other methods and means for full balancing of the amount of electricity that remained unbalanced after such reconciliation: available maneuverable power system capacities, electrochemical storage devices, hydrogen produced in the grid. Comprehensive coordination of generation and consumption schedules in the electrical grid for balancing electricity in it is carried out using a morphometric method, which is based on the transition from the Cartesian to the polar coordinate system.

Key words: electric grids, renewable energy sources, instability of generation, reservation, coordination of generation and consumption schedules.

Вступ та постановка завдання

Електричні мережі (ЕМ) енергосистем проектувалися і споруджувалися за умов централізованого електропостачання, коли електроенергія від крупних теплових і атомних електростанцій трансформуючись передавалась до споживачів. Для розподільних електричних мереж (РЕМ) 6–10–20 кВ, які проектувалися і експлуатувалися за розімкненими схемами, це означає що лінії електропередачі працювали в режимі з одностороннім живленням, а трансформатори є понижувальними. Відповідно до цього в РЕМ вибиралися комутаційні апарати, засоби релейного захисту і автоматики, встановлювалися системи обліку електроенергії, тощо. Стосовно до вимог надійності електропостачання споживачів та їх характеристик, вибиралась схема РЕМ та виконувалися пункти секціонування, що відповідно формувало потоки потужності

в мережі. При цьому РЕМ характеризувалися певним значенням втрат електроенергії і рівнем напруги у вузлах.

З розбудовою в розподільних електричних мережах електричних станцій, що використовують відновлювані джерела енергії (ВДЕ) (рис. 1) виникають нові задачі [1–3]. Це необхідність оптимізації комбінованого електропостачання від електроенергетичної системи (ЕЕС) і розосередженого генерування ВДЕ, узгодження покриття графіка навантаження розосередженими джерелами, які через свою залежність від погодних умов можуть виробляти електроенергію за відповідними графіками, оцінка впливу ВДЕ на значення струмів короткого замикання і, відповідно, на роботу релейного захисту та автоматики, оцінка впливу на техніко-економічні показники РЕМ тощо. Вплив ВДЕ на режими РЕМ суттєво залежить від значення сумарного розосередженого генерування в ній, від одиничної встановленої потужності ВДЕ та їх типу, а також від місця їх під'єднання в електричній мережі (це можуть бути шини нижчої напруги підстанцій або відгалуження ліній електропередачі).

Крім того слід враховувати, що одночасно змінюються економічні умови функціонування електроенергетики як галузі, зокрема змінюється модель оптового ринку [4, 5]. У випадку реалізації електропостачання за двосторонніми договорами за участі ВДЕ, коли останні видають потужність в електричну мережу, постає необхідність узгодження їх роботи з енергосистемою, від якої здійснюється централізоване живлення [6]. В цьому випадку РЕМ можна і доцільно розглядати як локальну електроенергетичну систему (ЛЕС), в якій окрім зазначених вище задач постають задачі дослідження статичної і динамічної стійкості РЕМ та інші, характерні для ЕЕС [7, 8]. Серед комплексу задач, що виникають в процесі впровадження ВДЕ, доцільно вивчати і розв'язувати в першу чергу ті, які безпосередньо впливають на масштаби й інтенсивність їх розбудови, та правильне рішення яких зможе сформувати наряду з «зеленими тарифами» та акціонуванням стійку мотивацію у інвесторів та енергопостачальних компаній щодо розбудови як ВДЕ, так і електричних мереж.

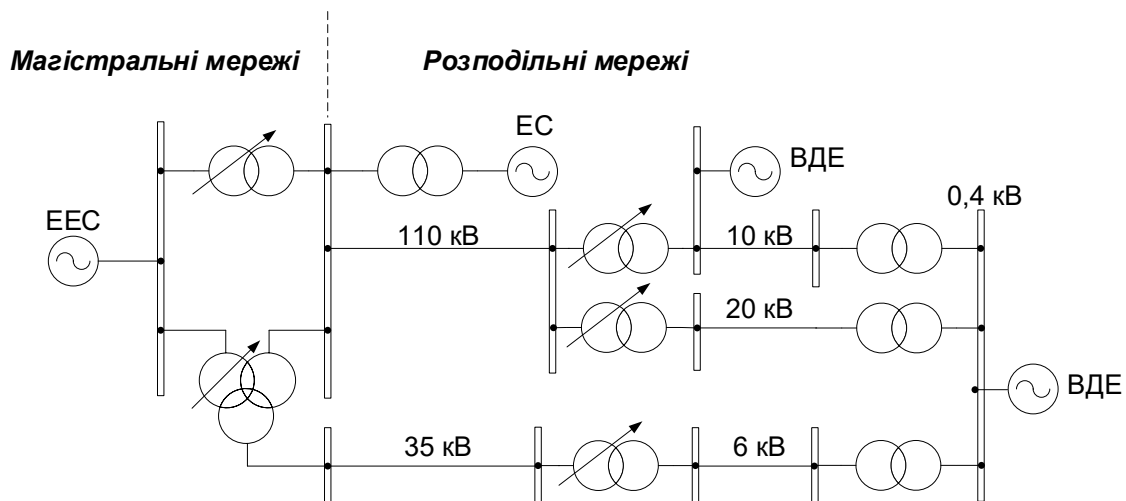


Рис. 1. Балансування електроенергії в електричній мережі як в балансуєчій групі

Відновлювані джерела енергії, зокрема фотоелектричні і вітрові станції (ФЕС, ВЕС), на сьогодні для електроенергетичних систем (ЕЕС) не є гарантованими джерелами електроенергії. Оскільки генерування електроенергії ВДЕ залежить від погодних умов, то для того, щоб узгодити їх роботу з технологічними вимогами ЛЕС, необхідно мати резерв потужності [9, 10]. Для забезпечення ефективної роботи ВДЕ в ЛЕС і надійного електропостачання споживачів необхідно мати резервні джерела енергії, які могли б компенсувати природну нестабільність генерування ВДЕ. На сьогодні тут можуть бути різні варіанти, які відрізняються технічними та економічними характеристиками [11, 12]. В ЕЕС через дефіцит маневреної потужності використовують різні способи і засоби накопичення електроенергії. В першу чергу йдеться про накопичення електроенергії, виробленої ВДЕ. Серед найбільш ефективних накопичувачів: електрохімічні накопичувачі, водневі та біогазові технології [13, 14]. Також активно в процесі балансування режиму ЕЕС може приймати участь узгодження графіків генерування ВДЕ з графіками навантаження споживачів електроенергії [15]. Особливо, коли йдеться про ЛЕС, які утворюються як частина існуючих розподільних електричних мереж, де розбудовуються ВДЕ і які набувають всіх ознак систем з певною автономією.

В ЕЕС з метою облегшити проходження максимуму навантаження застосовується стимулювання споживачів електроенергії щодо зміщення їх найбільшого навантаження в години, коли в системі спостерігається режим з мінімальним навантаженням. Участь «активних споживачів» в регулюванні балансу електроенергії в ЕЕС може покращити регулювання частоти і напруги в ній [10, 16]. Робиться це шляхом встановлення різних тарифів на електроенергію в різні години доби за узгодженням з оператором системи розподілу. В ЕЕС ускладнилось підтримування балансу потужності та електроенергії, коли в ній суттєво виросла частка ВДЕ. Зокрема з розбудовою ФЕС і ВЕС, які через свою природну залежність від погодних умов не є гарантованим постачальником електроенергії.

Розглянемо випадок, коли ВДЕ в ЛЕС виробляють електроенергію за прогнозованим погодинним графіком генерування на наступну добу. Потужність навантаження електроспоживачів в ЛЕС є співрозмірна з потужністю ВДЕ. Така ЛЕС містить джерела енергії, які об'єднані електричними мережами різного класу напруги, та споживачів електроенергії. Вона також зв'язана з енергосистемою лініями електропередачі, по яких вона може видавати або отримувати електроенергію. Таку ЛЕС технічно та економічно можливо і доцільно розглядати як окрему балансуєчу групу. Для цього необхідно визначитися зі способами і засобами зменшення нестабільності генерування ВДЕ в ЛЕС. В [17] показано, що серед можливих способів і засобів перекриття небалансів згенерованої та прогнозованої електроенергії ВДЕ ефективним є узгодження між собою в ЛЕС графіків генерування і споживання електроенергії. Реалізація способу узгодження графіків генерування і споживання електроенергії в першу чергу може також зменшити потрібну ємність накопичувачів енергії, що дозволить зменшити їх вартість. Проте, перед тим як розробляти систему технічної реалізації і економічної мотивації активної поведінки споживачів електроенергії в ЛЕС, необхідно дослідити ефективність узгодження графіків генерування ВДЕ і споживання електроенергії як заходу балансування режиму ЛЕС.

Метою статті є показати можливість і доцільність узгодження графіків генерування ВДЕ і споживання електроенергії в локальній електроенергетичній системі як способу балансування в ній потужності та електроенергії.

Активні споживачі в балансі потужності та електроенергії в ЛЕС як в балансуєчій групі

На рис. 1 наведено склад ЛЕС, яка є окремою балансуєчою групою. В неї входить джерела електроенергії, накопичувачі електроенергії та споживачі електроенергії. Джерелами електроенергії є ВДЕ, а також джерела централізованого живлення від ЕЕС (атомні електричні станції (АЕС), теплові електростанції (ТЕС), гідроелектростанції (ГЕС), гідроакumuлюючі електростанції (ГАЕС)). Як накопичувачі і перетворювачі електроенергії в інші види енергії і навпаки використовуються електрохімічні накопичувачі (ЕХН), водневі і біогазові установки (БГУ). Водневі технології призначені шляхом електролізу виробляти водень, який може для підтримання балансу електроенергії в ЛЕС використовуватися для вироблення електроенергії, а решта його використовується в інших галузях і на транспорті. БГУ можуть використовуватися як джерело теплової і електричної енергії (когенераційні установки). Споживачами електроенергії в ЛЕС є промислове і комунально-побутове навантаження, а також водневі технології та ЕХН в режимі заряду.

Баланс електроенергії в ЛЕС, як в балансуєчій групі, запишеться:

$$P_{EEC}(t) + P_{ВДЕ}(t) \pm P_g(t) \pm P_x(t) - P_{cn}(t) - P_{ac}(t) - \Delta P(t) = 0, \quad (1)$$

де $P_{EEC}(t)$ – потужність від ЕЕС; $P_{ВДЕ}(t)$ – потужність ВДЕ; $P_g(t)$ – потужність водневих установок; $P_x(t)$ – потужність електрохімічних накопичувачів; $P_{cn}(t)$ – потужність споживачів електроенергії, які працюють за своїм графіком; $P_{ac}(t)$ – потужність активних споживачів, які працюють за скоригованим графіком; $\Delta P(t)$ – технологічні витрати в електричних мережах.

Як ВДЕ в електричній мережі передбачаються фотоелектричні станції (ФЕС), вітрові електростанції (ВЕС), малі гідроелектростанції мГЕС, біогазові установки (БУ), газ яких може використовуватися для виробництва електроенергії. В електричній мережі може створюватися система накопичення електроенергії. В наших умовах це електрохімічні накопичувачі та водневі технології, які перетворюють електроенергію в інші види енергії, накопичують її, а за необхідності перетворюють її знову в електроенергію.

За фінансово-економічних та технічних обставин в ЛЕС як в балансуєчій групі реалізується принцип: вся вироблена електроенергія споживається в ЛЕС, а надлишок передається в ЕЕС. Для забезпечення стійкості ЛЕС у періоди максимального (мінімального) споживання або обмеженої пропускної здатності централізованої системи електропостачання, коли варіювання параметрів локального генерування може призводити до порушення обмежень на параметри режиму ЕЕС, актуальною є оптимізація режимів ВДЕ з метою мінімізації відхилень від заданого централізованого графіка сукупного генерування ВДЕ за заданих обмежень на первинні енергоресурси та характеристик ВДЕ [18]:

$$\int_{t_0}^{t_k} \frac{1}{2} \left(P_{ВДЕ}(t) - \sum_{i=1}^n P_i(t) \right)^2 dt \rightarrow \min, \quad (2)$$

де $P_{ВДЕ}(t)$ – сумарна прогнозована потужність ВДЕ ЛЕС, яка надається оператору балансуєчої групи у вигляді графіка генерування на наступну добу; $P_i(t)$ – поточне значення потужності ВДЕ на інтервал часу $t_0 - t_k$, на якому контролюється вироблена електроенергія в ЛЕС.

Не дивлячись на те, що генерування ФЕС і ВЕС можна прогнозувати з врахуванням внутрішньодобового корегування досить точно, проте за фактом вироблення ними електроенергії вони є нестабільними, тому в ЛЕС необхідний резерв потужності. Ним можуть бути електрохімічні накопичувачі, водневі і біогазові технології, а також може бути системний резерв ЕЕС. Ефективним також для компенсації нестабільності генерування ВДЕ в ЛЕС є спосіб узгодження їх графіків генерування та графіків навантаження споживачів електроенергії [17]. Перевагою способу узгодження графіків генерування і

споживання електроенергії є також те, що зменшується потрібна ємність накопичувачів енергії і зменшуються витрати на них. Тим більше, що вже є досвід використання активних споживачів для вирівнювання графіків навантаження в ЕЕС. Проте, перед тим як розробляти систему технічної реалізації і економічної мотивації активної поведінки споживачів електроенергії в ЛЕС, необхідно дослідити ефективність узгодження графіків генерування ВДЕ і споживання електроенергії як заходу балансування режиму ЛЕС.

Узгодження графіків генерування і споживання в ЛЕС для балансування в ній електроенергії

Вплив на графіки навантаження є складним процесом, що потребує змін у технологічному процесі споживачів електроенергії. Тому, зміна графіка електричних навантажень (ГЕН) повинна бути детально обґрунтована. Для цього необхідно вибрати зручний метод аналізу і порівняння параметрів графіків навантаження і генерування електроенергії в ЛЕС. В [19] показано, що використання морфометричного апарату для аналізу нерівномірності графіків має ряд переваг і дозволяє здійснити комплексну і детальну оцінку форми ГЕН. В основі застосування морфометричного аналізу лежить перехід від декартової до полярної системи координат (рис. 2). Таким чином, метою дослідження є формалізація нерівномірності ГЕН із застосуванням морфометричного аналізу, що дає можливість більш ґрунтовно охарактеризувати нерівномірність ГЕН, на відміну від класичних показників, що описують характер нерівномірності ГЕН (дисперсія, коефіцієнт форми, коефіцієнт заповнення, коефіцієнт нерівномірності ГЕН). Детальний аналіз ГЕН дає можливість покращити роботу джерел енергії, в тому числі і ВДЕ, в задачі покриття заданого графіка навантаження в межах балансової належності споживача та, як наслідок, зменшити нерівномірність ГЕН мережі.

На рис. 2 наведено, як приклад, покриття добового графіка електроспоживання електричної мережі у весняно-літньому сезоні, в якій режим споживання і генерування збалансований власними відновлюваними джерелами електроенергії та надходженнями з ЕЕС. По суті, електрична мережа, яка розглядається, є локальною електроенергетичною системою і балансування в ЛЕС є частиною процесу балансування електроенергії в ЕЕС. Графік на рис. 2 побудовано у відносних одиницях, де за базис прийнято потужність вечірнього максимуму. Характерним є те, що в після обідній час споживання електроенергії зменшується, а генерування ВДЕ за сприятливих погодних умов збільшується, тобто пік генерування ВДЕ припадає на денний провал у графіку навантаження. Якщо режим ЕЕС в цей час профіцитний, то стосовно балансування режиму спостерігається «надлишок» генерованої ФЕС і ВЕС потужності. Оператор системи розподілу (ОСР) змушений обмежувати вироблення ВДЕ електроенергії або необхідно узгоджувати графіки генерування і споживання в ЛЕС. Виникає необхідність мотивувати споживачів зміщувати свій добовий графік електричних навантажень в години максимуму генерування ФЕС і ВЕС.

Для розроблення методу узгодження графіків генерування ВДЕ та навантаження ЛЕС потрібно оцінити вплив генерування ВДЕ станцій на нерівномірність добового графіка електричних навантажень. Для аналізу та оцінювання ВДЕ на сумарний графік навантаження електричної мережі використаємо інтегральні морфометричні показники нерівномірності ГЕН [19].

Основним мотивуючим заходом є зонний тариф на електроенергію, згідно якого вартість електроенергії диференціюється за періодами часу доби. Споживач може зменшити плату за електроенергію, не зменшуючи обсягів споживання. При цьому зменшується нерівномірність ГЕН. Якщо споживач електроенергії знаходиться в балансуєчій групі, то додатковим стимулюючим мотивом є також зменшення різниці в (2) між прогнозованим і фактичним графіками генерування в ЛЕС.

Для оцінювання вартості зміщення потужності споживання потрібно розробити показник, який би враховував зміну тарифного коефіцієнта вартості електроенергії згідно зонного тарифу. Вартість компенсаційних виплат споживачеві за зміщення графіка електроспоживання та вартість втрат потужності внаслідок вирівнювання сумарного добового ГЕН визначаються:

$$V_{ij} = P_{zm} \cdot C_t (K_{ij} - K_{ti}) + \beta \pm \delta P \cdot C_t, \quad (3)$$

де P_{zm} – потужність, яку споживач має змістити для вирівнювання графіка навантаження ЛЕС; C_t – тариф на електроенергію по енергопостачальній компанії; K_{ij} – коефіцієнт вартості електроенергії згідно зонного

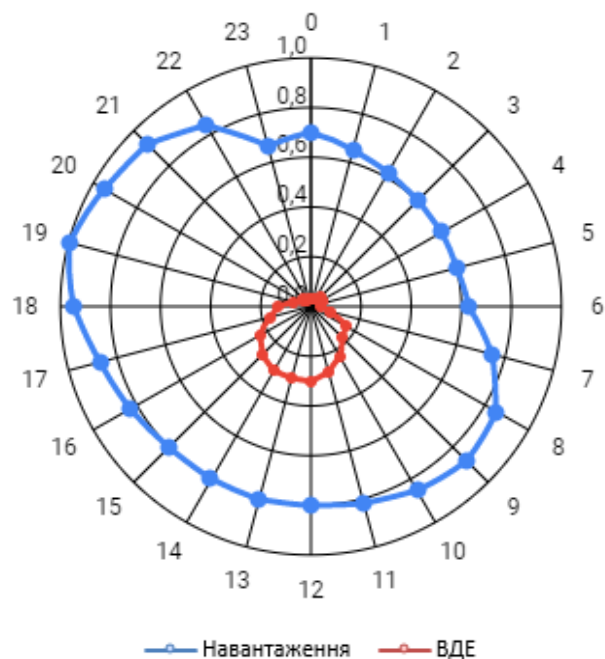


Рис. 2. Приклад покриття добового графіка електроспоживання

тарифу ступені графіка, з якої планується перенести потужність; K_{ji} – коефіцієнт вартості електроенергії згідно зонного тарифу ступені графіка, в яку планується переносити потужність; β – вартість технологічного зсуву виробництва, що має бути компенсована ЛЕС; δP – зміна втрат потужності мережі ЛЕС внаслідок коригування графіка навантаження споживача.

Для впливу зменшення нерівномірності сумарного добового ГЕН ЛЕС та мінімізації втрат потужності пропонується коригувати графік навантаження трансформаторних підстанцій (ТП) по черзі відповідно до їх коефіцієнтів завантаження. Очевидно, що значення відносних вартостей B_{ij} для кожного вузла будуть відрізнятись. Відповідно до поставленої задачі напишемо цільову функцію:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n B_{ij} \cdot P_{ij} \rightarrow \min, \quad (4)$$

де P_{ij} – потужність, яку потрібно змістити з j -ї ступені графіка навантаження на i -у; m – години, в які власне споживання ТП більше за генерування ВДЕ; n – години, в які генерування ВДЕ переважає споживання ТП.

Перша група обмежень вказує, що потужність на будь-якій ступені ГЕН повинна дорівнювати сумарній потужності споживання електроенергії цієї ступені ГЕН. Друга група обмежень вказує, що сумарний зсув споживання на деяку ступень ГЕН повинен повністю компенсувати генерування на цій ступені. Також вводиться обмеження на неможливість зміщення від’ємних значень потужності споживання.

Для розв’язання цієї задачі скористаємося методом транспортної задачі [20]. Розроблено відповідний алгоритм і програма. Для визначення потужності, якою може маневрувати споживач, визначається технологічний мінімум для кожного споживача. Виходячи з цього, потужність, яку може зміщувати споживач, буде дорівнювати різниці між фактичною P_{ji} потужністю споживання та технологічним мінімумом P_{mi} для певної години навантаження. Споживачі ранжуються відповідно до їх коефіцієнту завантаження ТП.

Години, в які власне споживання ТП менше за потужність генерування ВДЕ, умовно відносяться до годин «генерування». Тобто годин, на які потрібно буде змістити потужності споживання. Години, в які навантаження більше за потужність генерування та виконується умова $P_{ji}(t) - P_{mi}(t) > 0$ відносяться до годин, з яких можна переносити потужність. Саме ця різниця визначає обсяг надлишкової потужності $P_{noi}(t)$, яку можна змістити з певною вартістю та $P_{оefi}(t)$ – потужність, якої не вистачає в певну годину доби для коригування добового графіка. З урахуванням визначених потужностей дефіциту і надлишку формується транспортна матриця переносу потужностей з годин надлишків в години дефіциту для коригування добового графіка навантаження. У випадку, коли сумарна потужність генерування переважає потужність, яку можна змістити для коригування графіка електричних навантажень, для отримання збалансованої транспортної задачі вводиться додатково фіктивне джерело генерування навантаження (віртуальна електрична станція [21])

$P_{viri}(t) = \sum_{i \in \theta} P_i(t) - P_{noi}(t)$ (θ – множина джерел електроенергії ЛЕС). У випадку, коли власного генерування ВДЕ не вистачає для забезпечення потреб в електроенергії споживачів, вводиться умовне джерело централізованого живлення

$$P_{EECi}(t) = \sum_{i \in \theta} P_i(t) - P_{noi}(t).$$

Розв’язком транспортної задачі є рекомендація щодо зміщення графіка електричних навантажень споживачів, які в найбільшій мірі впливають на нерівномірність сумарного графіка навантаження ЛЕС. Коригування добового графіка електричних навантажень проводиться доти, доки є необхідність виконувати умову (2). Після завершення виводиться графічне відображення морфометричної моделі графіка електричних навантажень без урахування генерування ВДЕ, з урахуванням генерування ВДЕ та відкоригований графік електричних навантажень ЛЕС (рис. 2) та відповідні морфометричні показники для перерахованих графіків.

На рис. 3,а показано добовий графік електроспоживання, в якому надлишок незбалансованої електроенергії ФЕС (виділено червоним кольором) споживається під час післяобіднього мінімуму (виділено голубим кольором). Для цього зроблено відповідні зміни в технологічному процесі електроспоживання. На рис. 3,б наведено добовий графік електроспоживання, коли окрім електроенергії генерованої ФЕС зміщене також електроспоживання під час вечірнього максимуму на нічний мінімум. Таким чином є можливість вирівняти графік споживання електроенергії і наблизити його до кола.

Нерівномірність графіка електроспоживання характеризує зміщення центру ваги фігури, що описує її координати x_u, y_u відносно центра координат x_0, y_0 [19]. Якщо графік електроспоживання має форму кола (коли графік рівномірний), то координати центра ваги і початку координат співпадають. В іншому випадку має місце зміщення координат центра фігури, що описує графік електроспоживання, від центру рівномірного графіка x_0, y_0 . Така нерівномірність визначається відстанню d :

$$d = \sqrt{(x_0 - x_u)^2 + (y_0 - y_u)^2} . \quad (5)$$

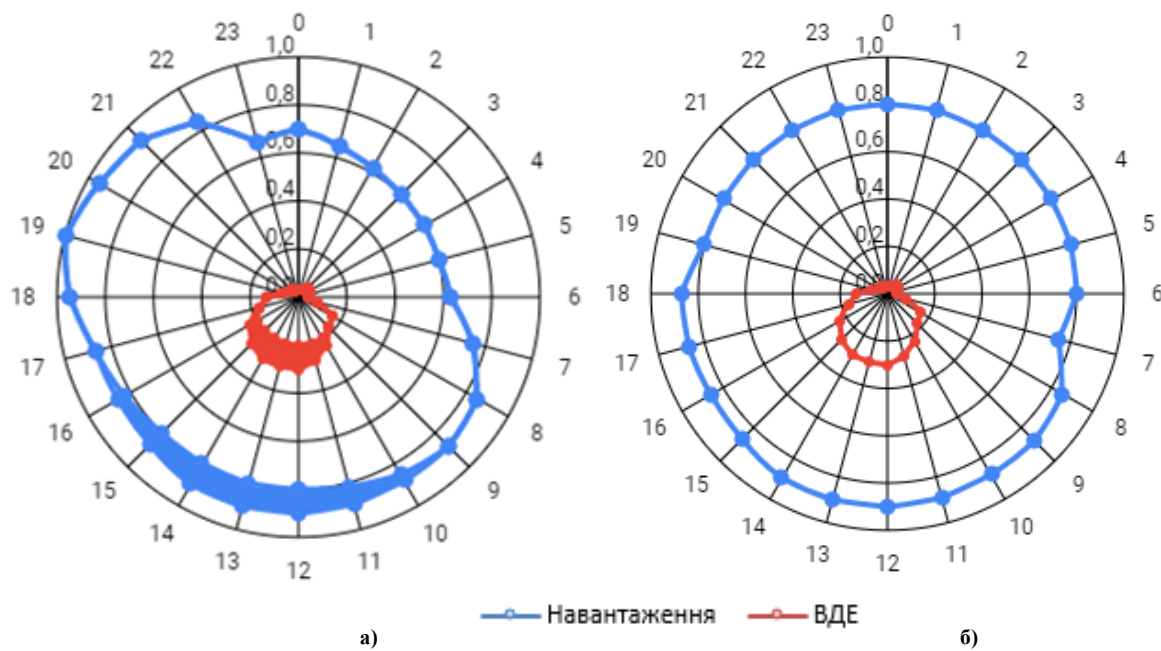


Рис. 3. Відкориговані графіки добового електроспоживання

Зі зменшенням нерівномірності відбувається наближення форми фігури, що описує графік електроспоживання, до кола, $d \rightarrow 0$. Тобто d є мірою нерівномірності фігури, що описує графік електроспоживання, та реагує на будь-які піки та провали в ньому. Наближення d до 0 відповідає зменшенню втрат електроенергії в електричній мережі. Для графіка електроспоживання в декартовій формі координат це подібно до зменшення його коефіцієнта форми графіка k_f під час визначення навантажувальних втрат методом середніх навантажень.

Висновки

За певних техніко-економічних умов в ЕЕС формуються локальні електроенергетичні системи, в яких балансується потужність і електроенергія за принципом – те що генерується споживається. За реалізації такого принципу ЕЕС є резервом відновлюваних джерел енергії в ЛЕС. За таких умов в ЛЕС стоїть задача компенсації природної нестабільності генерування ВДЕ, зокрема фотоелектричних і вітрових електростанцій. Вирішується вона різними способами і засобами накопичення електроенергії, виробленої ВДЕ. Пропонується один зі способів, який напряду не зв'язаний з накопиченням електроенергії. Йдеться про узгодження графіків генерування і споживання електроенергії в ЛЕС. Пропонується ще й тому, що в системах електропостачання є накопичений досвід вирівнювання графіків навантаження шляхом використанням зонного обліку електроенергії за різними тарифами. Розроблено алгоритм і програмне забезпечення для формування рекомендацій щодо зміщення графіка електричних навантажень споживачів, які в найбільшій мірі впливають на нерівномірність сумарного графіка навантаження ЛЕС. Показана можливість і доцільність узгодження графіків генерування ВДЕ і споживання електроенергії в локальній електроенергетичній системі як способу балансування в ній потужності та електроенергії.

Література

1. Кириленко О.В., Блінов І.В., Парус Є.В., Троч І.В. Оцінка ефективності використання систем накопичення електроенергії в електричних мережах. Технічна електродинаміка. 2021. № 2. С. 44–45. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.044>
2. Shiwei Su, Yiran You, Yu Zou. Comprehensive method for evaluation of medium- and low-voltage distribution network operating state. Технічна електродинаміка. 2020. № 6. С. 47–56. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.06.047>
3. Кузнецов М. П., Лисенко О. В., Мельник О. А. Задача оптимізації гібридної енергосистеми за рівнем дисперсії генерованої потужності. Відновлювана енергетика. 2022. № 1. С. 17–26. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1\(68\)839](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68)839)
4. Про затвердження Правил ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку : Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 308. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0308874-18>.
5. Блінов І.В., Мірошник В.О., Лоскутов С.С. Зниження витрат на покриття небалансів учасників

балансуючої групи виробників електричної енергії з відновлюваних джерел. Технічна електродинаміка. 2023. № 1. С. 62–65. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2023.01.062>

6. Зміни до постанови Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, від № 641 від 26 квітня 2019 року : затверджено постановою НКРЕКП № 46 від 15.01.2021 р.

7. Денисюк С.П., Таргонський В.А., Артем'єв М.В. Локальні електроенергетичні системи з активним споживачем: методи побудови та алгоритми їх функціонування. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2018. № 3. С. 7–22.

8. Лежнюк П.Д., Комар В.О., Кравчук С.В., Лесько В.О., Нетребський В.В. Балансова надійність електричної мережі з фотоелектричними станціями : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2018. 136 с.

9. Basok B.I., Butkevich O.F., Dubovsky S.V. Technical and economic aspects of evaluating prospects decarbonization of the unified energy system of Ukraine. *Technical electrodynamicics*. 2021. № 5. P. 55–62. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2021.05.055>

10. Яндульський О.С., Нестерко А.Б., Труніна Г.О. Визначення величини резерву активної потужності ТЕС та ГЕС для регулювання частоти та перетоків в ОЕС України. Технічна електродинаміка. 2020. № 1. С. 58–63. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2020.01.058>

11. Kudrya S. O., Repkin O. O., Rubanenko O. O., Yatsenko L. V., Shynkarenko L. Ya. Development stages of green hydrogen energy of Ukraine. *Renewable Energy*. 2022. № 1. P. 5–16. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1\(68\)840](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68)840)

12. Комар В. О., Кудря С. О., Лежнюк П. Д., Гунько І. О. Водневі технології для вирівнювання графіків генерування вітрових електростанцій під час балансування режимів електроенергетичних систем. Відновлювана енергетика. 2022. № 4. С. 64–70. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4\(71\).64-70](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4(71).64-70)

13. Zhu Z., Liu Z., Duan Q., Xu Z., Sun B. and Mei H. Capacity Allocation of Energy Storage and Synchronous Condenser for Wind-photovoltaic-thermal-storage Combined Transmission System. *2021 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)*, Nanjing, China, 2021. P. 239-244. DOI: <https://doi.org/10.1109/iSPEC53008.2021.9735446>.

14. Болотний М. П., Лоєнко Ю. Г., Кармазін О. О. Застосування систем накопичення енергії для задач керування режимами ЕЕС України: стан та перспективи розвитку. Відновлювана енергетика. 2022. № 3. С. 28–35. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.3\(70\)](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.3(70)).

15. Денисюк С.П., Дерев'янка Д.Г., Белоха Г.С. Синтез моделей локальних електроенергетичних систем з джерелами розосередженої генерації. Технічна електродинаміка. 2022. № 4. С. 48–53. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2022.04.048>

16. Lezhniuk P., Komar V., Hunko I. Natural-simulation model of photovoltaic station generation in process of electricity balancing in electrical power system. *Informatyka, Automatyka, Pomiar W Gospodarce I Ochronie Środowiska*. 2022. № 12(3). P. 40–45. DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.3030>.

17. Andrzej Smolarz, Petro Lezhniuk, Stepan Kudrya, Viacheslav Komar, Vladyslav Lysiak, Iryna Hunko and others. Increasing Technical Efficiency of Renewable Energy Sources in Power Systems. *Energies*. 2023. 16, 2828. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062828>.

18. Petro Lezhniuk, Vyacheslav Komar, Serhii Kravchuk, Volodymyr Netrebskiy, Vladyslav Lesko. *Optimal Integration of Photoelectric Stations in Electric Networks*. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. 210 p.

19. Taras Komenda, Nataliya Komenda, Yuriy Vagapov. Criteria of morphometric analysis of a daily load profile. *Electrical Energy Systems*. Volume 29, Issue 5, May 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.2847>.

20. Зайченко Ю. П. Дослідження операцій. Київ, ЗАТ «ВІПОЛ». 2001. 688 с.

21. Yin S., Jin M., Chen X., Guo X. and Feng J. Modeling and Simulation of Optimal Configuration of Virtual Power Plant Oriented to Power Internet of Things. *2021 IEEE 4th International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering*, Shenyang, China, 2021. P. 751-754. DOI: [10.1109/AUTEEE52864.2021.9668812](https://doi.org/10.1109/AUTEEE52864.2021.9668812).

References

1. Kyrylenko O.V., Blinov I.V., Parus E.V., Trach I.V. Evaluation of efficiency of use of energy storage system in electric networks. *Technical electrodynamicics*. 2021. No. 2. P. 44–45. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2021.04.044>
2. Shiwei Su, Yiran You, Yu Zou. Comprehensive method for evaluation of medium- and low-voltage distribution network operating state // *Technical electrodynamicics*. – 2020. – No. 6. - Pp. 47–56. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2020.06.047>
3. Kuznetsov M.P., Lysenko O.V., Melnyk O.A. The task of optimizing the hybrid energy system according to the level of dispersion of generated power. *Renewable Energy*. 2022. No. 1. P. 17–26. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1\(68\)839](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68)839)
4. On approval of the Rules of the "day-ahead" and intraday market: Resolution of the National Commission for State Regulation in the Fields of Energy and Public Utilities (Ukr). No. 308 of 14.03.2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0308874-18> (date of application 23.05.2019).
5. Blinov I.V., Miroshnyk V.O., Loskutov S.S. Reducing the cost of imbalances of the balancing group of producers from renewable energy sources. *Technical electrodynamicics*. 2023. No. 1. P. 62–65. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2023.01.062>
6. Amendments to the resolution of the National Commission for State Regulation in the Energy and Utilities Sectors No. 641 of 26.04.2019 (Approved by Resolution of the of the National Commission for State Regulation in the Fields of Energy and Public Utilities. No. 46 of 15.01.2021).

7. Denysiuk S.P., Targonskyi V.A., Artemiev M.V. Local electric power systems with an active consumer: methods of construction and algorithms of their operation. Energy: economics, technologies, ecology. 2018. No. 3. P. 7–22. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2018.164244>.
8. Balanced reliability of the electric network with photovoltaic stations: a monograph. Lezhniuk P.D., Komar V.O., Kravchuk S.V., Lesko V.O., Netrebskyi V.V. Vinnytsia: VNTU, 2018. 136 p.
9. Basok B.I., Butkevich O.F., Dubovsky S.V. Technical and economic aspects of evaluating prospects decarbonization of the unified energy system of Ukraine. Technical electrodynamics. 2021. № 5. P. 55–62. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.05.055>
10. Yandulskyi O.S., Nesterko A.B., Trunin G.O. Determining the reserve capacity of thermal and hydroelectric power stations for frequency and power flows regulation in isp of Ukraine. Technical electrodynamics. 2020. No. 1. P. 58–63. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.01.058>
11. Kudrya S. O., Repkin O. O., Rubanenko O. O., Yatsenko L. V., Shynkarenko L. Ya. Development stages of green hydrogen energy of Ukraine. Renewable Energy. 2022. № 1. P. 5–16. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1\(68\)840](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68)840)
12. Komar V.O., Kudrya S.O., Lezhniuk P.D., Gunko I.O. Hydrogen technologies for alignment of generation schedules of wind power plants during balancing of energy power system mode. Renewable Energy. 2022. No. 4. P. 64–70. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4\(71\).64-70](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4(71).64-70)
13. Zhu Z., Liu Z., Duan Q., Xu Z., Sun B. and Mei H. Capacity Allocation of Energy Storage and Synchronous Condenser for Wind-photovoltaic-thermal-storage Combined Transmission System. 2021 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), Nanjing, China, 2021. P. 239-244. DOI: <https://doi.org/10.1109/iSPEC53008.2021.9735446>.
14. Bolotnyi M. P., Loienko Y. G., Karmazin O. O. Energy storage systems application for operation management problems in electric power system of Ukraine: status and development prospects. Renewable Energy. 2022. No. 3. P. 28–35. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.3\(70\).28-35](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.3(70).28-35).
15. Denysiuk S.P., Derevianko D.G., Bieloha H.S. Synthesis of models of local power systems with distributed generation sources. Technical electrodynamics. 2022. No. 4. P. 48–53. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.04.048>
16. Lezhniuk P., Komar V., Hunko I. Natural-simulation model of photovoltaic station generation in process of electricity balancing in electrical power system. Informatyka, Automatyka, Pomiar y W Gospodarce I Ochronie Środowiska. 2022. № 12(3). P. 40–45. DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.3030>.
17. Andrzej Smolarz, Petro Lezhniuk, Stepan Kudrya, Viacheslav Komar, Vladyslav Lysiak, Iryna Hunko and others. Increasing Technical Efficiency of Renewable Energy Sources in Power Systems. Energies. 2023. 16, 2828. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062828>.
18. Petro Lezhniuk, Vyacheslav Komar, Serhii Kravchuk, Volodymyr Netrebskiy, Vladyslav Lesko. Optimal Integration of Photoelectric Stations in Electric Networks. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. 210 p.
19. Taras Komenda, Nataliya Komenda, Yuriy Vagapov. Criteria of morphometric analysis of a daily load profile. Electrical Energy Systems. Volume 29, Issue 5, May 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.2847>.
20. Zaichenko Yu. P. Research of operations. Kyiv, CJSC "VIPOL". 2001. 688 p.
21. Yin S., Jin M., Chen X., Guo X. and Feng J. Modeling and Simulation of Optimal Configuration of Virtual Power Plant Oriented to Power Internet of Things. 2021 IEEE 4th International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering, Shenyang, China, 2021. P. 751-754. DOI: [10.1109/AUTEEE52864.2021.9668812](https://doi.org/10.1109/AUTEEE52864.2021.9668812).

ПАСІЧНЮК АНТОН

НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

e-mail: pasichniuk.anton@gmail.com

ТИХОХОД ВОЛОДИМИР

НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID ID: 0000-0002-1525-4770

e-mail: v.tikhokhod@gmail.com

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПРЕДМЕТНО-ОРІЄНТОВАНОГО ПРОЄКТУВАННЯ СКЛАДНИХ ПРОГРАМНИХ СИСТЕМ НА ПЛАТФОРМІ .NET CORE

В роботі проаналізовано проблеми реалізації методів та вибору засобів предметно-орієнтованого проектування складних проблемних областей, розглянуто особливості реалізації шаблонів, що використовуються для створення програмного забезпечення підтримки діяльності складних областей на платформі .NET Core.

Ключові слова: предметно-орієнтоване проектування, DDD, проектування складних проблемних областей, шаблони тактичного проектування.

PASICHNIUK ANTON

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

TYKHOKHOD VOLODYMYR

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

METHODS AND TOOLS OF DOMAIN-DRIVEN DESIGN OF COMPLEX SOFTWARE SYSTEMS ON THE .NET CORE PLATFORM

Object-oriented design and approaches to software implementation of systems are relatively new concepts. Templates, tools and technologies related to the implementation of domain models are developing and taking on new forms together with other areas of information technology and software engineering, in particular, with the development of programming languages and platforms, object-relational mapping technologies, microservices, cloud applications. The paper analyzes the problems of implementing methods and choosing means of subject-oriented design of complex problem areas, considers the templates used to create software to support the activities of complex areas on the .NET Core platform.

Existing practices are summarized, methods of implementing tactical design patterns on the .NET Core platform are described. The basic concepts of tactical domain design are shown on the examples of object models made in the UML modeling language. Some examples with fragments of the implementation of subject models in the C# programming language are given, which reflect the peculiarities of the implementation of some aspects of the domain in this programming language and emphasize their peculiarities.

Technical solutions for the implementation of the main concepts of entities, aggregates and objects of values, which are the most important concepts of tactical domain design, are analyzed. The technical features of applying Entity Framework Core object-relational mapping technology for building a high-quality domain model are disclosed. The necessity of structuring the subject area into small isolated parts in order to simplify the task space by using the Module template is emphasized, and the main techniques of implementing this template are highlighted. There are several possible ways of implementing domain events that are used to transfer side effects between aggregates.

Keywords: domain-driven design, DDD, design of complex problem areas, tactical design patterns.

Постановка проблеми та аналіз публікацій. Предметно-орієнтоване проектування (domain-driven design, DDD) є досить складним напрямком програмної інженерії, що використовується переважно для проектування систем зі складною логікою предметної області. Шаблон модель предметна область був класифікований Матріном Фаулером [1]. Засновником терміну предметно-орієнтоване проектування є Ерік Еванс, в своїй праці [2] він описав концепції DDD та практичні аспекти їх реалізації мовою програмування Java. В подальшому теоретичні, практичні та методичні аспекти використання DDD були досліджені і описані в роботах Вона Вернона [3], Мартіна Фаулера [1], Скота Міллета [4], Джими Нілсена [5] та інших авторів.

Незважаючи на те, що області застосування предметно-орієнтованого проектування та підходи до програмної реалізації систем розширюються [6–8], концепції, що лежать в основі архітектури таких систем, є відносно новими. Шаблони, засоби та технології, пов'язані з реалізацією моделей предметної області розвиваються та набувають нових форм внаслідок розвитку іншими напрямків інформаційних технологій та програмної інженерії, зокрема, з розвитком мов програмування та платформ, технологій об'єктно-реляційного відображення, технологій реалізації мікросервісів, хмарних технологій тощо.

Платформа .NET Core також є відносно новою сучасною технологією розробки кросплатформних застосунків, що активно розвивається. З появою платформи .NET Core, її розвитком та розвитком мови програмування C# з'явилися нові можливості, що значно спростили реалізацію концепцій DDD та покращили способи розробки моделі предметної області в порівнянні з попередньою платформою .NET Framework.

Отже, методи та технології моделювання предметної області розвиваються, внаслідок чого виникає необхідність в перегляді відповідних підходів та практик.

Цілі статті. Виходячи з вище зазначеного актуальним є аналіз та узагальнення сучасних знань щодо проблеми вибору та застосування методів та практик предметно-орієнтованого проектування на платформі .NET Core.

Практики реалізації шаблонів тактичного проектування. Предметно-орієнтоване проектування — це архітектурний стиль, що призначений для створення моделі програмного забезпечення,

в якій максимально точно відображається модель предметної області (домен), що включає бізнес-процеси та правила, що діють в ній. Важливою концепцією DDD є шаблон «єдина мова», що передбачає використання в комунікаціях між розробниками та спеціалістами проблемної області єдиної множини термінів та понять предметної області, які потім відображаються на модель предметної області.

DDD включає стратегічний та тактичний рівні проектування. На кожному з рівнів використовують шаблони стратегічного та тактичного проектування відповідно. В результаті стратегічного проектування проблемна область з метою приборкання складності поділяється на частини, що називаються обмеженими контекстами. Після декомпозиції предметної області з використанням шаблонів стратегічного проектування, далі застосовують проектування моделі предметної області в границях обмежених контекстів за допомогою шаблонів тактичного проектування.

До шаблонів тактичного проектування відносяться: сутність (Entity), об'єкт значення (Value Type), агрегат (Aggregate), служба (Service), подія (Event), модуль (Module), агрегат (Aggregate), фабрика (Factory), сховище (Repository). Кожен тактичний шаблон має своє призначення, але реалізація цих концепцій відрізняється в різних мовах програмування та на різних платформах.

Шаблон «сутність» використовується для моделювання певних унікальних понять предметної області. Певний набір характеристик забезпечує унікальність сутності, зазвичай це деякий ідентифікатор, що може мати натуральну або синтетичну природу. Сутності в DDD мають поведінку, на відміну від об'єктів анемічної моделі (anemic model) [1]. Тому зовні впливати на сутність можна тільки через її методи. Основні концепції сутності та прийоми їх реалізації перелічені в таблиці 1.

Таблиця 1

Техніки реалізації шаблону Сутність (Entity)

| Концепції | Практики та засоби реалізації |
|--|---|
| Інкапсуляція правил поведінки та | <ul style="list-style-type: none"> Властивості тільки для читання (приватний set) — захищає сутності від випадкової, неусвідомленої зміни. Загальнодоступні методи, в назві яких використовується єдина мова домена — забезпечують усвідомлений вплив на сутність з метою виконання зрозумілої бізнес-операції; виконується перевірка бізнес-правил при виконанні метода; змінити стан сутності можна тільки через виклик методів. |
| Підтримка коректного (валідного) стану. Концептуальна цілісність | <ul style="list-style-type: none"> Приватний конструктор без параметрів — забороняє створювати об'єкт сутності з невідомим станом. Ініціалізація об'єкта через конструктор з параметрами — забезпечує ініціалізацію сутності з необхідним набором параметрів, що забезпечує коректність та цілісність об'єкта. Перевірка коректності параметрів в реалізації конструктора — блокують можливість передачі некоректних значень, які впливають на правильну ініціалізацію сутності. Одним зі шляхів перевірки інваріантів є реалізація шаблону специфікація. |
| Порівнюваність | <ul style="list-style-type: none"> Перевизначення методів Equals базового класу Object. Перевизначення методу GetHashCode базового класу Object. Реалізація операторів порівняння. |
| Унікальність та незмінність ідентичності на протязі життєвого циклу сутності | <ul style="list-style-type: none"> Заборона зміни ідентифікатора об'єкта через приватний метод set. Можливі способи уніфікації: <ul style="list-style-type: none"> Програмне створення ідентифікатора, наприклад, використання ідентифікатора GUID. Створення ідентифікатора механізмами системи керування базою даних. Використання алгоритму Hi/Lo [9]. |

На рисунку 1 основні концепції шаблону відображено на діаграмі класів UML моделі сутності доставки. Клас Package має приватний конструктор без параметрів; публічний конструктор з двома параметрами; закрити для змін властивість Weight, що ініціалізується в конструкторі; поле Id тільки для читання, що містить синтетичний ідентифікатор сутності, за створення ідентифікатора відповідає конструктор сутності.

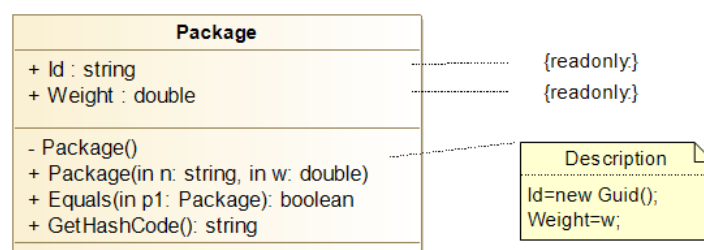


Рис. 1. Діаграма UML, що демонструє основні концепції сутності

Шаблон об'єкт-значення в архітектурі DDD має особливе призначення: він не має індивідуальності та специфікується повним набором його атрибутів, атрибути не змінюються на протязі життєвого циклу об'єкта-значення, при необхідності зміни характеристик об'єкта створюється новий об'єкт-значення з новими унікальними значеннями атрибутів. Основні концепції об'єкта-значення та прийоми його реалізації перелічені в таблиці 2.

Таблиця 2

Техніки реалізації шаблону Об'єкт-значення (Value type)

| Концепції | Практики та засоби реалізації |
|--|---|
| Унікальність за повним набором атрибутів | <ul style="list-style-type: none"> • Методи порівняння двох об'єктів-значень містять комбінацію логічних операції порівняння атрибутів цих класів. |
| Відсутність ідентичності | <ul style="list-style-type: none"> • Відсутнє відображення на власну таблицю в базі даних. • Відсутні ідентифікатори. |
| Незмінність значень атрибутів | <ul style="list-style-type: none"> • Властивості тільки для читання (приватний set). |
| Концептуальна цілісність | <ul style="list-style-type: none"> • Заборона доступу до конструктора без параметрів. • Ініціалізація об'єкта через конструктор з параметрами. |
| Порівнюваність | <ul style="list-style-type: none"> • Перевизначення методів Equals базового класу Object. • Перевизначення методу GetHashCode базового класу Object. • Реалізація операторів порівняння. • Операції порівняння для всіх об'єктів-значень доцільно винести в абстрактний базовий клас [10] з механізмом повного перебору властивостей за допомогою ітератора |
| Відсутність побічних ефектів | <ul style="list-style-type: none"> • Методи зміни стану повертають новий об'єкт-значення |

На рис. 2 відображено клас прямокутника, що є об'єктом-значенням та реалізує перелічені концепції: клас містить закриті для зміни властивості; значення атрибутів вимагаються в конструкторі; для порівняння об'єктів перевизначається метод Equals базового класу Object, в реалізації якого порівнюються значення всіх атрибутів двох об'єктів; метод Add зміни розмірів прямокутника не впливає на стан об'єкта, а створює та повертає новий об'єкт прямокутника.

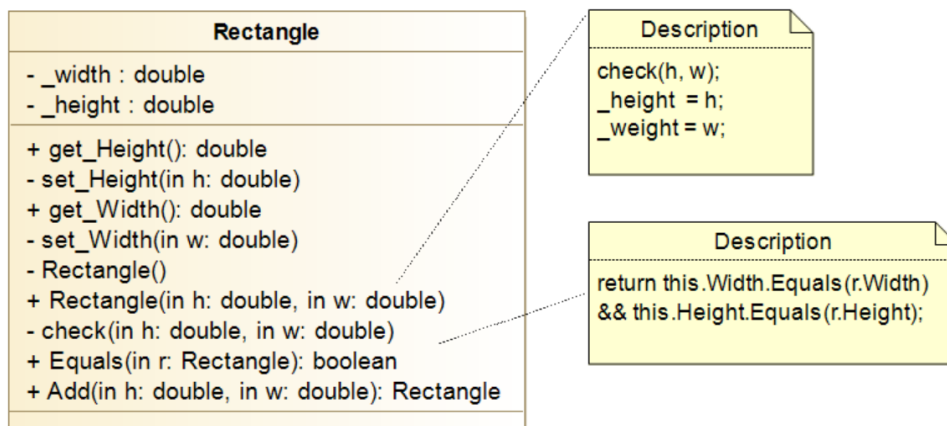


Рис. 2. UML-клас, що демонструє основні концепції об'єкту-значення

Фрагмент найпростішого об'єкта-значення на мові C# може виглядати наступним чином:


```

public class Rectangle
{
    public double Width { get; private set; }
    public double Height { get; private set; }

    private Rectangle() { }

    public Rectangle(double w, double h) { ... }

    public bool Equals(Rectangle r)
    {
        ...
        return this.Width.Equals(r.Width)
            && this.Height.Equals(r.Height);
    }
    public override int GetHashCode()
    {
        ...
        return (this.Width.GetHashCode()
            + this.Height.GetHashCode()).GetHashCode();
    }
    ...
}

```

Для реалізації об'єкта-значення на мові програмування C# доцільно використати готовий базовий універсальний клас [10], що забезпечує механізмом повного перебору властивостей за допомогою ітератора.

Пов'язані сутності об'єднуються в агрегати — ще один шаблон тактичного проєктування. Основною метою агрегатів є об'єднання сутностей в ізольовану модель, що змінюється в рамках однієї транзакції, при цьому агрегат повинен гарантувати узгодженість моделі та дійсність інваріантів в границях цієї моделі. Приблизна структура моделі агрегату доставки зображена на схемі діаграми класів UML на рис. 3, агрегат включає два об'єкти-значення: адресу та оплату, та колекцію, що включає об'єкти посилок. Основні концепції агрегата, що відображено на схемі: клас *Delivery* має приватний конструктор без параметрів; публічний конструктор з двома параметрами; закрити для змін колекцію залежних об'єктів *Package*; публічний метод *AddPackage*, що забезпечує коректну ініціалізацію об'єкта *Package* та зв'язування його з потрібним об'єктом *Delivery*; поле *Id* тільки для читання, що містить синтетичний ідентифікатор сутності, за створення ідентифікатора відповідає конструктор сутності. Основні концепції агрегату та шляхи їх реалізації представлено в таблиці 3.

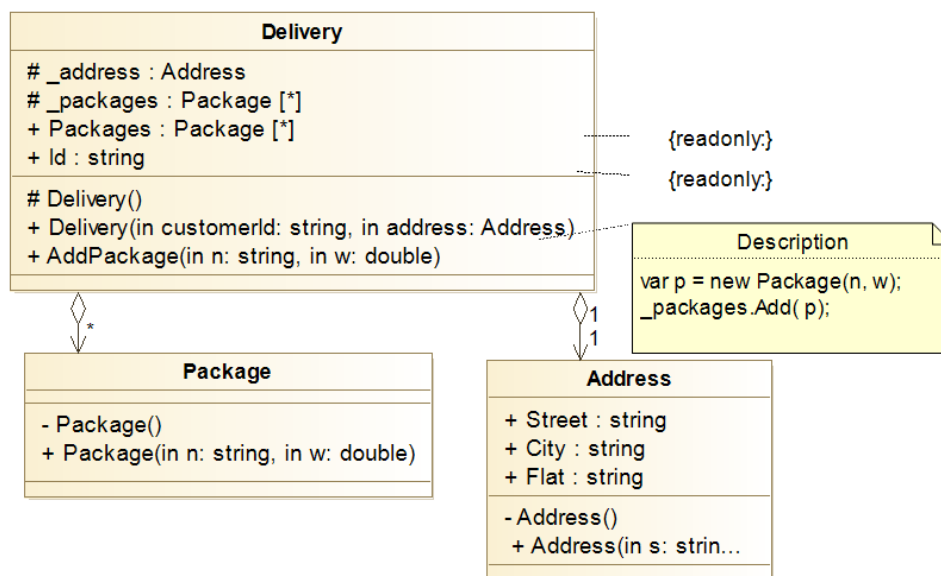


Рис. 3. Модель агрегату доставки

Проаналізуємо техніки реалізації тактичного шаблону Служба. Служби предметної області — це структури, що не мають свого стану, використовуються для виконання бізнес-операцій, що не відносяться до конкретних агрегатів та сутностей. Концептуально служби предметної області слід відрізнити від служб застосунку та служб, що розглядаються в контексті службово-орієнтованої архітектури.

Предметні служби можуть бути потрібні в таких сценаріях як виконання бізнес-операцій, трансформація об'єктів предметної області, агрегування інформації з декількох об'єктів предметної області тощо. В таблиці 4 наведено прийоми реалізації основних концепцій предметної служби.

Таблиця 3

Техніки реалізації шаблону Агрегат (Aggregate)

| Концепції | Практики та засоби реалізації |
|--|--|
| Заборона прямого додавання або зміни зв'язаних сутностей | <ul style="list-style-type: none"> Прихована колекція, що містить пов'язані об'єкти — забороняє зміну колекції об'єктів. Створення IReadOnlyCollection<T> при запиті колекції пов'язаних об'єктів на основі приватної колекції — для постачання колекції залежних об'єктів без можливості зміни колекції. |
| Підтримка концептуальної цілісності. Визначає границі паралельних транзакцій. Узгодженість графу об'єктів. | <ul style="list-style-type: none"> Перевірки інваріантів в реалізації методів. Приховування посилання на пов'язані об'єкти від зовнішнього світу. Зміни пов'язаних сутностей тільки через корінь агрегату через виклик методів (наприклад, ChangeAddress та ChangePayment на рис. 4). Використання однонаправлених зв'язків. |
| Ізольованість агрегатів | <ul style="list-style-type: none"> Різні агрегати посилаються один на одного через ідентифікатори. |

Таблиця 4

Техніки реалізації шаблону Служби (Service)

| Концепції | Практики та засоби реалізації |
|--|---|
| Виконання бізнес-сценаріїв предметної області, що не відносяться до відповідальності сутності або значення | <ul style="list-style-type: none"> Відокремлення операції в окремий інтерфейс. Визначається інтерфейс з операцією на мові моделі предметної області. Ім'я операції включається до єдиної мови обмеженого контексту. Необхідні об'єкти передаються через параметри методу, якщо операція вимагає декількох об'єктів. |
| Відсутність власного стану | <ul style="list-style-type: none"> Відсутність членів класу, що зберігають значення. |
| Приховування складності предметної логіки | <ul style="list-style-type: none"> Метод служби може інкапсулювати логіку трансформації об'єктів або їх комбінації |
| Підтримка єдиної мови обмеженого контексту | <ul style="list-style-type: none"> Назви методів відображають їх відповідальність з використанням предметних понять та термінів, та також стають частиною єдиної мови. |
| Забезпечення принципу єдиної відповідальності | <ul style="list-style-type: none"> Метод служби реалізує операцію, що не може бути віднесена до інших об'єктів домена. |

Технічно предметні служби представляють собою класи, що містять методи, що виконують бізнес-операцію, викликаючи методи інших об'єктів, в яких реалізована предметна логіка, тобто виконують координацію між різними агрегатами та сховищами.

Таблиця 5

Техніки реалізації шаблону Сховище (Repository)

| Концепції | Практики та засоби реалізації |
|---|---|
| Одне сховище на один агрегат | <ul style="list-style-type: none"> Використовують базовий шаблонізований клас для всіх сховищ. Конкретне сховище закривають класом агрегату. |
| Можливість розширення | <ul style="list-style-type: none"> Використовують Шаблон Специфікація (Specification) [11] Nuget-пакет Ardalis.Specification прискорює реалізацію специфікації [12] |
| Репозиторій повинен відноситись до домену | <ul style="list-style-type: none"> Використовують шаблон розділений інтерфейс (Separate Interface) [1] та інверсію залежності. Інтерфейс сховища розміщують в моделі домена. Реалізацію інтерфейса розміщують на рівні інфраструктури. |
| Методи сховища включаються до єдиної мови | <ul style="list-style-type: none"> Методи називають таким чином, щоб вони відображали відповідальність операцій предметної області. В назві методів використовують терміни предметної області. |
| Концептуальна цілісність | <ul style="list-style-type: none"> Використання механізму рефлексії для об'єктно-реляційного відображення |

Для реалізації збереження та відновлення агрегатів використовують шаблон сховище (Repository), що є проміжним рівнем між рівнем домену та рівнем доступу до даних. При цьому як правило одне сховище відповідає за один агрегат. Практично інтерфейс сховища включають в рівень домену, а класи, що

реалізують репозиторій, відносяться до рівня інфраструктури, далі служби або класи-обробники подій отримують об'єкти сховища через механізм впровадження залежності (Dependency Injection), що налаштовується в застосунку. При програмній реалізації сховищ використовують різні технології, наприклад, інструмент об'єктно-реляційного відображення (Object-Relation Mapping — ORM) Entity Framework, виконання коду SQL з допомогою ADO.NET, NoSQL тощо. В таблиці 5 відображено основні техніки реалізації концепцій сховища.

З виходом Entity Framework (EF) Core стало значно простіше технічно реалізувати відображення домену на реляційну структуру. Оскільки DDD орієнтований на поведінку, а не на дані, то для підтримки узгодженості моделі властивості приховуються для зміни зовні, а змінюються в методі. Ця особливість призводила до значної складності реалізації відновлення об'єктів на попередній платформі Entity Framework, оскільки вона дозволяла відображати тільки публічні властивості. На відміну від цього, EF Core використовує механізм рефлексії для об'єктно-реляційного відображення, що дає можливість налаштувати відображення приватних полів. Так, для класу:

```
public class Payment
{
    private int? _paymentMethodId;
    public int? PaymentMethodId
    {
        public get { return _paymentMethodId; }
        private set { _paymentMethodId = value; }
    }
    ...
}
```

конфігурація для EF Core, що вказує відображати приватне поле `_paymentMethodId` на колонку `PaymentMethodId` в таблиці бази даних, використовує для цього метод `UsePropertyAccessMode`:

```
orderConfiguration
    .Property<int?>("_paymentMethodId")
    .UsePropertyAccessMode(PropertyAccessMode.Field)
    .HasColumnName("PaymentMethodId")
    .IsRequired(false);
```

Шаблон «Модуль» в DDD принципово не відрізняється від модуля в об'єктно-орієнтованому програмуванні. Виділення такого шаблону окремо в DDD має на меті підкреслити необхідність структуризації предметної області на невеликі ізольовані частини з метою спрощення простору задач, причому підкреслюється важливість використання єдиної мови домену при моделюванні. Основні техніки реалізації шаблону наведено в таблиці 7.

Таблиця 7

Техніки реалізації шаблону Модуль (Module)

| Концепції | Практики та засоби реалізації |
|--|--|
| Організація та об'єднання спільних понять | <ul style="list-style-type: none"> Відокремлення просторів імен (namespace) та проєктів та розподілення в них споріднених програмних структур. |
| Підтримка слабкої зв'язаності та сильної зв'язаності | <ul style="list-style-type: none"> Мінімізація посилань між програмними структурами в різних модулях. Об'єднання об'єктів, що мають тісні зв'язки, в один проєкт. |
| Використання єдиної мови домену та розширення її | <ul style="list-style-type: none"> Назви проєктів та просторів імен повинні відповідати їх призначенню в моделі домену з використанням термінів єдиної мови. Ієрархія просторів імен та проєктів .Net Core рішення повинна відповідати структурі предметної області. |

Шаблон «фабрика» є загальним шаблоном проєктування, що призначений для конструювання класів, відповідальних за створення об'єктів. В архітектурі DDD він займає важливе місце, оскільки забезпечує цілісність домену за рахунок інкапсуляції логіки створення складних об'єктів домену з дотриманням бізнес-правил, інваріантів. Прості об'єкти рекомендується створювати через конструктори класів.

Важливе місце в моделюванні поведінки об'єктів домену посідають події. Події в DDD розділяють на два концептуальні типи: події предметної області та події інтеграції. Події предметної області використовуються для передачі побічних ефектів між агрегатами — коли певні зміни стану одного агрегату здійснюють вплив на інший агрегат. Для програмної реалізації розповсюдження подій часто

використовують компонент MediatR. MediatR надає контракти та автоматично сканує код проекту, знаходить обробники та зв'язує їх з подіями. Основні технічні рішення реалізації подій предметної області представлено в таблиці 6.

Таблиця 6

Техніки реалізації шаблону Подія (Event)

| Концепції | Практики та засоби реалізації |
|--|---|
| Розповсюдження побічних ефектів між агрегатами | <ul style="list-style-type: none"> Події моделюються простими класами даних, що включаються в модель домена. Nuget-пакет MediatR, що реалізує шаблон медіатр, може бути використаний для побудови інфраструктури розповсюдження подій та керування ними [13]. Уді Дахан запропонував рішення на основі класу зі статичними методами [14], перевагою використання якого є відсутність зовнішніх залежностей. Джимі Богарт рекомендує відкладені генерацію та відправку подій [15]. |

Висновки. В роботі проаналізовано основні концепції шаблонів тактичного предметно-орієнтованого проектування складних проблемних областей, проведено узагальнення методів та механізмів реалізації розглянутих архітектурних шаблонів на платформі .NET Core, наведено міркування щодо застосування різних технологій при програмній реалізації предметно-орієнтованих моделей.

References

1. Fowler M. Patterns of Enterprise Application Architecture. Addison-Wesley Professional. 2003. 560 p.
2. Evans E. Domain-Driven Design: Tackling Complexity in the Heart of Software. Addison-Wesley Professional. 2004. 560 p.
3. Vernon V. Implementing Domain-Driven Design. Addison-Wesley Professional. 2013. 656 p.
4. Millett S., Tune N. Patterns, Principles and Practices of Domain-Driven Design. Wrox. 2015. 800 p.
5. Nilsson J. Applying Domain-Driven Design And Patterns: With Examples in C# and .NET. Addison-Wesley Professional. 2006. 528 p.
6. Oukes P., Marc van Anel, Erwin Folmer, Rohan Bennett, Christiaan Lemmen. Domain-Driven Design applied to land administration system development: Lessons from the Netherlands. Land Use Policy. Issue 104. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105379>.
7. Design microservices for drones. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/architecture/microservices/design>
8. Jinsong Zhang, Yan Chen, Shengjun Qin. The Application of Domain-Driven Design in NMS. Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering. Issue 8350. 2011. DOI: 10.1117/12.920133.
9. Mihalcea Vlad. The hi/lo algorithm. URL: <https://vladmihalcea.com/the-hilo-algorithm/>
10. Implement value objects | Microsoft Learn. URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/dotnet/architecture/microservices/microservice-ddd-cqrs-patterns/implement-value-objects>
11. Specification Pattern | DevIQ. URL: <https://deviq.com/design-patterns/specification-pattern>
12. GitHub — ardalis/Specification: Base class with tests for adding. URL: <https://github.com/ardalis/Specification>
13. GitHub — jbogart/MediatR: Simple, unambitious mediator. URL: <https://github.com/jbogard/MediatR>
14. Domain Events — Take 2. URL: <https://udidahan.com/2008/08/25/domain-events-take-2/>
15. A better domain events pattern. URL: <https://lostechies.com/jimmybogard/2014/05/13/a-better-domain-events-pattern>

TESTING OF BACTERIAL FILTERS AND PRESERVATIVES FOR QUALITY ASSURANCE OF LYOPHILIZED SNAIL MUCUS AS A COSMETIC COMPONENT

*Snail mucus is the popular cosmetic ingredient that is rapidly taking over the modern market of beauty industry. Conducted microbiological tests using differential diagnostic agar media showed that mucus produced by snail farms had the hazard risks of contamination with coliform bacteria and staphylococci. In order to comply with biological safety requirements and extend the shelf life of products, it is advisable to carry out fine filtration and add antiseptic substances to the mucus filtrate. Microbiological analysis of two batches of *Helix aspersa* lyophilized mucus was carried out after the addition of preservatives such as Sharomix 300, Lysozyme, Natamycin with Nisin and the using of microporous acetyl cellulose filters (pore diameter of 2 μm). The best results of purification were demonstrated by 1% preservative Sharomix 300 or the fine-pore bacterial filters using in combination with 0.5% Sharomix 300*

Keywords: HelixComplex, lyophilized mucus, microbiological hazard risks, cosmetic product

ХРОКАЛО ЛЮДМИЛА

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

ВИПРОБОВУВАННЯ БАКТЕРІАЛЬНИХ ФІЛЬТРІВ ТА КОНСЕРВАНТІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ЛЮФІЛІЗОВАНОГО СЛИЗУ РАВЛИКА КОСМЕТИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

*Слиз равлика є одним з популярних інгредієнтів, що стрімко захоплює сучасний ринок косметичних засобів. Застосування слизу в косметології обумовлено високим вмістом в ньому біологічно активних сполук: специфічні протеїди, глікопептиди, гіалуронова кислота, алантоїн, забезпечують зволоження, профілактичну та лікувальну дію на пошкоджену і піддану віковим змінам шкіру. Склад та властивості слизу залежать від виду равликів-продуцентів, умов їх вирощування на фермі та технологічних рішень для отримання кінцевого продукту. Нами були проведені мікробіологічні тести щодо аналізу чистоти та біобезпеки слизу равлика з використанням диференційно-діагностичних агарових середовищ, який продемонстрував ризики зараження слизу, який виробляють равликові ферми, бактеріями групи кишкової палички та стафілококами. З метою дотримання вимог біологічної безпеки та продовження строку придатності доцільно проводити тонку фільтрацію та додавати антисептичні речовини до фільтрату слизу. Був проведений мікробіологічний аналіз двох партій люфілізованого слизу равлика *Helix aspersa* після внесення консервантів, таких як Шаромікс 300, лізоцим, натаміцин у поєднанні з нізином і використанням ацетилцелюлозних мікропористих фільтрів з діаметром пор 2 мкм. Найкращі результати щодо очищення від небажаних мікроорганізмів показало внесення 1% консерванту Шаромікс 300 та застосування бактеріальних фільтрів в комбінації з 0,5% Шаромікс 300.*

Ключові слова: HelixComplex, люфілізований слиз, ризики мікробіологічної небезпеки, косметичний продукт.

Issue statement and its connection with research and practical tasks

Snail mucus as ingredient for skincare cosmetic products has long been popular in South Korea and has already made its way as innovative one for beauty industry all over the world. Actually, the Global Snail Cosmetic Products Market is a huge business. The most popular product types with snail mucus are such as cell renewal cream, multi-functional cream, anti-acne cream, face skin mask, anti-aging eye patches, anti-wrinkle serum. According to expert estimations, Snail Beauty Market was valued at US \$ 555.9 million in 2022 and is expected to grow up to US \$ 1,232.7 million by 2030 [1].

Research of snail mucus content are often limited by access and complexity of investigation based on purification and identification of complicated organic compounds. The properties of mucus and content biological active compounds in it are strongly depend on snail species-producers, conditions of their growing at the farm and technological decisions for final product obtaining. Molluscs mucus is a complex matrix, highly influenced by biological and environmental factors. It is fundamental to understand how these factors influence the quality of the raw material in order to ensure effective, standardized cosmetic or pharmaceutical products. So, the points of quality, hazards analysis of snail mucus raw material as future cosmetic ingredient remain relevant. Another issue, that has to be solved, is low shelf life of product due to high protein content.

Review of latest research

In general, snail mucus demonstrates the high potential in cosmetic industry, medicine, pharmacy, and biotechnology. Different molluscs species have been applied as mucus producers in various sectors for biomedical or biotechnology applications. Terrestrial widespread garden snail *Helix aspersa* has been used for mucus and mucin production for commercially available cosmetic products proposed by company such as Benton, Mizon, Cos Rx, Biopelle, Missha. Mucus of terrestrial tropical snails *Archachatina marginata* and *Achatina fulica* also has been applied in medicine and pharmacology for antimicrobial wound care and drug delivery [2].

Wide application of mucus in cosmetology is assured due to rich content of biological active compounds. Specific proteins, glycopeptides, hyaluronic acid, allantoin, that are included in native snail mucus, provide moisture and treatment effect on irritated, damaged, and aged human skin. Some authors also reported about its antimicrobial, antioxidant, anti-tyrosinase and antitumoral activities [3]. Biochemical analysis of *H. aspersa* mucus (*further in text*

HelixComplex) demonstrated the presence of mucopolysaccharides which create a lot of hydrogen bonding with surrounded water molecules and effectively lead to tissue hydration. In addition, it stimulates endogenous hyaluronate synthesis, resulting in an increase in water-binding capacity and viscoelasticity of human skin [4, 5]. Microbiological analysis provides scientific support in the field of predictive microbiology for the estimation of the shelf-life and the quantitative microbiological risk assessment in snail mucus as ingredient of cosmetic products.

It is reported that HelixComplex demonstrated bio-adhesive effect and defensive properties against the ozone in concentration 0.5 ppm for 2 hours exposure in human keratinocytes [6]. In mentioned research cytotoxicity, tissue morphology and cytokine levels were determined. In addition, HelixComplex was able to protect from O₃ exposure by preventing oxidative damage and the consequent pro-inflammatory action in both 2D and 3D skin models. Moreover, the presence of mucopolysaccharide could improve mucus adhesion to skin and act as a barrier to prevent epithelial cell destruction from toxic agents. The presence of polyphenols could give to the mucus the ability to prevent and counteract the pollution induced cutaneous oxidative damage [6].

HelixComplex showed antibacterial effect against some pathogenic bacteria as strong action on several strains of *Pseudomonas aeruginosa* and a weak action on *Staphylococcus aureus* [7, 9]. Size separation experiments indicated that the antimicrobial substances were two proteins with molecular mass of 30-40 kDa and 50-60kDa [7]. Despite on weak or middle antimicrobial effect of snail mucus, this product isn't sterile and could be inhabited by bacteria and fungi [8, 10].

The aim of current research

In Ukraine there are a lot of farms which are breeding *H. aspersa* for meat and caviar as gastronomy diet products and for mucus obtaining. Our working group collaborated with snail farm in Kyiv region for estimation the quality and hazard control of produced mucus. Usually we get samples of native filtrated mucus and concentrated lyophilized ones. Estimation of physical and chemical properties such as moisture, pH, water soluble proteins content [11, 12] and mineral ash elements [12] had been made. Next important points that have to be studied were estimation of microbiological purity of native and lyophilized mucus. After getting original results of initial microbiological tests on snail mucus and finding a lot of saprophytic bacteria and in some samples the contamination by bacteria of *E. coli* group and *Staphylococcus* sp. we decided to conduct product purification from microorganisms.

Therefore, the main aim of current research was the method screening for purification of mucus from undesirable microorganisms via using preservatives or/and special bacterial filters. Biological safety is valuable parameter of product quality and optimization of its conservation technology and storage.

Material and methods

The preservatives were added to the snail mucus directly at the manufacture site after rough filtering and centrifugation but before lyophilisation. In particular cases (samples 5 and 6), the preservatives addition was partially or completely replaced by using of fine-pored bacterial filters with pore diameter of 2 µm. Concentrations of preservatives were selected in a range recommended by producers. Preservatives have been tested at the beginning of research, and then the most effective one was tested in a complex with filtration. Thus, the samples were tested in the following variants (table 1).

Table 1

Samples of lyophilized snail mucus with addition of preservative and subjected by micro-pored filtration

| Sample No | Type and concentration of preservative or filtration |
|-----------|--|
| 1 | 1% Sharomix 300 |
| 2 | 0.5 % Sharomix 3000 |
| 3 | 0.5 % Lysozyme |
| 4 | 12% Natamycin + 0.08% Nisin |
| 5 | fine-pore filtration (Membrane filter CA, 2 µm) |
| 6 | fine-pore filtration (Membrane filter CA, 2 µm) and 0.5 % Sharomix 300 |

Microbial purity determination in mucus samples was made by agar-plate method on common nutrient agar and several standard differential media. The 2 ml aliquot of a 5% aqueous solution of lyophilized snail mucus were covered by melted sterile medium and cultivated in each Petri dish. Five nutrient media had been used in experiment for obtained data on quantitative microbiological risk assessment, and all tests were carried out in three repetitions:

1. Nutrient agar (NA) for estimation the Total Microbial Count (TMC)
2. Endo agar for detection Enterobacteria of coliform group
3. Egg yolk-salt agar for detection of pathogenic *Staphylococci*
4. Cephaloridine fucidin cetrimide agar (CFC) for detection of *Pseudomonas aeruginosa*.
5. Sabouraud dextrose agar (SDA) with chloramphenicol for detection of mold fungi

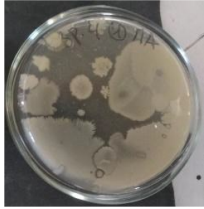
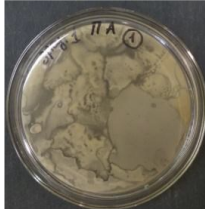
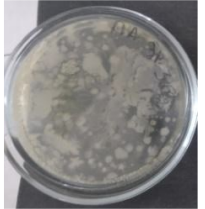

Inoculated Petri dishes had been being incubated at 37°C during 3 days. Visual observations had been made on every day of cultivation. For the NA and CFC data of first day cultivation was valued. If bacterial growth is observed on the differential media, the calculation and description of colony forming units (CFU) are provided.

Results and discussion

First, action of preservatives were tested, and among them Sharomix 300 was used in two concentrations. Results of experiment are presented in table 2.

Table 2

Tested samples of 5 % water solution of lyophilized mucus with preceding preservatives addition

| Observation day | Media | SAMPLE 1 1% Sharomix 300 | SAMPLE 2 0.5% Sharomix 300 | SAMPLE 3 Lysozyme | SAMPLE 4 Natamycin + Nisin |
|-----------------|-----------|--|--|---|--|
| 1st day | NA | 65 % space of medium surface is overgrown with white colonies  | 85% space of surface is overgrown with white colonies  | 80% of the surface is overgrown with white colonies  | 90 % space of medium surface is overgrown with white colonies  |
| | Endo | Bacterial growth is absent | Bacterial growth is absent | Bacterial growth is absent | Bacterial growth is absent |
| | Yolk-salt | Growth is absent | Growth is absent | Growth is absent | Growth is absent |
| | CFC | Blue colonies are absent | Blue colonies are absent | Blue colonies are absent | Blue colonies are absent |
| | SDA | Growth is absent | Growth is absent | Growth is absent | Growth is absent |
| 2nd day | Endo | Growth is absent | Growth is absent | Growth is absent | Growth is absent |
| | Yolk-salt | Growth is absent | Growth is absent | 6 small white CFU | Growth is absent |
| | SDA | Growth is absent | Growth is absent | Growth is absent | Growth is absent |
| 3rd day | Endo | Growth is absent | Growth is absent | Growth is absent | Growth is absent |
| | Yolk-salt | Growth is absent | 2 small yellow CFU | 20 white and 10 yellow CFU | 7 yellow CFU |
| | SDA | Growth is absent | Growth is absent | One CFU with Ø 4 mm grew in one sample | Growth is absent |

The conducted analysis showed that all samples had satisfactory quality, because bacteria of *E. coli* group and *Pseudomonas aeruginosa* were completely absent. With the exception of Lysozyme, all other preservatives destroyed mold fungi. However, almost all samples of this series had been infected with *Staphylococcus*, especially suspicious were yellow colonies on yolk-salt agar detected on the third day of cultivation. Among used preservatives, Sharomix 300 was the best one for destroying bacteria. So, the second experiment was conducted on selected preservative Sharomix 300 and fine filtration. Results were presented on the table 3.

Table 3

Tested samples of 5 % water solution of lyophilized mucus with preceding fine filtration and preservative addition

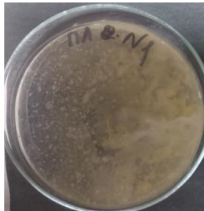



| Observation day | Media | SAMPLE 5 fine-pore filtration (Membrane filter CA, 2 µm) | SAMPLE 6 fine-pore filtration (Membrane filter CA, 2 µm) and 0.5 % Sharomix 300 |
|-----------------|-----------|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1st day | NA | 60 % of surface is overgrown with white colonies  | 20 % space of surface is overgrown with white colonies  |
| | Endo | Growth is absent | Growth is absent |
| | Yolk-salt | Growth is absent | Growth is absent |
| | CFC | Blue colonies are absent | Blue colonies are absent |
| | SDA | Growth is absent | Growth is absent |

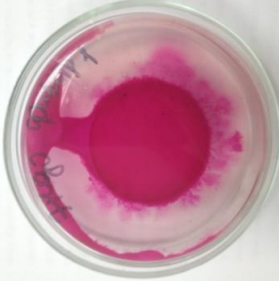

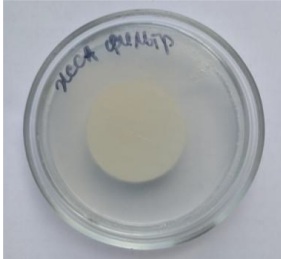
Table 3 – continues

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------|-----------|--|---|
| 2nd day | Endo | Growth is registered, 10 CFU | Growth is absent |
| | Yolk-salt | Growth is absent | Growth is absent |
| | SDA | Growth is absent | Growth is absent |
| 3rd day | Endo | More than 50 CFU  | Growth is absent  |
| | Yolk-salt | Growth is absent | Growth is absent |
| | SDA | Growth is absent | Growth is absent |

The ability of the filters to hold up various groups of improper microorganisms was also analyzed. For this purpose, the filters after uses were placed on the surface of differential media and the visual examination was carried out after 3 days of cultivation at 37⁰C (table 4).

Table 4

Analysis of trap capacity of bacterial membrane filter CA, 2 μm

| Endo agar | SDA | Yolk-salt agar |
|--|--|---|
| The filter substantially doesn't hold up bacteria of coliform group. Acid fuchsine reaction was present, but weren't colony growth  | The filter effectively trapped spores and vegetative forms of mold fungi  | <i>Staphylococcus</i> wasn't detected on the filter. However, considering fact that samples didn't contain staphylococci at all, it's difficult to evaluate the trap capacity of filter  |

Conclusions

Two batches of lyophilized mucus produced on a snail farm were examined. Microbiological analysis showed that there are risks of contamination with coliforms and staphylococci at that snail farm. As the main recommendation, it is proposed to carry out the disinfection of technological lines on the farm. To ensure the quality and biosafety standards of the mucus lyophilizate and to extend the product's shelf life, we recommend adding 1% of the preservative Sharomix 300 before lyophilization of native mucus or using fine-pore bacterial filters with 0.5% of Sharomix 300. The study of the trap capacity of acetylcellulose fine pore 2 μm filters showed that they effectively trap spores and vegetative forms of mold fungi.

References

1. Coherent Market Insights. Global Snail Beauty Products Market Analysis. Mar 10, 2023. URL: <https://www.coherentmarketinsights.com/press-release/global-snail-beauty-products-market-to-surpass-us-7695-million-by-2025-754> (Accessed 05 Apr 2023).
2. McDermott M., Dermott M. Mc., Cerullo A. R., Parziale J., Achrak E., Sultana S., Ferd J., Samad S., Deng W., Braunschweig A. B., Holford M. Advancing Discovery of Snail Mucins Function and Application. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2021. Vol. 9, № 734023. 9 p. Doi: 10.3389/fbioe.2021.734023. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8542881/#B22>
3. Noothuan N., Apitanyasai K., Panha S., Tassanakajon A. Snail mucus from the mantle and foot of two land snails, *Lissachatina fulica* and *Hemiplecta distincta*, exhibits different protein profile and biological activity. / N. Noothuan, // *BMC Research Notes*. – 2021. – Issue 14, № 138. 7 p. URL: <https://doi.org/10.1186/s13104-021-05557-0>
4. Trapella C., Rizzo R., Gallo S., Alogna A., Bortolotti D., Casciano F., Zauli G., Secchiero P., Voltan R. HelixComplex snail mucus exhibits pro-survival, proliferative and pro-migration effects on mammalian fibroblasts. *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8, Issue 1, № 17665. 10 p. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-018-35816-3>

5. Lorpez Angulo D. E., do Amaral Sobral P. J. Characterization of gelatin/chitosan scaffold blended with *Aloe vera* and snail mucus for biomedical purpose. *International Journals of Biological Macromolecules*. 2016. Issue 92. P. 645-653. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141813016307929?via%3Dihub>
6. Gentili V., Bortolotti D., Benedusi M., Alogna A., Fantinati A., Guiotto A., Turrin G., Cervellati C., Trapella C., Rizzo R., Valacchi G. HelixComplex snail mucus as a potential technology against O₃ induced skin damage. *PLoS One*. 2020. Vol. 15, issue 2, № e0229613. 13 p. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229613>
7. Gunn A., Pitt S. J., Graham M. A., Dedi C. G., Taylor-Harris P. M. Antimicrobial properties of mucus from the brown garden snail *Helix aspersa*. *British Journal of Biomedical Science*. 2015. Vol. 72, Issue 4. P. 174-181. ISSN 0967- 4845
8. Dolashki A., Velkova L., Daskalova E., Zheleva N., Topalova Y., Atanasov V., Voelter W., Dolashka P. Antimicrobial activities of different fractions from mucus of the garden snail *Cornu aspersum*. *Biomedicines*. 2020. Vol. 8, № 315. 17 p. URL: <https://doi.org/10.3390/biomedicines8090315>
9. Eghianruwa Q., Osoniyi O., Wachira S., Maina N., Mbugua R., Imbuga M. In vitro antiproliferative studies of extracts of the marine molluscs: *Tympanotonus fuscatus* var *radula* (Linnaeus) and *Pachymelania aurita* (Mueller). *International Journal of Biochemistry and Molecular Biology*. 2019. Vol. 10, issue 1. P. 1–8.
10. Belouhova M., Daskalova E., Yotinov I., Topalova Y., Velkova L., Dolashki A., Dolashka, P. (2022). Microbial diversity of garden snail mucus. *MicrobiologyOpen*, 2022. Issue 11, № e1263. 13 p. URL: <https://doi.org/10.1002/mbo3.1263>
11. Khrokalo L., Salitra N., Ryzhenko N. Physicochemical parameters and protein content in the mucus of *Helix aspersa*. *Problems of Environmental Biotechnology. Journal of National Aviation University of Ukraine*. 2020. Publ. 14.11.2021. Issue 1-2. P. 1-9. URL: <https://jrnل.nau.edu.ua/index.php/ecobiotech/article/view/16018>
12. Khrokalo L., Chyhyrynets O., Salitra N. Chemical properties of *Helix aspersa* mucus as a component of cosmetics and pharmaceutical products. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 62, Issue 15. P. 7650-7653. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.217>

КРАВЧЕНКО ІГОРКПІ ім. Ігоря Сікорського
ORCID ID: [0000-0002-9223-057X](https://orcid.org/0000-0002-9223-057X)
e-mail: kravchenko.igor@iit.kpi.ua**МАМУТА МАРИНА**КПІ ім. Ігоря Сікорського
ORCID ID: [0000-0002-7674-4984](https://orcid.org/0000-0002-7674-4984)
e-mail: rybalkomaryna@gmail.com

КОЕФІЦІЄНТ ВИПРОМІНЕННЯ ЛАМП РОЗЖАРЮВАННЯ

В роботі наведено результати табуляції та комп'ютерного моделювання методами поліноміальної апроксимації та лінійного прогнозування значень коефіцієнта випромінення вольфраму для радіометричних моделей оптичних ламп розжарювання.

Ключові слова: коефіцієнт випромінення, вольфрам, лампа розжарювання, лінійне прогнозування.

KRAVCHENKO IGOR, MAMUTA MARYNA
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

EMISSIVITY OF FILAMENT LAMPS

Quartz Tungsten Halogen Filament Electric Lamps (QTH FEL) are still widely used as light sources in various photoelectric systems and are currently the irradiance transfer standard following the introduction of the USA National Institute of Standards and Technology (NIST). Most of world leading manufactories, such as Phillips, OSRAM, GE, has FELs in its product lines. For system modelling and characterization, the Absolute Black Body (ABB) model is used with correction factor by filament emissivity. The most reliable data of tungsten emissivity have some peculiarity: they are represented in graphs format, for visual waves length and for temperatures up to 2800 K. Which makes it impossible to use it for infrared systems and for modern FEL, which has color temperatures 2850 K – 3200 K.

This paper presents the results of research of conversion graphs De Vos data to numerical form and extrapolation for temperatures up to 3200 K. It was determined that from many data sources original De Vos data are most useful for tabulating. The necessity of correction of grid nonorthogonality and distorsion are determined. It was found, that emissivity has near linear dependence from temperature. That's why polinomial linear, quadratic and cubic approximation extention and linear prediction has been studied for data extrapolation. Spectral ranges and extrapolation methods for SSE minimizing are defined. The estimated prediction absolute, relative errors and standard deviation were calculated. The expanded data for tungsten emissivity with standard deviation less than 0.0005, relative error less than 0.004 for temperatures up to 3200 K were obtained.

Keywords: emissivity, tungsten, filament lamp, incandescent lamp, linear prediction.

Постановка проблеми

В багатьох оптико-електронних системах джерелами випромінювання слугують оптичні лампи розжарювання. В якості робочих еталонів для експериментальних досліджень та теоретичних розрахунків параметрів фотоприймачів та оптико-електронних систем регулюючими органами, зокрема Національним інститутом стандартів і технологій США (NIST), визначені світловимірвальні лампи розжарювання [1; 2]. Тільки деякі виробники вказують для ламп спектральну щільність енергетичної світності для обмеженої (4–7) кількості стандартизованих довжин хвиль [3]. Для більшості ламп визначається робоча кольорова температура: NBS87, NBS1133 [4], СИС, СИП [5] лампи виробництва Philips [6], Osram [7], GE [8] тощо. Робоча кольорова температура оптичних ламп варіюється від 2400 К до 3200 К з основним значенням 2856 К та максимальним до 8000 К [6].

Колби оптичних ламп виготовляються з кварцового скла, що забезпечує їхнє застосовування для ультрафіолетового, видимого та інфрачервоного діапазонів NIR (IR-A), SWIR (IR-B), тобто для довжин хвиль від 0.2 мкм до 2.6 мкм.

Актуальним є питання отримання табличних значень спектральної щільності коефіцієнта випромінення таких ламп для діапазону температур до 3200 К.

Аналіз останніх джерел

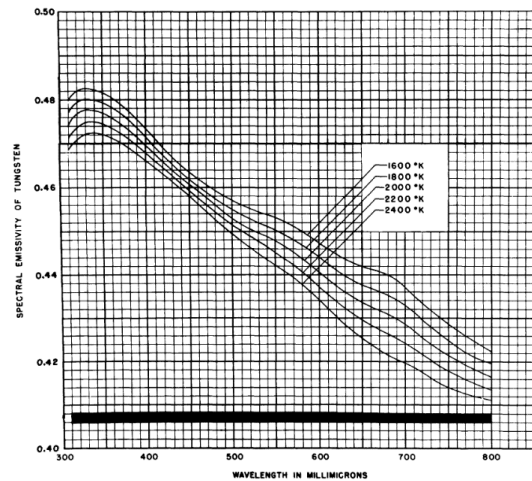
Випромінювальні властивості тіла розжарювання лампи обумовлюються матеріалом тіла: вольфрамом, - та його формою.

Найбільш точними вважаються експериментальні дані спектральної щільності напівсферичного коефіцієнта випромінення вольфраму Ларабі (R. D. Larrabee) [9]. Ці дані наведені табличному вигляді (рис. 1 а) та у вигляді графіків (рис. 1 б) у видимому діапазоні для (0.31–0.4) мкм з кроком 0.1 мкм, для (0.4–0.8) мкм з кроком 0.2 мкм, для температур від 1600 К до 2400 К з кроком 200 К. Хоча результати Ларабі вважаються найбільш достовірними [1; 10], принциповим недоліком даних є обмежені діапазони температур та довжин хвиль. Вказаний недолік унеможливує застосування даних для систем ультрафіолетового та інфрачервоного діапазонів, для опису галогенних ламп розжарювання.

Найбільш застосовуваними в науково-технічних міжнародних джерелах є експериментальні дані спектральної щільності нормального коефіцієнта випромінення вольфраму Де Воса (J. C. De Vos). Оригінальні дані наведені у вигляді графіків для температур від 1600 К до 2800 К з кроком 200 К в діапазоні (0.23–2.7) мкм [11]. Саме ці дані використані в розрахункових моделях Національного інституту стандартів і технологій США та Національної фізичної лабораторії Фінляндії.

Table I. Spectral Emissivity of Tungsten.

| Wavelength (m μ) | Temperature | | | | |
|--------------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|
| | 1600° K | 1800° K | 2000° K | 2200° K | 2400° K |
| 300 | — | — | — | — | — |
| 310 | 0.4798 | 0.4769 | 0.4740 | 0.4711 | 0.4682 |
| 320 | 0.4823 | 0.4795 | 0.4767 | 0.4739 | 0.4711 |
| 330 | 0.4828 | 0.4801 | 0.4774 | 0.4747 | 0.4720 |
| 340 | 0.4823 | 0.4798 | 0.4773 | 0.4748 | 0.4723 |
| 350 | 0.4816 | 0.4792 | 0.4768 | 0.4744 | 0.4720 |
| 360 | 0.4804 | 0.4781 | 0.4758 | 0.4735 | 0.4712 |
| 370 | 0.4791 | 0.4769 | 0.4747 | 0.4725 | 0.4703 |
| 380 | 0.4775 | 0.4754 | 0.4733 | 0.4712 | 0.4691 |
| 390 | 0.4754 | 0.4735 | 0.4716 | 0.4697 | 0.4678 |

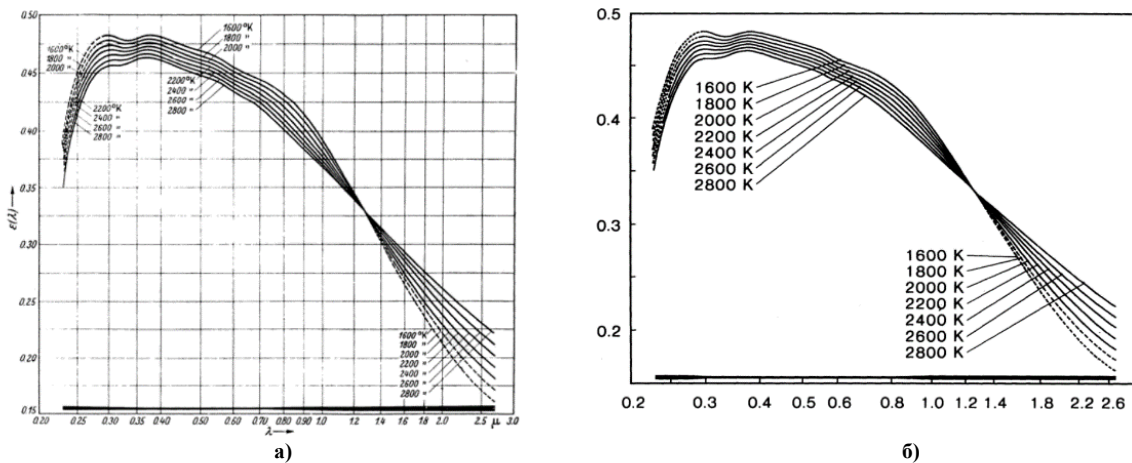


а) б)
Рис. 1. Дані Ларабі [9]: а) табличні значення; б) графіки

Метою роботи є табуляція графіків спектрального коефіцієнта випромінення вольфраму для отримання табличних даних, дослідження методів екстраполяції та розширення значень спектрального коефіцієнта випромінення вольфраму для актуальних робочих температур ламп в 3000 К, 3200 К.

Виклад основного матеріалу

Не зважаючи на те, що координатна сітка графіків де Воса не є ортогональною, мітки осі абсцис не відтворюють заявлений логарифмічний масштаб, а вертикальні лінії сітки мають явну «подушкоподібну» дисторсію, саме ці оригінальні дані є найбільш зручними для квантування. Екземпляри графіків, наведені в інших джерелах [12–14] або не мають координатної сітки, або мають сітку, яка не є достатньою для згущення (рис. 2). При цьому всі згадані екземпляри мають спотворений логарифмічний масштаб осі абсцис (рис. 3).



а) б)
Рис. 2. Графіки коефіцієнта випромінення: а) [14]; б) [13]

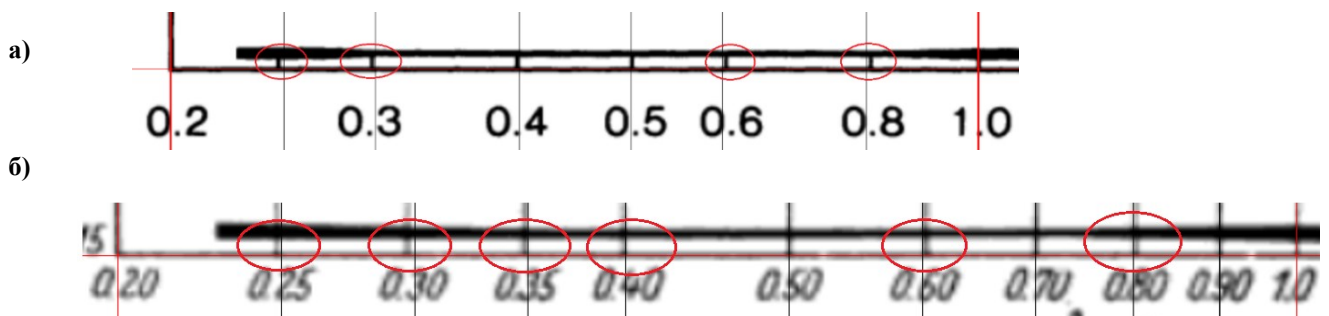


Рис. 3. Похибки координатної сітки: а) [13]; б) [14]

Проведений аналіз поведінки даних для відомих значень спектральної густини коефіцієнта випромінення вольфраму при температурі 2800 К.

З графіків залежності коефіцієнта випромінювання від температури (рис. 4) видно, що залежність наближена до лінійної, тому в якості наближення обрані метод прогнозування та поліноміальні апроксимації від лінійної до кубічної.

Метод апроксимації за критерієм мінімуму СКВ проводився алгебраїчним поліномом для кожної довжини хвилі з діапазону (0.23–2.7) мкм:

$$\varepsilon_k = \sum_{i=0}^N a_i T^i,$$

де a_i – коефіцієнти поліному; T – значення температури.

Метод лінійного прогнозування проводився з розрахунком коефіцієнтів кореляції методи Берга для кожної довжини хвилі з діапазону (0.23–2.7) мкм:

$$\varepsilon_k = \sum_{i=0}^{k-1} a_i \varepsilon_i,$$

де a_i – коефіцієнти кореляції даних; ε_i – відомі табличні значення у вузлах рівномірної сітки.

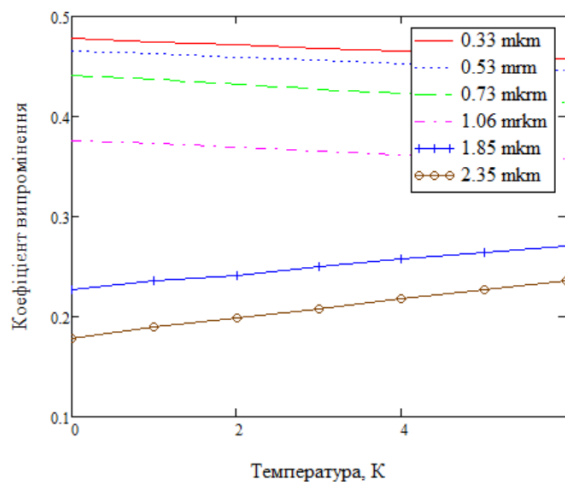


Рис. 4. Залежність спектрального коефіцієнта випромінювання від температури

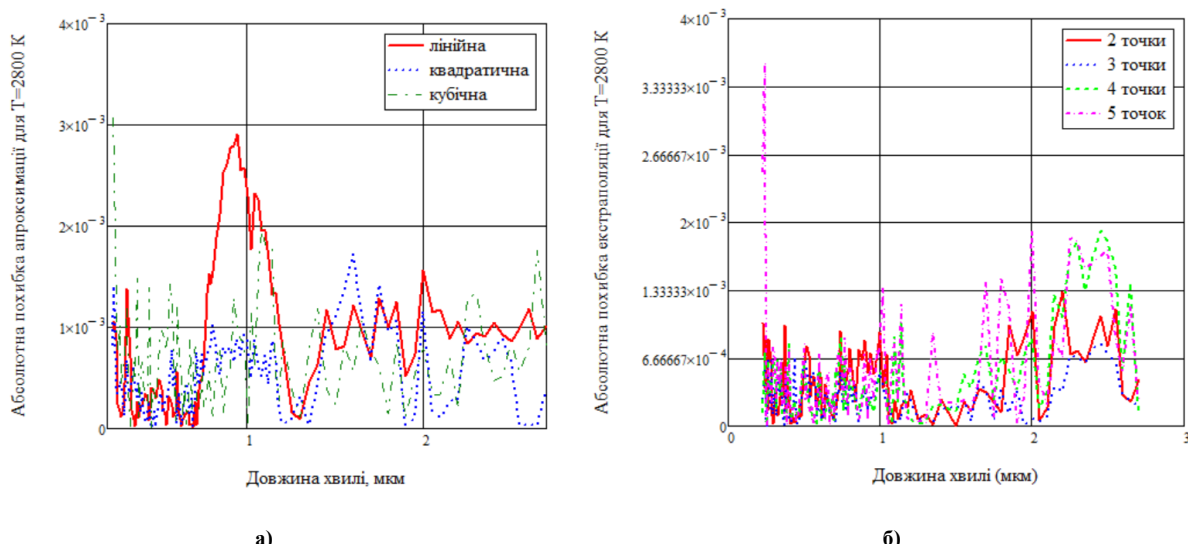


Рис. 5. Абсолютні похибки: а) апроксимації; б) лінійного прогнозування

Розрахункові значення абсолютної помилки для поліноміальної апроксимації для $T=2800$ К наведені на рис. 5. З графіків видно, що для різних значень довжини хвилі точніше наближення надають різні методи. За результатами аналізу виділено п'ять спектральних діапазонів для використання методів лінійної апроксимації та прогнозування по 2-х та 3-х точках.

За результатами аналізу за критерієм мінімальної похибки виявлено, що для різних діапазонів кращий результат надають різні методи екстраполяції. Отримані значення абсолютної похибки Δ_{max} , відносної похибки δ_{max} та середньоквадратичного відхилення СКВ регресійного наближення наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Похибки екстраполяції для $T=2800$ К

| Діапазон хвиль, мкм | Метод | $\Delta_{\max} \times 10^{-3}$ | $\delta_{\max} \times 10^{-3}$ | СКВ $\times 10^{-3}$ |
|---------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------|
| 0.23–0.34 | Прогнозування по 3-х точках | 0.660 | 1.496 | 0.423 |
| 0.35–0.52 | Лінійна апроксимація | 0.487 | 1.085 | 0.322 |
| 0.53–1.35 | Прогнозування по 3-х точках | 0.534 | 1.432 | 0.304 |
| 1.4–1.7 | Прогнозування по 2-х точках | 0.364 | 1.264 | 0.285 |
| 1.75–2.7 | Прогнозування по 3-х точках | 0.802 | 3.478 | 0.483 |

В результаті комп'ютерного моделювання отримані розширені табличні значення з трьома вірними знаками (СКВ <) нормального коефіцієнта випромінювання вольфраму в діапазонах:

(0.23–0.8) мкм з кроком 0.1 мкм;

(0.8–1.2) мкм з кроком 0.2 мкм;

(1.2–2.7) мкм з кроком 0.5 мкм;

для діапазону температур від 1600 К до 3200 К з кроком 200 К.

Значення прогнозованої відносної похибки для $T=2800$ К наведені на рис. 6. Числові значення розрахованих значень спектральної щільності нормального коефіцієнта випромінювання вольфраму для $T=3000$ К, 3200 К наведено в таблиці 2.

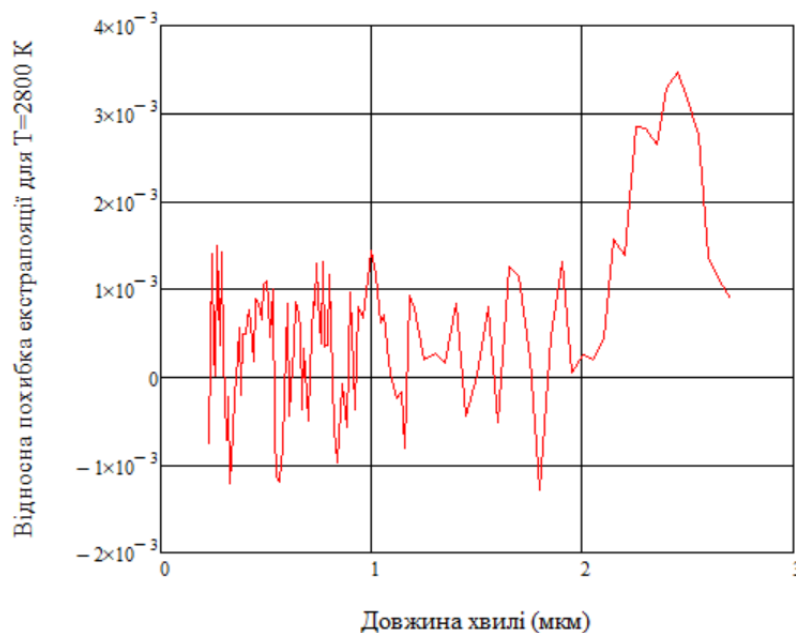


Рис. 6. Відносна похибка екстраполяції спектрального коефіцієнта випромінювання вольфраму за даними Де Воса для $T=2800$ К

Висновки

Проведений аналіз відомих джерел та показано, що найбільш достовірним джерелом значень спектрального нормального коефіцієнта випромінювання вольфраму є [11]. Отримані табличні дані коефіцієнта випромінювання для температур від 1600 К до 2800 К з кроком 200 К в діапазоні (0.23–2.7) мкм.

Шляхом комп'ютерного експерименту досліджено точність екстраполяції методами поліноміального наближення та лінійного прогнозування. Виявлено, що в різних спектральних діапазонах більшу точність екстраполяції забезпечують різні методи. Вихідні табличні дані розширені для температур 3000 К та 3200 К.

Таблиця 2

Спектральний нормальний коефіцієнт випромінювання вольфраму

| λ , мкм \ T, К | 3000 | 3200 | λ , мкм \ T, К | 3000 | 3200 | λ , мкм \ T, К | 3000 | 3200 |
|------------------------|-------|-------|------------------------|-------|-------|------------------------|-------|-------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 0.23 | 0.341 | 0.334 | 0.38 | 0.460 | 0.457 | 0.53 | 0.442 | 0.439 |
| 0.24 | 0.381 | 0.375 | 0.39 | 0.459 | 0.456 | 0.54 | 0.441 | 0.438 |
| 0.25 | 0.404 | 0.397 | 0.40 | 0.458 | 0.454 | 0.55 | 0.440 | 0.436 |
| 0.26 | 0.423 | 0.417 | 0.41 | 0.456 | 0.453 | 0.56 | 0.438 | 0.435 |
| 0.27 | 0.436 | 0.431 | 0.42 | 0.455 | 0.451 | 0.57 | 0.437 | 0.433 |

Продовження табл. 2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|
| 0.28 | 0.444 | 0.440 | 0.43 | 0.453 | 0.450 | 0.58 | 0.435 | 0.431 |
| 0.29 | 0.450 | 0.445 | 0.44 | 0.452 | 0.448 | 0.59 | 0.432 | 0.428 |
| 0.30 | 0.452 | 0.447 | 0.45 | 0.450 | 0.447 | 0.60 | 0.430 | 0.427 |
| 0.31 | 0.452 | 0.447 | 0.46 | 0.449 | 0.445 | 0.61 | 0.429 | 0.426 |
| 0.32 | 0.452 | 0.448 | 0.47 | 0.447 | 0.444 | 0.62 | 0.428 | 0.424 |
| 0.33 | 0.454 | 0.450 | 0.48 | 0.446 | 0.443 | 0.63 | 0.426 | 0.423 |
| 0.34 | 0.456 | 0.453 | 0.49 | 0.446 | 0.442 | 0.64 | 0.425 | 0.421 |
| 0.35 | 0.458 | 0.456 | 0.50 | 0.445 | 0.441 | 0.65 | 0.424 | 0.420 |
| 0.36 | 0.460 | 0.457 | 0.51 | 0.444 | 0.440 | 0.66 | 0.422 | 0.419 |
| 0.37 | 0.460 | 0.457 | 0.52 | 0.443 | 0.440 | 0.67 | 0.420 | 0.417 |
| 0.68 | 0.419 | 0.415 | 1.00 | 0.366 | 0.365 | 1.75 | 0.284 | 0.289 |
| 0.69 | 0.417 | 0.413 | 1.02 | 0.360 | 0.358 | 1.80 | 0.281 | 0.286 |
| 0.70 | 0.415 | 0.411 | 1.04 | 0.360 | 0.359 | 1.85 | 0.276 | 0.282 |
| 0.71 | 0.413 | 0.409 | 1.06 | 0.356 | 0.354 | 1.90 | 0.273 | 0.280 |
| 0.72 | 0.412 | 0.407 | 1.08 | 0.353 | 0.351 | 1.95 | 0.270 | 0.276 |
| 0.73 | 0.410 | 0.406 | 1.10 | 0.350 | 0.349 | 2.00 | 0.265 | 0.272 |
| 0.74 | 0.407 | 0.403 | 1.12 | 0.348 | 0.346 | 2.05 | 0.263 | 0.270 |
| 0.75 | 0.405 | 0.401 | 1.14 | 0.345 | 0.344 | 2.10 | 0.259 | 0.266 |
| 0.76 | 0.404 | 0.401 | 1.16 | 0.342 | 0.340 | 2.15 | 0.256 | 0.263 |
| 0.77 | 0.402 | 0.398 | 1.18 | 0.339 | 0.339 | 2.20 | 0.253 | 0.260 |
| 0.78 | 0.400 | 0.396 | 1.20 | 0.337 | 0.336 | 2.25 | 0.250 | 0.258 |
| 0.79 | 0.398 | 0.395 | 1.25 | 0.330 | 0.330 | 2.30 | 0.247 | 0.255 |
| 0.80 | 0.396 | 0.393 | 1.30 | 0.325 | 0.326 | 2.35 | 0.244 | 0.252 |
| 0.82 | 0.393 | 0.390 | 1.35 | 0.320 | 0.321 | 2.40 | 0.242 | 0.250 |
| 0.84 | 0.389 | 0.385 | 1.40 | 0.315 | 0.317 | 2.45 | 0.239 | 0.247 |
| 0.86 | 0.387 | 0.384 | 1.45 | 0.309 | 0.311 | 2.50 | 0.237 | 0.245 |
| 0.88 | 0.384 | 0.381 | 1.50 | 0.305 | 0.308 | 2.55 | 0.234 | 0.242 |
| 0.90 | 0.380 | 0.378 | 1.55 | 0.301 | 0.304 | 2.60 | 0.232 | 0.240 |
| 0.92 | 0.377 | 0.374 | 1.60 | 0.296 | 0.300 | 2.65 | 0.230 | 0.238 |
| 0.94 | 0.374 | 0.372 | 1.65 | 0.292 | 0.297 | 2.70 | 0.227 | 0.235 |
| 0.96 | 0.370 | 0.368 | 1.70 | 0.288 | 0.293 | | | |
| 0.98 | 0.368 | 0.366 | | | | | | |

Література

- Hunt T., Ruth Montgomery, Neil Harrison, Emma Woolliams (2004). An Investigation into the Collapse of Filaments of FEL QTH Lamps used as Irradiance Standards. NPL REPORT DQL-OR 003. 64 p.
- Ohno Y. Photometric Calibrations. NIST Special Publication 250-37. 1997. 100 p.
- Model 5000 FEL Lamp Source System Data Sheet. Gamma Scientific. <https://gamma-sci.com/wp-content/uploads/2020/10/5000-FEL-1000-Watt-Lamp-Source-rev-3.18.2.pdf>.
- Booker Robert L., Donald A. McSparron (1987). Photometric Calibrations. NIST Special Publication 250-15 / Robert L. Booker. 88 p.
- ГОСТ 10771082. Лампи розжарювання електричні світловимірювальні робочі. Видавництво стандартів, 1988. 21 с.
- Philips Entertainment Lamps catalogue. Koninklijke Philips Electronics N.V. 2013. 109 p.
- FEL. Product datasheet. OSRAM GmbH. 2022. 3 p.
- Technical catalogue. European edition – GE Lighting, 2015. 133 p.
- Larrabee R. D. The spectral emissivity and optical properties of tungsten. Technical report 328. Massachusetts institute of technology, 1957. 88 p.
- Branstetter J. Robert NASA Technical note D-1088. Radiant heat transfer between nongray parallel plates of tungsten. 1961. 26 p.
- De Vos J. C. A new determination of the emissivity of tungsten ribbon. Physica 1954, Vol XX, P. 690-714.
- Rieck G. D. Tungsten and Its Compounds. Pergamon press, 1967. 137 p.
- Lassner Erik Tungsten: Properties, Chemistry, Technology of the Element, Alloys and Chemical Compounds. Springer. 1999. 422 p.
- Rutgers G. A. Absolute radiometric measurements. NBS special publication 378. 1973. P. 53-62.

References

- Hunt T., Ruth Montgomery, Neil Harrison, Emma Woolliams (2004). An Investigation into the Collapse of Filaments of FEL QTH Lamps used as Irradiance Standards. NPL REPORT DQL-OR 003. 64 p.

-
2. Ohno Y. Photometric Calibrations. NIST Special Publication 250-37. 1997. 100 r.
 3. Model 5000 FEL Lamp Source System Data Sheet. Gamma Scientific. <https://gamma-sci.com/wp-content/uploads/2020/10/5000-FEL-1000-Watt-Lamp-Source-rev-3.18.2.pdf>.
 4. Booker Robert L., Donald A. McSparron (1987). Photometric Calibrations. NIST Special Publication 250-15 / Robert L. Booker. 88 r.
 5. HOST 10771082. Lampy rozzhariuvannia elektrychni svitlovymiriuvalni robochi. Vydavnytstvo standartiv, 1988. 21 s.
 6. Philips Entertainment Lamps catalogue. Koninklijke Philips Electronics N.V. 2013. 109 r.
 7. FEL. Product datasheet. OSRAM GmbH. 2022. 3 p.
 8. Technical catalogue. European edition– GE Lighting, 2015. 133 p.
 9. Larrabee R. D. The spectral emissivity and optical properties of tungsten. Technical report 328. Massachusetts institute of technology, 1957. 88 p.
 10. Branstetter J. Robert NASA Technical note D-1088. Radiant heat transfer between nongray parallel plates of tungsten. 1961. 26 p.
 11. De Vos J. C. A new determination of the emissivity of tungsten ribbon. Physica 1954, Vol XX, P. 690-714.
 12. Rieck G. D. Tungsten and Its Compounds. Pergamon press, 1967. 137 p.
 13. Lassner Erik Tungsten: Properties, Chemistry, Technology of the Element, Alloys and Chemical Compounds. Springer. 1999. 422 p.
 14. Rutgers G. A. Absolute radiometric measurements. NBS special publication 378. 1973. P. 53-62.

СУББОТА ІРИНА

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
<http://orcid.org/0000-0002-1581-8513>

ЗАСТОСУВАННЯ КРЕМНЕЗЕМИСТИХ ПОРІД ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ ВИРОБІВ БУДІВЕЛЬНОЇ КЕРАМІКИ

Скорочення запасів високоякісної глинистої сировини призвело до необхідності використовувати інші джерела сировини, які б забезпечили виробництво будівельної кераміки. Останнім часом увага приділяється використанню кремнеземистих порід (опок, трепелів, діатомітів), запаси яких в Україні досить значні, але використовуються не достатньо. В статті наведено результати досліджень складів мас на основі місцевої легкоплавкої глини та в якості домішки застосування недефіцитної кремнеземистої мінеральної породи. Це дозволить розширити застосування місцевих природних мінералів для ефективного та екологічно чистого виробництва будівельної кераміки.

Ключові слова: керамічні матеріали, глиниста сировина, кремнеземисті матеріали, будівельна кераміка.

SUBBOTA IRYNA

National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
<http://orcid.org/0000-0002-1581-8513>

THE USE OF SILICEOUS ROCKS TO INCREASE THE STRENGTH OF CONSTRUCTION CERAMICS

The purpose of the research are physicochemical processes of forming the structure and properties of ceramic masses based on local low-melting clay raw materials of the Kyiv region. Building ceramic materials differ by a combination of properties, such as durability and architectural expressiveness and therefore are one of the main ones in modern construction.

With usage of fusible raw materials in production there is a need, along with an increase in volumes, to improve the quality of wall ceramics and expand the range of manufactured products. The reduction of high-quality clay raw materials reserves has led to usage of other sources of raw materials, that might ensure building ceramics production. Attention has been paid to the use of siliceous rocks (cherts, trepels, diatomites) recently, the reserves of which in Ukraine are quite significant, however they are not widely used.

Preparation of ceramic materials effectiveness significantly relies on physical and chemical processes of their thermal processing. Drying the semi-finished product process is important for the quality of the finished product and is estimated as 10-12% of total final products cost. Mainly poly-mineral clay compositions with adding of natural mineral raw material are used to manufacture building materials. It is necessary to study their technological properties, to increase the usage effectiveness. Therefore, it is important to study technological properties of masses that are based on fusible clay and usage of mineral rock which contain gaize as an addition. The study presents the research results of mass compositions based on local low-melting clay and the usage of non-deficient siliceous mineral rock as an addition. This allows to expand the use of local natural minerals for efficient and environmentally clean production of building ceramics.

Key words: ceramic materials, clay raw materials, siliceous materials, building ceramics.

Постановка проблеми

У сучасних умовах постає питання про необхідність збільшення виробництва екологічно чистих, конкурентоздатних і недорогих керамічних матеріалів. Це можливо досягти за рахунок пошуку нових технологічних рішень при використанні сучасних підходів до оцінки потенціалу початкових сировинних матеріалів. Ефективність застосування керамічних будівельних матеріалів обумовлена підвищеною комфортністю житлових будівель завдяки сприятливому клімату приміщень.

Для виробництва матеріалів будівельного призначення застосовують в основному полімінеральні глинисті композиції з додаванням у якості домішок природної мінеральної сировини. Тому актуальним є питання дослідження мас на основі легкоплавких глин, а в якості домішки застосування кремнеземистої мінеральної породи з метою поліпшення теплофізичних властивостей виробів будівельної кераміки.

При застосуванні місцевої легкоплавкої глини виникає потреба у розробці шляхів та способів покращення якості будівельної кераміки, виготовленої на її основі. Якість готової продукції в значній мірі залежить від процесів, які відбуваються при випалюванні. Він є найважливішою технологічною операцією, в ході якої формується кінцевий фазовий склад та мікроструктура матеріалу, що складає до 30 % від загальної собівартості готових виробів. Для вирішення поставленої задачі з одержання керамічного матеріалу з місцевої сировини з застосуванням в якості домішки недефіцитної природної добавки опоковмісної породи використовували сучасні фізико-хімічні і фізико-технологічні методи дослідження.

Сучасне високоякісне обладнання дозволяє процеси підготовки керамічної маси, сушіння та випал максимально запрограмувати та врегулювати. Завдяки цьому можливо як добавку до легкоплавкої глини використовувати кремнеземисту опоковмісну породу. Характерною її особливістю є наявність активної аморфної кремнекислоти та тонкодисперсна структура, легкість, а також екологічна безпека при її використанні як природної сировини. Характер взаємодії з водою аморфного кремнезему, що входить до складу опок, відрізняється від взаємодії з водою глинистих мінералів, що і призводить до поліпшення фізико-механічних властивостей. Тому використання її як добавки при виробництві будівельної кераміки, що забезпечує можливість застосування місцевих сировинних матеріалів для ефективного та екологічно чистого виробництва, є актуальним.

Аналіз останніх джерел

Створення інноваційних матеріалів із високими теплофізичними характеристиками зазвичай спирається на управління структурою порового простору. Пористі матеріали в більшості випадків мають складну нерегулярну структуру [1, 2]. Окремі пори, що складають у сукупності простір пор, відрізняються за формою, розмірами, орієнтацією та кривизною поверхні. На структуру пор керамічних матеріалів насамперед впливають характеристики вихідної сировини. Кремнеземисті мінеральні породи це тонкозернисті матеріали, які мають досить високу пористість до 25–55 %. За походженням вони полімінеральні, у гранулометричному відношенні є порівняно однорідними. Тому є підстави кремнеземисті мінеральні породи прирівняти до тонкоподрібнених відпресованих мас і перенести на них закономірності, виявлені при випаленні цих мас. Під час термообробки проходить часткова їх усадка внаслідок чого зменшується природна пористість осадової породи. Це свідчить про те, що є можливість регулювання пористості, об'ємної маси та міцності при сушінні та випалі виробів, коли формуються найважливіші властивості керамічних матеріалів такі як міцність, морозостійкість, вогнетривкість зростають при спіканні під час випалення [3, 4].

Опока має пористу структуру та високі показники дисперсності, тому знаходить застосування як якісна термоізоляційна сировина, але вогнетривкість її низька – усадка починає відбуватися починаючи з 800 °С, але плавлення пізніше – при 1500 °С. У опоках кремнезем існує у вигляді аморфного силікагелю, він сприяє поліпшенню структури глини, робить її монолітною, підвищуючи механічну міцність. Домішки легкоплавких оксидів, які входять до складу опок, сприяють утворенню легкоплавкої евтектики, знижуючи вогнетривкість аморфного кремнезему та позитивно впливають на процес спікання, утворюючи склофазу [5].

При виборі глинистої сировини для виготовлення конкретних керамічних виробів необхідно керуватися комплексною оцінкою фізико-хімічних властивостей всіх компонентів сировинної маси. Необхідно враховувати хімічний, мінералогічний, гранулометричний склади пластичної складової та непластичних домішок, наявність аморфізованого матеріалу, стан упорядкованості структури глиноутворюючих мінералів [6, 7].

Таким чином, застосування в якості модифікатора кремнеземистої опоковмісної породи надає можливість виробляти енергоефективні керамічні матеріали. Тому використання опоки в якості модифікуючої домішки для поліпшення теплофізичних властивостей будівельної кераміки можна вважати доцільним. А зважаючи на розповсюдженість промислових родовищ в Україні, які є у Вінницькій, Дніпропетровській, Хмельницькій, Львівській, Чернівецькій, Чернігівській та Закарпатській областях і економічно вигідним.

Метою роботи є одержання керамічного матеріалу на основі місцевої легкоплавкої глини з використанням як недефіцитної природної добавки опоки, міцність якого відповідатиме сучасним вимогам до будівельної кераміки.

Виклад основного матеріалу

Для вирішення поставлених завдань застосовували сучасні фізико-хімічні методи – рентгенофазовий, диференційно-термічний, хімічні методи дослідження сировинних матеріалів і мас на їх основі, що дало можливість оцінити особливості структуроутворення керамічних матеріалів. Для визначення придатності місцевої легкоплавкої глини для виготовлення керамічних виробів були проведені систематичні дослідження з розробки складів мас, а також основних характеристик виготовленої продукції.

У роботі використовували пластичний спосіб підготовки сировинної суміші та формування зразків. При розробці керамічних мас для виготовлення будівельної кераміки необхідно враховувати чутливість їх до сушіння, зміну лінійних розмірів зразків під час випалу та межу міцності на стиск та вигин. З метою вивчення впливу добавки опоки на технологічні властивості керамічних мас на основі легкоплавкої сировини були досліджені наступні шихти для виробництва будівельної кераміки, склад яких приведений в таблиці 1.

Таблиця 1

Склади досліджуваних мас

| Компоненти | Вміст компонентів в шихтах, мас. % | | | |
|------------|------------------------------------|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Глина | 100 | 95 | 90 | 85 |
| Опока | - | 5 | 10 | 15 |

Керамічні зразки для проведення досліджень готували методом пластичного формування, використовуючи технологічний режим максимально наближений до процесу виготовлення керамічних виробів будівельного призначення. Для цього глину спочатку подрібнювали, а потім перемелювали у вальцях тонкого помелу і бігунах. Подрібнення опоки проводили в кульових млинах, а потім додавали до вихідної глини в кількості 5, 10 та 15 %. Підготовлені компоненти просіювали крізь сито, перемішували і зачиняли водою до нормальної формувальної вологості. Після вилежування протягом доби формували зразки розміром 50×50×50 мм і розміром 60×15×10 мм методом пластичного пресування при вологості 18-22 %. Сушіння проводили в сушильній шафі при 105 °С до постійної маси. Для випалення було обрано інтервал від 950 до 1100 °С. Пов'язано це, перш за все, з тим, що більшість заводів керамічної галузі працює

саме у цих інтервалах температур, що сприятливо впливає на якість готових виробів.

На першому етапі досліджень проводили аналіз хімічного та мінералогічного складу легкоплавкої глини Київської області. Результати хімічного аналізу дослідження легкоплавкої глини наведено у таблиці 2. За результатами хімічного аналізу місцева легкоплавка глина с. Озерне вирізняється високим вмістом SiO_2 69,72%. За вмістом Al_2O_3 згідно ДСТУ Б В.2.7-60-97 її можна віднести до групи кислих глин, так як кількість оксиду алюмінія < 14 %. За кількістю Fe_2O_3 та TiO_2 глина відноситься до сировини з високим вмістом забарвлюючих оксидів. Вона має невисокий вміст карбонатів, а сума лужних оксидів не перевищує 2 %. Також досліджувана сировина має високий вміст вільного кварцу 34-32 %. Сума водорозчинних солей у вихідній сировині складала 0,25 мг-екв/100 г глини, що відносить її до групи з низьким їх вмістом. Досліджувана глина є помірнопластична. Основним глиноутворюючим мінералом є гідрослюда.

Таблиця 2

Хімічний склад глини Київської області (с. Озерне)

| Родовище | Вміст оксидів, % | | | | | | | | | В.п.п |
|--------------|------------------|-------------------------|-------------------------|----------------|------|-----------------------|----------------------|------|---------------|-------|
| | SiO_2 | Al_2O_3 | Fe_2O_3 | TiO_2 | CaO | Na_2O | K_2O | MgO | SO_3 | |
| Озерна глина | 69,72 | 10,83 | 4,75 | 0,57 | 1,70 | 1,23 | 0,24 | 1,21 | - | 9,75 |

За результатами диференціально-термічного аналізу крива нагрівання досліджуваної сировини характеризується термічними ефектами, що відносяться до процесів виділення адсорбційної води (150 °C) і міжпакетної води (220 °C); окиснення двовалентного заліза з утворенням Fe_2O_3 ; видалення структурної води з глинистого мінералу майже до повного руйнування решітки (560 °C); поліморфного перетворення кварцу (580 °C); втрати залишків гідроксильної води (700 °C); дисоціація карбонатів кальцію (820 °C).

Рентгенофазовий аналіз вивчених зразків мінералів проводили на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-2,0 з двома щілинами Соллера, з відфільтрованим $\text{CuK}\alpha$ – випромінюванням з нікелевим фільтром. Результати вказують на наявність в глині кварцу (0,137; 0,145; 0,154; 0,166; 0,181; 0,198; 0,212; 0,223; 0,228; 0,245; 0,334, 0,425 нм), гідрослюда (0,15; 0,256; 0,356; 0,444; 0,493; 1,00 нм), каолініту (0,15; 0,239; 0,256; 0,356; 0,444; 0,714 нм), хлориту (0,15; 0,256; 0,356; 0,470; 1,38 нм), польового шпату (0,284; 0,295; 0,318; 0,370; 0,383; 0,404 нм) та кальциту (0,144; 0,160; 0,162; 0,187; 0,191; 0,209; 0,249; 0,303; 0,386 нм).

Найважливішими властивостями глин є пластичність, поведінка під час сушіння (повітряна усадка) і випалу. Ступінь пластичності залежить від мінералогічного і гранулометричного складу, форми і характеру поверхні зерен, а також від вмісту в них розчинних солей, органічних домішок і кількості зв'язаної води. Дослідженням формувальних властивостей керамічних мас на основі легкоплавкої глини встановили, що при додаванні опоки формувальна вологість знижується. Але це не призводить до погіршення формувальних властивостей мас. Також додавання опоки до досліджуваної глини сприяло зниженню повітряної усадки (рис.1).

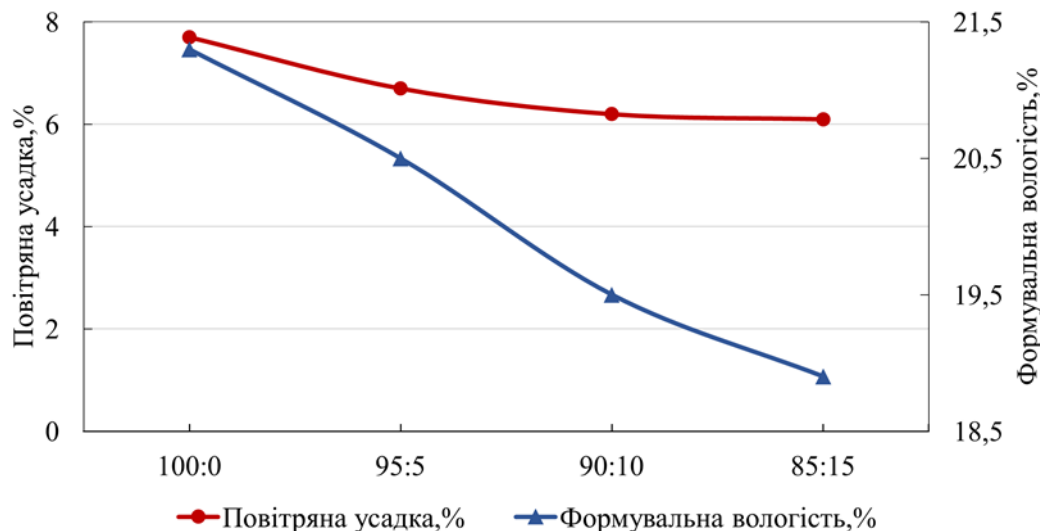


Рис. 1. Залежність повітряної усадки та формувальної вологості досліджуваних мас

При вивченні впливу опоки на пластичність глини встановили, що вона зменшувалась зі збільшенням вмісту в зразках домішки. Для досліджуваної глини вона складала 14,6 %, для зразка зі співвідношенням 95:5 – 13,6; для зразка 90:10 і для зразка 85:15 відповідно 13,0 і 12,8 %. Дослідження чутливості до сушіння легкоплавкої глини становить 65 с, що свідчить про належність її до середньочутливої групи. При додаванні домішки чутливість до сушіння становила 69 с (зразок 95:5), 70 с

(90:10) і 74 с (зразок 85:215).

Серед фізико-механічних властивостей механічна міцність є одним з основних критеріїв придатності сировинних матеріалів для виробництва будівельної кераміки. Проведені дослідження показали, що при збільшенні кількості добавки опоки від 5 до 15 % до легкоплавкої глини, механічна міцність керамічних зразків при стискуванні і вигині збільшується. Також проводили візуальний огляд досліджуваних зразків на наявність тріщини, викривлень, оскільки якість випалення впливає не лише на механічну міцність, а й на водопоглинання і морозостійкість кераміки. Результати визначення межі міцності на стиск та вигин досліджуваних мас представлені на рис. 2 і 3.

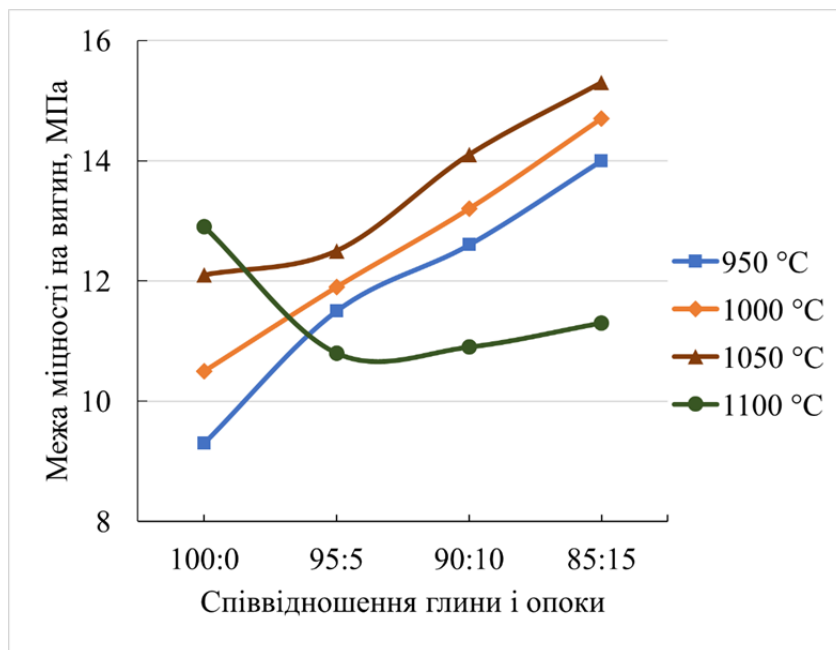


Рис. 2. Залежність межі міцності на вигин досліджуваних мас, випалених при різних температурах

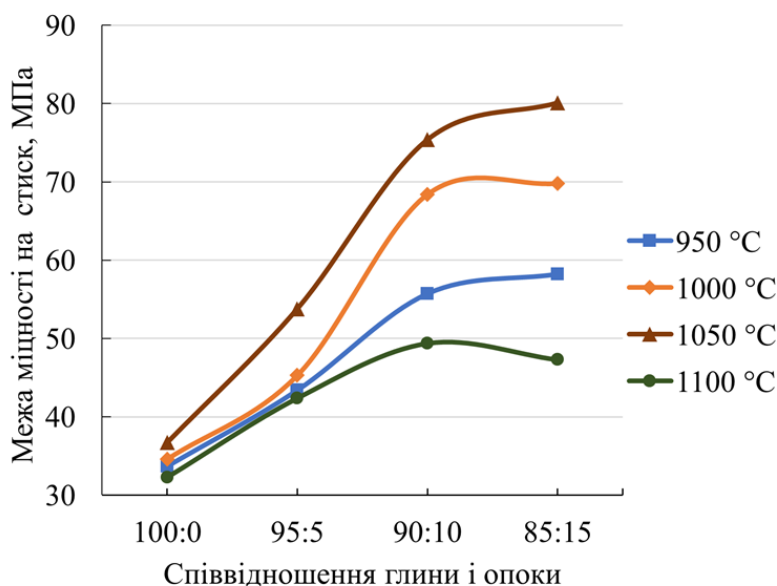


Рис. 3. Залежність межі міцності на стиск досліджуваних мас, випалених при різних температурах

В опоках кремнезем існує у вигляді аморфного силікатного гелю, який сприяє поліпшенню структури легкоплавкої сировини, робить її монолітною та підвищує механічну міцність. Присутність сполук заліза сприяє утворенню легкоплавкої евтектики, знижує вогнетривкість аморфного кремнезему та позитивно впливає на процес спікання, утворюючи склофазу. Спікання кераміки відбувається за участю рідкої фази і супроводжується комплексом фізико-хімічних процесів взаємодії аморфного кремнезему з оксидами, що входять до складу керамічної маси.

Висновки

1. При оцінці придатності сировини для виготовлення конкретного виду будівельних матеріалів необхідно керуватися комплексною оцінкою властивостей легкоплавкої глини серед яких мінералогічний, хімічний склад, вплив домішок на формування структури виробу після випалу з метою отримання необхідних фізико-технічних характеристик.

2. Особливість будови кремнеземистих матеріалів, таких як опока, полягає в наявності активної аморфної кремнекислоти, тонкодисперсної структури та забезпеченні екологічності при використанні як природної сировини, родовища якої знаходяться в багатьох областях України і в комбінації з легкоплавою місцевою глиною дозволяє використовувати її в керамічній технології. Введення домішки опоки до 15 мас.% дозволило забезпечити максимальні показники міцності на стиск та на вигин, а також розширити область використання місцевої сировини для отримання керамічних виробів.

3. Максимальні показники міцності на стиск та вигин для запропонованих рецептур були досягнуті при температурі випалу 1050 °C і характеризуються щільним, міцним керамічним черепком. Інтенсивність забарвлення не залежить від кількості добавки опоки в керамічну масу, а визначається температурою випалення. Забарвлення зразків мінялося з підвищенням температури.

4. Вирішення поставленого завдання дозволить створювати високоякісні будівельні матеріали на основі низькосортних легкоплавких глинистих порід, що забезпечить залучення у виробництво величезних ресурсів місцевої сировини, виключить необхідність завезення аналогічної сировини з віддалених районів та сприятливо позначиться на техніко-економічній стабільності функціонування керамічних підприємств.

Література

1. Manoj Dole. Ceramic Technology Diploma&Engineering MCQ. Objective question answers. India. 2021. 107 p.
2. Шестаков В.Л. Технологія керамічних стінових і лицевальних матеріалів : навчальний посібник. Рівне : УДУВГіП, 2002. 243 с.
3. Osman Şan, Remzi Gören, Cem Özgür (2009). Purification of diatomite powder by acid leaching for use in fabrication of porous ceramics. International Journal of Mineral Processing, 93(1), p. 6-10. URL: <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2009.04.007>
4. Mymrinea V., Ponteb M.J.J.S., Pontec H.A., Kaminaria N.M.S., Pawlowskyd U., Solyond G.J.P. (2013). Oily diatomite and galvanic wastes as raw materials for red ceramics fabrication. Construction and Building Materials, 41, pp. 360-364. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11>.
5. Kae-Long Lin, Jen-Chieh Chang (2013). Feasibility of recycling waste diatomite and fly ash cosintered as porous ceramics. Environmental Progress & Sustainable Energy, 32 (1), pp. 25-34. URL: <https://doi.org/10.1002/ep.10592>
6. Liping Hao, Wenyuan Gao, ShuangYan, Meihong, Niu, Guishan Liu, Hongshun Hao. (2019) Preparation and characterization of porous ceramics with low-grade diatomite and oyster shell. Materials Chemistry and Physics, 235, 121741. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019>.
7. Shijia Li, Chonggao Bao, Haiqiang Ma et.al. (2021). Fabrication and properties of diatomite ceramics with hierarchical pores based on direct stereolithography. Ceramics International, 48(10). DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.11.169

References

1. Manoj Dole. Ceramic Technology Diploma&Engineering MCQ. Objective question answers. India. 2021. 107 p.
2. Shestakov V.L. Technology of ceramic wall and facing materials: Textbook. Rivne: UDUVGiP, 2002. 243 p.
3. Osman Şan, Remzi Gören, Cem Özgür (2009). Purification of diatomite powder by acid leaching for use in fabrication of porous ceramics. International Journal of Mineral Processing, 93(1), p. 6-10. URL: <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2009.04.007>
4. Mymrinea V., Ponteb M.J.J.S., Pontec H.A., Kaminaria N.M.S., Pawlowskyd U., Solyond G.J.P. (2013). Oily diatomite and galvanic wastes as raw materials for red ceramics fabrication. Construction and Building Materials, 41, pp. 360-364. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11>.
5. Kae-Long Lin, Jen-Chieh Chang (2013). Feasibility of recycling waste diatomite and fly ash cosintered as porous ceramics. Environmental Progress & Sustainable Energy, 32 (1), pp. 25-34. URL: <https://doi.org/10.1002/ep.10592>
6. Liping Hao, Wenyuan Gao, ShuangYan, Meihong, Niu, Guishan Liu, Hongshun Hao. (2019) Preparation and characterization of porous ceramics with low-grade diatomite and oyster shell. Materials Chemistry and Physics, 235, 121741. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019>.
7. Shijia Li, Chonggao Bao, Haiqiang Ma et.al. (2021). Fabrication and properties of diatomite ceramics with hierarchical pores based on direct stereolithography. Ceramics International, 48(10). DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.11.169

БАГРІЙ ОЛЕНА

Хмельницький національний університет

ORCID ID: [0000-0003-2267-7162](https://orcid.org/0000-0003-2267-7162)e-mail: bahriio@khmnu.edu.ua

ВИКОРИСТАННЯ СКІНЧЕНО-ЕЛЕМЕНТНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ БОКОВОГО ТИСНЕННЯ МАСИВУ СІПКОГО СЕРЕДОВИЩА НА ПІДПІРНУ СТІНКУ ПРИ ЇЇ ЗМІЩЕННІ

Задача визначення тиснення сипкого середовища на підпирну стінку залежно від її переміщень є важливою задачею будівельної механіки. Існуючі бездеформаційні методи дозволяють знаходити тільки значення тиснень в момент переходу матеріалу в граничний стан. Підпирні ж стінки, як й інші інженерні конструкції, працюють у дограничній стадії. Вказана інженерна задача розглянута для перевірки достовірності розробленої нелінійної моделі. В статті сформульоване математичне представлення крайової задачі, що моделювалась на експериментальному стенді. Розглядається плоска розрахункова область прямокутної форми, що заповнена матеріалом з нелінійними законами деформування. Задача полягає у визначенні напруженого стану області від дії власної ваги матеріалу і горизонтального зміщення стінки. При виборі розрахункової схеми для комп'ютерного розв'язання задачі максимально можливо враховувались умови роботи масиву піску в стендовому експерименті. Проведено порівняння результатів комп'ютерного моделювання задачі та паралельного великомасштабного стендового моделювання взаємодії жорсткої вертикальної стінки з дискретним матеріалом засипки.

Ключові слова: підпирна стінка, сипке середовище, внутрішнє тертя, граничний стан, плоска деформація.

BAHRII OLENA

Khmelnitskyi National University

USING A FINITE ELEMENT MODEL TO DETERMINE LATERAL PRESSURE OF A GRANULAR MEDIUM ON A RETAINING WALL UNDER DISPLACEMENT

The problem of determining the pressure of a granular medium on a retaining wall depending on its displacement is an important problem in structural mechanics. Existing non-deformation methods only allow finding the pressure values at the moment of material transition to a limit state. Retaining walls, like other engineering structures, operate in a limit state. The mentioned engineering problem is considered to verify the accuracy of the developed nonlinear model. The article formulates a mathematical representation of the boundary problem that was modelled on an experimental stand. The environment that contacts the wall operates under conditions close to plane deformation, since there is no displacement in the direction perpendicular to the glass side walls. If neglect the frictional forces on the side walls, the estimation of the stress-strain state of the medium can be reduced to a two-dimensional problem based on deformation. The analysis is focused on a flat rectangular computational domain filled with a material with nonlinear deformation laws. The problem involves determining the stress state of the area under the influence of the material's own weight and the horizontal displacement of the wall.

To obtain a unique solution to the problem, it is necessary to ensure the fulfilment of static equilibrium conditions, geometric conditions of continuity (inseparability) of deformations adopted in the model of physical relationships, as well as to satisfy boundary conditions that correspond to the specific problem-solving scheme. The problem is solved using the finite element method. When choosing the calculation scheme for computer solution of the problem, the conditions of the sand mass operation in the experimental stand are considered as much as possible. The boundary conditions corresponding to the calculation scheme and the structure of the canonical equations of the displacement method of structural mechanics are considered in solving the problem. A comparison of the results of computer modelling of the problem and parallel large-scale modelling of the interaction of a rigid vertical wall with discrete filling material was made.

Keywords: retaining wall, granular medium, internal friction, boundary state, plane deformation

Постановка проблеми

Для деяких задач механіки деформівного твердого тіла достовірність і адекватність чисельних методів вдається довести шляхом порівняння результатів чисельного і аналітичного розв'язків однієї і тієї ж сталонної задачі. Для нелінійних задач механіки дискретних матеріалів аналітичні рішення не одержані. Тому єдиним можливим доказом достовірності і адекватності запропонованої розрахункової моделі імовірно є паралельне комп'ютерне і стендове (фізичне) моделювання однієї і тієї ж задачі.

Метою роботи є порівняння результатів розв'язання задачі з використанням комп'ютерного моделювання та паралельного великомасштабного стендового моделювання взаємодії вертикальної стінки з піском для перевірки достовірності розроблених алгоритмів та математичної моделі.

Виклад основного матеріалу

Стендове моделювання задачі

В сімдесятих роках під керівництвом доцента Лубенова Р.М. в лабораторії портових гідротехнічних споруд Одеського національного морського університету були проведені унікальні експериментальні дослідження, в яких на великомасштабних стендах моделювалась робота жорстких підпирних стін при їх зміщенні в сторону "від засипки". Результати досліджень детально описані в роботах М.М. Варгіна [1, 2]. В цих дослідженнях використовувався кварцовий дрібнозернистий пісок середньої щільності Люберецького родовища, фізико-механічні характеристики якого наведені в [3]. Саме з цим піском проведені лабораторні дослідження [4] на приладі плоскої деформації [5], що дало змогу в порівняльних розрахунках використовувати реальні деформаційні параметри нелінійних залежностей.

Експериментальний великомасштабний стенд (рис. 1, 2) являв собою камеру зі скляними боковими

стінками. Висота камери 1.9 м, ширина 1.51 м, довжина 3.6 м. Підпірну стінку моделював жорсткий вертикальний щит 2.48×1.48 м.

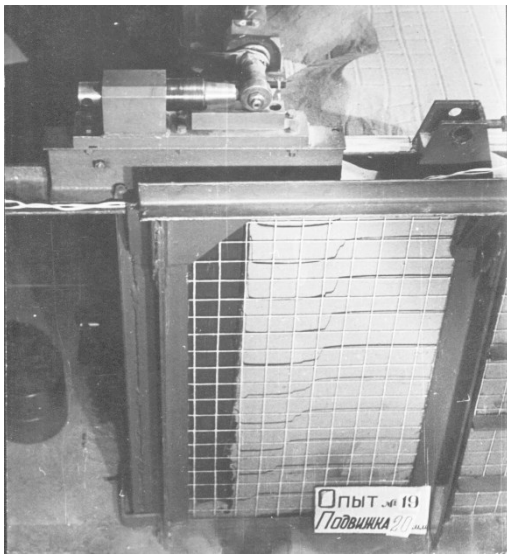


Рис. 1. Загальний вигляд випробувального стенда

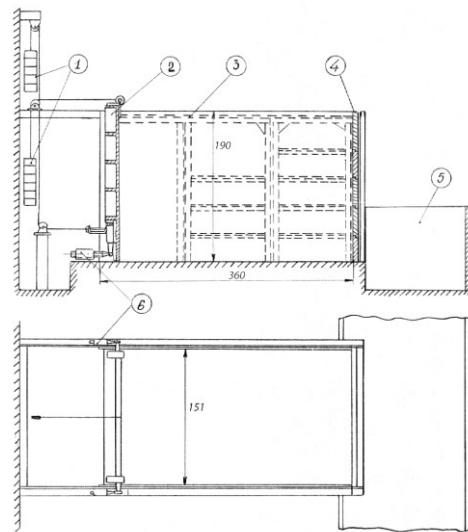


Рис. 2. Схема випробувального стенда

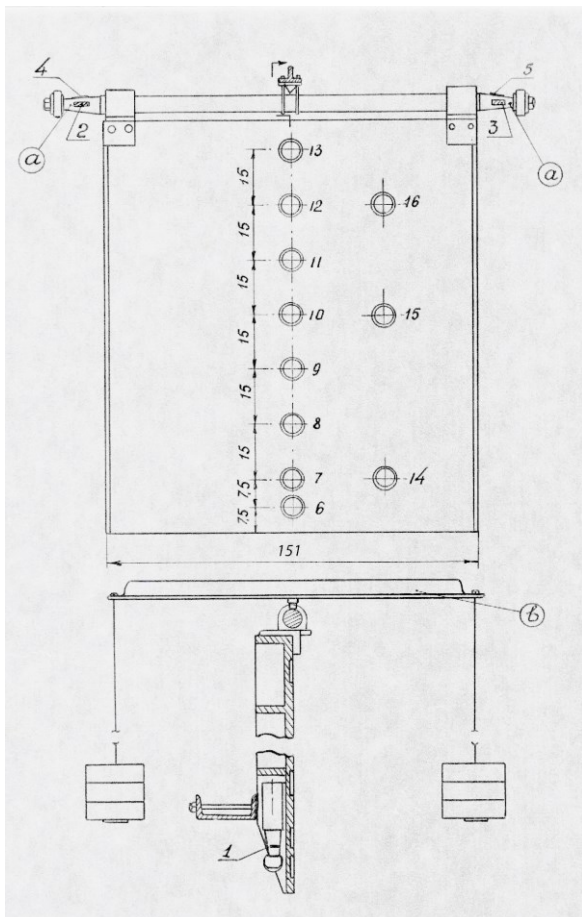


Рис. 3. Розташування тензометричних датчиків

Щит опирався на три гвинтові опори, що сприймали горизонтальні сили тиснення піску, і був підвішений на двох рухомих шарнірних опорах, які сприймали вертикальні складові сил тиснення. За допомогою гвинтових опор стінці можна було надавати фіксовані додаткові горизонтальні переміщення. Тиснення ґрунту на контактну грань стінки замірялось з допомогою встановлених по її висоті через 0.15 м тензометричних дискових датчиків (рис. 3). Сумарні сили тиску піску на стінку фіксувались за допомогою тензорезисторів, наклеєних на його опори. Переміщення контактної грані замірялись індикаторами з точністю 10^{-5} м.

Після завантаження камери піском на повну висоту фіксувалось початкове переміщення стінки, яке відбувалось за рахунок деформації опор. Ці переміщення склали $1.68 \cdot 10^{-4}$ м і не враховувались в комп'ютерному моделюванні. Далі за допомогою гвинтових опор модель підпірної стінки додатково переміщували ступенями в сторону "від засипки". На кожному ступені замірялись переміщення контактної грані стінки, інтенсивність бокового тиснення піску і загальні сили тиску. Конкретні значення цих показників наведені у [1]. Описану процедуру стендового моделювання ретельно відтворено в комп'ютерному моделюванні за допомогою описаного в [6] програмного комплексу.

Математичне формулювання задачі

Описана в інженерна задача щодо визначення тиснення сипкого середовища на підпірну стінку за

умови її зміщення в сторону "від засипки" на фіксовану величину Δ^* в спрощеній формі розглядалась у працях Б. Хансена [7], докторських дисертаціях Ф.М. Шихієва [8] і М.П. Дубровського [9], в багатьох кандидатських дисертаціях. Однак розв'язок коректно сформульованої крайової задачі дотепер не одержано.

Розглянемо постановку задачі, що моделювалась на експериментальному стенді на базі описаної у попередніх розділах моделі.

Середовище, що контактує зі стінкою, працює в умовах близьких до плоскої деформації, оскільки переміщення у перпендикулярному до скляних бокових стінок напрямку відсутні. Якщо знехтувати силами тертя по бокових стінках, то оцінка напружено-деформованого стану середовища може бути зведена до плоскої за деформаціями задачі.

Розглядається плоска розрахункова область прямокутної форми (рис. 4), що заповнена матеріалом з нелінійними законами деформування [10]. Задача полягає у визначенні напруженого стану області від дії власної ваги матеріалу і горизонтального зміщення Δ^* стінки.

Розрахункова область обмежена горизонтальними поверхнями $y=0$ та $y=1.9$ і вертикальними поверхнями $x=0$ та $x=3.6$.

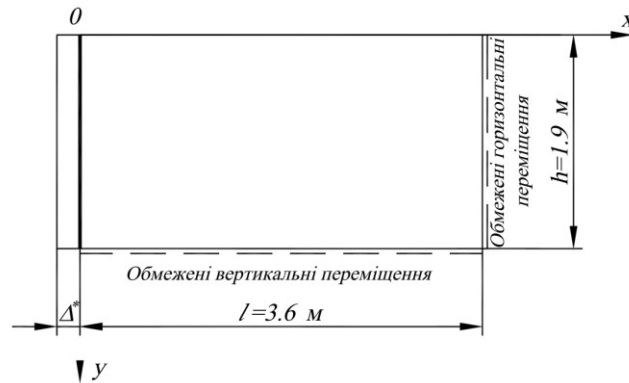


Рис. 4. Схема розрахункової області

Для одержання єдиного рішення задачі необхідно забезпечити виконання статичних умов рівноваги, геометричних умов суцільності (нерозривності) деформацій, прийнятих в моделі фізичних співвідношень, а також задовольнити крайові умови, що відповідають розрахунковій схемі конкретної задачі.

Статичні умови

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0;$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + q = 0,$$

де q – масова сила – питома вага матеріалу засипки;

геометричні лінійні диференціальні співвідношення Коші, що зводяться до умови нерозривності деформацій

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y};$$

нелінійні фізичні співвідношення моделі

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{K_{3M} + 2G_{3M}}{2} \varepsilon_x + \frac{K_{3M} - 2G_{3M}}{2} \varepsilon_y; \\ \sigma_y &= \frac{K_{3M} - 2G_{3M}}{2} \varepsilon_x + \frac{K_{3M} + 2G_{3M}}{2} \varepsilon_y; \\ \tau_{xy} &= G_{3M} \gamma_{xy} \end{aligned} \right\},$$

$$\text{де } G_{3M} = \frac{n}{m + \Gamma} P, \quad K_{3M} = 2G_{3M} \frac{1 + \nu}{1 - \nu}.$$

Крайові умови відображають особливості роботи розрахункової області і формулюються залежно від структури розв'язуючих рівнянь вибраного методу.

Крайові умови задачі, що розглядається, повинні відображати такі особливості деформування розрахункової області (рис. 4):

- горизонтальні переміщення точок контактної грані дорівнюють фіксованій в експерименті величині Δ^* , для точок $(x=0; y[0 \div 1.9])$ $u_x = \Delta^*$;
- горизонтальні переміщення точок тилової нерухомої грані дорівнюють нулю, для точок $(x=3.6; y[0 \div 1.9])$ $u_x = 0$;
- вертикальні переміщення точок на дні стенда дорівнюють нулю, для точок $(x[0 \div 3.6]; y=1.9)$ $u_y = 0$;
- переміщення точок вільної поверхні $(x[0 \div 3.6]; y=0)$ не обмежуються.

Розв'язання задачі ведеться методом скінчених елементів [10], можливість використання якого для випадку середовища, що не сприймає розтягуючих напружень, обґрунтована у монографії О. Зенкевича [11, с. 415], а задання крайових умов у дискретній формі [11, с. 414].

Комп'ютерне моделювання задачі

При виборі розрахункової схеми для комп'ютерного розв'язання задачі максимально можливо враховувались умови роботи масиву піску в стендовому експерименті.

Вважалось, що масив працює в умовах плоскої деформації, оскільки по бокових гранях він обмежений скляними стінками, які забезпечують неможливість деформування в поперечному напрямі, силами тертя по усіх обмежуючих поверхнях нехтується.

Скінчено-елементна (дискретна) модель розрахункової області показана на рис. 5. Дискретну модель складають 360 елементів у формі трикутних призм і 209 вузлів.

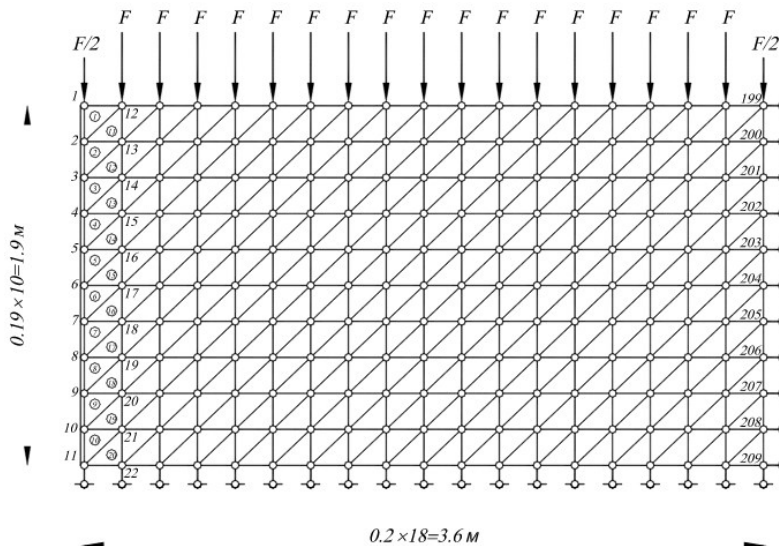


Рис. 5. Скінчено-елементна модель розрахункової області

Вузли 1 ÷ 11 ($x = 0; y[0 ÷ 1.9]$) лежать на контактній грані стінки, якій в експерименті надають фіксовані горизонтальні переміщення Δ^* . Вузли 199 ÷ 209 ($x = 3.6; y[0 ÷ 1.9]$) співпадають з нерухомою тиловою гранню масиву, вузли ($x[0 ÷ 3.6]; y = 1.9$) співпадають з нижньою гранню масиву (з дном лотка).

Неможливість горизонтальних переміщень вузлів 199 ÷ 209 на тильовій грані і вертикальних переміщень вузлів на нижній грані врахована показаними на розрахунковій схемі зовнішніми в'язями.

При розв'язанні задачі враховані крайові умови, що відповідають розрахунковій схемі і структурі канонічних рівнянь методу переміщень будівельної механіки [10].

Кінематичні крайові умови задаються як рівність нулю вузлових переміщень по напрямку введених на межі області зовнішніх в'язів:

- для вузлів з координатами ($x = 3.6; y[0 ÷ 1.9]$) горизонтальне переміщення $\delta_x = 0$;
- для вузлів з координатами ($x[0 ÷ 3.6]; y = 1.9$) вертикальне переміщення $\delta_y = 0$.

Кінематичне навантаження області розглядається як відомі з експерименту переміщення δ_x^* контактних вузлів.

Для вузлів з координатами ($x = 0; y[0 ÷ 1.9]$) переміщення $\delta_x = \Delta^*$.

Вектор вузлових переміщень $\{\delta\}$, що включає відомі з крайових умов компоненти, трансформується за допомогою підпрограми DIS [12] у вектор вузлових сил, який входить в систему канонічних рівнянь методу переміщень.

Силі крайові умови зводяться до задання відомих величин вузлових сил як компонентів вектора $\{R\}$ зовнішнього навантаження. В задачі, що розглядається, зовнішнім навантаженням є тільки власна вага. Розподілена по об'єму елемента власна вага приводиться до вузлових сил (на розрахунковій схемі не показані), які за допомогою підпрограми SILA [12] автоматично враховуються як компоненти заданого вектора $\{R\}$.

В розрахунках приймалися фізико-механічні характеристики кварцового піску середньої щільності, який використовувався у стендовому експерименті: коефіцієнт пористості $e = 0.72$, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.39$, об'ємна маса $\rho = 1565 \text{ кг/м}^3$, деформаційні параметри нелінійних залежностей моделі

$n = 0.4115$, $m = 0.02817$, величина відносного початкового модуля зсуву $G_0 = \frac{n}{m} = 14.6$. Кут внутрішнього тертя $\varphi = 40^\circ 10'$.

Розрахунки проведені для трьох випадків, що відповідають різним переміщенням контактної грані: $\Delta_1 = 0.168$ мм, $\Delta_2 = 0.328$ мм, $\Delta_3 = 1.028$ мм.

Кінцевим результатом розрахунків є значення напружень у кожному скінченному елементі.

Порівняння результатів стендового та комп'ютерного моделювання

Для порівняння напружень в контактних елементах з показниками датчиків, розрахункові напруження приводились до місць установки контактних датчиків.

На рис. 6 показані експериментальні і розрахункові епюри для трьох переміщень стінки $\Delta = 0.168$ мм, $\Delta = 0.328$ мм, $\Delta = 1.028$ мм, а також епюри тиснень на нерухому стінку ($\Delta = 0$) і епюри, що відповідають граничному тисненню за Кулоном.

Експериментальні епюри контактних тиснень [1] завжди мали зубчастий пилкоподібний вигляд, а розрахункові епюри, описувались монотонними кривими.

Як видно з рисунку, і експериментальна, і розрахункова епюри лежать між граничною епюрою і епюрою тиснення на нерухому стінку. Характер експериментальних і розрахункових епюр (випуклість "в сторону засипки") однаковий. Ординати розрахункових епюр завжди перевищують ординати експериментальних. В окремих перерізах різниця досягає 28%. Це пояснюється тим, що в комп'ютерному розрахунку нехтувалось силами тертя, які діють по поверхнях обмеження масиву, а також використанням у стендовому моделюванні датчиків мембранного типу, для яких властивий прояв аркового ефекту (зменшення сили тиску на датчик за рахунок утворення арки з частинок матеріалу при прогині мембрани).

Загальну силу тиску піску на стінку можна визначити як добуток площі епюр контактних тисків на ширину камери. Розходження між розрахунковим значенням сили і зафіксованим датчиками на опорах штампа не перевищувало 12%.

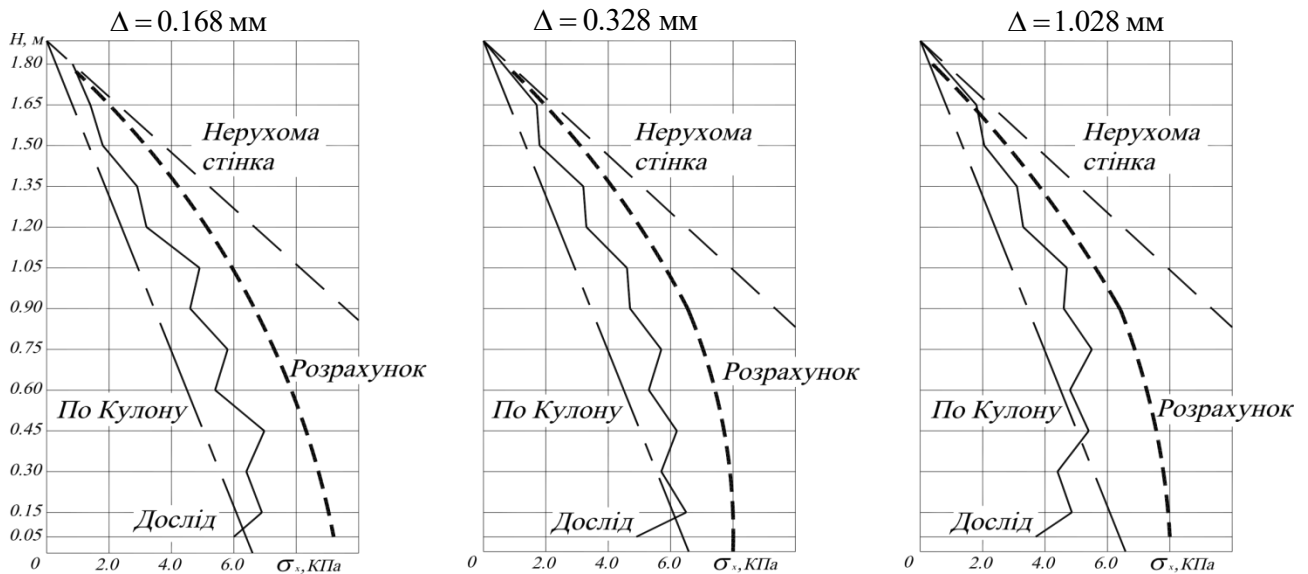


Рис. 6. Експериментальні і розрахункові епюри

Якщо врахувати складність задачі і можливі похибки експерименту, такі розходження можна вважати задовільними.

Висновки

Розглянуто приклад розв'язання інженерної задачі: визначення бокового тиснення масиву піску на підпірну стінку з урахуванням переміщення її контактної грані. Проведено порівняння результатів комп'ютерного моделювання задачі та паралельного великомасштабного стендового моделювання взаємодії жорсткої вертикальної стінки з дискретним матеріалом засипки. Порівняння результатів показало їх достатню збіжність: розходження ординат епюр бокових тиснень складає 28%, розходження між розрахунковими і експериментальними силами тиску близько 12%.

Література

1. Варгин М. Н. Исследование зависимости давления грунта от смещений подпорной стенки / М. Н. Варгин // Гидротехническое строительство. – 1968. – № 12. – С. 11–14.
2. Варгин М. Н. Исследование взаимодействия грунтовой засыпки и причальных сооружений типа жестких стен в условиях водной среды : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.473 "Морские и речные порты" / М. Н. Варгин. – Одесса, 1971. – 19 с.

3. Багрій О. В. Вплив внутрішнього кулонового тертя на деформування композитних матеріалів з малою зв'язністю / О. В. Багрій // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2013. – № 4. – С. 114–120.
4. Багрій О. В. Аналіз впливу внутрішнього кулонового тертя на деформування композитних матеріалів / О. В. Багрій // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2014. – № 4. – С. 37–43.
5. Багрій О. В. Обладнання та методика лабораторних випробувань зразків дискретних матеріалів в умовах плоскої деформації / О. В. Багрій, В. В. Ковтун // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2013. – № 2. – С. 31–39.
6. Багрій О. В. Програмна реалізація ітераційних алгоритмів для розв'язання плоскої фізично нелінійної задачі / О. В. Багрій // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2022. – № 5. – С. 108–112.
7. Hansen B. Line ruptures regarded as a narrow rupture zones. Basic equations based on kinematic considerations. Proc. Conf. Earth Pres. Probl. 1958. № 1, P. 124–126.
8. Шихиев Ф. М. Кинематическая теория давления грунтов на причальные сооружения и другие типы жестких и гибких ограждений : дис. ... доктора техн. наук : 05.22.18 / Шихиев Фуад Мувсумович. – Одесса : ОИИМФ, 1964. – 471 с.
9. Дубровский М. П. Кинематика взаимодействия портовых гидротехнических сооружений с грунтовой средой : дис. ... доктора техн. наук : 05.22.18 / Дубровский Михаил Павлович. – Одесса : ОГУ, 1994. – 310 с.
10. Bagrii O. V. Plane problem of discrete environment mechanics. Problems of Tribology. 2022. № 2. P. 104–111.
11. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / Зенкевич О. – М. : Мир, 1975. – 541 с.
12. Ковтун В. В. Программный комплекс для решения задач нелинейной механики грунтов с помощью ЭВМ / В. В. Ковтун // Современные проблемы нелинейной механики грунтов. – Челябинск, 1985. – С. 136–137.

References

1. Vargin M. N. Issledovanie zavisimosti davlenija grunta ot smeshhenij podpornoj stenki / M. N. Vargin // Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo. – 1968. – № 12. – S. 11–14.
2. Vargin M. N. Issledovanie vzaimodejstvija gruntovoj zasypki i prichal'nyh sooruzhenij tipa zhestkih sten v uslovijah vodnoj sredy : avtoref. dis. na zdobuttja nauk. stupenja kand. tehn. nauk : spec. 05.473 "Morskie i rechnye porty" / M. N. Vargin. – Odessa, 1971. – 19 s.
3. Bahrii O. V. Vplyv vnutrishnoho kulonovoho tertia na deformuvannia kompozytnykh materialiv z maloju zviaznistiu / O. V. Bahrii // Problemy trybolohii (Problems of Tribology). – 2013. – № 4. – S. 114–120.
4. Bahrii O. V. Analiz vplyvu vnutrishnoho kulonovoho tertia na deformuvannia kompozytnykh materialiv / O. V. Bahrii // Problemy trybolohii (Problems of Tribology). – 2014. – № 4. – S. 37–43.
5. Bahrii O. V. Obladnannia ta metodyka laboratornykh vyprobuvan zrazkiv dyskretnykh materialiv v umovakh ploskoi deformatsii / O. V. Bahrii, V. V. Kovtun // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2013. – № 2. – S. 31–39.
6. Bahrii O. V. Prohramna realizatsiia iteratsiinykh alhorytmiv dlia rozv'iazannia ploskoi fizychno neliniinoi zadachi / O. V. Bahrii // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2022. – № 5. – S. 108–112.
7. Hansen B. Line ruptures regarded as a narrow rupture zones. Basic equations based on kinematic considerations. Proc. Conf. Earth Pres. Probl. 1958. № 1, P. 124–126.
8. Shihiev F. M. Kinematischekaja teorija davlenija gruntov na prichal'nye sooruzhenija i drugie typy zhestkih i gibkih ograzhdenij : dis. ... doktora tehn. nauk : 05.22.18 / Shihiev Fuad Muvsumovich. – Odessa : OIIMF, 1964. – 471 s.
9. Dubrovskij M. P. Kinematika vzaimodejstvija portovyh gidrotehnicheskikh sooruzhenij s gruntovoj sredoj : dis. ... doktora tehn. nauk : 05.22.18 / Dubrovskij Mihail Pavlovich. – Odessa : OGU, 1994. – 310 s.
10. Bagrii O. V. Plane problem of discrete environment mechanics. Problems of Tribology. 2022. № 2. R. 104–111.
11. Zenkevich O. Metod konechnykh jelementov v tehnikе / Zenkevich O. – М. : Mir, 1975. – 541 s.
12. Kovtun V. V. Programmnyj kompleks dlja reshenija zadach nelinejnoj mehaniki gruntov s pomoshh'ju JeVM / V. V. Kovtun // Sovremennye problemy nelinejnoj mehaniki gruntov. – Cheljabinsk, 1985. – S. 136–137.

БОБРОВНИКОВА КІРАХмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0002-1046-893X>
e-mail: bobrovnikova.kira@gmail.com**ГУРМАН ІВАН**Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0002-2282-3484>
e-mail: devastator167384@gmail.com**ПОПОВ ЮРІЙ**Хмельницький національний університет
e-mail: f.society98@gmail.com**БОЙЧУК ЯРОСЛАВ**Хмельницький національний університет
e-mail: Boichuk.yaroslav@gmail.com**КАЧУР ВОЛОДИМИР**Хмельницький національний університет
e-mail: crevanskiyshpek@gmail.com

ВИЯВЛЕННЯ КІБЕРАТАК В ІНФРАСТРУКТУРІ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ НА ОСНОВІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Зростаючий попит на пристрої Інтернету речей призводить до прискорення темпів їх виробництва. Прагнучи прискорити випуск нового пристрою на ринок та зменшити його собівартість, виробники дуже часто нехтують дотриманням вимог кібербезпеки стосовно цих пристроїв. Відсутність оновлень безпеки та прозорості щодо стану безпеки пристроїв Інтернету речей, а також небезпечне розгортання в мережі перетворює пристрої Інтернету речей на об'єкт атак кіберзлочинців. Щоквартальні звіти компаній, пов'язаних з забезпеченням кібербезпеки, свідчать про низький рівень безпеки інфраструктури Інтернету речей. Враховуючи широке використання пристроїв Інтернету речей не лише в приватному секторі, а й на об'єктах різного призначення, включаючи об'єкти критичної інфраструктури, безпека цих пристроїв та інфраструктури Інтернету речей набуває важливого значення.

На сьогоднішній день відомо багато різних методів виявлення кібератак на інфраструктуру Інтернету речей. Перевагами застосування методів машинного навчання в порівнянні з сигнатурним аналізом є вища точність виявлення та менша кількість хибних спрацювань, можливість виявлення аномалій та нових ознак атак. Проте ці методи мають і певні недоліки. Серед них необхідність в додаткових апаратних ресурсах та більш низька швидкість обробки даних. В роботі представлено огляд сучасних методів, спрямованих на виявлення кібератак та аномалій в мережах Інтернету речей із застосуванням методів машинного навчання. Основними недоліками відомих методів є неспроможність виявлення та адаптивного реагування на атаки нульового дня та мультивекторні атаки. Останній недолік є найбільш критичним, про що свідчить постійне зростання кількості кібератак на інфраструктуру Інтернету речей. Загальним обмеженням для більшості відомих підходів є потреба в значних обсягах обчислювальних ресурсів та значний час відгуку систем виявлення кібератак.

Ключові слова: Інтернет речей (IoT), машинне навчання, виявлення аномалій, виявлення атак, виявлення вторгнень.

HURMAN IVAN, BOBROVNIKOVA KIRA, POPOV YURY, BOYCHUK YAROSLAV, KACHUR VOLODYMYR
Khmelnyskyi National University

MACHINE LEARNING BASED METHODS FOR CYBERATAACS DETECTION IN THE INTERNET OF THINGS INFRASTRUCTURE

The growing demand for IoT devices is accelerating the pace of their production. In an effort to accelerate the launch of a new device and reduce its cost, manufacturers often neglect to comply with cybersecurity requirements for these devices. The lack of security updates and transparency regarding the security status of IoT devices, as well as unsafe deployment on the Internet, makes IoT devices the target of cybercrime attacks. Quarterly reports from cybersecurity companies show a low level of security of the Internet of Things infrastructure. Considering the widespread use of IoT devices not only in the private sector but also in objects for various purposes, including critical infrastructure objects, the security of these devices and the IoT infrastructure becomes more important.

Nowadays, there are many different methods of detecting cyberattacks on the Internet of Things infrastructure. Advantages of applying the machine-based methods in comparison with signature analysis are the higher detection accuracy and fewer false positive, the possibility of detecting both anomalies and new features of attacks. However, these methods also have certain disadvantages. Among them there is the need for additional hardware resources and lower data processing speeds. The paper presents an overview of modern methods aimed at detecting cyberattacks and anomalies in the Internet of Things using machine learning methods. The main disadvantages of the known methods are the inability to detect and adaptively respond to zero-day attacks and multi-vector attacks. The latter shortcoming is the most critical, as evidenced by the constantly increasing number of cyber attacks on the Internet of Things infrastructure. A common limitation for most known approaches is the need for significant computing resources and the significant response time of cyberattack detection systems.

Keywords: Internet of Things (IoT), machine learning, anomaly detection, attacks detection, intrusions detection.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сьогодні Інтернет речей (IoT) є невід'ємною частиною сучасного суспільства. IoT інфраструктура

стає невід'ємною складовою інфраструктури сучасних мегаполісів. Віртуальна інфраструктура повсюдно контролює фізичні об'єкти різного призначення, включаючи об'єкти критичної інфраструктури: від приватних помешкань та об'єктів різного призначення, включаючи виробництва, до транспортних магістралей, дамб та електростанцій.

На сьогоднішній день Інтернет речей являє собою слабко пов'язані між собою розрізнені мережі фізичних об'єктів, кожна з яких розгорнута для розв'язку специфічних задач. Фізичні об'єкти Інтернету речей містять вбудовані технології, що дозволяють здійснювати взаємодію з зовнішнім середовищем, передавати дані про свій стан та приймати дані ззовні. Таким чином, інфраструктура Інтернету речей складається з мережі передачі даних між множиною фізичних пристроїв, які оснащені вбудованими засобами та технологіями для взаємодії в автоматичному режимі між собою та/або з зовнішнім середовищем (такими як давачі та виконавчі механізми), а також програмним забезпеченням. Для підключення пристроїв Інтернету речей можуть бути використані як провідні, так і безпроводні технології, що надає можливість передачі і обміну даними між зовнішнім середовищем і іншими пристроями Інтернету речей за допомогою використання стандартних протоколів зв'язку.

Зростаючий попит на різноманітні пристрої Інтернету речей для автоматизації житлових приміщень, інфраструктури розумних міст, медицини та сільського господарства призводить до прискорення темпів їх виробництва. Ці пристрої забезпечують нові послуги та уможливають автономну підтримку функціонування та комунікацій в різних галузях.

Прагнучи якнайшвидше випустити новий пристрій на ринок та зменшити його собівартість, виробники дуже часто розробляють ці пристрої без урахування останніх вимог кібербезпеки, спрощують або взагалі не впроваджують жодних функцій безпеки та захисту. Іншими критичними факторами є відсутність оновлень безпеки для пристроїв Інтернету речей, відсутність прозорості щодо стану їх безпеки, а також небезпечне розгортання з можливістю безпосереднього доступу до пристроїв Інтернету речей через Інтернет. Все це перетворює пристрої Інтернету речей на найслабшу ланку, що відкриває можливості для зловмисників та компрометації захищеної інфраструктури мереж. Це, в свою чергу, призводить до здійснення кібератак навіть на ті сфери, які раніше не представляли ризиків для кібербезпеки [1, 2]. Крім того, набувають поширення розумні пристрої Інтернету речей, які регулярно збирають та використовують конфіденційну інформацію про своїх власників, що також робить їх бажаною цільлю для кіберзлочинців.

Вразливими ланками в інфраструктурі Інтернету речей можуть бути як пристрої Інтернету речей, які зазвичай є основним засобом ініціювання атак, так і канали, що з'єднують компоненти інфраструктури Інтернету речей між собою [3]. Вразливими для кібератак можуть бути незахищені за замовчуванням налаштування пристроїв Інтернету речей та застарілі компоненти, неправильне конфігурування цих пристроїв, а також протоколи, що використовуються в інфраструктурі Інтернету речей [4]. Вразливості веб-додатків та програмного забезпечення пристроїв Інтернету речей можуть надати кіберзлочинцям можливість компрометації систем для надсилання зловмисних оновлень або викрадення облікових даних користувача.

В багатьох мережах Інтернету речей вже є скомпрометовані або вразливі до зловмисників пристрої Інтернету речей, на які можуть бути спрямовані різноманітні кібератаки, або які самі можуть стати джерелом кібератак на інші пристрої в мережі Інтернет. При цьому кібератаки на інфраструктуру Інтернету речей можуть бути спрямовані як на конфіденційність, так і на доступність або продуктивність мережі Інтернету речей. Таким чином, будь-який побутовий розумний пристрій, наприклад кавомашина, може бути скомпрометований і використаний в якості джерела кібератак, що дозволить кіберзлочинцям впливати на критично важливі системи мережі за рахунок моніторингу систем Інтернету речей та збору даних в скомпрометованій мережі [1].

Сотні тисяч окремих незахищених пристроїв Інтернету речей, кожен з яких має невелику обчислювальну потужність, можуть бути інфіковані зловмисним програмним забезпеченням та об'єднані злочинцями в єдину зловмисну мережу. Постійне підключення до мережі Інтернет та низький рівень або повна відсутність функцій безпеки перетворюють незахищені пристрої Інтернету речей на зручний інструмент для організації потужних кібератак. Мережі інфікованих пристроїв найчастіше використовуються для організації потужних DDoS-атак або в якості вузлів виходу VPN. При цьому обсяг DDoS-трафіку, генерований мережею інфікованих пристроїв Інтернету речей, зазвичай набагато потужніший, ніж обсяг трафіку зловмисних мереж, сформованих з персональних комп'ютерів [5, 6].

Іншим способом використання інфікованих пристроїв Інтернету речей є криптомайнінг. Обмежена ємність батарей на смартфонах не дозволяє використовувати такі інфіковані пристрої для монетизації, тому з цією метою найчастіше використовуються інфіковані смарт-телевізори, приставки тощо. При цьому будь-які розумні пристрої Інтернету речей, підключені до мережі Інтернет, наприклад такі як лічильники води, електрики і газу, потенційно можуть бути об'єктами інтересу кіберзлочинців. Мотивація кіберзлочинців для здійснення атак може бути різною: розваги, викрадення конфіденційної інформації або інформації, що є комерційною таємницею, помста, вимагання або шантаж з метою отримання фінансової вигоди, або навіть терористичні акти з політичною або іншою метою.

Згідно з прогнозами Groupe Speciale Mobile Association [7], кількість використовуваних у всьому світі пристроїв Інтернету речей до 2025 р. досягне майже 25 мільярдів (що вдвічі перевищує кількість підключених пристроїв на сьогоднішній день). Це призведе до зростання ризику кібератак, спрямованих на

ці пристрої. Важливою проблемою на сьогоднішній день також є неможливість встановлення будь-яких захисних або моніторингових рішень на пристрої Інтернету речей, що ускладнює попередження зловмисної активності в інфраструктурі Інтернету речей. Враховуючи стрімку інтеграцію мережі Інтернет через платформу Інтернета речей в різні сфери людської діяльності, включаючи об'єкти критичної інфраструктури, захист інфраструктури Інтернету речей від кібератак набуває важливого значення.

Метою роботи є огляд сучасних методів, спрямованих на виявлення кібератак та аномалій в мережах Інтернету речей із застосуванням методів машинного навчання

Методи на основі машинного навчання для виявлення кібератак в інфраструктурі Інтернету речей

На сьогоднішній день відомо багато підходів, спрямованих на виявлення кібератак в інфраструктурі Інтернету речей, і одним з перспективних напрямків є методи на основі машинного навчання (табл. 1).

Запропонований в роботі [8] метод використовує хмарні технології та парадигму програмно-визначених мереж (SDN) для виявлення та пом'якшення DDoS-атак в бездротових мережах Інтернету речей (табл. 1). В цьому підході використано дворівневу децентралізовану SDN. Кожен домен підмережі містить локальний контролер, при чому в хмарному середовищі розташовано універсальний контролер, підключений до локальних контролерів. Весь трафік мережі контролюється локальними контролерами, які збирають трафік і витягують з нього множину ознак, що можуть вказувати на наявність DDoS-атак. З цією метою було використано 155 ознак, вилучених за допомогою функції switched port analyzer (SPAN) комутатора Cisco Nexus, наприклад: `frame.interface_id`, `frame.time_epoch`, `frame.len`, `radiotap.pad`, `radiotap.length`, `wlan.fc.frag`, `wlan.duration`, `wlan.frag`, `data.len`. Вилучені з трафіку ознаки слугують для модуля виявлення DDoS, який працює на всіх локальних контролерах. Модуль пом'якшення DDoS-атак також розгорнутий у локальних контролерах. З метою пом'якшення DDoS-атак запропоновано окремі стратегії для рухомих та нерухомих пристроїв бездротового Інтернету речей.

З метою виявлення DDoS-атак використано часткове навчання та машину екстремального навчання, *extreme learning machine*, ELM – нейронну мережу прямого поширення. Особливістю функціонування машин екстремального навчання є вибір початкових параметрів випадковим чином і включення простих матричних операцій, що надає можливість скоротити час навчання. Таким чином, машини екстремального навчання можуть бути використані в режимі реального часу, оскільки будь-яке перенавчання буде досить швидким і не порушить роботу додатків.

В роботі [10] представлено систему виявлення вторгнень в інфраструктуру Інтернету речей на основі глибокого навчання (DL-IDS). Згідно запропонованого підходу, трафік середовища Інтернету речей піддається попередній обробці для усунення невизначеностей та нормалізації набору даних, що полягає в усуненні надмірності та замінах відсутніх значень. З цією метою здійснюється вимірювання подібності даних у наборі даних з використанням відстані Мінковського для обчислення відстані між кожною парою даних, після чого повторювані та надлишкові дані видаляються з набору даних і передаються на наступний етап попередньої обробки. На наступному етапі відсутні значення атрибутів у даних замінюються обчисленими значеннями найближчого сусіда, щоб уникнути зміщення результату класифікації в бік більш частих записів. З цією метою визначаються K найближчих сусідів за Евклідовою відстанню, і відсутнє значення замінюється середнім значенням для одержаних даних.

З метою вибору найбільш важливих ознак трафіку, які можуть свідчити про факт вторгнення в середовище Інтернету речей, використано алгоритм оптимізації *spider monkey* (SMO). З метою виявлення вторгнень застосовано *stacked-deep polynomial network* (SDPN), що надає можливість класифікувати вхідні дані як нормальні або аномальні. Аномальні дані можуть вказувати на факт вторгнення, такий як атака на відмову в обслуговуванні (DoS), атака *user-to-root* (U2R), атаку *probe*, атака *remote-to-local* (R2L).

В [11] проведено комплексне дослідження ефективності та перспектив використання класифікаторів, заснованих на машинному навчанні, для систем виявлення вторгнень на основі аномалій (IDS) в інфраструктурі Інтернету речей. В якості основної атаки для аналізу було обрано найбільш поширений та небезпечний тип атаки – атаку на відмову в обслуговуванні (DoS). Було проаналізовано ефективність застосування як ансамблів класифікаторів, так і одиночних класифікаторів (табл. 1). З цієї метою було використано популярні набори даних (табл. 1).

Продуктивність усіх класифікаторів було виміряно з точки зору точності, специфічності, чутливості, частоти помилок спрацьовувань та площі під кривою робочої характеристики приймача. Для статистичного аналізу значущих відмінностей між досліджуваними класифікаторами використано тести Фрідмана і Немен'ї. Крім того, проаналізовано час відгуку класифікаторів на спеціальному обладнанні IoT та обговорено методологію вибору найкращого класифікатора відповідно до вимог системи виявлення вторгнень. На основі одержаних результатів продуктивності та статистичних тестів було зроблено висновок, що такі класифікатори як дерева класифікації та регресії (*classification trees*, *regression trees*), а також *extreme gradient boosting* показують найкращий компроміс між проаналізованими показниками ефективності класифікації та часом відгуку, тому є прийнятним вибором для створення IDS для середовища IoT на основі аномалій (табл. 1).

В роботі [14] запропоновано фреймворк для виявлення трафіку атак в мережах Інтернету речей. Метод включає чотири кроки: (1) новий підхід *CorrAUC* до вибору ознак, що несуть достатню для виявлення трафіка атак інформацію; (2) на основі *CorrAUC* розроблено новий алгоритм *CorrAUC* вибору ознак, який базується на техніці обгортки для точної фільтрації найбільш ефективних ознак для вибраного алгоритму машинного навчання та складається з оцінки атрибутів кореляції (*Correlation Attribute Evaluation*,

CAE) і поєднується з метрикою Area Under Roc Curve (AUC); (3) застосування інтегрованих методу мультикритеріального аналізу рішень TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution, multi-criteria decision analysis method) та Shannon Entropy; (4) створення бієктивного м'якого набору для перевірки вибраних ознак для ідентифікації трафіку атак у мережі IoT. Ефективність запропонованого підходу була оцінена за допомогою чотирьох алгоритмів машинного навчання (табл. 1). Аналіз експериментальних результатів показав, що запропонований метод може досягати в середньому більше 96% ефективності для різних алгоритмів машинного навчання (табл. 1).

У [16] запропоновано систему AD-IoT для виявлення кібератак на вузли туманних обчислень в інфраструктурі розумного міста, засновану на алгоритмі машинного навчання Random Forest. Запропоноване рішення може ефективно виявляти скомпрометовані пристрої IoT у розподілених туманних вузлах. Згідно цього підходу, з метою визначення нормальної та аномальної поведінки здійснюється моніторинг мережного трафіку, який проходить через кожен туманний вузол. Після виявлення атак на рівні туману система повинна повідомити хмарні служби безпеки про аналіз та оновлення системи. Результати проведених експериментів показали, що AD-IoT надає можливість досягти прийнятних результатів для виявлення атак (табл. 1).

В [17] представлено фреймворк для виявлення та захисту від аномальної активності в бездротових сенсорних мережах IoT (Wireless sensor networks, WSN). Зазначено, що на формування бот-мереж впливають специфічні для інфраструктури IoT особливості, такі як недостатня обчислювальна потужність, обмеження живлення та висока щільність вузлів IoT. Було проаналізовано два типи найбільш поширених атак на пристрої Інтернету речей. Перший тип – атаки Bashlite, спрямовані на фреймворки Linux, за яких здійснюється передача даних через відкритий telnet. Другий тип – атаки Mirai, спрямовані на знаходження слабких місць в гаджетах IoT, які можуть бути атаковані через їх IP- та Mac-адреси, після чого на зламані пристрої завантажуються зловмисне програмне забезпечення. Запропоновано систему для виявлення та захисту від аномальної активності. В якості даних для аналізу цих двох типів атак було використано три стандартні набори доброякісних (нормальних) даних і (аномальних чи шкідливих) даних, зібраних з трьох пристроїв IoT (табл. 1). Дані, які використовуються для аналізу, розглядаються як великі дані. Таким чином, при обробці цих даних виникають наступні проблеми: великий обсяг даних, їх різноманітність та неструктурованість, нестача даних та необхідність високопродуктивної обробки. Тому при попередній обробці таких даних виключаються повторювані дані, після чого обчислюються мінімальне, максимальне, середнє та стандартне відхилення значень кожного атрибута. Після масштабування даних було одержано ознаки в діапазоні від 0 до 1. З метою оцінки кореляції ознак та рівня їх залежності було використано коефіцієнт Пірсона. Для аналізу одержаного набору даних було використано програмне забезпечення WEKA, а в якості методів машинного навчання було застосовано чотири класифікатори (табл. 1). Експериментальні результати показали, що поєднання алгоритмів Random Forest і Decision Tree може забезпечити достатньо високий рівень точності виявлення аномалій та атак на пристрої Інтернету речей.

В роботі [19] було проаналізовано трафік бот-мереж в середовищі IoT з використанням трьох класифікаторів машинного навчання (табл. 1). Було класифіковано дані для кожної атаки в кожній бот-мережі для дев'яти пристроїв. Для кожного класифікатора було обчислено такі показники як Accuracy, True Positive, False Positive, False Negative, True Negative, Precision, Recall, F1-score. За результатами експериментальних досліджень зазначено, що хоча було досягнуто високої точності виявлення (близько 99%), загалом застосування в якості класифікатора Random Forest дає найкращі результати, а застосування Support Vector Machine – найнижчі. Проте одержані високі показники F1-score демонструють надійність всіх трьох класифікаторів. Недоліком підходу є те, що для аналізу було використано всі наявні ознаки в наборах даних.

В роботі [20] проведено дослідження дванадцяти алгоритмів машинного навчання з точки зору їх здатності виявляти аномальну поведінку в мережі Інтернету речей. Оцінка проводиться за трьома загальнодоступними наборами даних (табл. 1). Експериментальні дослідження було проведено за допомогою ALICE high-performance computing facility at the University of Leicester. На основі проведених експериментальних досліджень здійснено комплексний аналіз застосування алгоритмів машинного навчання для виявлення аномальної поведінки в мережах Інтернету речей. Результати оцінки підтверджують, що алгоритм Random Forest досягає найкращої продуктивності з точки зору Accuracy, Precision, Recall, F1-Score and Receiver Operating Characteristic (ROC) curves для всіх застосованих наборів даних. Зауважено, що інші алгоритми машинного навчання працюють з близькою до Random Forest ефективністю, і що рішення стосовно вибору алгоритму машинного навчання залежить від даних, які підлягають аналізу.

В роботі [23] представлено систему виявлення вторгнень на основі аномалій, Також досліджено ефективність застосування різних алгоритмів машинного навчання для виявлення аномалій у використаному наборі даних про вторгнення в мережу Інтернету речей у реальному часі (табл. 1). Проведені експерименти показали найвищу точність класифікації для K-nearest Neighbours (табл. 1). Зазначено, що однією з важливих проблем, пов'язаних з безпекою в мережах Інтернету речей, є те, що більшість таких пристроїв мають обмежене живлення і обчислювальні можливості. Тому шифрування та аутентифікацію важко застосувати для захисту від кібератак. Виходячи з цього, виявлення мережних вторгнень на основі аномалій відіграє важливу роль у захисті мереж Інтернету речей від різних шкідливих дій. Перевага підходу полягає в тому, що коли відбувається атака нульового дня, сигнатура атаки не буде розпізнана, проте подальша поведінка мережі буде відхилятися від нормальних моделей трафіку, що дозволить IDS виявити аномалію.

Таблиця 1

Ефективність, використані методи машинного навчання та джерела наборів даних сучасних методів виявлення кібератак в інфраструктурі Інтернету речей

| Автори | Мета | Застосовані методи | Множина даних | Результат |
|---|---|--|--|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Ravi, N., Shalinie, S. M. [8] 2020 | Виявлення та пом'якшення DDoS-атак | Extreme learning machines, ELM з частковим навчанням | UNB-ISCX [9] | Точність виявлення (Accuracy) DDoS-атак на рівні 96,28% |
| Otoom, Y., Liu, D., Nayak, A. [10] 2019 | Виявлення вторгнень типу DoS, user-to-root (U2R), probe, remote-to-local (R2L) | Stacked-deep polynomial network | NSL-KDD [9] | Виявлення вторгнень на рівні: Accuracy (99.02%), Precision (0.9938), Recall (0.9829), F1-score (0.9883) |
| Verma, A., Ranga, V. [11] 2020 | Дослідження ефективності та перспектив використання класифікаторів, заснованих на машинному навчанні, для IDS на основі аномалій на прикладі виявлення DoS-атак | Ансамблі класифікаторів: Random Forest, AdaBoost, Gradient Boosted Machine, Extreme Gradient Boosting, Extremely Randomized Trees; одиночні класифікатори: Classification and Regression Trees, Multi-layer Perceptron | CIDDS-001[12], UNSW-NB15 [13], NSL-KDD [9] | Classification Trees, Regression Trees, а також Extreme Gradient Boosting показують найкращий результат з рівнем Accuracy до 96,7%, Specificity до 96,2%, Sensitivity до 97,3%, та прийнятним часом відгуку |
| Shafiq, M., Tian, Z., Bashir, A. K., Du, X., Guizani, M. [14] 2020 | Виявлення трафіку атак | Decision Tree (C4.5), Support Vector Machine, Naive Bayes, Random Forest | Bot-IoT Data Set [15] | Для Decision Tree C4.5 та Random Forest Specificity становить 98,95% і 99,99% відповідно, для Naive Bayes і SVM – 98,44% і 98,48% відповідно. |
| Alrashdi, I., Alqazzaz, A., Aloufi, E., Alharthi, R., Zohdy, M., Ming, H. [16] 2019 | Виявлення аномалій та атак | Random Forest | UNSW-NB15 [13] | Виявлення атак на рівні: Precision – 0.79, Recall – 0.97, F1-score – 0.86 |
| Aysa, M. H., Ibrahim, A. A., Mohammed, A. H. [17] 2020 | Виявлення аномалій та атак на пристрої IoT | Decision Tree (J-48), Linear Support Vector Machine, Neural Network (Back-propagation), Random Forest | Нормальні та аномальні дані, зібрані з пристроїв Інтернету речей, з UCI Machine Learning Repository [18] | Поєднання алгоритмів Random Forest і Decision Tree може забезпечити високий рівень Accuracy |
| Bagui, S., Wang, X., Bagui, S. [19] 2021 | Виявлення вторгнень | Logistic Regression, Random Forest, Support Vector Machine | UCI Machine Learning Repository [18] | Досягнуто високої точності виявлення (близько 99%) |

Продовження табл. 1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|--|---|--|---|
| Elmrabit, N., Zhou, F., Li, F., Zhou, H. [20] 2020 | Виявлення аномальної активності, яка може вказувати на наявність атак | Logistic Regression, Naive Bayes, Decision tree, Simple Recurrent Neural Network, Gated Recurrent Units, Convolutional Neural Network and Long short-Term Memory, Convolutional Neural Network, Long short-Term Memory, Random Forest, Adaptive boosting, Deep Neural Network, K-nearest Neighbours | CICIDS-2017 [21], UNSW-NB15 [13], ICS Cyberattack [22] | Random Forest (RF) algorithm надає кращу продуктивність на рівні до 99.9 % для CICIDS-2017 |
| Liu, Z., Thapa, N., Shaver, A., Roy, K., Yuan, X., Khorsandroo, S. [23] 2020 | Підвищення рівня безпеки мережі Інтернету речей шляхом застосування кількох методів машинного навчання на наборі даних про вторгнення в мережу IoT | Logistic Regression, Support Vector Machine, K-nearest Neighbours, Random Forest, Extreme Gradient Boosting | IoT Network Intrusion Dataset [24] | Accuracy на рівні 99% із застосуванням K-nearest Neighbours, тоді як час виконання класифікації становить в середньому 2 хв. Accuracy на рівні 97% при застосуванні Extreme Gradient Boosting, час виконання класифікації – 10,8 с. |

Висновки

Огляд звітів компаній, пов'язаних з забезпеченням кібербезпеки та виробників антивірусного програмного забезпечення, а також літературних джерел показує, що проблема виявлення кібератак в інфраструктурі Інтернету речей є надзвичайно актуальною. В роботі проведено короткий огляд підходів виявлення атак в інфраструктурі Інтернету речей на основі машинного навчання. Хоча відомі методи демонструють високий рівень ефективності, тим не менше їм властиві спільні недоліки та обмеження. Основними недоліками відомих методів є високий рівень хибних спрацювань, неспроможність виявлення та адаптивного реагування на атаки нульового дня та мультивекторні атаки. Останній недолік є найбільш критичним, про що свідчить постійне зростання кількості кібератак на інфраструктуру Інтернету речей. Загальним обмеженням для більшості відомих підходів є потреба в значних обсягах обчислювальних ресурсів та значний час відгуку систем виявлення, що є неприпустимим для роботи в режимі реального часу. Таким чином, все ще існує необхідність у розробленні нових методів виявлення атак в інфраструктурі Інтернету речей, які б усували недоліки відомих підходів та надавали можливість виявлення та адаптивного реагування на ще невідомі загрози, такі як атаки нульового дня та мультивекторні атаки.

References

1. Trend Micro. Inside the Smart Home: IoT Device Threats and Attack Scenarios. URL: <https://www.trendmicro.com/vinfo/it/security/news/internet-of-things/inside-the-smart-home-iot-device-threats-and-attack-scenarios> (accessed on November 1, 2021).
2. Check point software technologies LTD. Cyber security report 2021. URL: <https://www.checkpoint.com/pages/cyber-security-report-2021/> (accessed on November 1, 2021).
3. OWASP Internet of Things. URL: https://owasp.org/www-project-internet-of-things/#tab=IoT_Attack_Surface_Areas (accessed on November 1, 2021).
4. Nozomi Networks Labs. What IT Needs to Know about OT/IoT Security Threats in 2020. URL: <https://www.nozominetworks.com/blog/what-it-needs-to-know-about-ot-io-security-threats-in-2020/> (accessed on November 1, 2021).
5. McAfee Labs Threats Report. URL: <https://www.mcafee.com/enterprise/en-us/lp/threats-reports/oct-2021.html> (accessed on November 1, 2021).
6. Securelist. New trends in the world of IoT threats. URL: <https://securelist.com/new-trends-in-the-world->

of-iot-threats/87991/ (accessed on November 1, 2021).

7. Global System for Mobile Communications. URL: <https://www.gsma.com/> (accessed on November 1, 2021).

8. Ravi, N., & Shalinie, S. M. Learning-driven detection and mitigation of DDoS attack in IoT via SDN-cloud architecture. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(4), pp. 3559-3570.

9. UNB. Canadian Institute for Cybersecurity. Datasets. URL: <https://www.unb.ca/cic/datasets/index.html> (accessed on November 1, 2021).

10. Otoum, Y., Liu, D., & Nayak, A. DL - IDS: a deep learning-based intrusion detection framework for securing IoT. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2019, e3803.

11. Verma, A., & Ranga, V. Machine learning based intrusion detection systems for IoT applications. *Wireless Personal Communications*, 2020, 111(4), pp. 2287-2310.

12. Hochschule Coburg. CIDDS – Coburg Intrusion Detection Data Sets. URL: <https://www.hs-coburg.de/forschung/forschungsprojekte-oeffentlich/informationstechnologie/cidds-coburg-intrusion-detection-datasets.html> (accessed on November 1, 2021).

13. UNSW Sydney. The UNSW-NB15 Dataset. URL: <https://research.unsw.edu.au/projects/unsw-nb15-dataset> (accessed on November 1, 2021).

14. Shafiq, M., Tian, Z., Bashir, A. K., Du, X., & Guizani, M. Corrauc: a malicious bot-iot traffic detection method in iot network using machine learning techniques. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020.

15. UNSW Sydney. Bot-IoT Data Set. <https://research.unsw.edu.au/projects/bot-iot-dataset> (accessed on November 1, 2021).

16. Alrashdi, I., Alqazzaz, A., Aloufi, E., Alharthi, R., Zohdy, M., & Ming, H. Ad-iot: Anomaly detection of iot cyberattacks in smart city using machine learning. In *2019 IEEE 9th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, IEEE, 2019, pp. 0305-0310.

17. Aysa, M. H., Ibrahim, A. A., & Mohammed, A. H. IoT ddos attack detection using machine learning. In *2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, IEEE, 2020, pp. 1-7.

18. UCI Machine Learning Repository. URL: <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets.php> (accessed on November 1, 2021).

19. Bagui, S., Wang, X., & Bagui, S. Machine Learning Based Intrusion Detection for IoT Botnet. *International Journal of Machine Learning and Computing*, 11(6), 2021.

20. Elmrabit, N., Zhou, F., Li, F., & Zhou, H. Evaluation of machine learning algorithms for anomaly detection. In *2020 International Conference on Cyber Security and Protection of Digital Services (Cyber Security)*, IEEE, 2020, pp. 1-8.

21. UNB. Canadian Institute for Cybersecurity. Intrusion Detection Evaluation Dataset (CIC-IDS2017). URL: <https://www.unb.ca/cic/datasets/ids-2017.html>.

22. Industrial Control System (ICS) Cyber Attack Datasets. URL: <https://sites.google.com/a/uah.edu/tommy-morris-uah/ics-data-sets> (accessed on November 1, 2021).

23. Liu, Z., Thapa, N., Shaver, A., Roy, K., Yuan, X., & Khorsandroo, S. Anomaly detection on iot network intrusion using machine learning. In *2020 International Conference on Artificial Intelligence, Big Data, Computing and Data Communication Systems (icABCD)*, IEEE, 2020, pp. 1-5.

24. IEEE DataPort. IoT network intrusion dataset. URL: <https://iee-dataport.org/open-access/iot-network-intrusion-dataset>.

ВАЩИШАК СЕРГІЙ

ЗВО Університет Короля Данила

<https://orcid.org/0000-0002-1753-1540>e-mail: serhii.vaschyshak@ukd.edu.ua**СТИСЛО ТАРАС**

ЗВО Університет Короля Данила

<https://orcid.org/0000-0002-2377-7985>e-mail: taras.styslo@ukd.edu.ua**СТИСЛО ОКСАНА**

ЗВО Університет Короля Данила

e-mail: oksana.styslo@ukd.edu.ua**ДЕМЧИНА МИКОЛА**

ЗВО Університет Короля Данила

e-mail: mykola.demchyna@ukd.edu.ua**ШКАТУЛЯК ВАСИЛЬ**

ЗВО Університет Короля Данила

e-mail: vasyl.v.shkatuliak@ukd.edu.ua

АДАПТИВНА МОДЕЛЬ ГЕЙМІФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ НАВЧАННЯ У ЗАКЛАДІ ВИЩОЇ ОСВІТИ

В роботі наведено результати проектування адаптивної моделі гейміфікації для підвищення якості навчання у закладі вищої освіти (ЗВО). Вказано, що для підвищення мотивації студентів та виховання всебічно розвинутої особистості ЗВО повинні застосовувати комплексний підхід до навчання. Такий підхід передбачає застосування інноваційних методів навчання, таких як гейміфікація. Цьому сприяє інтенсивний розвиток ігрової індустрії, яка застосовує гру для кращого засвоєння навичок. Проаналізовано наукові роботи з оцінки використання гейміфікації та вказано, що вона має позитивний вплив на процес навчання. Вказано, що для підвищення ефективності гейміфікації в ній доцільно використовувати елементи комп'ютерних ігор. Для підвищення зацікавленості завданням доцільно надати характеристик ігрового світу (цікаві тематичні назви, розповідь чи передісторію). Отже, для підвищення якості навчання, адаптивна модель гейміфікації повинна підлаштовувати навчальний процес в ЗВО під індивідуальні особливості студента та сприяти максимальному розвитку його навичок і творчих здібностей. Для створення моделі проаналізовано ігрові жанри, звідки взято її базові елементи: аватар, система місій, система балів, турнірна таблиця, рівнева система гравця, тематичні івенти, ігрова атрибутика і спорядження, ігрова валюта. Ці елементи будуть розміщені у віртуальному середовищі, де на основі особистого акаунта студента буде створено аватар – його віртуальний образ. Студент матиме можливість обирати і виконувати навчальні місії та місії, що стосуються студентського життя. За виконання місій студентів будуть нараховані бали, за допомогою яких він зможе конкурувати з іншими студентами. Адаптивність буде реалізована шляхом присвоєння кожному завданню тега. І якщо більшість виконаних студентом завдань буде одного типу, то йому будуть запропоновані завдання, що розвиватимуть інші сторони його особистості (навчання, дозвілля, спорт, креативність). За аналіз виконання завдань та адаптації процесу навчання для потреб студента буде відповідати штучна нейронна мережа.

Ключові слова: гейміфікація, модель, інтерактивний метод, процес навчання, адаптація.

VAHSCHYSHAK SERHII

HEI King Danylo University

STYSLO TARAS

HEI King Danylo University

STYSLO OKSANA

HEI King Danylo University

DEMCHYNA MYKOLA

HEI King Danylo University

SHKATULIAK VASYL

HEI King Danylo University

ADAPTIVE MODEL OF GAMIFICATION FOR HIGHER EDUCATION LEARNING PROCESS

The paper presents the results of designing an adaptive gamification model aimed at improving the quality of education in higher education institutions (HEIs). It is stated that in order to increase student motivation and foster all-round personal development, HEIs should adopt a comprehensive approach to teaching that includes innovative methods such as gamification. The intensive development of the gaming industry, which uses games for better skill acquisition, contributes to this trend. Scientific studies on the use of gamification have been analyzed, indicating its positive impact on the learning process. To enhance the effectiveness of gamification, it is recommended to use elements of computer games. Providing interesting thematic names, stories, or pre-stories for tasks can increase students' interest.

Therefore, to improve the quality of education, an adaptive gamification model should adjust the learning process in HEIs to the individual characteristics of each student and promote the maximum development of their skills and creative abilities. In creating the model, gaming genres were analyzed, and their basic elements were used, including avatars, mission systems, point systems, leaderboards, player level systems, thematic events, gaming attributes and equipment, and game currency. These elements will be placed in a virtual environment where a student's personal account will create an avatar representing their virtual self. Students will have the opportunity to choose and

perform educational and student life missions. Points will be awarded for completing missions, allowing students to compete with other students. Adaptability will be achieved by assigning tags to each task. If a student completes mostly one type of task, they will be presented with tasks that develop other aspects of their personality (education, leisure, sports, creativity). An artificial neural network will be responsible for analyzing task performance and adapting the learning process to the student's needs.

Keywords: gamification, model, interactive method, learning process, adaptation.

Постановка проблеми у загальному вигляді та зв'язок її із важливими науковими чи практичними завданнями

В наш час спостерігається інтенсивний розвиток комп'ютерних технологій, що в свою чергу сприяє розвитку і інших галузей. Згідно цього процес навчання також має вийти на якісно новий рівень. Серйозною проблемою традиційних методів навчання у вищій школі є те, що їх використання не забезпечує достатню мотивацію студентів та не сприяє ефективному засвоєнню знань. Заклади вищої освіти (ЗВО) повинні готувати не тільки фахівців у певній галузі знань, але і формувати всебічно розвинені особистості, які мають широкий спектр навичок та компетенцій, необхідних для життя та роботи в сучасному світі. Для досягнення цієї мети, ЗВО повинні забезпечувати:

- інтеграцію в освітні програми сучасних дисциплін, які допоможуть студентам розвивати різноманітні навички та компетенції, такі як критичне мислення, комунікація, лідерство, співпраця;
- використання інноваційних методів навчання, які сприяють розвитку креативності та творчого мислення студентів, такі як проекти, групові дискусії, наукові та дослідницькі роботи тощо;
- підтримку розвитку «м'яких» навичок та соціальних компетенцій студентів, наприклад, підтримку взаємодії з різними людьми та культурами, розвиток емоційного інтелекту, вміння працювати в команді;
- створення можливостей для практичного застосування отриманих знань та навичок у реальному житті, наприклад, через стажування, професійні практики, волонтерську діяльність тощо.

Отже, для готування всебічно розвинених особистостей, ЗВО повинні застосовувати комплексний підхід до навчання, що охоплює різні аспекти розвитку студентів.

Однією з найбільших проблем у сучасній вищій школі є низька мотивація студентів до навчання. Ця проблема є особливо актуальною в контексті зростаючої кількості інформації, з якою студенти зіштовхуються, та високої конкуренції на ринку праці. Недостатня мотивація може призвести до погіршення результатів навчання, недосягнення поставлених цілей та загального незадоволення студентів навчальним процесом.

Комплексний підхід, що охоплює різні аспекти розвитку студентів, може допомогти зміцнити мотивацію студентів до навчання шляхом додаткового використання інноваційних методів навчання, таких як гейміфікація. Застосування у навчальному процесі ігрових технік (гейміфікації) може допомогти студентам зосередитися на навчальному процесі та стимулювати їхні зусилля для досягнення поставлених цілей. Крім того, гейміфікація може стимулювати бажання студентів брати участь у наукових проєктах та розвиватися. Однак, важливо постійно аналізувати результати впровадження гейміфікації в навчальний процес, щоб забезпечити її високу ефективність та адаптувати до потреб студентів та ЗВО.

Аналіз останніх джерел

Любов до ігор в людей закладається з дитинства, бо ми отримуємо перший досвід пізнання навколишнього світу саме через ігри з батьками та іграшками. Про динаміку розвитку ігрової індустрії можна судити з даних графіка на рис. 1, де зображено загальний дохід від відеоігор в світі [1].

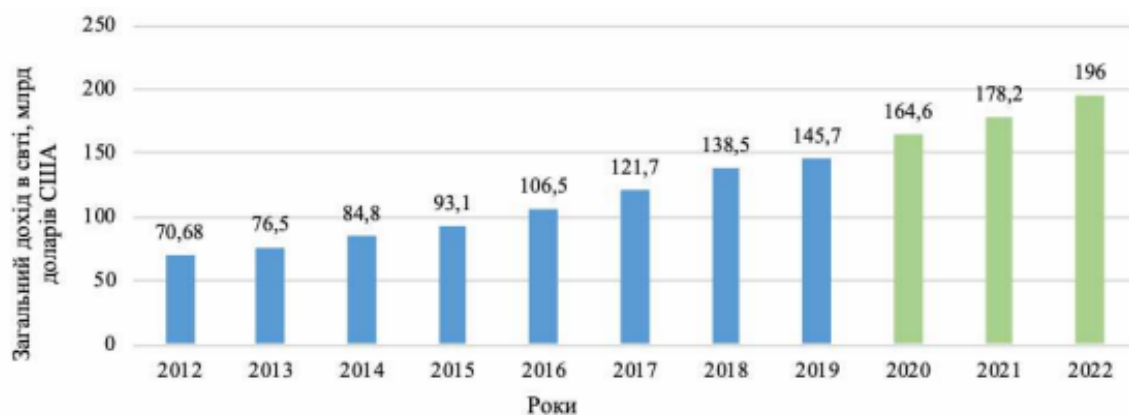


Рис. 1. Загальний дохід ігрової індустрії у світі

З рис. 1 видно, що дохід від ігрової індустрії з 2012 по 2022 збільшився більше ніж у 2 рази. Це вказує на постійний розвиток галузі, а також постійний ріст кількості користувачів відеоігор. Ось кілька причин, чому ігрова індустрія важлива:

1. Розвага та культура: існує багато ігор для різноманітних смаків та вікових груп, включаючи ігри з різними рівнями складності та стилістичними особливостями. Це дає можливість людям розважатися та релаксувати, а також відкривати нові культурні та естетичні горизонти.

2. Економіка: ігрова індустрія є однією з найбільш прибуткових та швидко зростаючих галузей в світі, яка включає в себе розробку, виробництво та продаж ігор, а також пов'язані з ними послуги. Це створює робочі місця та забезпечує економічне зростання в багатьох країнах світу.

3. Наука та технології: розробка і використання ігор потребує значних наукових та технологічних знань, що сприяє розвитку нових технологій та досліджень в різних галузях науки.

4. Освіта та навчання: використання ігрових технологій в навчанні та освіті дозволяє зробити навчання більш захопливим та ефективним, зокрема шляхом гейміфікації навчальних процесів та створення серйозних ігор для навчання.

5. Соціальна взаємодія: багато ігор мають онлайн-компонент, що дозволяє гравцям спілкуватися та взаємодіяти з іншими людьми з усього світу. Це допомагає збільшувати соціальну взаємодію, покращувати міжкультурне спілкування та сприяти взаєморозумінню.

Багато наукових досліджень засвідчують позитивний вплив ігор на якість нашого життя, які створюють позитивні емоції та посилюють соціальні відносини [2–5]. Наприклад, соціальні навички можна розвинути за допомогою рольових ігор; для розширення кругозору доцільно пограти у ігри-симулятори; просторове мислення розвинути за допомогою логічних ігор; тренувати здатність до аналізу найкраще у іграх стратегіях; підтягнути роботу в команді і реакцію можна за допомогою “стрілялок”. Ігри можуть розвивати різні якості та навички, залежно від їх жанру та механіки. Ось декілька прикладів:

- координація рухів та реакція на подразники;
- стратегічне мислення та прийняття рішень;
- комунікація та співпраця;
- стійкість до стресу та розвиток емоційного інтелекту;
- розвиток креативності та уяви.

Ігри можуть бути більш, ніж просто розвагою, вони мають потенціал покращувати різні аспекти життя людини та сприяти її особистому розвитку [6].

Перші згадки про гейміфікацію, яка застосовувалася у реальному житті, датовані ще 1896 р. В той час компанія Speggy & Hutchinson випускала спеціальні марки. Ці марки покупці отримували у роздрібних магазинах та на автозаправках за покупку товарів і клеювали їх у спеціальний альбом. Потім зібрані марки можна було обмінювати на різні подарунки. Першим прикладом гейміфікації в сфері управління стала поява у 1908 році скаутського руху, де в якості нагороди за певні досягнення учасникам вручалися різні відзнаки.

В 1973 році у світ вийшла книга “The game of work” Чарльза Кунрадта. В ній піднімалося питання підвищення продуктивності роботи працівників шляхом впровадження ігрових елементів, взятих зі спорту.

Першим хто вжив термін “гейміфікація” був Нік Пелінг у 2002 році.

Однією з наукових статей на дану тему є "Gamification of Learning: A Review of Issues and Designs" авторів Шермана, Меррітта та Моррісона. У цій статті автори провели аналіз різних аспектів гейміфікації процесу навчання, зосередившись на проблемах та дизайнах гейміфікованих навчальних середовищ. Вони розглянули теоретичні основи гейміфікації, провели огляд досліджень щодо її ефективності та використали свій досвід для розробки критеріїв дизайну гейміфікованих навчальних середовищ. Автори статті обговорюють основні виклики при гейміфікації навчання, такі як забезпечення ефективності, мотивації, залучення та ретенції студентів, і висувають рекомендації щодо розв'язання цих проблем. Вони також детально описують різні дизайни гейміфікованих навчальних середовищ та їхні переваги і недоліки.

У 2020 році на базі Національного університету “Чернігівська політехніка” було проведено анкетування 127 студентів спеціальності ІТ. Їм необхідно було оцінити важливість тренду гейміфікації від 0 до 10. Результати опитування представлені на рис. 2. Згідно з ними, позитивно гейміфікацію освіти підтримує більше 48% опитаних здобувачів освіти.

Більшість проведених наукових досліджень показала позитивні результати навчання після гейміфікації.

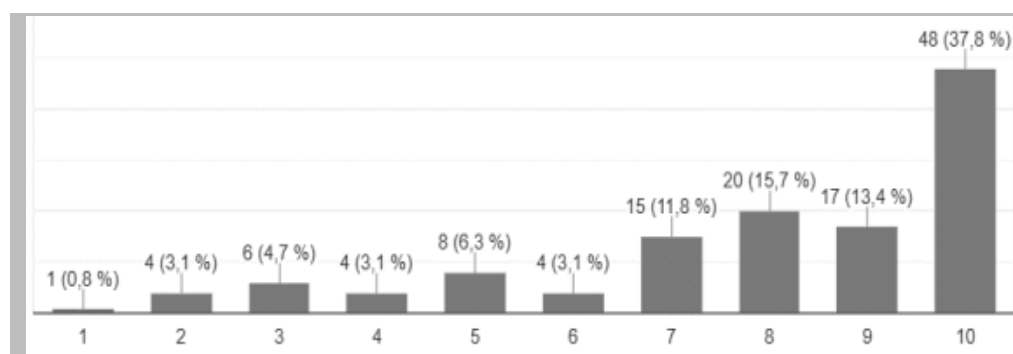


Рис. 2. Результат опитування студентів стосовно важливості гейміфікації у навчанні

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: розроблення адаптивної моделі гейміфікації процесу навчання у ЗВО, яка б допомогла покращити якість навчання та збільшити мотивацію студентів до активної участі у житті навчального закладу шляхом організації конкуренції та підлаштування процесу навчання під гармонійний розвиток студента як фахівця і особистості.

Виклад основного матеріалу

Гейміфікація стає все популярнішою у сучасному світі і використовується в різних галузях, включаючи бізнес, освіту, здоров'я тощо. Вона передбачає використання елементів та принципів гри в неігровому контексті, наприклад у навчанні, з метою залучення та мотивації учасників до досягнення певної мети. Гейміфікація може включати в себе елементи гри, такі як бали, досягнення, рівні, відзнаки, лідерські таблиці та інші, які надають стимул для активності та залучення учасників. Основною задачею гейміфікації є залучення природних людських інстинктів: самовираження, досягнення, статусу, конкуренції, розв'язання задач [2].

Гейміфікацією можна вважати також використання у навчанні елементів комп'ютерних ігор.

Одним з елементів, який можна використати у гейміфікації є конкуренція. Вона спонукає людину до дій [2, 3]. Основною мотивацією в гейміфікації є отримання винагороди за виконане завдання. Винагороди можуть бути різні: бали, рівні, відзнаки, видача віртуальних призів чи валюти, індикатор прогресу, тощо.

Для заохочення і кращого занурення у процес навчання можна надати реальним задачам характеристик ігрового світу, додати цікаві тематичні назви, розповідь чи передісторію.

Популярними прикладами застосування гейміфікації є системи оцінювання у молодших класах (замість оцінок відмітки по типу сонечко чи хмаринка), дошки пошани (своєрідна таблиця лідерів), змагання між класами за певну винагороду і навіть використання ігрових елементів під час уроків. Гейміфікація може використовуватися у випадках:

- коли є потреба сформувати певні навички чи поведінки;
- візуалізації дій і навичок, які важко продемонструвати;
- створенні різноманітних змагань між учнями (студентами) для їхньої зацікавленості;
- спостереження учнями (студентами) за власним прогресом розвитку освітніх навичок.

Вплив гейміфікації на мотивацію студентів у навчальному процесі досліджував Д. Кларк. Він визначив, що набуття вмінь та бажання студента здобувати знання виникають за власними переконаннями і бажанням, а не під зовнішнім впливом викладачів чи ще когось [2].

Отже, на даний час саме ігрові методи навчання в ЗВО можуть стати одними з найефективніших, а впровадження гейміфікації в навчальний процес дасть змогу мотивувати студентів до самостійного вивчення навчального матеріалу і підвищити загальну зацікавленість у своєму студентському житті.

Для ефективного впровадження ігрових особливостей у процес навчання потрібно створити адаптивну модель гейміфікації цього процесу, яка дозволить підлаштовувати процес навчання під індивідуальні потреби студента і підвищить рівень його зацікавленості шляхом конкуренції з іншими студентами. Для цього треба проаналізувати різноманітні ігрові жанри і вибрати один, який буде найкраще покривати навчальні потреби або взяти з різних жанрів їхні особливості і поєднати у єдину модель. Існує багато ігрових жанрів: гонки, шутери, хорори, стратегії, спортивні, пригодницькі, платформери, ігри з відкритим світом, RPG ігри тощо. Для аналізу вибрано чотири ігрові жанри, зміст яких, на нашу думку, найкраще відповідатиме концепції створення моделі:

- стратегії;
- ігри з відкритим світом;
- RPG ігри;
- пригодницькі.

Суть стратегічних ігор полягає у продумуванні стратегії розвитку на багато ходів вперед, тобто плануванні дії для досягнення поставленої мети за типом перемоги у військовій операції чи розбудові наймогутнішої держави. З ігор цього жанру корисним для нашої моделі буде те, що гравцеві потрібно продумувати свої дії набагато кроків вперед, збирати певні ігрові ресурси та здійснювати постійні змагання.

Ігри з відкритим світом характеризуються тим, що гравець не прив'язаний до якоїсь конкретної локації чи місії. В цих іграх він сам вибирає куди бігти, які обирати і виконувати завдання. Кожна гра має свої унікальні особливості, геймплей, світ та атмосферу. З ігор цього жанру корисним для моделі буде свобода дій і створення віртуального світу, тільки у нашій моделі цей відкритий світ буде внутрішньою структурою ЗВО.

RPG ігри (Role-Playing Game) – жанр ігор, де гравець асоціюється з конкретним персонажем, який досліджує світ, розвивається, збирає предмети, виконує квести та покращує свої вміння по ходу сюжету. Концепція RPG ігор полягає в тому щоб відіграти конкретну роль персонажа за її правилами. Протягом відігравання ролі гравцю доступний розвиток персонажу, численні варіанти екіпірування, одягу, зброї. Ще однією особливістю жанру є історія та опис персонажів, їхня взаємодія зі світом за допомогою балів, запасу сил, рівня розвитку чи рівня знання певного фаху. Цей жанр підходить для нашої моделі найкраще, звідси можна взяти багато корисного: прокачку рівня, вмінь, систему місій і квестів.

Пригодницький – це жанр гри, де гравець керує персонажем, а той рухається по сюжету і виконує

встановлені місії, шукає підказки та покладається на власну логіку. Сюжет таких ігор швидко розвивається і наповнений яскравими подіями. З даного жанру для моделі можна використати проведення тематичних подій і їхнє проходження у встановлений час.

З проведеного аналізу виділимо спільні риси жанрів:

- змагання з іншими студентами (далі гравцями);
- рівень персонажу та ступінь його підняття;
- певні віртуальні ресурси і спорядження;
- ігровий персонаж з власними характеристиками.

Отже, з наведених рис і особливостей можна вивести елементи, необхідні у нашій моделі:

1. Аватар.
2. Система місій.
3. Система балів.
4. Турнірна таблиця.
5. Рівнева система гравця.
6. Тематичні івенти.
7. Ігрова атрибутика і спорядження.
8. Ігрова валюта.

Аватар – внутрішньоігровий персонаж гравця, візуальний портрет у межах гри з власними характеристиками. У нашому розумінні це буде акаунт студента у моделі. Як характеристики будуть вноситися такі дані: ім'я, ігровий нікнейм, рівень персонажу, фізичні характеристики (зріст, вага), набрані бали, місце у таблиці, вміння якими володіє студент та короткий опис про себе.

Система місій – гравцеві будуть доступні певні елементи навчання у виді місій для проходження.

Система балів – один з головних елементів, який служить для чисельного представлення прогресу гравця. У нашій моделі студент буде отримувати бали за успішне виконання певної діяльності: виконану місію, здобуте вміння, пройдений івент. Усі бали будуть записані у рейтингову таблицю.

Турнірна таблиця – це таблиця, у якій гравці будуть розміщуватися відповідно до набраних балів і рівня персонажу.

Рівнева система гравця, як і в RPG іграх, де кожен гравець буде починати навчання після реєстрації і входу з першого (нульового) рівня персонажу. Рівень буде рости після проходження місії, тобто після успішного виконання певного завдання (проходження модуля дисципліни, здобуття нового вміння, чи участі в івентах) гравцю нараховуватиметься певний досвід, який постійно зростатиме в процесі навчання. Високий рівень гравця свідчатиме про його всебічний розвиток. Також рівень гравця буде відображатися у рейтинговій таблиці. За структурою моделі, гравці з низьким рівнем не зможуть братися до певних завдань. Вивчення окремих навиків також буде залежати від рівня персонажу. При отриманні нового рівня персонажу будуть нараховуватися бали та він буде отримувати внутрішню ігрову валюту для підвищення мотивації.

Тематичні івенти призначені для урізноманітнення студентського життя, тобто час від часу у ЗВО і нашій моделі відповідно, будуть організовуватись тематичні івенти. Вони будуть мати обмежений час, спеціальні місії і завдання. А в кінці івенту гравцям будуть нараховані бали, видана внутрішню ігрова атрибутика по даній тематиці, а також, якщо це передбачено івентом, то і реальні призи.

Ігрова атрибутика і спорядження використовується для підвищення мотивації – за проходження певних рівнів чи виконання місій гравець буде отримувати різні значки (візуальні уявлення про досягнення), які символізуватимуть його досягнення і заслуги. Також за виконання окремих місій чи участі у івентах гравець буде отримувати ігрове спорядження і “артефакти”.

Ігрова валюта – аналог справжніх грошей. Гравець буде отримувати дану валюту за проходження місій, досягнення рівня та за проходження івентів. За цю валюту він зможе придбати додаткову ігрову атрибутику.

У нашій моделі гейміфікації планується реалізувати також донатну валюту – гравець свідомо, самостійно (якщо йому виповнилося 18 років, в іншому випадку за згоди батьків) донатить гроші у систему і йому нараховується дана валюта. За неї він зможе купувати артефакти.

Підсумувавши вищенаведені елементи можна сказати, що для реалізації моделі буде створене віртуальне середовище, де у кожного студента буде особистий акаунт, на основі якого буде створений аватар – його віртуальний образ.

У студента буде можливість обирати і виконувати місії, основою цих місій буде навчання, а також будуть додаткові місії які уже не стосуються безпосередньо навчання, але стосуються студентського життя. За виконання місій студенту нараховуватимуться бали і за допомогою цих балів він зможе конкурувати з іншими учасниками навчального процесу (гравцями).

Для того, щоб наша модель була максимально ефективною, частина її функцій буде адаптуватись під кожного конкретного користувача. Для реалізації адаптивності кожному навчальному завданню буде присвоюватися тег і, якщо більшість виконаних завдань буде одного типу, то студенту пропонуватимуться завдання, які своїм виконанням будуть сприяти розвитку інших сторін його особистості. Наприклад, якщо студент виконує багато завдань, які сфокусовані на навчанні, то відповідно, він менше розвиває соціальні зв'язки чи фізичну форму. В такому випадку студенту пропонуватимуться завдання по типу: “Біг зранку 30

днів”, “Спробувати грати на гітарі” чи “Відвідати нові міста з друзями”.

За аналіз завдань та корисних для студента пропозицій буде відповідати штучна нейронна мережа, яка зараз створюється за структурою, наведеною в [7].

Адаптивність нашої моделі буде базуватися на оцінках результатів виконання студентом різних типів завдань (показників) та на формуванні переліку завдань для покращення навичок у певній сфері. Всі завдання будуть поділені на такі пункти: навчання, дозвілля, спорт, креативність, активність (розвинуті навички). З використанням даних пунктів для кожного студента буде сформована п'ятикутна пелюсткова діаграма, приклад якої наведено на рис. 3.



Рис. 3. Приклад пелюсткової діаграми для студента

За допомогою таких діаграм студенти будуть бачити чому надають перевагу інші, також за допомогою діаграми штучна нейронна мережа буде підбирати рекомендовані завдання. Наприклад, якщо у студента низький рівень креативності, то йому будуть пропонуватися завдання (від простішого до складнішого), безпосередньо спрямовані на поступовий розвиток цієї творчої здібності. Всі сфери діяльності студента в ЗВО будуть записуватися і подаватися у проміжку від 0 до 10 балів, де 0 – зовсім не розвинута сторона, а 10 – експерт у напрямку. Максимальна кількість балів буде визначатися з загальноуніверситетських показників.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

На основі аналізу виявлено, що вплив ігрової індустрії на людей дедалі сильнішає, це сприяє поширенню ігрових технологій в освіту. Встановлено, що використання ігрових елементів може покращити мотивацію студентів до навчання, збільшити їх інтерес до предмету та підвищити рівень розуміння матеріалу. Досліджено важливість всебічного розвитку особистості студента та визначено, що гейміфікація може сприяти цьому шляхом розвитку комунікативних, лідерських та творчих навичок.

На основі вибору з ігрових механік та ігрових жанрів необхідних характеристик розроблено адаптивну модель гейміфікації процесу навчання, в якій будуть враховуватися індивідуальні показники студента. Шляхом присвоєння тегів до кожного навчального завдання та аналізу виконання студентом цих завдань адаптивна модель за допомогою штучної нейронної мережі пропонуватиме студенту завдання для розвитку тих навичок, які мають нижчу оцінку за інші. Таким чином, адаптивність та гейміфікація можуть стати потужними інструментами для покращення якості навчального процесу в ЗВО шляхом стимулювання конкурентних змагань і підвищення мотивації студентів до навчання та дозвілля.

Література

1. Гречко А.В. Аналіз динаміки розвитку ринку відеоігор, джерел його фінансування та особливостей монетизації продукції в даній сфері / А.В. Гречко, Н.В. Захаров, М.О. Фалько // Ефективна економіка. – 2021. – № 5.
2. Гейміфікація як одна з інноваційних форм навчального процесу // Управління розвитком складних систем : зб. наук. праць / Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. – URL: <https://repository.knuba.edu.ua/bitstream/handle/987654321/1553/16.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
3. Gamification and learning: a review of issues and research. Journal of e-Learning and Knowledge Society. Volume 11, Number 3. 2015. URL: <https://www.learntechlib.org/P/151920/>
4. Мечус Х. Дослідження проблематики впровадження технологій гейміфікації у систему освіти / Х. Мечус, О. Смотр, Н. Вовчиста, М. Рашкевич // Збірник тез доповідей IV Міжнародної науково-практичної конференції, ІБІТ 2022, м. Львів, 30 листопада 2022 року. – Львів : Растр-7, 2022. – С. 353–356.

5. Ткаченко О. Гейміфікація освіти: формальний і неформальний простір / О. Ткаченко // Актуальні питання гуманітарних наук. – 2015. – Вип. 11. – С. 303–309.
6. Захарова О.В. Підвищення якості послуг вищої освіти за допомогою гейміфікації / О.В. Захарова, А.В. Грузд // Наукові праці національного технічного університету. Економічні науки. – 2017. – Вип. 32. – С. 113 – 122.
7. Пашкевич О.П. Застосування моделей машинного навчання для прогнозування цін на ринку нерухомості / О.П. Пашкевич, С.П. Ващишак, А.М. Бойчук, Т.Р. Стисло, М.М. Демчина // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2022. – № 5(313). – С. 265–273.

References

1. Hrechko A.V. Analiz dynamiky rozvytku rynku videoihor, dzherel yoho finansuvannya ta osoblyvosti monetyzatsii produktii v daniy sferi / A.V. Hrechko, N.V. Zakharov, M.O. Falko // Efektyvna ekonomika. – 2021. – № 5.
2. Heimifikatsiia yak odna z innovatsiinykh form navchalnoho protsesu // Upravlinnia rozvytkom skladnykh system : zb. nauk. prats / Kyiv. nats. un-t bud-va i arkhitektury. – URL: <https://repository.knuba.edu.ua/bitstream/handle/987654321/1553/16.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
3. Gamification and learning: a review of issues and research. Journal of e-Learning and Knowledge Society. Volume 11, Number 3. 2015. URL: <https://www.learntechlib.org/P/151920/>
4. Mechus Kh. Doslidzhennia problematyky vprovadzhennia tekhnologii heimifikatsii u systemu osvity / Kh. Mechus, O. Smotr, N. Vovchasta, M. Rashkevych // Zbirnyk tez dopovidei IV Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, IBIT 2022, m. Lviv, 30 lystopada 2022 roku. – Lviv : Rastr-7, 2022. – S. 353–356.
5. Tkachenko O. Heimifikatsiia osvity: formalnyi i neformalny prostir / O. Tkachenko // Aktualni pyttannia humanitarnykh nauk. – 2015. – Vyp. 11. – S. 303–309.
6. Zakharova O.V. Pidvyshchennia yakosti posluh vyshchoi osvity za dopomohoiu heimifikatsii / O.V. Zakharova, A.V. Hruzd // Naukovi pratsi natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Ekonomichni nauky. – 2017. – Vyp. 32. – S. 113 – 122.
7. Pashkevych O.P. Zastosuvannya modelei mashynnoho navchannia dlia prohnozuvannia tsin na rynku nerukhomosti / O.P. Pashkevych, S.P. Vashchyshak, A.M. Boichuk, T.R. Styslo, M.M. Demchyna // Herald of Khmelnytsky national university. Technical sciences. – 2022. – № 5(313). – S. 265–273.

КЛИМЕНКО АНЖЕЛІКА

Національний університет харчових технологій, м. Київ,
«Асіно Холдинг АГ», м. Київ

СОКОЛЬСЬКИЙ ГЕОРГІЙ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID ID: [0000-0002-6665-2744](https://orcid.org/0000-0002-6665-2744)e-mail: g.sokolsky@kpi.ua

КАМЕНСЬКА ТЕТЯНА

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID ID: [0000-0001-9216-0201](https://orcid.org/0000-0001-9216-0201)

ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ ВИПІКАННЯ ХЛІБОБУЛОЧНОГО ВИРОБУ З ЕКСТРАКТОМ ШИПШИННИ

В роботі досліджено вплив екстракту шипшини на процес випікання хлібобулочних виробів методом термогравіметричного аналізу з метою покращення якості та харчової цінності хлібобулочного продукту. Встановлено оптимальне значення концентрації добавленого екстракту (2% мас.) з найкращими волого- та CO₂-зберігаючими властивостями. Втрати маси порівняно з контрольним зразком була на 5-10% меншою, збільшення втрати маси знову спостерігалось при концентрації екстракту 3 та 6% мас. Пояснення такої екстремальної залежності від вмісту екстракту запропоновано шляхом порівняння властивостей аскорбінової кислоти та рутину як основних компонентів екстракту шипшини та різних дії цих компонентів. Аскорбінова кислота діє виключно до стадії нагрівання, але рутин частково зберігає свою антиоксидантну активність після термічної обробки. Встановлено термогравіметрично складний характер перетворень у процесі випікання хліба за температури 200 °C. Виділили три етапи цього процесу. Енергію їх активації визначали для зразка з 2% мас. екстракту: 3,95; 42,3; 81,4 кДж/моль відповідно.

Ключові слова: хлібобулочний виріб, екстракт шипшини, термогравіметричний аналіз.

KLIMENKO ANZHELIKA

National university of food technologies, kyiv

SOKOLSKY GEORGII, KAMENSKA TETIANA

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS OF BAKING BREAD PRODUCTS WITH ROSE HIP EXTRACT

The chemical composition of bakery products needs to be optimized and balanced by the most important nutrients. The application of rose hip extract to improve the quality and nutritional value of bakery products is considered. The purpose of the work is to investigate and scientifically justify the conditions of rose hip extract possible application in bread baking.

Methods. The effect of the rose hip extract on the physicochemical and consumer properties of the bread product was monitored by the thermogravimetric method. A technique for determining mass loss in the process of baking a bakery product in isothermal mode has been developed.

Results. The optimal value of the extract additive of 2% by mass has been found with the best moisture and CO₂-retaining properties. The mass loss compared to the control sample was by 5-10% lower. The explanation of this extremal dependence on the content of the extract was proposed by comparing properties of ascorbic acid and rutin as the main components of a rosehip extract and due to the different effects of these components. Ascorbic acid acts exclusively before the heating stage, but rutin partially retains its antioxidant activity after heat treatment. Therefore, it may be responsible for the increase in mass loss at an extract concentration of 3, 6% by mass. The thermogravimetrically complex nature of transformations in the baking bread process at a temperature of 200 °C was established. Three stages of this process were distinguished. Their activation energies were determined for a sample with 2% wt. of extract: 3.95; 42.3; 81.4 kJ/mol respectively.

Conclusions. The properties of the bread product with added rose hip extract can be controlled by the thermogravimetric method. The optimum concentration of 2% by mass was shown. In the range of up to 6% by mass, the addition of extract to retain moisture and CO₂ when baking bread in isothermal mode at a temperature of 200 °C. A sample of wheat bread with a rose hip extract content of 2% by weight better retains CO₂ and moisture, and has a minimal effect on structure formation, which improves the consumer properties of the product.

Keywords: baking and bread product, rose hip extract, thermogravimetric analysis.

Вступ

Сучасні уявлення про раціональне харчування передбачають постачання організму людини необхідної кількості білкових речовин, вуглеводів, жирів, вітамінів і мінеральних сполук для забезпечення її активної життєдіяльності. Хлібні вироби є одними з основних продуктів харчування людини. Хліб майже на половину задовольняє потребу людини у вуглеводах, на третину в білках, більш ніж на половину у вітамінах групи В, солях фосфору і феруму. Водночас хімічний склад хліба необхідно оптимізувати для збільшення кількості найважливіших нутрієнтів та досягнення їх збалансованості.

Однією з важливих проблем хлібопекарської промисловості є збільшення терміну збереження виробами свіжості. Свіжість хліба – це один з основних показників його якості, погіршення якого зумовлено процесом черствіння. Ефективним заходом подовження тривалості зберігання хліба є застосування нетрадиційної сировини і добавок, які одночасно із сповільненням процесу черствіння підвищують харчову цінність хліба, збагачують його важливими для життєдіяльності людини речовинами.

Спираючись на попередньо проведені дослідження, де було встановлено оптимальні умови екстрагування вітамінного комплексу з плодів шипшини *Rosa Cinnamomea L.*, запропоновано введення даного екстракту в хлібобулочні вироби для покращення їх якості та харчової цінності [1].

Постановка задачі

Актуальною проблемою хлібопекарського виробництва є пошук та встановлення заходів, спрямованих на розробку і виробництво хлібобулочних виробів, що відповідають сучасним науково обґрунтованим вимогам до харчування. Одним з напрямів вирішення поставленої проблеми є використання у рецептурах хлібобулочних виробів концентрованих екстрактів цінних для людини речовин з рослинної сировини. З цієї точки зору перспективним є використання місцевих сировинних ресурсів, які характеризуються доступністю, екологічною чистотою і достатнім поширенням. Тому слід приділити увагу сировині на основі плодів шипшини, що містять вітаміни, макро- та мікроелементи, харчові волокна, органічні кислоти та інші корисні речовини.

Таким чином, **метою** роботи є дослідити та науково обґрунтувати умови використання екстракту шипшини у хлібопеченні.

Методики дослідження

Відбір і підготовку проб сировини для лабораторних досліджень проводили згідно з єдиною методикою вивчення харчових продуктів за [2]. Тісто було підготовлене за рецептурою: 100 г пшеничного борошна, 1,1 г сухих дріжджів, 1,4 г солі і 60 г води (контрольний зразок). Досліджували серію зразків із доданими 3, 5 та 10 мл екстракту шипшини (3, 5, 10% по відношенню до маси сухого борошна, далі по тексту 2, 3, 6 % мас., відповідно). Після замісу тісто бродило протягом 60 хв. за температури 32 °С. Заготовки тіста зберігали в харчовій плівці у холодильнику.

Приготування екстракту з плодів шипшини. Як показано раніше [1], для вилучення вітамінного комплексу плодів шипшини економічно оптимальною є екстракція 40-відсотковим розчином етанолу. При цьому вміст вітаміну Р у вилученні становить 1,12 %, а вітаміну С – 0,058 г на 100 мл.

Визначення втрати маси готових виробів у процесі випікання хліба. Суть методу полягає в термостатуванні за заданої температури наважки тіста хлібобулочного виробу з добавкою екстракту шипшини або без неї та спостереженні за втратою маси. Таким чином, термогравіметричні дослідження зразків тіста проводили в ізотермічному режимі. Для більшості дослідів обрано температуру 200 °С у зв'язку з найбільшою відповідністю технологічному процесу приготування хлібобулочних виробів за стандартною технологією [3].

Втрату маси приблизно 300 мг зразка тіста при випіканні досліджували у сушильній шафі КС-65 за постійної температури. Наважку розміщували на спеціально підготовлених та подовжених шальках торсійних терезів. Останні поміщали у попередньо підігріту сушильну шафу через верхній отвір за заданої температури, продовжували спостерігати за втратою маси протягом приблизно 15 хв. Проводили три паралельних експерименти, в тому числі до отримання 3-х відтворюваних за виглядом кінетичних кривих втрати маси. Для аналізу кінетичних характеристик обирали середню криву. Аналогічно проводили дослідження зразків з екстрактом шипшини концентрації 2, 3, 6% мас.

Обґрунтування методики та умов термогравіметричного експерименту

Випічка в пекарних камерах різної конструкції — заключна ланка приготування хліба. В результаті інтенсивного прогрівання (200–280 °С) тісто поступово перетворюється в хліб з доволі стійкою формою. Режими випікання хліба відрізняються для різних видів виробів, оскільки швидкості тепломасообмінних процесів залежать від багатьох факторів: сорту борошна і вологості тіста, маси і форми виробів, способу випічки (на поду або у формі), параметрів газового середовища пекарної камери тощо. Тривалість випічки менша для виробів з пшеничного борошна з більшою вологістю тіста і меншою масою, довгої форми. Високі температура і відносна вологість пароповітряного середовища в пекарній камері прискорюють випічку.

Тепло передається за допомогою термовипромінювання, конвекції і кондукції, причому частка променевої енергії приблизно у 5 разів перевищує конвективний і кондуктивний теплопідвід. У хлібопекарських печах з терморадіаційним обігрівом частка променевої енергії ще вище [3].

Під час випічки перебігають різні взаємопов'язані процеси: спричинений прогріванням тіста внутрішній тепломасообмін і зовнішній — між тістом-хлібом і пароповітряним середовищем пекарної камери. Тістові заготовки, які мають після вистоювання температуру приблизно 30 °С, потрапляючи в зволожене і нагріте пароповітряне середовище пекарної камери, починають швидко прогріватися. На поверхні шматка тіста на початковій стадії випічки конденсується пара з навколишнього середовища, прискорюючи прогрівання тіста. Шари, що прилягають ближче до скоринки, мають температуру незначно вищу, ніж центральні. Таким чином, в тісті-хлібі виникає температурний градієнт, що призводить до виникнення спрямованого від зовнішніх шарів до центральних теплового потоку [4, 5].

Процес випаровування характеризується виділенням вільної та зв'язаної вологи. Воду в різних полімерних і біополімерних системах, а також і в харчових продуктах, можна розділити на вільну, яка замерзає за температури 0 °С та не впливає на біополімерні поверхні, слабо зв'язану воду, яка замерзає нижче звичайної точки замерзання та сильно зв'язану воду. Безпосередньо біля полярної або двополусної області макромолекули дипольна молекула води має певну середню орієнтацію і, отже, меншу потенціальну енергію. Поверхня полімерних молекул впливає на енергію і орієнтацію сусідніх молекул води [6].

Відповідно до першого наслідку закону Рауля поведінка температури кипіння буде протилежною: зв'язана вода буде кипіти за вищої температури, ніж 100 °С за стандартного тиску. Кількість води в хлібній м'якушці може змінитися внаслідок різних хімічних взаємодій у системі (водневих зв'язків, ретроградації крохмалю і склоподібної / каучукової рівноваги) [5]. Також спостерігаються втрати маси тістових заготовок внаслідок випаровування частини води і випаровування деяких продуктів бродіння. Основною причиною зменшення маси тіста-хліба внаслідок випічки є випаровування вологи під час утворення скоринки. Відносно несуттєво (до 5–8%) упік обумовлений видаленням з тістової заготовки діоксиду вуглецю, летких кислот та інших легких речовин.

Втрати маси для різних видів хлібних виробів знаходяться в межах 6–14% і залежать від форми і маси тістової заготовки, а також від способу випічки виробів (у формах або на поду). Менша маса виробів спричиняє збільшення втрати маси за інших однакових умов, так як процес втрати маси відбувається здебільшого внаслідок зневоднення скоринки, а питомий вміст скоринки у дрібноштучних виробів більший, ніж у виробів більшої маси. Наприклад, у булки круглої форми масою 0,05 кг частка скоринки становить приблизно 40 %, а втрата маси ~ 11,9 %. Булка тієї ж форми масою 0,5 кг містить 22,5 % скоринки, а втрата маси – 7,8 % [3].

Таким чином, можна припустити, що внаслідок складних фізико-хімічних процесів під час термообробки тістової заготовки хлібного виробу, здатності екстракту взаємодіяти із білковими сполуками, втрата маси має корелювати із введеною добавкою екстракту та характеризувати здатність зразка тіста утримувати вологу. Нами запропоновано використати методику термогравіметричного аналізу втрати маси в процесі випікання хліба пшеничного з додаванням екстракту шипшини для перевірки зазначеного вище припущення.

Особливість запропонованої методики термогравіметричного дослідження полягала у *in situ* спостереженні за втратою маси в ізотермічному режимі на відміну від стандартних підходів, які потребують поєднання зважування із послідовним перериванням температурного режиму, витримкою в ексікаторі та нарешті зважуванням зразка [7]. Також було використано торсійні терези, які уможливили проводити зважування з високою точністю до 0,1 % мас.. Передбачений конструкцією печі вертикальний отвір, було використано для проведення експерименту: за допомогою спеціальним чином сконструйованої шальки - гачка на подовженому металевому термостабільному дроті, відбувалося занурення у зону нагріву. Перевагою такого підходу були експресність та точність. Таким чином, у реальному часі досліджувались особливості кінетики процесу в ізотермічних умовах.

Термогравіметричний аналіз впливу екстрактивних речовин на кінетику фізико-хімічних перетворень у процесі випікання хліба

Термогравіметричний аналіз, в тому числі запропонована методика нагрівання зразка тіста з добавками екстракту шипшини в ізотермічних умовах, дозволяє визначати фізико-хімічні параметри багатьох процесів. На рис. 1 наведено три експериментальні криві втрати маси, зареєстровані в ізотермічному режимі за температури 200 °С для зразків тіста, виготовлених за стандартною технологією. Аналіз вигляду графіка демонструє три типові ділянки, які позначено на рисунку римськими цифрами. Втрата маси першої ділянки є максимальною — 30 % мас., а для третьої ділянки є практично відсутньою.

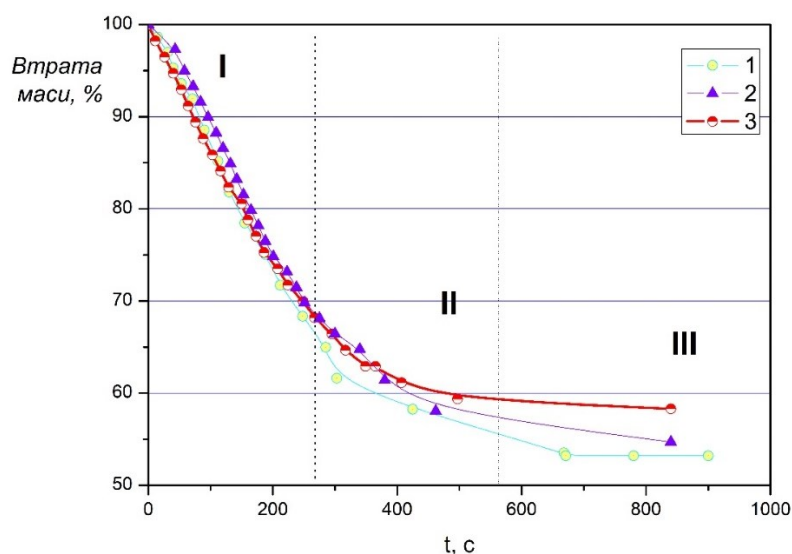


Рис. 1. Термогравіметричні криві втрати маси в ізотермічному режимі за температури 200 °С для серії зразків тіста, виготовлених за стандартною технологією

На рис. 2 наведено криві втрати маси виготовлених за стандартною технологією (контроль) та з добавкою екстракту шипшини (2%, 3%, 6% мас.) зразків тіста в ізотермічному режимі за температури 200 °С.

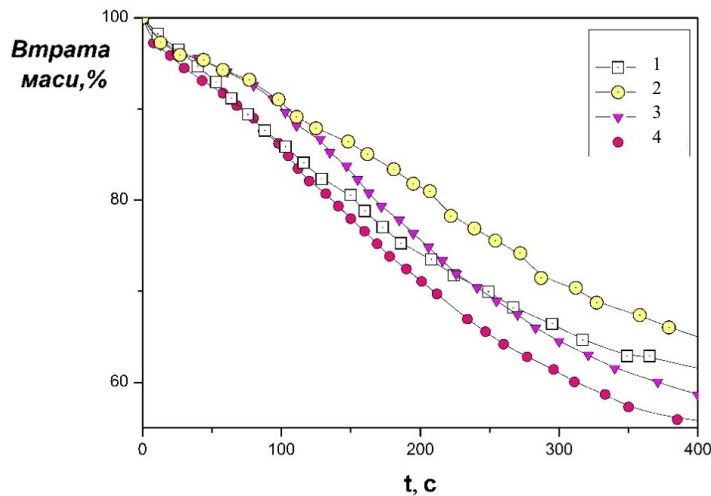


Рис. 2. Втрати маси в ізотермічному режимі за $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ для зразків тіста, виготовлених за стандартною технологією (1 - контроль, 0%) та з добавкою екстракту шипшини: 2%; 3%; 6% мас. (криві 2–4, відповідно)

Можна помітити нелінійний вплив добавки екстракту на втрату маси зразками на рис. 2. Поведінка зразка з 2% мас. вмістом екстракту має аномальний характер з двома періодами сповільненої втрати маси в проміжку часу 50–150 с (I) та після 150 с (II). Перший сповільнений період властивий також зразку з 3-відсотковою добавкою. Для 6% добавки обидва ефекти відсутні.

Розраховували ступінь перетворення (α) за формулою (1):

$$\alpha(t) = \frac{\Delta m(t)}{\Delta m(\text{заг.})} \cdot 100, \% \quad (1)$$

де $\Delta m(t)$ — втрата маси зразка у момент часу t ; $\Delta m(\text{заг.})$ — загальна втрата маси зразком у процесі випікання. Відповідно до законів формальної кінетики для реакції розкладу, вигляд залежності має наближатися до кінетики реакцій першого порядку. Нами в даній роботі проаналізовано залежності логарифма ступеня перетворення від часу (рис. 3).

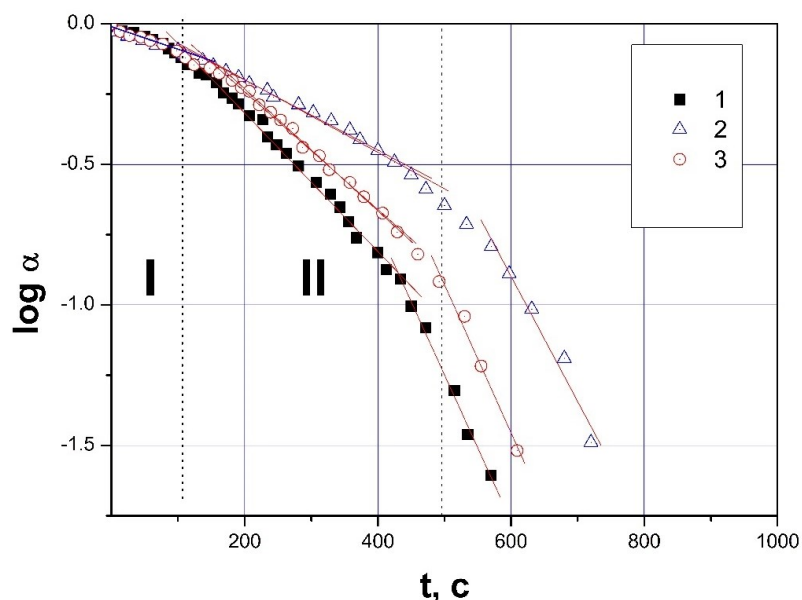


Рис. 3. Термогравіметричні криві залежності логарифма ступеня перетворення від часу в ізотермічному режимі за температури 200 °С для зразка з 2% мас. вмістом екстракту шипшини (показано результати трьох паралельних дослідів)

Виявилося, що такі кінетичні залежності характеризується декількома прямолінійними ділянками. Це свідчить про складний характер процесу термообробки. Перша, швидкоплинна, іноді відсутня початкова ділянка (будемо називати її «нульовою» у тексті), вочевидь визначає втрату летких, газофазних продуктів, яким може бути CO_2 . Вона виражена найбільше у зразків з 2% та 3% мас. екстракту шипшини. Наступна

ділянка має відповідати втратам внаслідок видалення води, вміст якої у сировині не перевищує 40% мас. Третя ділянка за нашими спостереженнями збігається з процесами меланоїдиноутворення у зразку. Під меланоїдиноутворенням (МУ) розуміють взаємодію вихідних відновлюючих цукрів (моносахариди і дисахариди) і таких, які утворюються під час гідролізу більш складних вуглеводів [8]. За реакцією Майяра [9] утворюються темнозабарвлені продукти — меланоїдини. Реакція Майяра (РМ) вважається основним хімічним процесом, що відбувається під час випічки. Реакція відбувається між вільною аміногрупою лізину та/або іншими амінокислотами та карбонільними групами відновлюючих цукрів, таких як глюкоза та мальтоза [10]. Процес карамелізації вимагає більш інтенсивних умов, таких як температура більша за 120 °С, $3 < \text{pH} < 9$ і низька концентрація води. Під час випікання крохмаль і сахароза можуть гідролізуватися з утворенням відновлюючих цукрів, які можуть брати участь в обох реакціях. Таким чином, РМ і карамелізація можуть відбуватися одночасно. Під час випікання хліба вміст води на поверхні буханки швидко зменшується, забезпечуючи оптимальні умови для утворення продуктів РМ та інтенсивного коричневого кольору [11].

Процес МУ також супроводжується втратами маси внаслідок виділення молекул води та CO_2 . Він є складним як з мономолекулярними, так й з біомолекулярними стадіями, однак експериментально визначений порядок реакції наближається до першого у досліджуваному діапазоні температур та часу. Це дозволило нам встановити особливості впливу добавки екстракту шипшини на кінетику процесу запікання.

Таким чином, нами інтерпретовані отримані кінетичні криві як процеси першого порядку у всьому часовому інтервалі дослідження та розраховані константи швидкості відповідних ділянок за формулою (2):

$$k = \frac{1}{t} \ln \frac{100}{100 - \alpha} \quad (2)$$

Результати кінетичних досліджень зразків тіста без добавок та з 2, 3, 6% концентрацією екстракту шипшини наведено в табл. 1. Оцінка величин констант швидкості двох чітко виражених стадій процесу показує відмінності у швидкості їх перебігу. Константа другої стадії є приблизно в два рази більшою за винятком зразка 2% за температури 220 °С. Порівняння зразків показує, що константа першої стадії незначним чином зменшується, а другої збільшується за наявності 2% добавки екстракту шипшини порівняно із контрольним зразком без добавки екстракту. Можна стверджувати, що втрата маси зразка з 2% екстракту відбувається повільніше. Відповідно енергія активації має бути більшою у порівнянні з контролем.

Таблиця 1

Константи швидкості процесу випікання зразків тіста з E (%) концентрацією екстракту шипшини за температур 180, 200 °С та 220 °С для ділянок I, II напівлогарифмічної залежності $\ln \alpha - t \cdot 10^{-4}, \text{с}^{-1}$

| T, °C | 180 | | 200 | | | 220 |
|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|
| E, % мас. | 2 | 0 | 2 | 3 | 6 | 2 |
| I | 4,98±0,44 | 10,09±0,55 | 8,47±0,42 | 8,9±0,42 | 13,93±0,42 | 8,55±0,39 |
| II | 8,66±0,43 | 17,04±0,30 | 21,61±0,37 | 21,65±0,42 | 25,9±0,42 | 8,73±0,29 |

Для визначення енергії активації нами розглянута кінетика нагрівання досліджуваних зразків в ізотермічному режимі за різних температур. Із урахуванням технологічно важливих режимів було обрано 180, 200 та 220 °С. За аналогічною методикою ми одержали кінетичні залежності та аналізували їх з метою розрахунку енергії активації виявлених стадій за рівнянням Арреніуса. Для графічного визначення нами використане рівняння Арреніуса в логарифмічній формі (3):

$$\ln k = \ln A - \frac{E_A}{RT} \quad (3)$$

Узагальнені дані ізотермічних кривих втрати маси для «нульової» лінійної ділянки за різних температур (180, 200 та 220 °С) використано для оцінки енергії активації зразка з 2-відсотковою концентрацією екстракту шипшини за кутом нахилу залежності $\ln k - 1/T$ (E_A/R) = $4,75 \times 10^2 \text{ K}$. Таким чином, енергія активації дорівнює $E_A = 8,314 \text{ Дж моль}^{-1} \text{ K}^{-1} \cdot 4,75 \times 10^2 \text{ K} = 3950 \text{ Дж моль}^{-1}$. Отримана величина є меншою за 40 кДж моль⁻¹. Вона добре узгоджується з видаленням вже наявних у зразку речовин у газоподібному стані, наприклад CO_2 . Втрата маси цієї ділянки знаходиться в межах десяти відсотків за даних умов.

Вигляд кривих I та II ділянки для максимальної температури термообробки в ізотермічному режимі (220 °С) має суттєві відмінності на початковій ділянці кривих, що свідчить про зміну механізму процесу. Енергії активації для них оцінено за значеннями констант швидкості, одержаними за декількох температур і аналітичною формулою (4), табл. 2:

$$E_A = \frac{RT_1 T_2 \ln \frac{k_2}{k_1}}{T_2 - T_1} \quad (4)$$

Враховуючи зміну механізму процесу за максимальної температури, обрано температури 180 та 200 °С. Результат для ділянки I становить 42,3 кДж/моль, що незначно перевищує типові значення енергії активації процесів фізичної адсорбції. В даному випадку основним процесом є фізична десорбція води з деяким внеском хімічних процесів, зазначених вище. Додатковим впливом водневих зв'язків та конденсованим станом води у зразку можна пояснити збільшення енергії активації приблизно в десять разів порівняно з попередньою ділянкою.

Таблиця 2

Результати кінетичних досліджень за температур 180, 200 °С для зразків з 2% мас. концентрацією екстракту шипшини

| Т, °С | Ділянка 1 | | |
|-----------|-------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| | $1/T \cdot 10^{-4}$, К | $k \cdot 10^{-4}$, с ⁻¹ | E_a , кДж·моль ⁻¹ |
| 180 | 22,08 | 0,00061 | 42,3 |
| 200 | 20,28 | 0,000847 | |
| Ділянка 2 | | | |
| 180 | 22,08 | 0,000866 | 81,4 |
| 200 | 21,14 | 0,002161 | |

Для ділянки II одержане значення енергії активації 81,41 кДж·моль⁻¹ може відповідати хімічним процесам, в тому числі десорбції хімічно зв'язаної води. Остання гіпотеза добре узгоджується з 36% мас. вихідного вмісту води за рецептурою. Видно, що енергія активації ділянки II приблизно у два рази більша, ніж ділянки I, тому внесок досить великої кількості хімічних процесів є також можливим. Наприклад, результати оцінок енергії активації (кДж/моль) деяких типових для приготування харчових продуктів хімічних процесів наведено нижче [12]:

| | |
|-------------------------------|-----------|
| реакції гідролізу | 60 — 120 |
| окиснення ліпідів | 40 — 100 |
| підсмажування | 100 — 200 |
| деструкція вітамінів | 70 — 150 |
| денатурація/коагуляція білків | 200 — 500 |
| ферментативні реакції | 100 — 200 |

Згадаємо також літературні дані енергії активації інших процесів, що супроводжують випікання хліба в описаних у роботі умовах. Енергія активації втрати аміногрупи в білково-глюкозній суміші становила приблизно 100 кДж/моль, а в нагрітому окремо білку, була більшою [13]. Визначена величина уявної енергії активації реакції Майяра змінюється в діапазоні: 100–160 кДж/моль [14], 90–150 кДж/моль [15]. Так звані ранні стадії цієї реакції характеризується значеннями 90–100 кДж/моль [13].

Процеси деструкції вітамінного комплексу рутину з екстракту шипшини ймовірно за узагальненими даними [12], однак не є визначальними щодо кінетики процесу. Ділянка II зустрічається незалежно від наявності екстракту.

Зразок пшеничного хліба з 2% екстракту втрачає масу найбільш повільно, й таким чином найбільше утримує вологу. Втрата маси у порівнянні з контролем є меншою в діапазоні 5 - 10 %, залежно від ступеня перетворення

(рис. 2). Щодо двох інших зразків з вмістом екстракту шипшини 3% та 6% мас., то втрата маси у порівнянні з контролем в них є переважно більшою на 3 - 6%. Причому зразок з 3% добавкою екстракту на першій стадії має дуже схожу поведінку зі зразком з 2% екстракту.

Екстремальна залежність втрати маси, на нашу думку, пов'язана зі складним механізмом впливу вітамінного комплексу екстракту шипшини на процеси окиснення та структуроутворення зразків. Зменшення втрат маси можна пояснити покращеною здатністю біокоолідів утримувати вологу під впливом антиоксидантної дії введеного екстракту, наприклад в процесі клейстеризації крохмалю за підвищеної температури, що забезпечує утворення сухої еластичної м'якушки хліба [3].

Розглянемо роль основних компонентів вітамінного комплексу шипшини, наведену в літературних джерелах. Аскорбінова кислота як покращувач окисної дії, застосовується у переробці борошна. Хімізм дії аскорбінової кислоти заснований на утворенні додаткових дисульфідних зв'язків (-S = S-) у структурі молекули білка шляхом окислення суміжних сульфгідридних груп [15]. Кількість дисульфідних зв'язків, утворених в структурі глютену, має істотне значення в збереженні вуглекислого газу, що утворився в процесі ферментації, і призводить до збільшення об'єму і поліпшення текстури. Внаслідок термічної нестабільності аскорбінова кислота відсутня у готовому продукті.

Завдяки наявності в екстракті шипшини флавоноїду рутину, якому притаманна Р-вітамінна активність, готовий хлібопродукт виявляє антиоксидантну дію. Зміни антиоксидантної активності в процесі приготування хліба відбуваються послідовно внаслідок виконання трьох основних операцій: замішування або формування тіста, бродіння і випікання. Показано [15], що антиоксидантна активність та рівні вільних фенолоокислот знижуються в результаті змішування, але відновлюються після бродіння та випікання. Зв'язки

з антиоксидантами під час бродіння гідролізуються, вивільняючи антиоксиданти. Відновлення вмісту фенолокислоти після випічки за даними [15] становило 74–80%. Зазначимо також, що кислотність середовища може змінюватися суттєво внаслідок збільшення концентрації екстракту шипшини більше 3%.

Порівнявши властивості основних компонентів екстракту шипшини — аскорбінової кислоти та рутину, можна пояснити екстремальну залежність від вмісту екстракту на рис. 2 різним впливом цих компонентів. Аскорбінова кислота діє виключно до етапу нагрівання, однак рутин частково зберігає свою антиоксидантну активність після термообробки. Отже, він може бути відповідальним за збільшення втрати маси за концентрації екстракту 3, 6% мас.

Отже, термогравіметричне дослідження показало складний характер перетворень за високих температур в процесі випікання хліба за температури 200 °С. З точки зору хімічної кінетики можна виділити не менше двох стадій процесу в напівлогарифмічних координатах « $\log a - t$ ». Показано, що залежно від концентрації доданого екстракту, закономірності втрати маси є різними. Виявлено оптимальну концентрацію 2% з мінімальними втратами маси, тобто мінімальним впливом на структуроутворення та покращеним зберіганням вуглекислого газу та вологи, що призводить до покращення споживчих властивостей продукту.

Аналіз констант швидкості процесу показує, що стадія лінійної ділянки 1 має енергію активації деструкції 42,3 кДж/моль, що є порівняним із втратою фізично сорбованої води. Вочевидь зразок із 2% екстракту порівняно з контрольним зразком без добавок має незначно більшу енергію активації цієї стадії. Наступна ділянка 2, яка характеризується суттєво більшою енергією активації 81,4 кДж/моль, пов'язана із хімічним процесом.

Висновки

Встановлено переваги використання складових екстракту шипшини у хлібопекарському виробництві для покращення якості та харчової цінності хлібобулочних виробів, надання їм протекторних властивостей, запобігання мікробіологічному псуванню, інтенсифікації процесу дозрівання тіста та коригування хлібопекарських властивостей борошна.

Властивості хлібопродукту із введеним екстрактом шипшини можна контролювати термогравіметричним методом. Показано можливий чинник впливу екстракту на такі властивості, підтверджено оптимальність обраної концентрації 2% на підставі оптимальних вологоутримуючих властивостей. Зразок пшеничного хліба з вмістом екстракту шипшини 2% краще утримує вологу, має мінімальний вплив на структуроутворення, що покращує споживчі властивості продукту. Втрата маси у порівнянні з контролем є меншою в діапазоні 5–10 %, залежно від ступеня перетворення.

Порівняння термостабільності та інших властивостей основних компонентів екстракту шипшини — аскорбінової кислоти та рутину пояснює екстремальну залежність втрати маси від вмісту екстракту завдяки різному впливу цих компонентів. Аскорбінова кислота діє виключно до етапу нагрівання, однак на порядок більший за вмістом в екстракті рутин частково зберігає свою антиоксидантну активність після термообробки і може відповідати за збільшення втрати маси з концентрацією екстракту 3, 6% мас.

Показано термогравіметрично складний характер перетворень за високих температур в процесі випікання хліба за температури 200 °С. З точки зору хімічної кінетики можна виділити не менше трьох стадій процесу в напівлогарифмічних координатах «ступінь перетворення — час». Оцінено за рівнянням Арреніуса енергії активації стадій процесу для зразка із 2% мас. екстракту: 3,95; 42,3; 81,4 кДж/моль. Перша стадія пов'язана із видаленням вже наявних у зразку речовин у газоподібному стані. Для наступної ділянки результат не перевищує енергію активації процесів фізичної десорбції, в тому числі води. Для останньої одержане значення 81,41 кДж·моль⁻¹ може відповідати складним хімічним процесам, включаючи видалення хімічно сорбованої води.

Література

1. Клименко А. В., Таволжан А. А., Бондаренко С. П. Вилучення та аналіз вітамінного комплексу з плодів шипшини *Rosa Cinnamomea* L. : матеріали 81 Міжнар. наук. конф. молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті», (Київ, 23–24 квітня 2015 р. Ч. 2) / Нац. ун-т харч. технологій. К. : Нац. ун-т харч. технологій, 2015. 530 с.
2. Зернові, бобові та продукти їх помелу. Відбір проб (ISO13690:2003) : ДСТУ ISO13690:2003. [Чинний від 2005-07-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2003. 18 с. (Національні стандарти України).
3. Дробот В. І. Технологія хлібопекарського виробництва : підруч. [для студ. вищ. навч. закл.]. Київ : Логос, 2002. 368 с.
4. Технологічне обладнання хлібопекарських і макаронних виробництв : підруч. [для студ. вищ. навч. закл.] / [Лісовенко О. Т., Руденко-Грицюк О. А., Литовченко І. М.]. Київ : Наукова думка, 2000. 282 с.
5. Silva T. H. L., Monteiro R. L., Salvador A. A., Laurindo J. B., Carciofi B. A. M. Kinetics of bread physical properties in baking depending on actual finely controlled temperature. *Food Control*. 2022. Vol. 137. P. 10889.
6. Wolfe J., Bryant G., Koster K. What is “unfreezable water”, how unfreezable is it and how much is there? *CryoLetters*. 2002. № 23. P. 157–166.
7. Вироби хлібобулочні. Методи визначення фізико-хімічних показників. Зі зміною та поправкою :

ДСТУ 7045:2009. [Чинний від 2010-01-01]. К. : Держспоживстандарт України, 2009. 33 с. (Національні стандарти України).

8. Mottram D. S., Wedzicha B. L., Dodson A. T. Acrylamide is formed in the Maillard reaction. *Nature*. 2002. № 10. P. 448–449.
9. Lund M. N., Ray C. A. Control of Maillard Reactions in Foods: Strategies and Chemical Mechanisms. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2017. № 65 (23). P. 4537–4552.
10. Camire M., Camire A., Krumburgh K. Chemical and nutritional changes in foods during extrusion. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*. 1990. № 29(1). P. 35–57.
11. Capuano E., Ferrigno A., Acampa I., Ait-Ameur L., Fogliano V. Characterization of the Maillard reaction in bread crisps. *European Food Research and Technology*. 2008. Vol. 228. P. 311–319.
12. Mary D., Earle R. L. *Fundamentals of Food Reaction Technology*. Royal Society of Chemistry. 2003. 187 p.
13. Ajandouz E. H., Desseaux V., Tazi S., Puigserver A. Effects of temperature and pH on the kinetics of caramelisation, protein cross-linking and Maillard reactions in aqueous model systems. *Food Chemistry*. 2008. Vol. 107. № 3. P. 1244–1252.
14. Morales F. J., Van Boekel M. A. A study on advanced Maillard reaction in heated casein/sugar solutions: colour formation. *International Dairy Journal*. 1998. Vol. 8. № 10. P. 907–915.
15. Dziki D., Różyło R., Gawlik-Dziki U., Świeca M. Current trends in the enhancement of antioxidant activity of wheat bread by the addition of plant materials rich in phenolic compounds. *Trends in Food Science & Technology*. 2014. Vol. 40. Issue 1. P. 48–61.

References

1. Klymenko A. V., Tavalzhan A. A., Bondarenko S. P. Vyluchennia ta analiz vitaminnoho kompleksu z plodiv shypshyny Rosa Cinnamomea L. : materialy 81 Mizhnar. nauk. konf. molodykh uchenykh, aspirantiv i studentiv «Naukovi zdotky molodi – vyrishenniu problem kharchuvannia liudstva u KhKhI stolitti», (Kyiv, 23–24 kvitnia 2015 r. Ch. 2) / Nats. un-t kharch. tekhnolohii. K. : Nats. un-t kharch. tekhnolohii, 2015. 530 s.
2. Zernovi, bobovi ta produkty yikh pomelu. Vidbir prob (ISO13690:2003) : DSTU ISO13690:2003. [Chynnyi vid 2005-07-01]. Kyiv : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2003. 18 s. (Natsionalni standarty Ukrainy).
3. Drobot V. I. Tekhnolohiia khlibopekarskoho vyrobnytstva : pidruch. [dlia stud. vyshch. navch. zakl.]. Kyiv : Lohos, 2002. 368 s.
4. Tekhnolohichne obladnannia khlibopekarskykh i makaronnykh vyrobnytstv : pidruch. [dlia stud. vyshch. navch. zakl.] / [Lisovenko O. T., Rudenko-Hrytsiuk O. A., Lytovchenko I. M.]. Kyiv : Naukova dumka, 2000. 282 s.
5. Silva T. H. L., Monteiro R. L., Salvador A. A., Laurindo J. B., Carciofi B. A. M. Kinetics of bread physical properties in baking depending on actual finely controlled temperature. *Food Control*. 2022. Vol. 137. P. 10889.
6. Wolfe J., Bryant G., Koster K. What is “unfreezable water, how unfreezable is it and how much is there? *CryoLetters*. 2002. № 23. P. 157–166.
7. Vyroby khlibobulochni. Metody vyznachennia fizyko-khimichnykh pokaznykiv. Zi zminoiu ta popravkoii : DSTU 7045:2009. [Chynnyi vid 2010-01-01]. K. : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2009. 33 s. (Natsionalni standarty Ukrainy).
8. Mottram D. S., Wedzicha B. L., Dodson A. T. Acrylamide is formed in the Maillard reaction. *Nature*. 2002. № 10. P. 448–449.
9. Lund M. N., Ray C. A. Control of Maillard Reactions in Foods: Strategies and Chemical Mechanisms. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2017. № 65 (23). P. 4537–4552.
10. Camire M., Camire A., Krumburgh K. Chemical and nutritional changes in foods during extrusion. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*. 1990. № 29(1). P. 35–57.
11. Capuano E., Ferrigno A., Acampa I., Ait-Ameur L., Fogliano V. Characterization of the Maillard reaction in bread crisps. *European Food Research and Technology*. 2008. Vol. 228. P. 311–319.
12. Mary D., Earle R. L. *Fundamentals of Food Reaction Technology*. Royal Society of Chemistry. 2003. 187 p.
13. Ajandouz E. H., Desseaux V., Tazi S., Puigserver A. Effects of temperature and pH on the kinetics of caramelisation, protein cross-linking and Maillard reactions in aqueous model systems. *Food Chemistry*. 2008. Vol. 107. № 3. P. 1244–1252.
14. Morales F. J., Van Boekel M. A. A study on advanced Maillard reaction in heated casein/sugar solutions: colour formation. *International Dairy Journal*. 1998. Vol. 8. № 10. P. 907–915.
15. Dziki D., Różyło R., Gawlik-Dziki U., Świeca M. Current trends in the enhancement of antioxidant activity of wheat bread by the addition of plant materials rich in phenolic compounds. *Trends in Food Science & Technology*. 2014. Vol. 40. Issue 1. P. 48–61.

КОСТИРКО ВАСИЛЬ

Львівський торговельно-економічний університет

ORCID ID: [0000-0002-6366-8695](https://orcid.org/0000-0002-6366-8695)e-mail: vkostyrko@lute.lviv.ua**АНИЛОВСЬКА ГАННА**

Львівський торговельно-економічний університет

ORCID ID: [0000-0002-0154-1584](https://orcid.org/0000-0002-0154-1584)e-mail: hjaa5514@gmail.com**ПЛЕША ВАСИЛЬ**

Львівський торговельно-економічний університет

ORCID ID: [0000-0001-5321-9602](https://orcid.org/0000-0001-5321-9602)e-mail: plesha_v@i.ua

ПРОЄКТУВАННЯ БІБЛІОТЕКИ ДЛЯ СПРОЦЕННЯ УМОВ ВЕРИФІКАЦІЇ ПРОГРАМ

Анотація програми інваріантами, заданими в певних точках програми, зводить проблему її верифікації до перевірки істинності ряду логічних виразів. Однак, проблема виводимості є алгоритмічно нерозв'язною навіть для достатньо простих предметних областей, таких як елементарна арифметика. Тому важлива розробка комп'ютерних засобів, які можуть спростити задачу верифікації програм. Особливо важлива наявність таких систем для навчання програмуванню. До них відносяться технологія символного виконання програм та інструменти для еквівалентних перетворень та спрощення символних виразів. Залишаються актуальними дослідження формальних методів верифікації програм. У статті описана побудована на базі бібліотеки ExprLib технологія автоматичного еквівалентного перетворення арифметичних та логічних виразів до найпростішого стандартизованого вигляду. Досліджено побудовані перетворення. Встановлено, що вони мають властивість ідемпотентності, а еквівалентні вирази мають єдине нормалізоване представлення. Бібліотека написана алгоритмічною мовою Python з використанням рекурсії на структурах даних типу дерево. Бібліотека реалізована класами та функціями мови Python, які представляють деревовидні структури списками, множинами та словниками мови Python. Побудовано класи для представлення дерев, одночленів та поліномів, відношень та їх кон'юнкцій, а також імплікацій. Для спрощення імплікацій застосовується правило редукації кон'юнкцій. Бібліотека застосовується в системі VerPro символного виконання та верифікації програм на мові Python. Для перевірки тотожності істинності імплікацій, які представляють умови верифікації, використовуються солвери системи доведення теорем Z3. Система VerPro є експериментальною і зараз обмежується програмами цілочисельної арифметики. Наявність власної бібліотеки дозволяє розширювати область застосування системи, яка розвивається в напрямку генерації інваріантів та розширення областей охоплених нею програм.

Ключові слова: бібліотека функцій і класів; мова Python; еквівалентні перетворення виразів; умова коректності; дерево виразу; верифікація програм.

KOSTYRKO VASYL, ANILOVSKA HANNA, PLESZA VASYL

Lviv University of Trade and Economics

DESIGNING A LIBRARY TO SIMPLIFY PROGRAM VERIFICATION CONDITIONS

The ExprLib library described for the equivalent transformation of arithmetic and logical expressions in order to reduce them to the simplest form based on the classical relations of integer arithmetic and mathematical logic. Annotating the program with invariants specified at certain points of the program reduces the problem of program verification to checking the truth of a set of logical expressions. However, the problem of derivability is algorithmically unsolvable even for sufficiently simple subject area, such as elementary arithmetic. Therefore, it is important to develop computer tools that can simplify the task of program verification. It is especially important to have such systems for programming teaching. These include the technology of symbolic execution of programs and tools for equivalent transformation and simplification of symbolic expressions. Formal methods of program verification are reflected in many modern studies. The article describes the technology of automatic equivalent conversion the arithmetic and logical expressions to the simplest standardized form built on the basis of the ExprLib library. These transformations have the property of idempotency, and the equivalent expressions have a single normalized representation. The library is written in the Python algorithmic language using recursion on tree-type data structures. The library is implemented by classes and functions built in Python using lists, sets, and dictionaries. These classes represent trees, monomials and polynomials, relations and their conjunctions, as well as implications. To simplify the implications, the reduction rule of conjunctions is used. The ExprLib is used in the VerPro system for symbolic execution and Python programs verification. To verify the identical truth of the implications, which represent the verification conditions, solvers of the Z3 theorem proving system are used. The VerPro system is experimental and currently limited to integer arithmetic applications. Having the own library allows us to expand the scope of the system. The VerPro system is developing in the direction of invariant generating and expanding the program area.

Keywords: library of functions and classes; Python language; equivalent transformations of expressions; correctness condition; expression tree; program verification.

Постановка проблеми

Стаття присвячена проблематиці формальної верифікації програм, анотованих передумовою, післяумовою та інваріантами, асоційованими з деякими точками програми – так, щоб у кожному циклі був принаймні один інваріант. Анотація програми інваріантами, заданими в певних точках програми, як встановив Флойд [2], зводить проблему її верифікації до перевірки істинності ряду логічних виразів. Однак, проблема виводу логічних формул є алгоритмічно нерозв'язною навіть для достатньо простих предметних

областей, в тому числі, для елементарної арифметики. Тому проблема верифікації програм залишається актуальною і все ще притягує дослідників. Об'єктом дослідження виступають анотовані програми, а предмет дослідження – бібліотека програм та програмний застосунок, які реалізують верифікацію.

Враховуючи це, в роботі було визначено такі основні проблеми дослідження: побудувати внутрішнє представлення арифметичних виразів – одночленів та поліномів, яке б гарантувало єдине і найпростіше їх зовнішнє представлення; побудувати внутрішнє представлення логічних виразів – відношень та їх кон'юнкцій з тими ж властивостями; побудувати аналогічне внутрішнє представлення умов верифікації у вигляді імплікації кон'юнкцій; реалізувати програмні функції для спрощення виразів з застосуванням співвідношень асоціативності, комутативності та дистрибутивності арифметичних та логічних операцій, а також операцій з арифметичними та логічними константами.

Аналіз останніх джерел

Еквівалентні перетворення арифметичних та логічних виразів реалізуються цілим рядом програмних пакетів: Mathematica [7], Maple, MATLAB, REDUCE. Мова Python також має бібліотеку символічних перетворень SymPy [6].

Однак, ці системи орієнтовані на застосування математиками в ролі специфічних формульних калькуляторів. Тому для реалізації системи VerPro нам прийшлося створити власний програмний інтерфейс (API), який базується на бібліотеці ExprLib.

Бібліотека ExprLib написана мовою Python і складається з функцій та класів, об'єднаних в такі три пакети:

treelib – пакет для представлення арифметичних та логічних виразів деревовидними структурами;

arilib – пакет для еквівалентного перетворення арифметичних виразів;

logilib – пакет для еквівалентного перетворення логічних виразів.

Ціллю перетворення арифметичних та логічних виразів в системі VerPro є приведення їх до більш простого (і бажано уніфікованого) вигляду за допомогою співвідношень асоціативності, комутативності, дистрибутивності, а також класичних співвідношень з області арифметики та математичної логіки.

При всій очевидності та тривіальності деяких фактів, співвідношень і властивостей арифметичних виразів під час реалізації бібліотеки їх прийшлося ретельно проаналізувати та формалізувати [7, 9]. Такі передумови появи бібліотеки ExprLib.

Багатократно більш складна та універсальна система верифікації програм Isabelle [13] вимагає значної роботи з освоєння системи та підготовки програм та їх анотацій для використання системи. Вона технологічно складна і тому використовується в унікальних науково-дослідних проектах.

Мета даної роботи – описати принципи побудови бібліотек для автоматичного спрощення виразів з метою полегшення перевірки умов верифікації програм.

Виклад основного матеріалу

Перетворення арифметичних виразів. В арифметичних виразах будемо дозволяти використання простих змінних, знаків бінарних операцій + (додавання), – (віднімання) та * (множення), унарних операцій + (плюс) та – (мінус), дужок та цілих чисел.

Загальноприйняте текстове представлення арифметичного виразу є інфіксным і для визначення порядку виконання операцій містить дужки. Правило старшинства операцій дозволяє зменшити кількість дужок, що сприяє спрощенню виразів.

Однак, правила розстановки дужок в інфіксному представленні виразів є неоднозначними. Наприклад, $((x)) = (x) = x$.

Асоціативність операцій додає такої неоднозначності, наприклад,

$$(x * y) * z = x * (y * z) = x * y * z.$$

Всі вирази, які з точністю до асоціативності еквівалентні заданому виразу, назовемо асоціативно-еквівалентними. Серед асоціативно-еквівалентних можна виділити два представлення заданого виразу з мінімальною кількістю дужок, які однозначно визначають порядок виконання операцій: з використанням старшинства операцій і без нього.

Наприклад, наступні вирази є асоціативно-еквівалентними і представляють два описані представлення:

$$((a * b) * c) + (c * a) = a * b * c + c * a.$$

Оскільки друге представлення містить меншу кількість символів, то воно людиною сприймається як простіше.

Інфіксне представлення виразу назовемо нормалізованим, якщо в ньому використовується мінімально можлива кількість дужок з огляду на старшинство та асоціативність операцій.

Стверджується, що кожен арифметичний вираз має єдине нормалізоване представлення, тому можна побудувати функцію нормалізації виразів N . Неважко переконатися, що функція N є ідемпотентною, тобто, для будь-якого виразу e в інфіксному представленні виконується співвідношення

$$N(N(e)) = N(e).$$

Бібліотека ExprLib реалізує функцію T перетворення арифметичних виразів з інфіксного (дужкового) представлення в постфіксне (бездужкове), а також функцію зворотного перетворення T^* , які будемо називати далі прямим та оберненим перетвореннями.

Перетворення T^* є оберненим до T в тому сенсі, що для будь-якого інфіксного виразу e

послідовне застосування до нього прямого та оберненого перетворень нормалізує цей вираз:

$$T^*(T(e)) = N(e). \quad (1)$$

Зрозуміло, що на множині нормалізованих виразів перетворення T^* буде оберненим до T в загальноприйнятому смислі: для будь-якого нормалізованого виразу E :

$$T^*(T(E)) = E. \quad (2)$$

Зауважимо, що пряме та обернене перетворення виразів використовують лише відношення асоціативності, але не застосовують відношень комутативності, дистрибутивності чи якихось інших. Тому ці перетворення можуть лише усувати зайві дужки та змінювати порядок виконання деяких операцій.

Відношення дистрибутивності дозволяє арифметичний вираз перетворити до вигляду полінома від багатьох змінних. Такий поліном будемо представляти у вигляді сум (різниць) одночленів, кожен з яких – це добуток довільної кількості цілих чисел та змінних.

Властивість комутативності й асоціативності операцій множення та додавання дозволяє побудувати однозначні представлення одночленів та поліномів, які назвемо впорядкованими.

Одночлен назвемо впорядкованим, якщо він має такі властивості:

Якщо одночлен має числовий множник, тоді він є першим і єдиним числовим множником; всі числові множники одночлена пересуваються на початок одночлена і перемножуються;

Якщо одночлен має числовий множник, який рівний 1, і нечисловий множник, тоді він опускається згідно співвідношення $1 * x = x$;

Унарні операції застосовуються лише до коефіцієнта, змінюючи його знак відповідно до таких відношень:

$$-n = (-n), \quad +n = n,$$

де n – довільне ціле число, а $(-n)$ – число n з протилежним знаком;

Нечислові множники одночлена впорядковані за алфавітом.

Стверджується, що впорядковане представлення одночлена – єдине. Символом M позначимо перетворення, яке для будь-якого одночлена видає його впорядковане представлення.

Якщо одночлен не вироджується в число і має числовий множник, тоді останній назвемо коефіцієнтом одночлена, а добуток інших множників – його основою.

Одночлени з однаковими основами назвемо подібними. Зведення подібних одночленів задається співвідношеннями

$$n * x + m * x = (n + m) * x, \quad n + m = (n + m),$$

де n, m – довільні цілі числа, $(n + m)$ – їх сума, а x – довільна основа одночлена.

Поліном назвемо впорядкованим якщо:

Всі його одночлени є впорядкованими;

Серед одночленів немає подібних; до подібних одночленів застосовується зведення;

Серед коефіцієнтів одночленів немає нулів; тобто, до одночлена з нульовим коефіцієнтом та довільною основою x застосовується співвідношення $0 * x = 0$;

Число може бути лише першим одночленом полінома; всі числові одночлени підсумовуються;

Це число не може бути нулем (хіба що весь поліном вироджується в 0); тобто, застосовується співвідношення $0 + x = x$;

Одночлени впорядковані за їх основами в алфавітному порядку;

Всі коефіцієнти одночленів можуть бути лише додатними; від'ємний коефіцієнт першого одночлена полінома перетворюється в унарну операцію – (мінус), яка застосовується до всього одночлена; від'ємний коефіцієнт наступних одночленів перетворюються на бінарну операцію віднімання, яка застосовується до попереднього одночлена полінома та поточного.

Стверджується, що описане впорядковане представлення полінома – єдине. Символом P позначимо перетворення впорядкування полінома. Очевидно, перетворення M та P також є ідемпотентними.

Бібліотека ExprLib надає реалізацію перетворень T , T^* , M та P . Поліном, побудований перетвореннями T , M та P , назвемо стандартизованим.

Представлення виразів деревами. Для обробки арифметичних виразів бібліотека ExprLib представляє їх деревами. Дерево арифметичного виразу визначимо за допомогою рекурсивного класу Tree з атрибутом op і двома орієнтованими асоціаціями – лівою lt та правою rt (рис. 1).

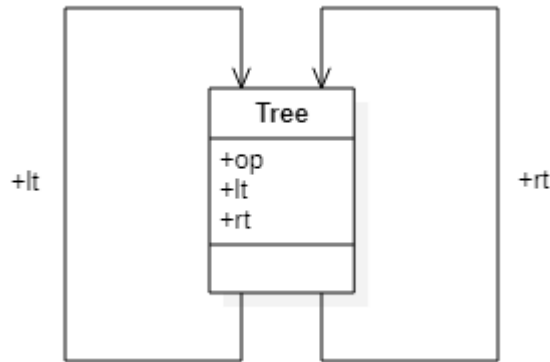


Рис. 1. Діаграма класу Tree / Class diagram of a tree

Об'єкти класу *Tree* задають вузли дерева виразу – його корінь, внутрішні вузли та листки, а атрибут *op* – текстове представлення операцій, змінних та чисел виразу. Асоціації *lt* та *rt* задають спадкоємців вузлів дерева. Якщо вузол дерева є листком, тоді його обидві асоціації пусті: $lt = rt = None$.

Якщо вузол дерева представляє бінарну операцію, тоді його обидві асоціації непусті і задають піддерева. Якщо вузол дерева представляє унарну операцію, тоді одна з асоціацій є пустою, а інша – ні й задає піддерево. Для визначеності будемо вважати, що ознакою унарної операції є пустота її лівої асоціації: $lt = None$.

Деревом арифметичного виразу будемо називати множину вузлів класу *Tree*, зв'язаних орієнтованими асоціаціями в ієрархічну структуру з одним коренем [5].

Рис. 2 демонструє представлення арифметичного виразу $-2 * (b + c)$ за допомогою об'єктів класу *Tree*.

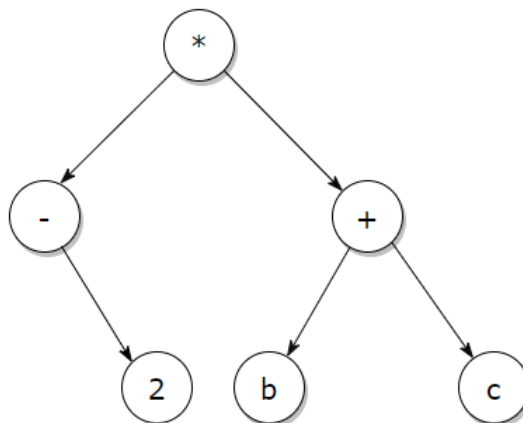


Рис. 2. Представлення виразу деревом / Tree representation of an expression

Частина методів класу *Tree* є простими, наприклад, наведені в прикладі 1 предикати для визначення типу поточної вершини дерева.

Приклад 1. Предикати для визначення типу поточної вершини дерева.

```

def unary(self):
    return self.lt is None and self.rt is not None
def binary(self):
    return self.lt is not None and self.rt is not None
def leaf(self):
    res = self.lt is None and self.rt is None
    return res
    
```

Інші методи класу *Tree* є достатньо складними. Для того, щоб не ускладнювати класу, вони реалізуються функціями, які розташовуються в тому ж модулі *tree*.

Стандартний конструктор класу *Tree* утворює пусте дерево, тому для побудови кожного дерева потрібно було б створювати спеціальну програму. Для полегшення побудови дерев виразів в модулі *tree* реалізовано функцію *exprtree*, яка утворює дерево з заданого виразу. Ця функція фактично служить ще одним конструктором класу *Tree*.

Функція *exprtree* побудована з використанням функції *polish*, яка перетворює арифметичний вираз зі звичайної інфіксної форми в постфіксну з застосуванням стеку [5]. Функція *exprtree* фактично реалізує перетворення *T*, але не зупиняється на постфіксному представлення виразів, а одразу переходить до деревного.

Метод *tostring* перетворює дерево арифметичного виразу в інфіксну форму, також оминаючи постфіксне представлення виразу, фактично реалізуючи перетворення T^* . Очевидно, така підміна не впливає на співвідношення (1) та (2).

Модуль *tree* надає також функцію *equaltree*, яка визначає, чи два дерева задають один арифметичний вираз, функцію *copytree*, яка утворює копію заданого дерева виразу, та функцію *istarexpr*, яка перевіряє, чи її аргумент є деревом арифметичного виразу.

Аналіз одночленів. Для представлення впорядкованих одночленів бібліотека *ExprLib* надає клас *Monom*. У ньому одночлен представлений числовим коефіцієнтом та основою. Модуль *monom*, у якому розташований опис класу *Monom*, визначає ще декілька цікавих функцій.

Функція *similar* визначає подібність двох заданих одночленів. Функція *treetomono* перетворює одночлен, заданий об'єктом класу *Tree*, на об'єкт класу *Monom*. При цьому числові коефіцієнти перемножуються, а нечислові – впорядковуються за алфавітом. Функція *monototree*, навпаки, об'єкт класу *Monom* перетворює на об'єкт класу *Tree*.

Аналіз поліномів. Роботу з поліномами реалізує модуль *polynom*. Для цього в ньому описано клас *Polynom* впорядкованих поліномів. Функція *treetopoly* заданий деревом поліном перетворює на об'єкт класу *Polynom*, а функція *polytotree* здійснює обернене перетворення. Функція *distrall* циклічно застосовує до дерева виразу відношення дистрибутивності, копіюючи піддерева за допомогою функції *copytree*.

Коли доданки стають одночленами, вони піддаються впорядкуванню функціями та методами з модуля *monom*. Функція *combinesim* зводить подібні члени полінома, розпізнаючи їх за допомогою функції *similar*. Одночлени впорядковуються за алфавітом., ігноруючи їх коефіцієнти.

Перетворення арифметичного виразу в поліном фактично реалізує описані вище еквівалентні перетворення T , M , P та T^* арифметичного виразу до найпростішого вигляду в інфіксній нотації, який назвемо стандартизованим. Наприклад, арифметичний вираз $(-1) * ((q + 1) * y) + (r - y)$ приводиться до такого стандартизованого вигляду: $-q * y - r$.

Відношення арифметичних виразів. Найпростішими елементами логічних виразів служать відношення арифметичних виразів. Бібліотека *ExprLib* дозволяє такі операції відношення: $<$ (менше), $<=$ (менше або дорівнює), $>$ (більше), $>=$ (більше або дорівнює), $==$ (дорівнює), $!=$ (не дорівнює).

Еквівалентними перетвореннями відношення приводяться до такої нормальної форми:

- Всі відношення виду $x < y$ перетворюються на $y > x$, а відношення виду $x <= y$ – на $y >= x$;
- Переносом арифметичних виразів з правої частини в ліву зі зміною їх знаку всі відношення приводяться до одного з таких чотирьох видів:

$$z > 0, \quad z >= 0, \quad z == 0, \quad z != 0;$$

- Всі відношення виду $(0 == 0)$ та $(0 >= 0)$ замінюються логічною константою *True*, а відношення виду $(0 != 0)$ та $(0 > 0)$ замінюються логічною константою *False*;
- Всі відношення виду $(n) == 0$, де (n) – додатне або від'ємне число, замінюються логічною константою *False*, а відношення виду $(n) != 0$ – логічною константою *True*;
- Всі відношення виду $(n) > 0$ та $(n) >= 0$, де (n) – додатне число, замінюються логічною константою *True*, а відношення виду $(n) > 0$ та $(n) >= 0$, де (n) – від'ємне число, замінюються логічною константою *False*.

Описана вище функція *exprtree* поширена на відношення арифметичних виразів, перетворюючи їх в постфіксну форму, а далі – в об'єкти класу *Tree*. Функція *treeexpr* здійснює обернене перетворення. Описані вище перетворення забезпечують однозначне представлення і відношень, зберігаючи властивість ідемпотентності. Для представлення відношень стандартизованих поліномів бібліотека *ExprLib* надає клас *Relation*.

Логічні вирази. З відношень за допомогою логічних операцій мови Python можна будувати більш складні вирази. В логічних виразах виразах можна застосовувати лише дві логічних операції – кон'юнкції *and* та заперечення *not*.

Логічні вирази представляються тими ж об'єктами класу *Tree*, що й арифметичні вирази та їх відношення. Функції *exprtree* та *treeexpr* поширено і на логічні вирази.

А наступні співвідношення дозволяють позбутися застосування операцій заперечення до відношень арифметичних виразів:

$$\begin{aligned} (\text{not } (x < y) = (x >= y)), \quad (\text{not } (x <= y) = (x > y)), \quad (\text{not } (x > y) = (x <= y)), \\ (\text{not } (x >= y) = (x < y)), \quad (\text{not } (x == y) = (x != y)), \quad (\text{not } (x != y) = (x == y)). \end{aligned}$$

Співвідношення $(a \text{ and } a = a)$ усувають з логічних виразів повторення, а співвідношення $(False \text{ and } x = False)$, $(True \text{ and } x = x)$ дозволяють позбутися логічних констант – крім випадку, коли весь логічний вираз представляє собою логічну константу.

Для представлення кон'юнкції стандартизованих відношень арифметичних виразів бібліотека *ExprLib* надає клас *Conjunct*.

Співвідношення комутативності й асоціативності операцій кон'юнкції та диз'юнкції дозволяють впорядкувати всі відношення кожної кон'юнкції аналогічно впорядкуванню стандартизованих поліномів.

Стверджується, що описане цими співвідношеннями перетворення всі еквівалентні вирази приводить до єдиної форми, яку назвемо стандартизованою. Таке перетворення, очевидно, теж є ідемпотентним.

Умови коректності. Відповідно до теорії Флойда–Хоора [2] задача перевірки коректності програми зводиться до деякого набору логічних виразів, які називаються умовами верифікації. Кожна умова верифікації представляє собою імплікацію, антецедент і консеквент якої, як правило, є кон'юнкціями відношень.

Система *VerPro* передбачає, що антецеденти і консеквенти умов верифікації є кон'юнкціями відношень арифметичних виразів. Для представлення таких умов бібліотека *ExprLib* надає клас *Implication*.

Верифікація анотованої програми здійснюється шляхом побудови умов верифікації та приведенням їх антецедентів та консеквентів до стандартизованого вигляду. Далі з консеквенту кожної умови коректності викреслюються ті кон'юнкції, які присутні в її антецеденті, відповідно до наступних еквівалентних співвідношень:

$$a \rightarrow a \text{ and } b = a \rightarrow b \text{ and } a = a \rightarrow b \quad (3)$$

$$a \text{ and } b \rightarrow a = \text{True} \quad (4)$$

Співвідношення (3–4) назвемо правилами редукції [1, 4]. Правила редукції теж задають еквівалентне перетворення і дозволяють спростувати імплікації аж до перетворення їх в константи. Якщо всі умови верифікації програми істинні, тоді стверджується, що програма коректна.

Інакше ті умови верифікації, з якими не вдалося справитися еквівалентним перетворенням, передаються системі *Z3* [8]. Якщо *Z3* не зуміє встановити тотожню істинність якоїсь умови, тоді для неї *Z3* знаходить контрприклад. Аналізуючи останній, користувач може знайти причину невдачі і внести зміни в анотовану програму.

Система *VerPro* надає інструменти для дослідження проблеми верифікації програм та випробовування таких інструментів аналізу програм, як символічне виконання, зворотне протягування умов, побудови інваріантів тощо. В [3] наведено декілька ранніх реалізацій комп'ютерних систем верифікації програм.

Системи верифікації програм переважно реалізувалися як специфічні системи логічного виводу, що сильно ускладнювало їх побудову та функціонування, однак створювало враження їх універсальності. Дана стаття демонструє, що систему верифікації програм можна ефективно будувати на принципах еквівалентного перетворення виразів.

На відміну від них система *VerPro* надає користувачу сучасний гнучкий діалоговий віконний інтерфейс та звичну інфіксне представлення умов та виразів. Система застосовується до програм та функцій сучасної популярної мови програмування Python. Система базується на строго описаних еквівалентних перетвореннях бібліотеки *ExprLib*.

Для встановлення коректності програми часто недостатньо стандартних співвідношень арифметики та логіки. Інколи для цього приходиться залучати співвідношення, які специфікують предметну область програми чи саму програму. Такими співвідношеннями потрібно доповнювати умови коректності. Спрощення умов коректності розглядається як необхідний початковий етап верифікації, що дозволяє зрозуміти, яких співвідношень не вистачає для верифікації.

Бібліотека *ExprLib* дозволяє перетворювати арифметичні та логічні вирази до найпростішого вигляду. Наявність операцій переходу від внутрішнього представлення виразів деревами до інфіксного представлення надає користувачу можливість контролювати процес перетворення.

Комп'ютерна реалізація еквівалентного перетворення виразів найкраще представлена системою *Mathematica* [7]. Не претендуючи на універсальність, для цілей верифікації програм система *VerPro* надає аналогічні еквівалентні перетворення.

В роботах [10–12] обговорювалася проблема відповідності програми та її анотації. В системі *VerPro* було вперше розглянуто задачу знаходження контрприкладів для умов верифікації, які дозволяють побачити причину невідповідності програми та її анотації, виправити програму або її анотацію і продовжити дослідження.

Висновки

За результатами виконаного дослідження можна зробити такі висновки.

Система *VerPro* надає інструменти для верифікації програм, допомагаючи користувачу в пошуку інваріантів та помилок відповідності програми та її анотації. Система базується на строго визначених еквівалентних перетвореннях виразів, реалізованих функціями та класами бібліотеки *ExprLib*.

Систему верифікації програм можна ефективно будувати на принципах еквівалентного перетворення виразів, доповнюючи їх застосуванням зовнішніх систем доведення теорем та пошуку контрприкладів.

Зручний діалоговий віконний графічний інтерфейс системи *VerPro* дозволяє успішно застосовувати її в ході навчання студентів основам програмування. Бібліотека *ExprLib* та система *VerPro* також надають хорошу основу для виконання курсових та дипломних робіт.

Література

1. Feys R. (1965). *Modal Logics* Paris. Gauthier-Villars.
2. Floyd R.W. (1967). Assigning meanings to programs. *Proceedings of a Symposium on Applied*

- Mathematics. 19: Mathematical Aspects of Computer Science. 18–32.
3. Gries D. (1981). The science of programming. Springer-Verlag.
 4. Kleene S.C. (2009). Introduction to metamathematics. New York: Ishi Press.
 5. Knuth D. (1997). The Art of Computer Programming, vol. 1: Fundamental Algorithms. Addison-Wesley.
 6. Lamy R. (2013). Instant SymPy Starter. Packt Publishing.
 7. Wolfram Mathematica. <https://www.wolfram.com/>.
 8. Z3 Guide. <https://microsoft.github.io/z3guide/docs/logic/intro/>.
 9. Костирко В. С., Плеша В. І. Застосування бібліотеки Z3PY для перевірки умов коректності та завершеності програм. Матеріали XXVI Міжнародної науково-практичної конференції „Інформаційні технології в економіці, менеджменті і бізнесі. Проблеми науки, практики і освіти“. Київ : Вид-во Європейського університету, 2020. С. 80–83.
 10. Stump A. (2016). Verified Functional Programming in Agda. Association for Computing Machinery and Morgan & Claypool. <https://doi.org/10.1145/2841316>.
 11. Vardi, M.Y. (2021). Program verification: vision and reality. Communications of the ACM (CACM), 65 (7). 46–55. <https://doi.org/10.1145/3469113>.
 12. Zilberstein N., Dreyer D., Silva A. (2021). Outcome Logic: A Unifying Foundation for Correctness and Incorrectness Reasoning. Proceedings of the ACM on Programming Languages. 7 (OOPSLA1). 522–550. <https://doi.org/10.1145/3586045>.
 13. Paulson L.C., Nipkow T., Wenzel M. (2019). From LCF to Isabelle/HOL. Formal Aspects of Computing. 31 (6). 675–698. <https://doi.org/10.1007/s00165-019-00492-1>.

References

1. Feys R. (1965). Modal Logics Paris. Gauthier-Villars.
2. Floyd R.W. (1967). Assigning meanings to programs. Proceedings of a Symposium on Applied Mathematics. 19: Mathematical Aspects of Computer Science. 18–32.
3. Gries D. (1981). The science of programming. Springer-Verlag.
4. Kleene S.C. (2009). Introduction to metamathematics. New York: Ishi Press.
5. Knuth D. (1997). The Art of Computer Programming, vol. 1: Fundamental Algorithms. Addison-Wesley.
6. Lamy R. (2013). Instant SymPy Starter. Packt Publishing.
7. Wolfram Mathematica. <https://www.wolfram.com/>.
8. Z3 Guide. <https://microsoft.github.io/z3guide/docs/logic/intro/>.
9. Kostyrko V. S., Plesha V. I. Zastosuvannia biblioteki Z3PY dlia perevirky umov korektnosti ta zavershymosti prohram. Materialy KhXVI Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii „Informatsiini tekhnolohii v ekonomitsi, menezhmenti i biznesi. Problemy nauky, praktyky i osvity“. Kyiv : Vyd-vo Yevropeiskoho universytetu, 2020. S. 80–83.
10. Stump A. (2016). Verified Functional Programming in Agda. Association for Computing Machinery and Morgan & Claypool. <https://doi.org/10.1145/2841316>.
11. Vardi, M.Y. (2021). Program verification: vision and reality. Communications of the ACM (CACM), 65 (7). 46–55. <https://doi.org/10.1145/3469113>.
12. Zilberstein N., Dreyer D., Silva A. (2021). Outcome Logic: A Unifying Foundation for Correctness and Incorrectness Reasoning. Proceedings of the ACM on Programming Languages. 7 (OOPSLA1). 522–550. <https://doi.org/10.1145/3586045>.
13. Paulson L.C., Nipkow T., Wenzel M. (2019). From LCF to Isabelle/HOL. Formal Aspects of Computing. 31 (6). 675–698. <https://doi.org/10.1007/s00165-019-00492-1>.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-321-3-280-Помилка! Закладку не визначено.
УДК 687.016.6: 687.122

ЗУБКО ОЛЬГА

Хмельницький національний університет
e-mail: olga.zubko.2000@gmail.com

ШВЕЦЬ ГАЛІНА

Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0001-7980-5474>
e-mail: shvetsh@khmnu.edu.ua

КУЛЕШОВА СВІТЛАНА

Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0003-2361-2950>
e-mail: kuleshovas@khmnu.edu.ua

СЕЛЕЗНЕВА АННА

Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0002-8238-5340>
e-mail: seleznoaa@khmnu.edu.ua

DIGITAL TECHNOLOGIES OF DEVELOPING CONSUMER IMAGE

Стаття присвячена розробці капсул гардеробу для адресного споживача за допомогою digital інструментів і автоматизованих методів дизайн-проекування, які є складовою інтеграційної стратегії творення модних інновацій fashion-брендів у контексті Circular моди.

Ключові слова: імідж, upcycling, капсула гардеробу, адресний споживач, digital технології, мобільні додатки.

ZUBKO OLGA, SHVETS GALINA, SVITLANA KULESHOVA, ANNA SELEZNEVA
Khmelnitskyi National University

DIGITAL TECHNOLOGIES OF CONSUMER IMAGE DEVELOPMENT

The article is devoted to developing wardrobe capsules for the targeted consumer using digital tools and automated design methods that make up the integration strategy for creating fashion innovations for fashion brands in the context of Circular fashion.

Technological progress, oversaturation of the market with goods, and the speed of changes in fashion trends are forcing manufacturers to reconsider their development strategy and the vector in which they need to move and develop. Fashion design is one of the activities most dependent on innovation. Especially evident in costume design, the object of which is a person, and the goal is to form an image, taking into account the characteristics of the individual.

In recent years, the ecological component of fashion has been carefully studied. Slow fashion, with a focus on quality, design, sustainability and ethics, represents an alternative to fast fashion's harmful environmental and social impacts. The move towards a circular economy and sustainable development has become increasingly important worldwide in recent years. Awareness of sustainable production and consumption practices is also growing. Upcycling is considered a sustainable approach in several fields, including environmental management, engineering, technology, and design. It is a process in which materials that become old after their use are transformed into higher-quality products.

The object of the study is the process of forming the author's wardrobe assortment capsules based on new innovative design practices. The research subject is digital technologies for developing one's image using upcycling methods. Approaches to using mobile applications as innovative digital tools for developing wardrobe capsules for the targeted consumer are proposed. The formulated working hypothesis of the study on the possibility of adapting mobile applications for creating a capsule wardrobe, planning and forming an individual image of the consumer was confirmed by the example of many applications and their specific practical application.

An algorithm for forming an individual wardrobe has been developed using the methodology of targeted design of garments based on the typology of design images in the fashion industry based on the primary colours of costume ensembles. Based on the classifier's results, capsules of the real and desired author's wardrobe were formed, the basis of which are exclusive ensembles of consumer women's clothing using the upcycling concept. In the context of the work carried out, they represent a means of forming fashion standards and a tool for the mass consumer to implement self-identification in modern fashion.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Технічний прогрес, перенасичення ринку товарами, швидкість змін модних тенденцій змушує виробників переглянути свою стратегію розвитку та вектор, у якому потрібно рухатися та розвиватися. Fashion-дизайн відноситься до видів діяльності, які найбільше залежать від інновацій. Це особливо яскраво проявляється в дизайні костюма, об'єктом призначення якого є людина, а метою – формування іміджу з урахуванням особливостей особистості. Останнім часом інтеграційні стратегії творення модних інновацій, в контексті їх візуалізації й презентації, актуалізували проблему розуміння стилю як комунікативного засобу. Тенденції розвитку іміджних технологій у всіх сферах діяльності потребують нових підходів до методології прийняття проектних рішень у процесі адресного проектування одягу [1, 2].

Слід відзначити, що розвиток fashion-індустрії повинен здійснюватись з орієнтуванням на екологічно вигідну форму творчого споживання та з урахуванням Порядку денного сталого розвитку на період до 2030 року, що був ухвалений усіма державами-членами ООН у 2015 році і містить каталог із 17 цілей сталого розвитку (ЦСР). У цьому контексті мода Circular виділяється як один із секторів, де найбільше потрібна відповідність ЦСР, враховуючи її глобальний характер і значне зростання споживання [3]. Індустріалізація зробила споживання невід'ємною частиною економіки. Занепокоєння стійким розвитком обговорювалася в організаціях, які шукають способи зробити свій внесок у майбутнє планети, прагнучи звести до мінімуму соціальні та екологічні наслідки [4].

За останні два десятиліття концепція *upcycling* («апсайклінг») набула популярності як цілеспрямоване втручання, спрямоване на зменшення використання матеріалів та енергії в бізнес-процесах. По суті, повторна переробка включає повторне використання, ремонт, перепрофілювання та модернізацію відходів, щоб уникнути традиційної кінцевої точки «утилізації» [5].

Аналіз останніх джерел

Керований імідж є одним із провідних позацінових важелів конкурентної боротьби в різних сферах соціального життя: політиці, шоу-бізнесі, торгівлі та виробництві. Зі збільшенням значущості іміджу, як соціального феномену, з'явилися нові напрямки в суспільному житті – іміджелогія, іміджклоузінг, індустрія стилю [6, 7]. Серед вчених, що займаються проблемами костюма стосовно іміджелогії можна назвати таких відомих фахівців як, Т. Л. Макарова (знакові системи, символи в костюмі), М. С. Білан (імідж української нації), Н. В. Чупріна (теорія, методологія, практика формування іміджу і сучасного жіночого костюма на основі українського народного одягу).

Поєднання слів «імідж» + «одяг» в іміджклоузінг змушує переглянути сучасні, прийняті в науці визначення понять «костюм» і «одяг». Найпростіша розшифровка укладена в поєднанні слів *image* (одне з знач. з англ. – імідж) і *clothing* (англ. одяг, одягання) означає разом імідж + процес одягання, тобто мова йде про цілеспрямоване використання костюма для формування індивідуального образу.

На сьогоднішній день існує основне протиріччя: оболонка людини (костюм, одяг), наділена своєю мовою і несе закодовану інформацію в іміджі, проектується без будь-якого наукового знання цієї інформації. Важливо усвідомити, що костюм – це складна інтеграційна система, що включає одяг, зачіску, головний убір, рукавички, прикраси, грим, і виконує соціально-психологічні функції в спілкуванні [7].

Таким чином, поняття «костюм», як складну невербальну психосеміотичну і психосемантичну систему, що входить в інформаційну триаду «костюм» ↔ «особистість» ↔ «зовнішність», необхідно досліджувати у взаємодії соціально-психологічних взаємозв'язків «костюм ↔ особистість ↔ зовнішність ↔ спостерігач».

Останніми роками ретельно досліджується екологічна складова моди. Повільна мода, з акцентом на якості, дизайні, стійкості та етичності, представляє альтернативу шкідливому екологічному та соціальному впливу швидкої моди.

Просування до економіки замкнутого циклу та сталого розвитку стає все більш важливим у всьому світі в останні роки, що частково пов'язано зі зміною відношення та поведінки споживачів [8]. Також зростає усвідомлення практики сталого виробництва та споживання. У цьому контексті *upcycling* вважається стійким підходом у ряді областей, включаючи управління навколишнім середовищем, інженерію, технології, дизайн. Це процес, у якому матеріали, які старіють після їхнього використання, перетворюються на продукти вищої якості та/або цінності у другому житті. Подовжуючи термін служби виробів та матеріалів, їхня переробка сприяє розвитку сталого виробництва та споживання. Скорочення кількості нових матеріалів, що вводяться у виробництво, знижує видобуток сировини, підвищує ефективність використання ресурсів і в кінцевому результаті знижує викиди вуглецю, пов'язані зі споживанням матеріалів і енергії [9]. Таким чином, *upcycling* може призвести до переходу від лінійної економіки до економіки замкнутого циклу з перевагами для населення, довкілля та сталої економіки за часів глобальної фінансової нестабільності. У цьому переході фундаментальною вимогою є участь усіх зацікавлених сторін та їх здатність спільно ділитися знаннями та навичками. *Upcycling* об'єднує та пов'язує різні групи зацікавлених сторін, включаючи професіоналів швейної і текстильної галузей, митців, підприємців та споживачів. Окремі особи та галузі займаються вторинною переробкою, щоб створити позитивні зміни або принести користь навколишньому середовищу через емоційну прихильність, економічну та/або соціальну вигоду. Сьогодні багато підприємств починають розглядати *upcycling* як можливість для бізнесу [10]. *Upcycling* грає ключову роль у переході від лінійної економіки до економіки замкнутого циклу. Цей перехід спрямований на уповільнення, замикання та звуження циклів ресурсів за рахунок скорочення відходів та утримання ресурсів у використанні якнайдовше за рахунок їх повторного використання у виробничих процесах.

Повністю замкнута економіка характеризуватиметься відсутністю відходів, що надходять на звалище, та мінімальним використанням первинних матеріалів. Так, у колекціях різних модних будинків, включаючи Christian Dior, Bode, застосовується техніка «Patchwork», що полягає в поєднанні клаптиків різних матеріалів в одне полотно. Прихильниками еко-дизайну є українська марка «Ksenia Schnaider», яка використовує джинси, спортивні куртки та светри для створення колекцій. В рамках цієї техніки можна виконувати деконструкцію кількох предметів одягу, а потім з'єднувати їх елементи між собою. Проведений аналіз існуючих способів *upcycling* виробів *fashion-індустрії* дозволив виявити екологічні, художні та естетичні переваги одягу, який виготовляється з матеріалів вторинної переробки (табл. 1).

Отже, *upcycling* допомагає не лише стримувати поповнення світового обсягу текстильної продукції, а й сприяє творчому створенню оригінальних та унікальних виробів, кидаючи виклик культурним кодам щодо того, що можна вважати сміттям, а що – втіленням духу епохи (наприклад, вінтажний одяг).

Формування цілей статті

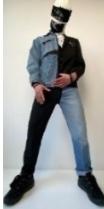




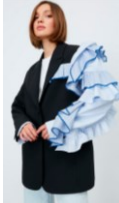




Метою дослідження є розробка капсул гардеробу для адресного споживача за допомогою *digital* інструментів і автоматизованих методів дизайн-проектування у контексті *Circular* моди.

Об'єктом дослідження є процес формування авторських асортиментних капсул гардеробу на основі нових інноваційних проєктних практик.

Предметом дослідження є digital технології розробки власного стилю з використанням способів upcycling.

Таблиця 1

Способи upcycling для виробів fashion-індустрії

| Способи | Опис | Приклад |
|--|--|---|
| Апсайкл деніма | Поєднання речей з деніму з іншими, отримуючи унікальні поєднання та нові текстури |   |
| Альтернативне фарбування | Фарбування вручну, малими серіями за допомогою різноманітних барвників: від хімічних (у вигляді порошку) до натуральних (куркума, чай) |   |
| Додавання декоративних елементів | Продовження життя речей за допомогою додавання оригінальних латок (шматків тканини, кишень тощо) або деталей |   |
| Печворк | Техніка шиття речей з клаптиків тканини |   |
| Поєднання різних елементів гардеробу в одне ціле | Техніка полягає у зшиванні частин від різних речей в один виріб, є однією з найпростіших технік, що не потребують великих зусиль |   |

Виклад основного матеріалу

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

– сформулювати робочу гіпотезу дослідження;

– розробити рекомендації щодо послідовності дій для формування авторських асортиментних капсул гардеробу з використанням певного мобільного додатку, або декількох мобільних додатків.

Основна гіпотеза дослідження полягає в тому, що мобільний додаток – це спосіб покращення не лише каналів зв'язку між fashion-брендом і споживачем, але й сам процес графічної презентації модних інновацій fashion-брендів і засіб формування нових звичок в онлайн покупках і формуванні власного стилю і гардеробу споживача.

Зміни торкнулися не тільки нових можливостей презентації та популяризації fashion-брендів, а і можливостей реалізації нових ідей у спеціалізованих мобільних додатках для роботи з гардеробом, тренд щодо використання та розробки яких став помітним в останні роки [11, 12]. Окрім безпосередньо функції організації гардеробу, такі додатки мають функції візуального нагадування і поради щодо підбору стилю для визначеного кольоротику споживача та визначеної події.

Під час розробки авторських та промислових колекцій одягу майбутні фахівці, зокрема студенти, використовують прогресивні технології, серед яких і мобільні додатки, які значно підвищують продуктивність праці та сприяють скороченню витрат часу на розробку дизайн-продукту. Сьогодні інтерес до інтеграції мобільних додатків у навчання стрімко росте, тому потрібні такі методи навчання, які б полегшували і прискорювали передачу знань студентам, активізували процес засвоєння ними знань, навчали їх прийомам самостійної роботи з матеріалом, підвищували продуктивність навчального процесу. Мобільні

технології можуть зробити процес навчання та роботи над творчими художніми проектами цікавішим, що відповідає вимогам сьогодення, надаючи потрібну інформацію в потрібний час [11, 12].

Подібні функції має цілий ряд додатків, які можна знайти на платформах Google Play, App Store та ін. Зокрема, за допомогою пошуку за ключовими словами «wardrobe», «гардероб», «іміджкоузінг», «модні кольори одягу», «гармонія кольорів» та інших слів-синонімів було виявлено більше ніж 300 додатків найбільш популярних у цій сфері.

Для проведення дослідження авторами були відібрані мобільні додатки, які підтримують реалізацію художніх ідей у конструюванні та дизайні швейних виробів, зосереджуючись на огляді мобільних додатків із функціями, характерними для створення модного продукту. За результатами аналізу близько 60 мобільних додатків, які можна кваліфікувати як «додатки для роботи з кольоротипом і стилем споживача» встановлено, що найширшою функціональністю характеризуються мобільні додатки Color Gear та Dressika. Серед мобільних додатків, що позиціоновані як «додатки-органайзери гардеробу або додатки для створення капсульного гардеробу» перевага надана Acloset, враховуючи наявність у ньому набору специфічних функцій.

Науковцями доведено [6, 7, 12], що в основу формування гармонійного візуального іміджу і покращення естетичних властивостей моделей одягу покладені підходи корекції структурних компонент образів «Я» в стратегії самопрезентації особистості: «реальне Я» → «бажане Я» → «гармонійне Я» що дає можливість відтворити проєктний образ комфортного ансамблю одягу з адресним споживачем.

Остаточною інтегральною характеристикою іміджу є персоналізований образ споживача. Така характеристика підкреслює його спрямованість на максимально можливе урахування не лише особливостей зовнішнього вигляду, але й індивідуальних особливостей, інтересів і можливостей конкретної особистості – персони [7].

Стилисти і представники fashion-брендів розглядають модний, ситуаційний (капсульний) гардероб [6, 7]. Ситуаційний гардероб як набір предметів одягу, використовуваний для певних цілей, в якому всі предмети поєднуються між собою за кольором і стилем, це – капсульний гардероб, який містить набір з 6-8 речей (аксесуари не входять в цей список), що гармонійно комбінуються між собою.

Виходячи з концепції проєктування одягу як оболонки для сприйняття, сформульовано етапи формування індивідуального іміджу за допомогою одягу. Провідним у цьому процесі є вибір стилю одягу, виходячи з прописаних по ньому характеристик особистості і відповідно до завдань, які розв'язуються особистістю. На другому місці – підбір кольору, який має здійснюватися виходячи з даних психології сприйняття кольору, з урахуванням цілей формування іміджу і принципів гармонізації конкретної кольорової палітри людини. Потім проводиться розробка варіантів виробів, які найкращим чином реалізують формування враження з урахуванням гармонійного сприйняття фігури адресного споживача в цілому.

Відомо, що зміна стильового рішення одягу впливає на зміну приписуваних характеристик особистості, а отже і на формований імідж. Для управління «мовою» одягу і розробці рекомендацій зі створення індивідуального іміджу з урахуванням стильового типу, пропонується побудувати адекватну систему індивідуальних іміджів за базовими кольорами, оскільки в роботах сучасних авторів, дослідників моди, відсутні характеристики і критерії формування проєктного образу (ПОб) в індустрії моди, орієнтованого на розробку дизайнерських пропозицій в сегменті базового кольору костюмного ансамблю.

На підставі результатів проведених досліджень сформовано основні принципи розробки проєктного образу різного призначення, як стильового типу системи індивідуальних іміджів за базовими кольорами. Для здійснення цього етапу використано метод організуючих понять. Отже, на першому етапі реалізації методу організуючих понять були встановлені найбільш стійкі ознаки формування ПОб адресного споживача при розробці модних образів в контексті базового кольору швейних виробів.

На другому етапі проведена класифікація організуючих понять формування ПОб (у контексті базового кольору) за ступенем їх важливості. При цьому кожній організуючій ознаці привласнено класифікаційний кодовий номер, який забезпечує формування причинно-наслідкових зв'язків між ознаками для опису персоналізованого образу адресного споживача (табл. 2).

Таблиця 2

Класифікатор організуючих понять проєктних образів системи індивідуальних іміджів за базовими кольорами

| № | 1. | | | | | | | | | | 2. | | | | | 3. | | | | 4. | | | | | 5. | | | | | | | |
|--|-----------------------------------|-----------|--------|---------|-------|------------|------------|--------|--------|--------|---|----------------|----------------|------------|-------------|--|----------|---------------------|-----------------|---|----------------------|----------|---------------------------------------|--|--|--------------------------------------|----------|--------------|----------|----------------|-------------|----------|
| | Базовий колір костюмного ансамблю | | | | | | | | | | Образи КА у відповідності до основних об'єктивних характеристик кольору | | | | | Рекомендована база гармонійна колірна гама | | | | Приклад візуального графічного образу костюмного ансамблю | | | | | Враження від образу КА: емоційні ключові слова | | | | | | | |
| Код | 1.1. | 1.2. | 1.3. | 1.4. | 1.5. | 1.6. | 1.7. | 1.7.1. | 1.7.2. | 1.7.3. | 1.8-1.10 | 2.1. | 2.2. | 2.3. | 2.4. | 2.5. | 2.6-2.10 | 3.1. | 3.2. | 3.3. | 3.4. | 3.5-3.10 | 4.1. | 4.2. | 4.3. | 4.4. | 4.5-4.10 | 5.1. | 5.2. | 5.3. | 5.4. | 5.5-5.10 |
| Образно-стилістична і проєктно-композиційна ознака | Червоний | Оранжевий | Жовтий | Зелений | Синій | Фіолетовий | Ахроматика | Білий | Сірий | Чорний | Резерв | Консервативний | Комунікативний | Креативний | Романтичний | Неформальний | Резерв | Монохромна гармонія | Двоколірна гама | Гармонійний градієнт | Складна колірна гама | Резерв | Художній ескіз КА на фігурі в колірні | Складові КА: олія, вугілля, голловий убір, аксесуари | Гармонійна єдність образу людини і текстони КА | Гармонійна організація фігури людини | Резерв | Фізіологічні | Емоційні | Інтелектуальні | Поведінкові | Резерв |

Таким чином, удосконалення структури і асортименту раціонального гардеробу за допомогою використання спеціалізованих мобільних додатків з функцією віртуального гардеробу дозволить знизити витрати часу на підбір і гармонізацію елементів гардеробу при високій естетичній якості результату.

Важливим моментом є підбір правильних складових капсул: за кольірною гамою у відповідності до кольоротипу споживача і його психологічних особливостей, за поєднанням фактур, а також за обраним стилем і запланованим враженням (табл. 2).

Процес формування авторських асортиментних капсул гардеробу з використанням мобільних додатків здійснюється за наступним алгоритмом:

1. Визначити кольірний тип зовнішності адресного споживача.
2. Сформувати палітри індивідуальних кольорів у відповідності до кольоротипу адресного споживача.
3. За допомогою інструментальних засобів універсальних графічних редакторів та мобільних додатків сформувати авторські асортиментні капсули гардеробу адресного споживача з запланованим враженням, у відповідності до базових кольорів, які найкращим чином реалізують цілі формування враження з урахуванням гармонійного сприйняття образу людини в цілому.

Отже, на першому етапі був визначений кольірний тип зовнішності адресного споживача за допомогою мобільного додатка Dressika [12]. Для формування палітри індивідуальних кольорів запропоновано використовувати мобільний додаток Color Gear (рис. 1).

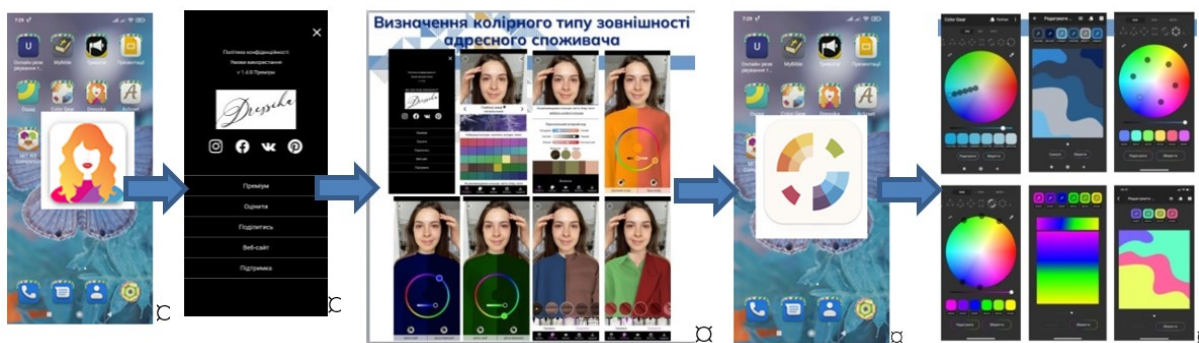


Рис. 1. Візуалізація процесу визначення кольірний типу зовнішності та кольірних відтінків одягу адресного споживача у мобільних додатках Dressika, Color Gear

На наступному етапі з використанням класифікатора організуючих понять проектних образів системи індивідуальних іміджів (табл.2) були сформовані капсули адресного раціонального гардеробу у мобільному додатку Acloset [13], які візуалізують всі вище описані принципи на прикладі рекомендованих кольорів (рис. 2).



Рис. 2. Авторські асортиментні капсули гардеробу адресного споживача з запланованим враженням у мобільному додатку Acloset

Як продемонстровано, кожна капсула гардеробу являє собою оптимальну групу з п'яти - восьми предметів одягу, які об'єднані загальним призначенням і взаємопов'язані один з одним по стилю і кольору. Весь гардероб споживача молодшої вікової групи розділено на три капсули, відповідно до сезону, призначенню і образу: зимові, демісезонні, літні капсули, які в свою чергу містять: 1) діловий гардероб (робочий, офісний) – консервативний (класичний) образ; 2) повсякденний гардероб (для перебування в неформальній обстановці, для проведення зустрічей, презентацій, відпочинку) – комунікативний (повсякденний) образ; енергійний, природний образ; творчий (креативний) образ.

Авторка даного дослідження є представником молодого покоління Y [1], і надає перевагу концепції сталого розвитку і екологізації продукції швейної промисловості. Тому, в основу розробки складових авторських капсул гардеробу покладено техніку upcycling, що є одним із способів підвищення екологічності товарів індустрії моди. В рамках цього дослідження джерелом творчості було обрано оптичний прилад, що дозволяє створювати візерунки – калейдоскоп. «Калейдоскоп» етимологічно походить від трьох давньогрецьких слів, які розглядають у сукупності – «красивий», «вид» та «спостерегаю». Склавши разом, отримаємо щось на зразок «красиві види, які можна спостерігати». В переносному значенні – це швидка зміна явищ, осіб, подій, тобто життя змінюється швидко і безповоротно, як візерунки «чарівної труби». Таким чином, завдання полягає в створенні ансамблів, які буде нагадувати своїми деталями візерунки калейдоскопа. За задумом одяг повинен складатися з різних матеріалів, може мати багато членувань та нашарувань виробів різного асортименту. Можна поєднувати різні кольори створюючи ілюзію калейдоскопа. Послідовність реалізації творчого задуму за допомогою особливостей інструментів мобільного додатку Acloset продемонстровано на рис. 3.



Рис. 3. Візуалізація процесу розробки авторського ансамблю одягу у Acloset:
а) вибір моделі одягу із цифрової шафи; б) коригування деталей; в) збереження категорій у шафі; г) вибір елементів із цифрової шафи; д) складання моделі, е) перегляд готової моделі

Результатом став ряд концепт-варіантів комбінацій відібраних ознак, в якому втілено образно-стильові властивості та проектно-композиційні характеристики техніки upcycling – створення одягу із вживаного одягу.

У таблиці 3 представлено капсули реального і бажаного авторського гардеробів, основою яких є ексклюзивні ансамблі жіночого одягу, виробу яких демонструють втілення авторського задуму.

Таблиця 3

**Використання мобільних додатків у практичній роботі:
сформовані капсули гардеробу у мобільному додатку Acloset**

| Гардероб | Бажаний | | | Реальний | |
|-----------------|---|--|---|--|--|
| Капсула | Зимова | Демісезонна | Літня | Демісезонна | |
| Образ КА | Спорт-шик | Креативний | Легкий | Гуцульський | |
| Кольори в КА | Фіолетовий, зелений, блакитний | Бежевий, блакитний, слонява кістка | Оранжевий, денім, білий, чорний | Червоний, аквамарин, слонява кістка, білий, чорний | |
| Зображення КА | | | | | |
| Враження від КА | розкішний яскравий творчий | стильний жіночний грайливий | емоційний активний життєрадісний | прохолодний стильний природний | |
| Склад | Пальто, гольф, светр, джинси, сумка, шарф | Тренч-піджак, палаццо, гольф, сумка, підбори | Майка, спідниця, кросівки, сумка, окуляри | Кроп-топ, куртка, джинси, сумка, кросівки | |

В результаті аналізу та систематизації проведених досліджень розроблено ескізний проєкт авторської колекції жіночих виробів під девізом «Upcycling style» в основу якого покладено принципи upcycling, що відповідає модним тенденціям 2023 р.

Для забезпечення стильової єдності використано модні кольори, характеристики яких сформовано з урахуванням основних правил сучасної бренд-колеристики (табл. 4):

- 1) Правильне співвідношення кольору і позиціонування виробів колекції, як модного продукту.
- 2) Відповідна гармонія кольорів. Запропонована багатоколірна гармонія природних кольорів.





3) Відсутність проблемних кольорів. Спокійні кольори авторської колекції «Upcycling style» характерні для сегмента upper- middle і premium.

4) Правило контексту: колір залежить від контексту, що його оточує. Це не тільки інші кольори, але й специфіка навколишнього середовища й носія комунікаційних повідомлень. В нашому випадку це реконструкція, творча трансформація, реінтеграція готових елементів, кардинально нові вироби після редилайну виробів, що були у використанні.

7) Культурне підґрунтя – екологічність моди, інноваційні методи вторинної переробки.

Таблиця 4

Бренд-колористика у формуванні стилю авторської колекції під девізом «Upcycling style»

| Колір | | Особливості сприйняття |
|----------------|---|--|
| Назва | Зразок | |
| Блакитна сталь |  | Створює відчуття довіри і безпеки. Приємний і миролюбний, від цього кольору немов віє прохолодою, свіжістю і чистотою. Тут поєднуються спокій і витончена елегантність |
| Жовта примула |  | Зберігається в пам'яті довше, ніж інші. Вражаючий, енергійний, веселий. Заряджає бадьорістю і оптимізмом, дружелюбністю і відкритістю. |
| Бежевий |  | Стимулює емоційну сферу, створює відчуття благополуччя та веселощів. М'який, спокійний, легкий. Це одночасно елегантність і витончений еротизм. У цьому кольорі є вишуканість і жіночність |
| Ебоніт |  | Мінливий і різноманітний, викликає безліч почуттів. Може бути зловісним і магічним, а може - розкішним, молодіжним та сексуальним |

Запропонована авторська колекція (рис. 4) відображає низку альтернативних творчих ідей для upcycling одягу, таких як: вторинне використання натуральної та штучної шкіри і переробка у нові вироби чи аксесуари; використання пакувальних матеріалів для створення нових текстур; вторинне використання деталей та елементів виробів з джинсової тканини.

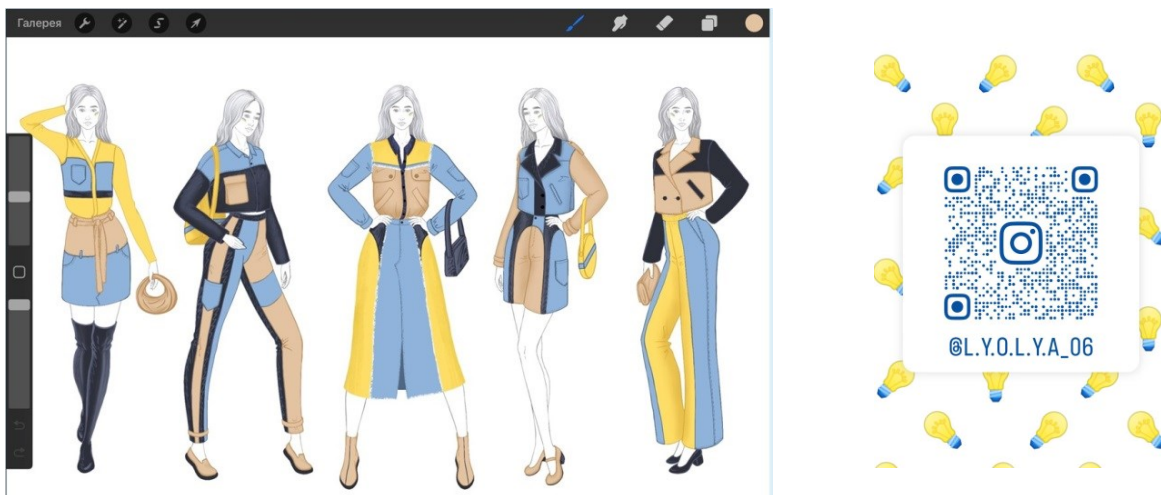


Рис. 4. Ескізи жіночої колекції під девізом «Upcycling style»

Висновки. Запропоновано підходи до застосування мобільних додатків, як інноваційних digital інструментів для розробки капсул гардеробу для адресного споживача.

Сформульована робоча гіпотеза дослідження щодо можливості адаптації мобільних додатків для створення капсульного гардеробу, його планування та формування індивідуального образу споживача знайшла своє підтвердження на прикладі ряду додатків і їх конкретного практичного застосування.

Розроблено алгоритм формування індивідуального гардеробу із застосування методології адресного проектування швейних виробів на основі типології проектних образів в індустрії моди за базовими кольорами костюмних ансамблів.

За результатами класифікатора сформовано капсули реального і бажаного авторського гардеробів, основою яких є ексклюзивні ансамблі жіночого одягу споживача з використанням концепції upcycling. У контексті проведеної роботи вони представляють засіб формування модних стандартів, а також – інструмент реалізації масовим споживачем самоідентифікації в сучасній моді.

Література

1. Дерман Л. М. Діджитал-проекування та презентація колекції одягу як автоматизована граматики ХХІ століття / Л. М. Дерман // Дизайн. Культура і сучасність. – 2020. – №2. – С. 118-122.
2. Свідома мода: як мас-маркет шкодить екології і чому варто відмовитися від «одноразових» речей / Катерина Гончарова. – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.rbc.ua/ukr/lite/moda/osoznannaya-moda-mass-market-vredit-ekologii-1537779523.html>

3. Aramendia-Muneta ME. Circular Fashion: Cluster Analysis to Define Advertising Strategies / ME Aramendia-Muneta, A. Ollo-López, K. Simón-Elorz // *Sustainability*. – 2022. – 14(20). – 13365. <https://doi.org/10.3390/su142013365>
4. Borsatto C. Upcycling as a business strategy in textile and clothing industry clusters / C. Borsatto, R. Isoton, C. P. Giacomello // *Revista Brasileira de Gestao e Desenvolvimento Regional*. – 2023. – 19(1). – S. 379-398. DOI: [10.54399/rbgdr.v19i1.6529](https://doi.org/10.54399/rbgdr.v19i1.6529)
5. Caldera S. Evaluating barriers, enablers and opportunities for closing the loop through ‘waste upcycling’: A systematic literature review / S. Caldera, R. Jayasinghe, C. Desha, L. Dawes, S. Ferguson // *J. sustain. dev. energy water environ. syst.* – 2022. – 10(1). – 1080367. DOI: <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d8.0367>
6. Болотова В.О. Іміджологія: текст лекцій для студентів спеціальностей 054 «Соціологія», 061 «Журналістика» / В. О. Болотова, Н. О. Ляшенко, К. А. Агаларова – Харків : НТУ «ХПІ», 2021. – 150 с. http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-ress/55391/1/Book_2021_Bolotova_Imidzholohiia.pdf
7. Kuleshova S. G. Image clothing as a perceptual component of clothing design / S. G. Kuleshova, A.L. Slavinska, O. V. Zakharkevich, G. S. Shvets // *Textiles, clothing, leather and technologies*. – 2017. – Vol. 3. – P. 12-20.
8. Bridgens B. Creative upcycling: Reconnecting people, materials and place through making / B. Bridgens, M. Powell, G. Farmer, C. Walsh, E. Reed, M. Royapoor, P. Gosling, J. Hall, O. Heidrich // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – Vol. 189. – P. 145-154. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.317>
9. Wang C. A literature review of sustainable consumption and production: A comparative analysis in developed and developing economies / C. Wang, P. Ghadimi, M. K. Lim, M. L. Tseng // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – Vol. 206. – P. 741-754. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.172>
10. Singh J. Challenges and opportunities for scaling up upcycling businesses – The case of textile and wood upcycling businesses in the UK / J. Singh, K. Sung, T. Cooper, K. West, O. Mont // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2019. – Vol. 150. – 104439. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104439>
11. Захаркевич О. В. Обґрунтування вибору мобільних додатків для створення та упорядкування модного гардеробу / О. В. Захаркевич, Ю. В. Кошевка, С. М. Лисенко // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. – 2022. – №1 (305). – С. 25-30. DOI 10.31891/2307-5732-2022-305-1-25-30
12. Kuleshova S. Implementation of digital techniques in the curriculum of clothing designer's training / S. Kuleshova, O. Zakharkevich, G. Shvets, O. Lushevskaya // *ARTTE* Vol. 10, No. 3, 2022 ISSN 1314-8788 (print), ISSN 1314-8796 (online), doi: 10.15547/artte.2022.03.008, P. 189-196. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sites.google.com/a/trakia-uni.bg/artte/articles/artte-vol-10-no-3>
13. Acloset [Електронний ресурс], Режим доступу: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.looko.acloset&hl=ru&gl=US>

References

1. Derman L. M. Didzhytal-proektuvannia ta prezentatsiia koleksii odiahu yak avtomatyzovana hramatyka KhKhI stolittia / L. M. Derman // *Dyzain. Kultura i suchasnist.* – 2020. – №2. – S. 118-122.
2. Svidoma moda: yak mas-market shkodyt ekolohii i chomu varto vidmovytysia vid «odnorazovykh» rechei / Kateryna Honcharova. – [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu: <https://www.rbc.ua/ukr/lite/moda/osoznannaya-moda-mass-market-vredit-ekologii-153779523.html>
3. Aramendia-Muneta ME. Circular Fashion: Cluster Analysis to Define Advertising Strategies / ME Aramendia-Muneta, A. Ollo-López, K. Simón-Elorz // *Sustainability*. – 2022. – 14(20). – 13365. <https://doi.org/10.3390/su142013365>
4. Borsatto C. Upcycling as a business strategy in textile and clothing industry clusters / C. Borsatto, R. Isoton, C. P. Giacomello // *Revista Brasileira de Gestao e Desenvolvimento Regional*. – 2023. – 19(1). – S. 379-398. DOI: [10.54399/rbgdr.v19i1.6529](https://doi.org/10.54399/rbgdr.v19i1.6529)
5. Caldera S. Evaluating barriers, enablers and opportunities for closing the loop through ‘waste upcycling’: A systematic literature review / S. Caldera, R. Jayasinghe, C. Desha, L. Dawes, S. Ferguson // *J. sustain. dev. energy water environ. syst.* – 2022. – 10(1). – 1080367. DOI: <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d8.0367>
6. Bolotova V.O. Imidzholohiia: tekst leksii dlia studentiv spetsialnostei 054 «Sotsiolohiia», 061 «Zhurnalistyka» / V. O. Bolotova, N. O. Liashenko, K. A. Ahalarova – Kharkiv : NTU «KhPI», 2021. – 150 s. http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-ress/55391/1/Book_2021_Bolotova_Imidzholohiia.pdf
7. Kuleshova S. G. Image clothing as a perceptual component of clothing design / S. G. Kuleshova, A.L. Slavinska, O. V. Zakharkevich, G. S. Shvets // *Textiles, clothing, leather and technologies*. – 2017. – Vol. 3. – P. 12-20.
8. Bridgens B. Creative upcycling: Reconnecting people, materials and place through making / B. Bridgens, M. Powell, G. Farmer, C. Walsh, E. Reed, M. Royapoor, P. Gosling, J. Hall, O. Heidrich // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – Vol. 189. – P. 145-154. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.317>
9. Wang C. A literature review of sustainable consumption and production: A comparative analysis in developed and developing economies / C. Wang, P. Ghadimi, M. K. Lim, M. L. Tseng // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – Vol. 206. – P. 741-754. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.172>
10. Singh J. Challenges and opportunities for scaling up upcycling businesses – The case of textile and wood upcycling businesses in the UK / J. Singh, K. Sung, T. Cooper, K. West, O. Mont // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2019. – Vol. 150. – 104439. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104439>
11. Zakharkevych O. V. Obgruntuvannia vyboru mobilnykh dodatkov dlia stvorennia ta uporiadkuvannia modnoho harderobu / O. V. Zakharkevych, Yu. V. Koshevko, S. M. Lysenko // *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences.* – 2022. – №1 (305). – S. 25-30. DOI 10.31891/2307-5732-2022-305-1-25-30
12. Kuleshova S. Implementation of digital techniques in the curriculum of clothing designer's training / S. Kuleshova, O. Zakharkevich, G. Shvets, O. Lushevskaya // *ARTTE*. – 2022. – Vol. 10, No. 3. – P. 189-196. doi: 10.15547/artte.2022.03.008
13. Acloset – [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.looko.acloset&hl=ru&gl=US>

МОЛЧАНОВА КАТЕРИНА

Київський національний університет технологій та дизайну
e-mail: katyakatrin1999@gmail.com

АНДРЕЄВА ОЛЬГА

Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID ID: [0000-0001-8374-2306](https://orcid.org/0000-0001-8374-2306)
e-mail: wayfarer14@ukr.net

ПЕРВАЯ НАТАЛІЯ

Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID ID: [0000-0002-5086-3926](https://orcid.org/0000-0002-5086-3926)
e-mail: vsu@knuutd.com.ua

ЗАСТОСУВАННЯ ПЕПТИДІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ КОСМЕТИЧНИХ КРЕМІВ

У роботі наведено огляд сучасних досліджень із пошуку, створення та застосування пептидів як біологічно активних складових емульсійних кремів по догляданню за шкірою обличчя у напрямку розширення сировинної бази, асортименту та підвищення ефективності дії цих косметичних засобів.

Ключові слова: косметичні креми, пептиди, технологія, властивості.

MOLCHANOVA KATERINA

Kyiv National University of Technologies and Design

ANDREYEVA OLGA

Kyiv National University of Technologies and Design

PERVAIA NATALIYA

Kyiv National University of Technologies and Design

APPLICATION OF PEPTIDES FOR THE MANUFACTURE OF COSMETIC CREAMS

Cosmetic creams are considered one of the most common types of cosmetic products. This is due to their preventive and therapeutic properties, ease of consumption and affordability. The largest part of cosmetic facial skin care creams is created on the basis of emulsions, which can be explained by the ability of the latter to combine oil and water phases, the possibility of introducing various active ingredients and good consumer properties. Particular attention is drawn to products that have not only a cosmetic effect, but also have special properties such as regenerating, antibacterial, wound healing ability. To create products that have a more effective effect on the skin, the search for components and technological methods that can provide this is relevant.

Recent advances in pharmaceutical, bio- and chemical technology have led to the development of innovative cosmeceuticals that use peptides to improve skin condition. The long-term benefits of these products have not yet been adequately assessed, but a review of the literature indicates a growing body of evidence to support their use. This is achieved due to the inclusion in the composition of emulsion cosmetic creams of low molecular weight peptides obtained by hydrolysis of proteins of plant origin, marine animals, as well as agents that enhance their penetration into the skin in the form of chemical enhancers and needle patches. At the same time, it should be noted that the use of natural resources for the production of bioactive peptides is not enough to meet the growing demands of consumers. To solve this problem, various biotechnological tools and processes for the synthesis of bioactive peptides are used. The main requirements for the created peptide compositions are their physical and chemical stability, compatibility with the skin and its components, and effective action.

Keywords: cosmetic creams, peptides, technology, properties.

Постановка проблеми

Вигляд та стан шкіри – її колір, тон, пігментація, характеристика поверхні – значною мірою відображають вік, спосіб життя і стан здоров'я людини [1]. Тому різні галузі промисловості (парфумерно-косметична, фармацевтична, харчова, хімічна, біотехнологічна) пропонують величезний арсенал косметичних засобів для того, щоб очистити, заспокоїти, відновити, зміцнити й захистити нашу шкіру, тобто підтримати її у нормальному стані.

Завдяки ефективності та простоті застосування й доволі прийнятній ціновій політиці одним із найбільш популярних засобів по догляданню за шкірою вважаються косметичні креми (у подальшому просто «креми») [2]. Зараз на полицях магазинів є креми різного складу і цільового призначення – для живлення та зволоження, усунення зморшок та інших недоліків шкіри. При цьому через погіршення клімату, урбанізацію, стрімкий темп і не завжди здоровий образ життя, передчасне старіння населення вимоги до якості та ефективності дії косметичних кремів постійно підвищуються. Задовольнити різноманітні потреби споживачів, викликати довіру потенційних покупців й тим самим отримати прибуток виробникам можна шляхом розробки інноваційних препаратів, а також вдосконалення існуючих рецептур і технологій.

Аналіз досліджень та публікацій

Одним із популярних видів косметичної продукції для доглядання за шкірою, які користуються постійним попитом споживачів, є креми. Відповідно до нормативної документації [3] крем косметичний уявляє собою косметичний засіб мазеподібної консистенції для догляду за шкірою, волоссям, нігтями тощо з вмістом спеціальних речовин або добавок, які визначають його конкретну функційну призначеність та вузьконаправлену дію. За складом креми поділяють на жирові, емульсійні та на гелевій основі. Від мазей вони відрізняються тим, що містять більше води, мають приємніший запах та вигляд.

Креми володіють багатьма корисними функціями, наприклад, такими як зволожуюча, живильна, омолодуюча, антибактеріальна, але основна функція будь-якого крему – захист шкірного покриву людини від холоду, сонячних променів, вітру, часу та інших негативних впливів [2, 4].

Раніше креми готували шляхом простого змішування двох або більше інгредієнтів із використанням води у якості розчинника. Перший засіб для догляду за шкірою (кольдкрем) створив грецький лікар, хірург і філософ римської доби Клавдій Гален, який змішав воду з оливковою олією та бджолиним воском. Згодом аналогічні препарати зустрічалися в різні епохи, на різних континентах, і інгредієнти в їхньому складі могли варіюватися, так, замість звичайної води стали використовувати рожеву, а замість оливкової олії мигдальну [5].

Основною всіх сучасних кремів для догляду за шкірою, як і в давнину, є композиція жирних речовин, води та біологічно активних компонентів. Оскільки вода та олія не змішуються, вводять емульгатори. На даний час найбільш поширеними на косметичному ринку є емульсійні креми, що обумовлено високою косметичною ефективністю та рентабельністю даної групи косметичних засобів. Фізіологічна виправданість використання емульсій в якості основи цих косметичних засобів обґрунтована такими чинниками як: а) структурні та функціональні особливості шкірного покриву, негативні зміни яких попереджають і коригують саме емульсійні косметичні креми. До прикладу, суха, надто чутлива шкіра, що характеризується типом «мантії», вимагає компенсуючої дії з боку водомасляних систем (емульсії типу «вода/масло»), а жирний тип шкіри – застосування систем з переважаючою кількістю води, тобто емульсії типу «масло/вода»; б) раціональне поєднання у складі емульсій води та жирів, що забезпечує низку життєво важливих функцій як шкіри, так і організму в цілому. Оскільки водожирова система за природою та складом близька до природних компонентів шкіри, вона здатна активно впливати на процеси, що відбуваються у структурі останньої; в) присутність води, яка сприяє змочуванню, гідратації шкірної поверхні, що, у свою чергу, збільшує її сорбційні властивості. Значною мірою цьому також сприяють нативні «епідермальні емульгатори» – холестерин та його ефіри. Внаслідок зазначеного покращується контакт шкіри з оточуючим середовищем, що сприяє активізації процесів всмоктування та десорбції; г) здатність гідратованої шкірної поверхні підвищувати свою «пропускну» здатність. На відміну від жирних та гелеподібних кремів до складу емульсій при необхідності можна вводити речовини з різними властивостями [2, 4].

З літератури [6, 7] та практики пересічного споживача відомо про зростаючий попит на косметичні засоби, у складі яких є інгредієнти, що виявляють біологічну активність: вітаміни, вуглеводи, білки тощо. Особливе місце серед цих сполук посідають пептиди, насамперед, природного походження, які стимулюють вироблення природної гіалуронової кислоти, колагену, еластину, підвищують тургор та щільність шкіри, надаючи помітний ліфтинг-ефект, вирівнюють рельєф шкіри, розгладжуючи зморшки, забезпечують антиоксидантний захист, зокрема захищаючи від вільних радикалів. Крім того, креми з пептидами мають накопичувальний ефект. Недарма деякі косметологи називають пептиди «таємними агентами краси» [8].

Традиційне уявлення про пептиди пов'язане з природними чи синтетичними органічними сполуками, молекули яких складаються із залишків амінокислот (двох та більше), що з'єднані між собою ковалентними пептидними зв'язками $-CO-NH-$ у нерозгалужений ланцюг. Довжина пептидного ланцюга в пептидах і білках може коливатися у широких межах – від 2 до 100, а іноді до тисячі амінокислотних залишків [9, 10].

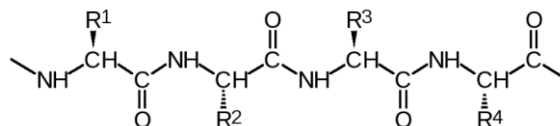


Рис.1. $-CO-NH-$ ланцюг

Пептиди, що містять до 10 амінокислотних залишків, називаються олігопептидами, понад 10 амінокислотних залишків – поліпептидами. Сполуки побудовані з більш, ніж 100 (за деякими даними 50-70) амінокислотних залишків, дістали назву «білки» (або «протеїни»). Головна відмінність пептидів від амінокислот і білків полягає у тому, що пептиди не мають видоспецифічності. Наприклад, колаген риб у складі крему не покращить стану шкіри людини; але якщо цей колаген розщепити та ввести отримані пептиди до складу крему, то від такого косметичного продукту можна очікувати омолоджувального ефекту, хоча деякі косметологи схиляються до думки, що хімічно синтезовані пептиди безпечніші за ті, що отримані розщепленням білків живої природи.

Пептиди розрізняються за видом, кількістю та розташуванням амінокислотних залишків у поліпептидному ланцюжку. Наприклад, пептиди про-сер-про-ала-гіс і гіс-ала-про-сер-про, незважаючи на однаковий кількісний та якісний склад, мають різні властивості [11].

Унікальна будова, відносно висока стабільність й чітко визначені дії роблять пептиди привабливими для багатьох показань, пов'язаних зі шкірою (в першу чергу, для антивікової терапії) та волоссям. До основних переваг пептидів належать біосумісність, висока біологічна активність, біофункціональність і легкість модифікації. Завдяки цим перевагам наноматеріали на основі пептидів використовуються у виготовленні ліків, тканинній інженерії, регенеративній медицині, вакцинах, діагностиці та косметиці [12, 13].

На сьогоднішній день у розпорядженні хіміків та біотехнологів є два види пептидів: натуральні та синтетичні. Натуральні пептиди утворюються за допомогою гідролізу – хімічної реакції між водою та білками, внаслідок чого утворюються гідролізати, основною складовою яких є окремі амінокислоти (АК) або ланцюжки з кількох АК, які і є пептидами. Синтетичні пептиди збираються з амінокислот на кшталт конструктора. У лабораторіях постійно створюються все нові й нові синтетичні пептиди – як правило, вони мають більш вузько спрямовану дію та дозволяють адресувати ті або інші завдання більш прицільно.

Інтерес до пептидів у косметичній сфері виник в результаті відкриття їх корисних ефектів при загоєнні ран. Оскільки пептиди беруть участь у величезній кількості фізіологічних процесів, було логічно продовжити їх використання у косметичних цілях. За способом дії косметичні пептиди ділять на три основні групи:

- *сигнальні пептиди* – складаються переважно з пептидів, що здатні збільшувати синтез колагену або, навпаки, інгібувати розщеплення колагену колагеназою;
- *пептиди, що впливають на нейротрансмітери* – імітують ефекти ботулінічних нейротоксинів;
- *пептиди-носії* – діють шляхом доставки мікроелементів, необхідних ферментативних процесів.

Більшість пептидів, що використовуються у косметичній сфері, призначені для протидії процесу старіння шкіри. Потреба у таких продуктах обумовлена зростаючим у суспільстві прагненням зберегти молодий зовнішній вигляд навіть у літньому віці, а також широтою можливих методів лікування та догляду для досягнення цієї мети [14]. Багаторічний досвід у галузі синтезу пептидів ще більше розширює перспективи застосування цих сполук при створенні сучасних ефективних косметичних засобів. На поточний момент виявлено понад півтори тисячі різновидів таких речовин.

При розробці косметичних складів для догляду за здоровою шкірою та лікування пошкодженої або дисфункціональної шкіри все більш популярними стають пептиди. Декілька компаній, таких як PharmaSpecial, Galena, Biotec, Lipotec та Silab, інвестують у технологічно інноваційні біоактивні пептиди, приділяючи особливу увагу сигнальним пептидам і пептидам-інгібіторам нейротрансмітерів. Біоактивні пептиди становлять 10 % всіх продажів фармацевтичних компаній [15]. Проте, публікацій про такі пептиди недостатньо. Здебільшого подається інформація про антивікову косметичну продукцію і пептиди, що синтезуються з пальмітолу і застосовуються у кремах для розгладжуванні зморшок або наповнення шкіри. Тому для підвищення ефективності дії та розширення асортименту кремів виникає потреба в аналізі та систематизації інформації з удосконалення складу і технології виготовлення цих косметичних засобів з використанням пептидів.

Формулювання цілей статті

З урахуванням переваг емульсійних кремів та пептидів, як дієвих компонентів останніх, визначено мету дослідження – аналіз сучасних розробок із застосування пептидів для виготовлення емульсійних косметичних кремів у напрямку розширення асортименту й підвищення ефективності дії цих засобів на шкіру людини. Оскільки емульсійні креми з пептидами застосовуються переважно для догляду за шкірою обличчя, акцент зроблено саме на такому їх призначенні. Об'єкт дослідження – пептиди як складова емульсійних косметичних кремів для догляду за шкірою обличчя, а також самі креми. Предмет дослідження – пошук та одержання пептидів різного походження для виготовлення дієвих косметичних кремів на їх основі. У роботі застосовано загальнонаукові методи пізнання у вигляді опису, спостереження, аналізу та синтезу, а також такі методологічні прийоми, як порівняння й встановлення причинно-наслідкових зв'язків.

Виклад основного матеріалу

Пошук нових сполук, що запобігають або послаблюють старіння шкіри, покращують її зовнішній вигляд, був одним із пріоритетів дослідження активних косметичних засобів у роботі [16]. Автори відпрацювали режими одержання косметичного крему типу «масло-вода» на основі самоемульгуючої основи Lipoderm 4/1. У якості активної речовини використали пептид Матриксил, відмінною особливістю якого є здатність діяти через місцеве застосування, що дає більше переваг порівняно зі складом на основі ботулінічного токсину. Встановлено оптимальну частоту обертання ротора при диспергуванні жирової фази, що дозволяє отримати емульсії певної консистенції та ступеня дисперсності. Використання в рецептурі косметичного крему пептиду Матриксил у кількості до 5 % не знижує емульсійні властивості цього засобу. На відсутність гідролітичних процесів в емульсії, що призводять до псування отриманого препарату, вказує стабільність його рН при двомісячному зберіганні.

Зазвичай вважається, що гідролізати колагену (пептиди) з низькою молекулярною масою (LMW) проявляють кращу біологічну активність, ніж їх більш розмірні аналоги. Однак, приготування низькомолекулярних гідролізатів колагену часто ускладнено їх особливою структурою, перехресними зв'язками та наявністю гідроксипроліну. В огляді [17] проаналізовано здобутки у приготуванні низькомолекулярних гідролізатів колагену та методах визначення молекулярної маси. Обговорено проблеми та перспективи майбутніх напрямів в отриманні гідролізату колагену LMW, наприклад, представлена мотивація харчової, косметичної та деяких інших галузей промисловості до отримання низькомолекулярного гідролізату колагену з побічних продуктів харчової промисловості, які здатні викликати певні фізіологічні реакції в організмі.

Для забезпечення ефективної дії активного компонента косметичного засобу на шкіру необхідно не лише обґрунтовано обрати цей компонент, а й забезпечити його транспортування до всіх шарів шкіри без втрати активності. З точки зору автора [18], розрахунки якого підтверджені експериментально, найбільш придатними носіями є носії рослинного походження: саме вони ефективно доставляють поліпептиди, що входять до складу

активного інгредієнта, до всіх необхідних складових шкіри: косметичний засіб (крем) у вигляді комплексу рослинного походження своєю ефективною дією сприятиме омолодженню шкіри людини, розгладжуванню зморшок, відновленню нормального стану шкіри, її вологості, пружності, міцності, еластичності, гладкості та природного кольору. На підставі комплексного дослідження можливості використання численних рослин для формування активного компонента косметичного засобу встановлено, що на кінцеву ефективність компонента впливають лише біологічно розміри активних поліпептидів рослинного походження молекулярної масою від 1 до 98 кДа. Тобто, частинки будь-якої рослини (тобто не лише лікарської) у вигляді поліпептидів такої молекулярної маси, незалежно від індивідуальних властивостей рослини, формують активний компонент з певною вище ефективністю. Експериментально доведена доцільність застосування основи з рослинних компонентів, вибраних із групи буферних та желеутворюючих агентів, ароматизаторів, консервантів, стабілізаторів і т.і.

Все більшу увагу сучасної біотехнологічної промисловості привертає виробництво стійких, поживних та екологічно чистих продуктів і препаратів на базі побічних продуктів агропромислового виробництва. Способи отримання пептидів (точніше поліпептидів) із рослинної сировини відомі в галузі техніки. Зокрема, у відповідності з [18] отримання активного компонента косметичного крему і контроль молекулярної маси поліпептидів, що входять до його складу, здійснюється за наступним алгоритмом: промивання сировини – сушіння – екстрагування – центрифугування – ліофілізація – визначення поліпептидного складу отриманого препарату – пакування – зберігання.

У роботі [19] у якості джерела рослинного протеїну та біоактивних пептидів розглядається бавовняна сировина, наводяться докази біофункціональності та перспективи промислового застосування цих сполук. Авторами всебічно обговорені методи найбільш ефективної екстракції білка бавовняного насіння з екулентною концентрацією держсиполу. Поліпептиди бавовняного насіння виявляють антиоксидантну, протимікробну, імуномодулюючу та інгібуючу активність ангіотензинперетворюючого ферменту. Чудові функціональні харчові властивості та відносно низька вартість порівняно з іншими рослинними поліпептидами роблять їх прийнятними біоагентами для різних харчових та нехарчових застосувань, наприклад, у косметичній промисловості.

Гідроліз білків може спричиняти утворення великої кількості біоактивних фрагментів. Для отримання пептидів з високою біологічною активністю білок *насіння китайської айви* гідролізували папаїном [20]. Після очищення ультрафільтрацією, гель-фільтраційною хроматографією та високоефективною рідинною хроматографією з оберненою фазою отримано два пептиди: NYRRE (аспарагін-тирозин-аргінін-глутамінова кислота) і RHAKF (аргінін-гістидин-аланін-лізин-фенілаланін). У тестах на антиоксиданти RHAKF продемонстрував сильнішу DPPH активність видалення супероксидних аніон-радикалів та інгібування перекисного окиснення ліпідів, а також кращу мідь-хелатуючу активність, ніж NYRRE. На підставі моделювання молекулярного докінгу встановлено, що між RHAKF і тирозиназою спостерігається більше сайтів стикування, що, ймовірно, підтверджує кращу інгібуючу поведінку даного пептиду. Одержані результати передбачають, що він буде більш прийнятним як потенційний засіб для догляду за шкірою у фармацевтичній або косметичній промисловості.

Метою роботи [21] було визначити захисні ефекти (антиоксидантний, протизапальний та омолоджуючий) пептидних екстрактів *зерен сорго білого* проти пошкоджень, спричинених впливом ультрафіолетового опромінення в органотипічних культурах шкіри. Витягнуті із зерен сорго фракції-окупанти гідролізували алкалазою з отриманням неочищених гідролізатів. Потім методом ультрафільтрації готували два пептидних екстракти з молекулярною масою 1-3 кДа (PE-3) і менше 1 кДа (PE-1). Результати біопроб показали, що оброблення обома екстрактами значно знижує: а) пошкодження, викликане ультрафіолетовим опроміненням, за рахунок послаблення активності супероксиддисмутази та глутатіонпероксидази та за рахунок підвищення активності каталази; б) рівень протизапальних цитокінів у вигляді інтерлейкіну 1- β та інтерферону- γ , а також фактор некрозу пухлини- α (TNF- α). Крім того, ці пептидні екстракти інгібують активність колагенази, еластази і тирозинази. Отже, ферментативне виробництво таких екстрактів із захисними функціями шкіри може стати перспективною стратегією створення потенційних інгредієнтів нових космецевтичних складів.

Метою дослідження [22] було виявити біоактивні пептиди, що вивільняються з гідролізату білків *насіння Vicia faba* – однорічної трав'яної рослини родини бобових (*Fabaceae*), кормової та овочевої культури. Модель гідролізу проводили із трипсином. Спочатку отриманий гідролізат фракціонували за допомогою катіонообмінної хроматографії, потім найбільш біологічно активну фракцію аналізували методом тандемної мас-спектрометрії ВЕРХ з оберненою фазою. Після анотації за допомогою програмного забезпечення Peaks (BSI, Канада) для секвенування пептидів *de novo* ідентифікували сім пептидів, переважно отриманих із запасних білків (легумін та вітелін). Ці пептиди додатково хімічно синтезували для оцінювання їхньої антиоксидантної здатності, антитирозиназної активності та антибіоплівкової здатності проти *Pseudomonas aeruginosa* PA14. Результати показали, що пептиди P5-P7, ідентифіковані як LSPGDVLVIPAGYPVAIK, VESEAGLTETWNPNHPELR і EEYDEEKEQGEEIR, виявляють найвищу активність видалення радикалів DPPH (IC₅₀ = 0,25-1,9 мМ). P5 був єдиним пептидом, здатним хелатувати залізо і відновлювати Fe³⁺ до Fe²⁺. Крім того, пептиди P4 (GPLVHPQSQSQSN) і P6 спостерігалися як потужні інгібітори тирозинази зі значеннями IC₅₀ 1 та 0,14 мМ відповідно. P1, P5, P6 та P7 також показали цікаву антибіоплівкову активність проти *Pseudomonas aeruginosa* PA14 зі значенням MBIC₅₀ в діапазоні від

12 до 35 мкМ. Отримані дані свідчать, що гідролізат білків насіння *Vicia faba* може бути джерелом природних біоактивних пептидів для косметичних та фармацевтичних цілей.

Одним з поширених шкірних захворювань із серйозними психосоціальними наслідками є гіперпігментація. Групою вчених виявлено [23], що новий декапептид-12 безпечніший за гідрохінон у зниженні вмісту меланіну з ефективністю більшою, ніж 50 %, після шістнадцяти тижнів лікування двічі на день. Однак, цей пептид має обмежене проникнення через шкіру внаслідок своєї гідрофільності та високої молекулярної маси. Для подолання такого обмеження декапептид-12 модифікували додаванням ланцюга пальмітату. За результатами молекулярного докінгу два пептиди виявили однакову біологічну активність щодо тирозинази. Дослідники також перевірили дію хімічних підсилювачів (олеїнова кислота та ментол) проникнення та мікроголки для доставки двох пептидів у шкіру та через шкіру, використовуючи метод проникнення через шкіру людини *in vitro*. Було показано, що пальмовий пептид краще утримується в шкірі за рахунок підвищеної ліпофільності, а при шкірному всмоктуванні пальмових пептидів досягається їх терапевтична концентрація у шкірі. Комбінований підхід з використанням молекулярної модифікації, хімічного посилення проникнення та пластиру з мікроголками виявився корисним для покращення проникнення пептидів через шкіру.

У роботі шведських вчених [24] повідомляється про розробку багатьох фізіологічно активних пептидів та білків, проте, на ринку відсутня фармацевтична та косметична продукція для місцевого застосування, яка містить ці чутливі молекули. Основними причинами можуть бути відсутність стабільності та обмеження проникнення більших молекул у шкіру. Авторами досліджено можливість створення такого пептидного складу, який забезпечує проникнення пептидів у волосяні фолікули та відповідає наступним критеріям:

- склад повинен бути хімічно та фізично стабільним;
- склад повинен мати привабливі косметичні властивості;
- склад повинен бути сумісним як зі шкірою, так і зі шкірним жиром.

Гіпотеза полягала в тому, що підвищена стабільність пептиду може бути досягнута шляхом його зберігання у твердій формі та у безводному середовищі, а проникнення в шкіру полегшене за рахунок зменшення розміру частинки (менше 10 мкм) при виготовленні пептиду, а також використання допоміжних речовин, сумісних зі шкірним покривом. На підставі цього розроблено безпечну та косметично привабливу рецептуру, що полегшує локальний розподіл модельного пептиду FOL-005 у шкірі, водночас забезпечуючи хімічну та фізичну стабільність.

В останні роки поглиблений розвиток і використання отримали пептиди водних тварин і рослин [25-29]. Прикладами морських джерел біоактивних пептидів є водорості, молюски та риби. У цих пептидів виявлено низку цінних біологічних властивостей у вигляді антиоксидантної, антиатеросклерозної, протипухлинної, антикоагулянтної, протизапальної, антигіпертензивної та антимікробної активності. Крім того, пептиди, отримані з морських джерел, можуть представляти великий інтерес через такі функціональні властивості, як розчинність, емульгуюча та піноутворювальна здатність.

У статті португальських вчених [27] наведено інформацію про біоактивні пептиди, виділені з різних морських джерел, їх біологічну активність, функціональні властивості та промислове застосування. Найбільш поширеним методом виробництва пептидів є ферментативний гідроліз. І хоча гідролізати морських білків вже використовуються в різних промислових цілях, біоактивні пептиди не знайшли широкого індивідуального застосування. Однак, завдяки зазначеним вище біологічним властивостям, морські пептиди можуть представляти великий інтерес для промислового застосування, наприклад, як активні інгредієнти харчових або косметичних продуктів; консерванти для харчових продуктів або косметики; протизапальні космецевтичні засоби; фармацевтичні або нутрицевтичні продукти для лікування або профілактики захворювань, з потенційно меншою кількістю побічних ефектів порівняно з синтетичними ліками. Пептиди, отримані з молюсків, мають антимікробні властивості. Проте, включення пептидів у промислові матриці може призвести до зниження їхньої біоактивності. Одним із найцікавіших підходів до підвищення захисту пептидів від несприятливих зовнішніх факторів може бути інкапсуляція.

Asterias pectinifera або морська зірка – дуже незвичайна, безхребетна голкошкіра істота, яка мешкає в морях та океанах, руйнуючи аквакультурну промисловість через свій надзвичайний апетит. Нещодавно у Кореї вона була визнана екологічно чистим джерелом нетоксичних і добре розчинних у воді низькомолекулярних пептидів колагену, які сприяють загоєнню ран, регенерації кісток та захисту шкіри. Потенційно ці пептиди можуть застосовуватися з біомедичною метою, включаючи фармацевтичні та косметичні продукти, проте, залишалось незрозумілим, яким чином вони здатні поліпшити абсорбцію колагенових пептидів *in vivo*. Виходячи з цього, автори [28] розробили метод підвищення швидкості поглинання колагену пептидів з використанням наноносія на основі ліпідів. Таким чином, комбінація низькомолекулярних пептидів колагену, отриманих з *Asterias pectinifera*, та еластичних наноліпосом стала багатообіцяючою перспективою екологічно чистого джерела матеріалів для антивікової косметики.

Порошкоподібний пептид *голотурії* або морського огірка, який належить до класу безхребетних тварин типу голкошкірих, уявляє собою низькомолекулярний (молекулярна маса менше 1 кДал) пептид, отриманий протеолітичним гідролізом з подальшим поділом та очищенням гідролізату морського огірка. Цей пептид переважно колагеновий й додатково містить різні активні пептиди, такі як нейропептид, глікопептид та антибактеріальний. Йому притаманні швидке поглинання, високий коефіцієнт використання,

гарна розчинність, стабільність і низька в'язкість. Широко використовується у харчовій, медичній, косметичній та фармацевтичній промисловості [29].

Заради об'єктивності слід зазначити, що використання природних ресурсів для виробництва біоактивних пептидів недостатньо для задоволення зростаючих потреб людей. Для вирішення цієї проблеми використовуються біотехнологічні інструменти та процеси для синтезу біоактивних пептидів. Порівняно з традиційним біоактивним пептидом синтезований не лише задовольняє потреби споживачів, а іноді й більш ефективний.

З появою соціальної проблеми старіння зростає попит людей на активні інгредієнти для захисту здоров'я шкіри та терапевтичної ефективності. Біоактивні пептиди є оптимальними речовинами для боротьби зі старінням шкіри з високою безпекою та великою різноманітністю біологічних дій, таких як антиоксидантна, антивікова, антидіабетична, антигіпертензивна та антибактеріальна. В останні роки природні та синтетичні пептиди проти старіння були широко вивчені *in vitro*, *in vivo* та клінічно. До прикладу, такі пептиди проти старіння, як пептиди колагену, можуть впливати на різні фізіологічні шляхи шкіри і мають значний ефект захисту шкіри при місцевому застосуванні та вживанні в їжу. Ці характеристики показують, що біоактивні пептиди можуть покращити здоров'я шкіри, забезпечуючи певні фізіологічні функції. В огляді [30] підсумовано дослідження пептидів проти старіння та застосування пептидів проти старіння для покращення здоров'я шкіри, які в основному базуються на пептидах колагену та відповідних синтетичних пептидах (рис. 2).

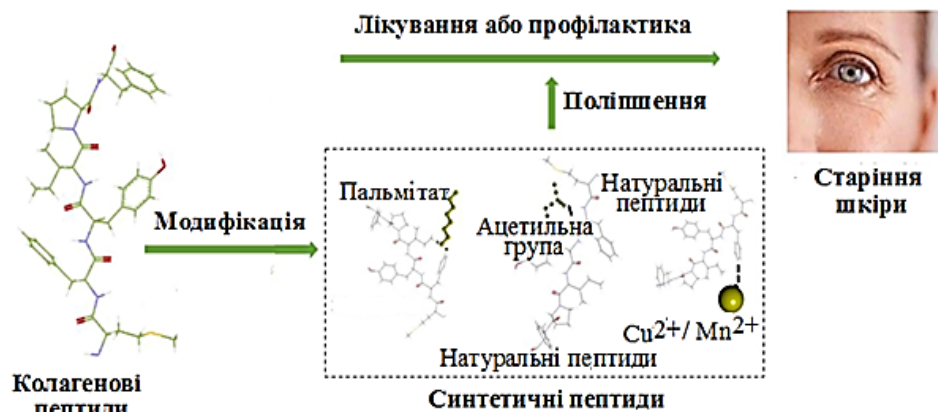


Рис. 2. Природні та синтетичні пептиди проти старіння [30]

Висновки

Одним з найпоширеніших видів косметичної продукції є креми, які завдяки широкому використанню екстрактів цілющих рослин, ефірних та рафінованих жирних олій, білків, вітамінів, а також простоті застосування та досить прийнятній ціновій політиці мають профілактично-лікувальні властивості та великий попит у населення. Найбільша частина косметичних кремів для догляду за шкірою обличчя створюється на основі емульсій, що обумовлено здатністю останніх поєднувати масляну та водну фази, можливістю введення різних активних компонентів і такими гарними споживчими властивостями, як зволожуюча здатність, легкість всмоктування та нанесення на шкіру. Особливу увагу привертають засоби, які надають на шкіру не тільки косметичну дію, але й виявляють деякі спеціальні властивості, наприклад регенеруючу, антибактеріальну, ранозагоювальну дію і т.д. Для створення продуктів, що мають більш ефективний вплив на шкіру, актуальним є пошук інгредієнтів та технологічних прийомів, здатних це забезпечити.

Останні досягнення у дослідженнях, пов'язаних із загоєнням ран та старінням шкіри, призвели до розробки інноваційних косметичних препаратів, які для покращення стану шкіри передбачають використання пептидів. Довгострокові переваги цих продуктів ще неповністю оцінені, проте аналіз літератури свідчить у тому, що кількість доказів користі, отриманої від використання, постійно зростає. Це досягається шляхом включення до складу косметичних емульсійних кремів низькомолекулярних пептидів, отриманих шляхом гідролізу білків рослинного походження, морських тварин, а також засобів, що підсилюють їх проникнення в шкіру, наприклад, хімічних підсилювачів та голкових пластирів. Заради об'єктивності слід зазначити, що використання природних ресурсів для виробництва біоактивних пептидів недостатньо для задоволення зростаючих потреб людей. Для вирішення цієї проблеми використовуються біотехнологічні інструменти та процеси синтезу біоактивних пептидів. Основні вимоги до створюваних пептидних складів полягають у їх фізико-хімічній стабільності, сумісності зі шкірою та її компонентами та, безумовно, ефективності дії.

Література

1. Біохімія шкіри та її додатків : навчальний посібник / К. В. Александрова, Н. П. Рудько, О. Б. Макоїд, О. Ю. Черчесова, Д. А. Васильєв. Запоріжжя : ЗДМУ, 2021. 96 с.
2. Пешук Л. В., Бавіка Л. І., Демідов І. М. Технологія парфумерно-косметичних продуктів : навчальний посібник. К. : Центр учбової літератури, 2007. 376 с.
3. ДСТУ 2472:2006. Продукція парфумерно-косметична. Терміни та визначення понять : наказ Держспоживстандарту України від 1 серпня 2006 р. № 227 з 2007-07-01. Київ : Держспоживстандарт України, 2008. 70 с.
4. Технологія косметичних засобів : підручник / О. Г. Башура, О. І. Тихонов, В. В. Россіхін та ін. ; за ред. О. Г. Башури і О. І. Тихонова. Х. : НФаУ, Оригінал, 2017. 552 с.
5. Історія cold-cream. <https://www.ambra.in.ua/en/novini/istoriya-cold-cream>
6. Переваги органічної косметики. <https://sts.sumy.ua/society-2/perevagy-organichnoyi-kosmetyky.html>
7. Pulok K. Mukherjee, Niladri Maitya, Neelesh K. Nema, Birendra K. Sarkar (2011). Bioactive compounds from natural resources against skin aging. *Phytomedicine*. №19. pp. 64–73.
8. Пептиди в косметології, крем для обличчя з пептидами - топ 10, пептиди для шкіри, очей, уколи. <https://prostolady.com.ua/525-peptidi-v-kosmetologiyi-krem-dlya-oblichchya-z-peptidami-top-10-peptidi-dlya-shkiri-ochey-ukoli.html>
9. Raymond Cooper, George Nicola (2015). *Natural Products Chemistry. Sources, Separations, and Structures*. London-New York: Taylor & Francis Group, LLC CRC Press, 206 p.
10. Olga Andreyeva, Ivan Gryshchenko. *Natural Products Chemistry: Tutorial*. Kyiv : Svit Uspichu, 2022. 496 p.
11. Пептиди. <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B5%D0%BF%D1%82%D0%B8%D0%B4%D0%B8>
12. Берладір Х. В., Говорун Т. П., Олешко О. М. Біомедичні матеріали: від історії до сьогодення : навчальний посібник. Суми : Сумський державний університет, 2022. 223 с.
13. Yasemin Budama-Kilinc, Burak Ozdemir, Kubra Gozutok. Peptide-based nanobiomaterials: In book «*Nanobiomaterials Science, Development and Evaluation*». Istanbul : Yildiz Technical University, 2017. pp. 135–146.
14. Peptides in cosmetics: pioneering partner for cosmetic peptides. <https://www-bachem-com.translate.google.com/translate/knowledge-center/white-papers/peptides-in-cosmetics/>
15. Tamyres Nassa Lima, Carla Aparecida Pedriali Moraes. Bioactive peptides: applications and relevance for cosmeceuticals. *Cosmetics*. 2018. 5 (1). pp. 1–9.
16. Пептид Matrixyl Morphomics. <https://zulfiya.ua/peptidi/3675-peptid-matrixyl-morphomics>
17. Hui Hong, Hongbing Fan, Meram Chalamaiah, Jianping Wu. Preparation of low-molecular-weight, collagen hydrolysates (peptides): Current progress, challenges, and future perspectives. *Food Chemistry*. 2019. Vol. 301. Article 125222.
18. Gogidze Z. D. International patent application ZST/UA 2014/000063, A61K 8/64 (2006.01), A61K 8/30(2006.01), A61Q 19/00 (2006.01). Cosmetic cream. International publication number WO 2014/204423 A1.
19. Manoj Kumar, Muzaffar Hasan, Prince Choyal etc. Cottonseed feedstock as a source of plant-based protein and bioactive peptides : Evidence based on biofunctionalities and industrial applications. *Food Hydrocolloids*. 2022. Vol. 131. Article 107776.
20. Yejun Deng, Lixin Huang, Caihong Zhang etc. Skin-care functions of peptides prepared from Chinese quince seed protein: Sequences analysis, tyrosinase inhibition and molecular docking study. *Industrial Crops and Products*. 2020. Vol. 148. Article 112331.
21. Tania P. Castro-Jácomea, Luz E. Alcántara-Quintana, Efigenia Montalvo-González, etc. Skin-protective properties of peptide extracts produced from white sorghum grain kafirins. *Industrial Crops and Products*. 2021. Vol. 167. Article 113551.
22. Antioxidant, antityrosinase and antibiofilm activities of synthesized peptides derived from Vicia faba protein hydrolysate: A powerful agents in cosmetic application. *Industrial Crops and Products*. Vol. 109 (15). December 2017. pp. 310–319.
23. Jungen Chen, Junxing Bian, Basil M. Hantash, etc. Enhanced skin retention and permeation of a novel peptide via structural modification, chemical enhancement, and microneedles. *International Journal of Pharmaceutics*. 2021. Vol. 606. Article 120868.
24. Anna Runnsjöa, Susanna Liljedahla, David Sagna, etc. A Novel Microparticle Based Formulation for Topical Delivery of FOL-005, a Small Peptide. *Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2022. Vol. 111 (5). pp. 1309–1317.
25. Морські організми як багате джерело біологічно активних пептидів. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2021.667764/full>
26. Ahmed M., Verma A. K., Patel R. Collagen extraction and recent biological activities of collagen peptides derived from sea-food waste: A review. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 2020. Vol. 18. Article 100315.
27. Sara Alexandra, Cunha Manuela, Estevez Pintado. Bioactive peptides derived from marine sources:

Biological and functional properties. Trends in Food Science & Technology. 2022. Vol. 119. pp. 348–370.

28. Seong-Beom Hana, Bada Wonb, Seung-chan Yangb, Dong-Hwee Kima. Asterias pectinifera derived collagen peptide-encapsulating elastic nanoliposomes for the cosmetic application. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2021. Vol. 98. pp. 289–297.

29. Пептидний порошок морського огірка. <http://ua.sxpanier.com/plant-extract/sea-cucumber-peptide-powder.html>

30. Xiaocao Zhao, Xuejiao Zhang, Dengyong Liu. Collagen peptides and the related synthetic peptides: A review on improving skin health. Journal of Functional Foods. 2021. Vol. 86. Article 104680.

References

1. Biokhimiia shkiry ta yii prydatkiv : navchalnyi posibnyk / K. V. Aleksandrova, N. P. Rudko, O. B. Makoid, O. Yu. Cheresova, D. A. Vasyliiev. Zaporizhzhia : ZDMU, 2021. 96 s.
2. Peshuk L. V., Bavika L. I., Demidov I. M. Tekhnolohiia parfumerno-kosmetychnykh produktiv : navchalnyi posibnyk. K. : Tsentr uchbovoi literatury, 2007. 376 c.
3. DSTU 2472:2006. Produktsiia parfumerno-kosmetychna. Terminy ta vyznachennia poniat : nakaz Derzhspozhyvstandartu Ukrainy vid 1 serpnia 2006 r. № 227 z 2007-07-01. Kyiv : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2008. 70 s.
4. Tekhnolohiia kosmetychnykh zasobiv : pidruchnyk / O. H. Bashura, O. I. Tykhonov, V. V. Rossikhin ta in. ; za red. O. H. Bashury i O. I. Tykhonova. Kh. : NFAU, Oryhinal, 2017. 552 s.
5. Istoriia cold-cream. <https://www.ambra.in.ua/en/novini/istoriya-cold-cream>
6. Perevahy orhanichnoi kosmetyky. <https://sts.sumy.ua/society-2/perevagy-organichnoi-kosmetyky.html>
7. Pulok K. Mukherjeea, Niladri Maitya, Neelesh K. Nema, Birendra K. Sarkar (2011). Bioactive compounds from natural resources against skin aging. Phytomedicine. №19. rr. 64–73.
8. Peptydy v kosmetolohii, krem dlia oblychchia z peptydamy - top 10, peptydy dlia shkiry, ochei, ukoly. <https://prostolady.com.ua/525-peptidi-v-kosmetologiyi-krem-dlya-oblychchia-z-peptidami-top-10-peptidi-dlya-shkiry-ochey-ukoli.html>
9. Raymond Cooper, George Nicola (2015). Natural Products Chemistry. Sources, Separations, and Structures. London-New York: Taylor & Francis Group, LLC CRC Press, 206 r.
10. Olga Andreeva, Ivan Gryshchenko. Natural Products Chemistry: Tutorial. Kyiv : Svit Uspichu, 2022. 496 r.
11. Peptydy. <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B5%D0%BF%D1%82%D0%B8%D0%B4%D0%B8>
12. Berladir Kh. V., Hovorun T. P., Oleshko O. M. Biomedychni materialy: vid istorii do sohodennia : navchalnyi posibnyk. Sumy : Sumskyi derzhavnyi universytet, 2022. 223 s.
13. Yasemin Budama-Kilinc, Burak Ozdemir, Kubra Gozutok. Peptide-based nanobiomaterials: In book «Nanobiomaterials Science, Development and Evaluation». Istanbul : Yildiz Technical University, 2017. rr. 135–146.
14. Peptides in cosmetics: pioneering partner for cosmetic peptides. <https://www.bachem-com.translate.google.com/translate/goog/knowledge-center/white-papers/peptides-in-cosmetics/>
15. Tamyres Nassa Lima, Carla Aparecida Pedriali Moraes. Bioactive peptides: applications and relevance for cosmeceuticals. Cosmetics. 2018. 5 (1). rr. 1–9.
16. Peptyd Matrixyl Morphomics. <https://zulfiya.ua/peptidi/3675-peptid-matrixyl-morphomics>
17. Hui Hong, Hongbing Fan, Meram Chalamaiah, Jianping Wu. Preparation of low-molecular-weight, collagen hydrolysates (peptides): Current progress, challenges, and future perspectives. Food Chemistry. 2019. Vol. 301. Article 125222.
18. Gogidze Z. D. International patent application ZST/UA 2014/000063, A61K 8/64 (2006.01), A61K 8/30(2006.01), A61Q 19/00 (2006.01). Cosmetic cream. International publication number WO 2014/204423 A1.
19. Manoj Kumar, Muzaffar Hasan, Prince Choyal etc. Cottonseed feedstock as a source of plant-based protein and bioactive peptides : Evidence based on biofunctionalities and industrial applications. Food Hydrocolloids. 2022. Vol. 131. Article 107776.
20. Yejun Deng, Lixin Huang, Caihong Zhang etc. Skin-care functions of peptides prepared from Chinese quince seed protein: Sequences analysis, tyrosinase inhibition and molecular docking study. Industrial Crops and Products. 2020. Vol. 148. Article 112331.
21. Tania P. Castro-Jácomea, Luz E. Alcántara-Quintana, Efigenia Montalvo-González, etc. Skin-protective properties of peptide extracts produced from white sorghum grain kafirins. Industrial Crops and Products. 2021. Vol. 167. Article 113551.
22. Antioxidant, antityrosinase and antibiofilm activities of synthesized peptides derived from Vicia faba protein hydrolysate: A powerful agents in cosmetic application. Industrial Crops and Products. Vol. 109 (15). December 2017. rr. 310–319.
23. Jungen Chen, Junxing Bian, Basil M. Hantash, etc. Enhanced skin retention and permeation of a novel peptide via structural modification, chemical enhancement, and microneedles. International Journal of Pharmaceutics. 2021. Vol. 606. Article 120868.
24. Anna Runnsjöa, Susanna Liljedahla, David Sagna, etc. A Novel Microparticle Based Formulation for Topical Delivery of FOL-005, a Small Peptide. Journal of Pharmaceutical Sciences. 2022. Vol. 111 (5). rr. 1309–1317.
25. Morski orhanizmy yak bahate dzherelo biolohichno aktyvnykh peptydiv. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2021.667764/full>
26. Ahmed M., Verma A. K., Patel R. Collagen extraction and recent biological activities of collagen peptides derived from sea-food waste: A review. Sustainable Chemistry and Pharmacy. 2020. Vol. 18. Article 100315.
27. Sara Alexandra, Cunha Manuela, Estevez Pintado. Bioactive peptides derived from marine sources: Biological and functional properties. Trends in Food Science & Technology. 2022. Vol. 119. rr. 348–370.
28. Seong-Beom Hana, Bada Wonb, Seung-chan Yangb, Dong-Hwee Kima. Asterias pectinifera derived collagen peptide-encapsulating elastic nanoliposomes for the cosmetic application. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2021. Vol. 98. rr. 289–297.
29. Peptydnyi poroshok morskoho ohirka. <http://ua.sxpanier.com/plant-extract/sea-cucumber-peptide-powder.html>
30. Xiaocao Zhao, Xuejiao Zhang, Dengyong Liu. Collagen peptides and the related synthetic peptides: A review on improving skin health. Journal of Functional Foods. 2021. Vol. 86. Article 104680.

НІЧЕПОРУК АНДРІЙ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-7230-9475>e-mail: andrey.nicheporuk@gmail.com**НІЧЕПОРУК АНАСТАСІЯ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-5366-5792>e-mail: eldess06@gmail.com**ДАНЧУК СЕРГІЙ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7854-4556>e-mail: sergey.danchuk.p@gmail.com**КОРОТКОВ ЮРІЙ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0000-4544-4588>e-mail: gazswe707@gmail.com**ЦАВОЛИК ТАРАС**

Західноукраїнський національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-1136-5705>e-mail: tth@wunu.edu.ua

СИСТЕМА ЗБОРУ ДАНИХ ТА ВИЯВЛЕННЯ РОЗПОДІЛЕНИХ АТАК ВІДМОВА В ОБСЛУГОВУВАННІ У МЕРЕЖАХ НА ОСНОВІ ПРОТОКОЛУ RPL

В роботі представлено систему збору даних та виявлення розподілених атак відмова в обслуговуванні у мережах на основі протоколу RPL. Система складається із трьох модулів: модуль збору даних, модуль класифікації та модуль виявлення. Головною особливістю модуля збору даних було те, що збір даних забезпечувався декількома sniffерами, що встановлені у мережі, і з подальшою агрегацією зібраних даних. Для реалізації модуля класифікації проведено дослідження методу опорних векторів та багатошарового перцептрона. Модуль виявлення використовувався для трансляції повідомлення про аномальну поведінку на решту вузлів IoT мережі, що містять ідентифікатор скопроментованого вузла та шлях до нього.

Ключові слова: розподілена атака відмова в обслуговуванні, sniffer, RPL мережа.

NICHEPORUK ANDRII, NICHEPORUK ANASTASIIA, DANCHUK SERHII, KOROTKOV YURII

Khmelnytskyi National University

TSAVOLYK TARAS

West Ukrainian National University

SYSTEM FOR DATA COLLECTION AND DETECTION OF DISTRIBUTED DENIAL OF SERVICE ATTACKS IN THE RPL-BASED NETWORKS

Denial of Service (DoS) or Distributed Denial of Service (DDoS) attacks are among the main security threats to Internet of Things (IoT) networks today. This type of attack leads to the loss of access to the device or the resources it offers. Therefore, with the aim of countering such cyber threats, it is proposed, a system for data collection and detection of distributed denial of service in the RPL-based networks is presented. The system consists of three modules: a data gathering module, a classification module and a detection module. The main purpose of the data collection module is that data collection was provided by several sniffers installed in the RPL network and with subsequent aggregation of the collected data. For the implementation of the classification module, research was carried out on the method of support vector machines (SVM) and a multilayer perceptron (MLP). The detection module was used to broadcast a message about the abnormal behaviour to the rest of the RPL network nodes, containing the ID of the compromised node and the path to it.

To evaluate the efficiency of the proposed system that is based on the data collected by the data gathering module, a number of experiments are conducted. To obtain the data set for the experiments, an infrastructure based on the Ubuntu operating system and the Cooja simulator are deployed, which allowed to simulate the RPL network. Based on the operation of the deployed network, network traffic was collected that corresponded to both legitimate traffic and traffic during a black hole attack. The total number of test data was 24,023 samples. According to the research results, it is established that the SVM-based model demonstrated better performance level, in particular, the accuracy of detecting denial-of-service attacks was 89.6%, while the rate of false positives was 6%.

Keywords: distributed denial of service attack, sniffer, RPL network.

Вступ

Інтернет речей (IoT) об'єднує пристрої у комп'ютерну мережу й дозволяє їм збирати, аналізувати, обробляти та передавати дані іншим об'єктам (речам), що поєднані між собою через програмне забезпечення, програми або технічні пристрої. Проте гетерогенність середовища та безпроводний спосіб обміну даними робить мережі Інтернету речей потенційними цілями для зловмисників. Серед одних із основних загроз безпеці мережам IoT є атаки типу відмова в обслуговуванні (DoS) або розподілені атаки відмова в обслуговуванні (DDoS). Даний тип атак призводить до втрати доступу до пристрою або ресурсів, які він пропонує. Зловмисники реалізують велике коло різних способів атаки, але найпоширеніші з них полягають у бомбардуванні системи величезною кількістю непотрібних даних, щоб заповнити доступну пропускну здатність мережі цілі або її обчислювальну потужність [1]. Іншим варіантом впливу IoT мережу є

перенаправлення пакетів або їх відкидання [2]. Даний види атак особливо гостро проявляється у IoT мережах з огляду на характер реалізації алгоритмів маршрутизації, що передбачають використання повнозв'язних топологій та передачу даних від джерела до приймача через ланцюжок проміжних вузлів [3]. В загальному даний вид атак призводить до того, що легітимні користувачі втрачають доступ до ресурсів або пристроїв. Ще більше погіршує ситуацію для антивірусних засобів використання різних технік обфускації, які до прикладу використовуються у метаморфних вірусах [4–6]. Щодо мети реалізації такі атак, то вона може бути різною, починаючи від створення бот-мереж [7] для отримання грошової винагороди, і закінчуючи задоволенням власних амбіцій. На сьогоднішній день традиційні підходи виявлення атак відмова в обслуговуванні не відповідають поточним вимогам безпеки [8–10]. Існуючі методи та засоби не дозволяють у повному обсязі протистояти постійно зростаючим загрозам. Тому розробка нових методів виявлення атак відмова в обслуговуванні на інфраструктуру Інтернету речей є актуальним завданням.

Архітектура системи збору даних та виявлення розподілених атак відмова в обслуговуванні у мережах на основі RPL протоколу

Завдання збору даних у мережах Інтернету речей є одним напрямків процесу зворотної розробки та може бути імплементоване з метою виконання двох основних функцій: аналізу зібраних даних з метою підвищення ефективності взаємодії між пристроями в мережі або з метою здійснення діагностики мережі на предмет пошуку несправностей. В свою чергу одним із основних напрямків діагностики мереж є аналіз даних мережевого трафіку на предмет виявлення зловмисної активності або впливу кібератак. Це дозволяє реалізувати одну із головних вимог що ставиться до інфраструктури Інтернету речей – забезпечення її безпеки функціонування з точки зору здатності протидії впливу зловмисного програмного забезпечення та кібератак. В даній роботі представлено систему збору даних із протоколу маршрутизації RPL для виявлення розподілених атак відмова в обслуговуванні у мережах Інтернету речей, що функціонують на основі протоколів 6LoWPAN та RPL. Основу запропонованої системи складають три основних модулі (рис. 1): модуль збору даних (МЗД), модуль класифікації (МК), модуль виявлення (МВ).

Модуль збору даних (МЗД) можна розглядати як міжфазний модуль, оскільки він залучається у двох фазах функціонування системи: попереднього навчання та після навчання. Модуль виявлення та модуль агента вузла є частиною фази після навчання та відповідають за виявлення атак і формування реакції протидії. Крім того, на цьому етапі відбувається моніторинг трафіку, класифікація даних та ізоляція зловмисних вузлів. Узагальнену схему системи збору даних та виявлення розподілених атак відмова в обслуговуванні у мережах на основі RPL протоколу наведено на рис. 1.



Рис. 1. Архітектура системи збору даних та виявлення розподілених атак відмова в обслуговуванні у мережах на основі RPL протоколу

Модуль збору даних

Перш ніж здійснити виявлення будь-якої зловмисної активності, слід отримати ознаки (features) із мережі, що дозволили б ідентифікувати появу аномалій. З цією метою у системі запропоновано модуль збору даних. Основною метою цього модуля є збір даних у реальній мережі Інтернету речей (або у модельованій мережі), що функціонує на основі протоколів 6LoWPAN і RPL. Слід відзначити, що запропонована архітектура системи збору даних і виявлення розподілених атак відмова в обслуговуванні не обмежується даними протоколами і у майбутньому може бути узагальнена та масштабована й для інших протоколів обміну даними в мережах Інтернету речей.

У даній системі пропонується використати ознаки із трьох логічних рівнів: фізичного, мережевого та прикладного рівнів. Опрацювання ознак фізичного рівня, зокрема таких як прийняті та передані dBm сигнали на рівні MAC, пов'язано із атаками глушіння фізичного рівня (jamming attacks), що переслідують мету порушення фізичного з'єднання між вузлами у мережі. В результаті опрацювання пакетів фізичного

рівня отримуємо ознаки показник рівня приймаючого сигналу RSSI (f_{RSSI}^p), значення отриманого сигналу dBm (f_{RdBM}^p), значення переданого сигналу dBm (f_{TdBM}^p).

Отримання ознак мережевого рівня є важливим з огляду на специфіку функціонування багатьох відомих атак відмова в обслуговуванні (наприклад атаки вибіркового пересилання пакетів та black hole атака). Із пакетів цього рівня отримуються такі ознаки, як значення якості зв'язку (f_{LQI}^n), середнє значення очікуваної кількості передач ETX (f_{ETX}^n), кількість повідомлень DIO (f_{NDIO}^n), кількість повідомлень DIS (f_{NDIS}^n) та зміна рівня RPL (ранг) вузла (f_{LRPL}^n).

На прикладному рівні даний модуль збирає специфічну для програми інформацію, таку як рівень потужності вузла та температура. Ознаки прикладного рівня, можна отримати шляхом програмування вузлів для розрахунку споживаної потужності електроенергії та інших пов'язаних функцій. Прикладний рівень є зв'язком між мережею та прикладним програмним забезпеченням. В даному дослідженні із пакетів прикладного рівня отримуються такі ознаки як середнє (f_{MeCP}^a) та модальне значення споживаної потужності (f_{MoCP}^a) та ідентифікатор вузла (f_{NID}^a).

Процес вилучення ознак передбачає послідовне отримання ознак із кожного рівня та збереження їх до бази даних з метою їх подальшого опрацювання. Окремо слід відзначити, що перед вилученням ознак слід визначити часове вікно для агрегування даних у записи. Це часове вікно буде використано пізніше для отримання кількісних показників та середніх значень.

Таким чином в результаті опрацювання мережевого трафіку модулем збору даних буде отримано набір даних на основі протоколів RPL та LoWPAN, який буде використано для навчання та тестування алгоритму машинного навчання та створення моделі виявлення (фаза попереднього навчання). Також слід відзначити, що ідентичні кроки по відбору ознак проводяться і для фази після навчання, коли буде використана створена модель машинного навчання для аналізу невідомої активності в режимі реального часу.

Модуль класифікації

Набір даних, згенерований модулем збору даних, використовуватиметься для навчання та тестування алгоритмів машинного навчання. На цьому рівні виконується аналіз різних методів машинного навчання, а також здійснюється вибір того алгоритму, який має найкращі результати з точки зору ефективності та достовірності виявлення атак. В даній роботі в якості методів машинного навчання використовуємо два найбільш поширені методи для даної області дослідження, а саме метод опорних векторів та багатошаровий перцептрон.

Модуль виявлення

Цей модуль працює як точка з'єднання між локальною мережею та системою виявлення розподілених атак відмова в обслуговуванні на інфраструктуру Інтернету речей. Він побудований на вершині базової станції мережі (sink node), оскільки всі вузли підключені до базової станції або безпосередньо, або на відстані кількох переходів (hop). Основна функція цього модуля полягає в трансляції повідомлення про аномальну поведінку на решту вузлів IoT мережі, що містять ідентифікатор зловмисника та шлях до зловмисника. Це дозволить іншому незачепленому вузлу додати вузол зловмисника до чорного списку та уникнути будь-якого зв'язку зі зловмисним вузлом [11]. Крім того, агент виявлення змінює маршрут вузла-жертви та створює новий альтернативний шлях до вузла-приймача. Потім агент виявлення ініціює реконфігурацію топології мережі, щоб ізолювати зловмисний вузол шляхом встановлення нового маршруту до приймача від вузла-жертви. Усі вузли заносять у чорний список шкідливий вузол, а весь мережевий трафік від нього ігнорується та відкидається.

Функціонування системи: фаза попереднього навчання та фаза після навчання

Функціонування запропонованої системи збору даних протоколу маршрутизації RPL для виявлення розподілених атак відмова в обслуговуванні на інфраструктуру Інтернету речей включає дві фази: фазу попереднього навчання та фазу після навчання.

У фазі попереднього навчання модель машинного навчання навчається та тестується на основі зібраних даних МЗД. У даній роботі буде досліджено два алгоритми машинного навчання та проведено набір тестів для визначення найефективнішої моделі. Слід відзначити, що опрацювання моделей машинного навчання здійснюється на основі отриманих даних МЗД.

Процес вибору найкращого методу машинного навчання можна описати наступними кроками:

1. Вибір алгоритму: перед навчанням моделі необхідно вибрати тип машинного навчання. Загальну базу алгоритмів складають метод опорних векторів та штучна нейронна мережа. Слід відзначити, що даний набір може бути розширений, шляхом додавання інших алгоритмів машинного навчання.
2. Навчання/тестування: це фаза навчання для моделі машинного навчання, на якій дані передаються в обраний алгоритм для створення моделі машинного навчання.
3. Перевірка: на цьому етапі модель перевіряється за допомогою набору атрибутів і оцінок.
4. Оптимізація: на цьому кроці задана модель повторюється кілька ітерацій із іншим набором гіперпараметрів. Зазначені кроки повторюються доки не буде отримано найоптимальніший модель для заданого алгоритму машинного навчання.

Наприкінці цих кроків генеруються дві оптимізовані моделі машинного навчання. На основі

результатів на етапі верифікації буде обрано найкращу модель, яка і буде розгорнута в інтелектуальній системі виявлення розподілених атак відмова в обслуговуванні на інфраструктуру Інтернету речей.

Фаза після навчання відповідає за обробку даних і виконання активностей у режимі реальному часі. Роботу системи збору даних протоколу маршрутизації RPL для виявлення розподілених атак відмова в обслуговуванні у фазі після навчання подамо у вигляді наступної послідовності етапів:

1. Агрегація трафіку. Даний крок передбачає збір даних з декількох сніферів, що функціонують у мережі Інтернету речей. Підтримка кількох сніферів у мережі має важливе значення для забезпечення масштабованості мережі та покриття виявлення атак, особливо, якщо мова йде про розподілені атаки, що націлені на декілька вузлів.

З метою перевірки унікальності пакетів, здійснюється порівняння пакетів за часовою міткою. Далі якщо відбулось співпадіння, здійснюється перевірка по значенню ідентифікатора вузла. Таким чином сигнатура даних визначимо як пару значень <часова мітка, ідентифікатор вузла>. Якщо підпис пакета дорівнює будь-яким пакетам, отриманим від будь-якого іншого сніфера, один із пакетів буде проігноровано, і лише одну версію пакета буде додано до черги. В іншому випадку додаткова процедура не потрібна, і пакети пересилаються до наступного набору. Цей процес забезпечує відсутність дублювання даних у режимі реальному часі. Слід відзначити, що процес отримання даних здійснюється на протязі часового вікна w . Таким чином, мережевий трафік розбивається на k інтервалів, довжиною w .

2. Вилучення ознак. Даний крок передбачає виконання тієї самої послідовності дії, що й для фази попереднього навчання (в режимі офлайн), за тим лиш виключенням, що цей процес виконується в режимі реального часу для мереж Інтернету речей.

3. Класифікація атак. На основі отриманої у фазі попереднього навчання оптимальної моделі машинного навчання здійснюється класифікація аномалій у мережевому трафіку.

4. Формування результатів. На цьому кроці здійснюється генерація результату виявлення та створення й надсилання UDP пакету агенту виявлення. Пакет містить такі параметри як ідентифікатор вузла, часова мітка, батьки вузла, ранг і результат виявлення. Результат виявлення є змінною, яка може приймати два значення – 0 або 1. Якщо результат дорівнює 0, то це вказує на те, що жодної атаки не виявлено, і подальші пакети не будуть надіслані агенту виявлення. В іншому випадку, якщо результат виявлення дорівнює 1, пакет із результатом виявлення надсилається агенту виявлення.

Окремо слід відзначити про аномальну поведінку у мережі при якій здійснюється активація фази після навчання. Загалом аномалією вважається зміна параметрів мережі у порівнянні із усталеними показниками цих показників більше ніж заданий поріг чутливості. Значення порогу чутливості є емпіричним числом, що специфічне для кожної мережі. У даній роботі показниками, що є тригерами для активації фази після навчання є:

Зміна кількості інформаційних повідомлень DIO. Заданий вузол у дереві DODAG може розсилати це повідомлення, яке дозволяє іншим вузлам дізнатись про нього. Це повідомлення використовується з метою отримати інформацію про те, чи є вузли, які хочуть приєднатись до дерева.

Зміна кількості інформаційних повідомлень DIS. Якщо відсутнє повідомлення DIO, і якщо вузол хоче приєднатися до дерева DODAG, він надсилає дане контрольне повідомлення. Таким чином DIS дозволяє згенерувати запит на пошук будь-яких DODAG.

Отримання даних та перевірка достовірності виявлення розподілених атак відмова в обслуговуванні

Для отримання набору даних для проведення експериментів було розгорнуто інфраструктуру на основі операційної системи Ubuntu та симулятора Cooja [12]. При моделюванні мережі на основі протоколу RPL усі давачі (звичайні вузли і вузли, що представляють базові станції) використано один і той самий тип мота – Zolertia Z1. Для отримання тестових даних розгорнуто гомогенну мережу, що складалась із двох типів вузлів – базової станції та клієнтських вузлів. Основне завдання, що вирішувалось у модельованій мережі було вимірювання температури. Це завдання виконувалось клієнтськими вузлами, що виконували вимірювання та надсилання базовій станції температури з інтервалом у 20 секунд. Разом із цими даними у пакетах UDP, що відправлялись на базову станцію, отримувалась інша службова інформація, така як рівень RSSI, LQI (індикатор якості зв'язку) та значення ETX. Базова станція представляла кореневий вузол, що виконував функцію не тільки організуючу (підтримує ієрархію зв'язків між вузлами у мережі IoT), а й працював як сервер, на який надходили дані від клієнтських вузлів. Окрім того даний вузол був містком між IoT мережею та граничним маршрутизатором. Організація базової станції та її функціональність реалізована за допомогою компонентів у Contiki OS.

Усі вузли у модельованій мережі працюють під керуванням модифікованої операційної системи Contiki 3.0, включаючи вузли-сніфери. З точки зору маршрутизації було використано стандартний мережевий стек в Contiki OS на основі протоколу RPL. Граничний маршрутизатор реалізовано на основі операційної системи Ubuntu 22.04, яка обробляє всі з'єднання, що надходять від сніферів і базових станцій. Для реалізації сніферів було використано засіб WireShark. На рисунку 3 наведено результати процесу моделювання розгорнутої IoT мережі в Cooja.

В якості розподіленої атаки відмова в обслуговуванні, яка використовувалась для тестування запропонованої системи, було обрано атака скидання пакетів, у якій маршрутизатор, за принципом роботи повинен ретранслювати пакети, проте натомість відкидає їх. В даному дослідженні для реалізації атаки скидання пакетів було використано RPL Attacks Framework [13].

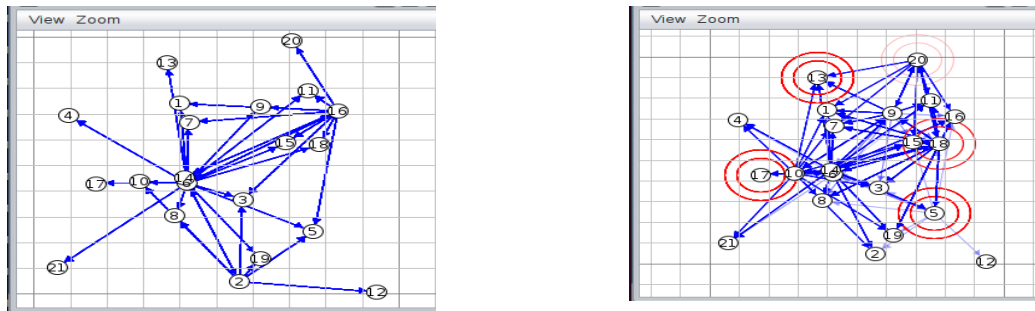


Рис. 2. 6LoWPAN-RPL мережа для моделювання в Cooja

В результаті моделювання бездротової сенсорної мережі було отримано 24 023 векторів ознак, що отримані із IEEE 802.15.4, 6LoWPAN, IPv6 та ICMPv6 пакетів. Із отриманих векторів ознак до класу malicious traffic віднесено 14596 зразків, а до класу legitimate traffic 9426 векторів ознак.

Для створення моделі виявлення у системі виявлення розподілених атак відмова в обслуговуванні весь набір даних був поділений на 2 частини: навчальна та тестова вибірка.

Навчальний набір даних це набір векторів ознак, які використовуються для процесу навчання та підгонки параметрів класифікатора. Даний набір складає 80% всіх векторів ознак із обох класів (тобто 7 540 зразків легітимного трафіку та 11 676 зразків, що промарковані як malicious traffic). Таким чином навчальний набір даних використовується для створення моделей, які є кандидатами для розпізнавання шкідливої активності у мережевому трафіку.

Для підбору оптимальних гіперпараметрів для кожної моделі було використано метод К-перехресної перевірки. Даний метод використовується для пошуку оптимальних гіперпараметрів моделі та нівелювання процесів недонавчання та перенавчання моделі.

Для виконання К-перехресної перевірки вся множина навчальної вибірки була поділена на дві частини: навчальну та вибірку для валідації. В якості К було вибрано значення 8. Це означає, що із 8 частин, навчання моделі проводиться на 7 частинах, а перевірка здійснюється на тій, що залишилась. Даний процес ітеративно продовжувався допоки кожна із 8 частин була використана як тестовий набір. На кожній ітерації проводилось оцінка моделі класифікатора із використанням міри F1. За результатами всі К навчань та перевірок класифікатора було визначено усереднене значення міри F1.

Для моделі штучної нейронної мережі було використано багатошаровий перцептрон із зворотним розповсюдженням помилки. В якості гіперпараметрів для запропонованої ШНМ було досліджено кількість прихованих шарів, значення альфа та функцію активації. Кількість прихованих шарів використовується для визначення кількості шарів між входом мережі та виходом мережі та кількості нейронів у кожному прихованому шарі. Значення альфа використовується для регуляризації, та визначає штрафне значення, яке використовується для визначення розміру ваг, що використовуються для запобігання перенавчання.

За результатами проведених експериментів по визначенню оптимальних параметрів оптимальне значення кількості прихованих шарів становить (6,4), функція активація ReLU, а значення альфа 0,001.

В якості гіперпараметрів для моделі на основі SVM обрано значення С та Гамма. Параметр С повідомляє у SVM визначає, наскільки потрібно уникнути неправильної класифікації кожного прикладу при навчанні. Для великих значень С оптимізація вибере гіперплощину з меншим запасом, якщо ця гіперплощина краще справляється з правильною класифікацією всіх навчальних точок. І навпаки, дуже мале значення С змусить оптимізатор шукати роздільну гіперплощину з більшим запасом, навіть якщо ця гіперплощина неправильно класифікує більше точок. Ядром SVM обрано радіальну базисну функцію, у якій параметр гама визначає вплив точки на кривизну рішення.

За результатами проведених експериментів оптимальними гіперпараметрами для SVM було визначено значення С на рівні 1 та параметром гамма, що складає 0,001. Як і для ШНМ визначення гіперпараметрів для SVM проводилось на основі К-перехресної перевірки.

Таблиця 1

Оцінка достовірності роботи системи виявлення розподілених атак відмова в обслуговуванні на інфраструктуру Інтернету речей для ШНМ та SVM

| Модель класифікатора | Спостереження | | | | Метрика |
|----------------------|---------------|-----|------|-----|----------|
| | TP | FP | TN | FN | Accuracy |
| ШНМ | 2546 | 264 | 1622 | 374 | 0,867 |
| SVM | 2686 | 298 | 1588 | 234 | 0,896 |

Для визначення ефективності запропонованої системи, проведено експеримент, що полягав у оцінці процесу виявлення розподілених атак відмова в обслуговуванні двома моделями класифікаторами, що отримані на попередньому кроці. В якості метрик для оцінки було використано Accuracy:

В якості нульової гіпотези H0 було визначено твердження, яке можна сформулювати наступним чином: «зразок мережевого трафіку має ознаки аномальності та може бути атакою скидання пакетів».

За результатами проведених експериментів можна зробити висновок, що обидві моделі класифікаторів, що представляють ядро модуля виявлення у запропонованій системі, продемонстрували достовірність виявлення більшу за 85%. Кращим отриманні результати у моделі на основі SVM (достовірність виявлення 89,6%) із рівнем хибних позитивних спрацювань (помилки першого роду) 6% та рівнем хибно негативних спрацювань 4,87%. Слід відзначити, що модель на основі штучної нейронної мережі показала результати помилок першого роду на рівні 5,5, що є меншим відповідне значення у моделі SVM. Проте з точки зору критичності для кінцевих користувачів важливішим є помилки другого роду, які є в даному експерименті кращими саме у моделі на основі SVM.

Висновки

В результаті проведеного дослідження представлено систему збору даних із протоколу маршрутизації RPL для виявлення розподілених атак відмова в обслуговуванні у мережах Інтернету речей, що функціонують на основі протоколів 6LoWPAN та RPL. Основу запропонованої системи складають три основні модулі: модуль збору даних, модуль класифікації та модуль виявлення. Особливістю модуля збору даних було те, що збір даних забезпечувався декількома sniffерами, що встановлені у мережі, і з подальшою агрегацією зібраних даних. В основі модуля класифікації було досліджено два алгоритми машинного навчання: метод опорних векторів та багатошаровий перцептрон. Модуль виявлення використовувався для трансляції повідомлення про аномальну поведінку на решту вузлів IoT мережі, що містять ідентифікатор скопроментованого вузла та шлях до нього.

Метою проведення експериментів було оцінка достовірності виявлення розподілених атак відмова в обслуговуванні на наборі даних отриманому модулем збору даних. Для отримання набору даних для проведення експериментів було розгорнуто інфраструктуру на основі операційної системи Ubuntu та симулятора Cooja, що дозволило змодельовати RPL мережу, основним завданням вузлів якої було вимірювання температури та надсилання отриманого значення на базову станцію. Ґрунтуючись на функціонуванні розгорнутої мережі було зібрано мережевий трафік, що відповідав як легітимному трафіку так і трафіку при впливу атаки відмова в обслуговуванні. Загальна кількість тестових даних склала 24 023 зразків. В якості атаки для дослідження було задіяно атаку скидання пакетів. За результатами проведених експериментів модель на основі SVM показала кращі показники достовірності, із рівнем хибних позитивних спрацювань 6% та рівнем хибно негативних спрацювань 4,87%.

References

1. Serrano B., Fernando J., Song W. (2021). A survey on DoS/DDoS attacks mathematical modelling for traditional, SDN and virtual networks. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 31. DOI: 10.1016/j.jestch.2021.09.011.
2. Kafke J., Viana T. (2022). Call Me Maybe: Using Dynamic Protocol Switching to Mitigate Denial-of-Service Attacks on VoIP Systems. *Network*. 2(4). p. 545–567.
3. Al-Hadhrami Y., Hussain F. K. (2020). Real time dataset generation framework for intrusion detection systems in IoT. *Future Generation Computer Systems*. 108. p. 414–423.
4. Pomorova O., Savenko O., Lysenko S. (2016). Metamorphic Viruses Detection Technique based on the Modified Emulators. *CEUR Workshop Proceedings*. 1614. p. 375–383.
5. Savenko O., Lysenko S., Nicheporuk A. (2017). Metamorphic Viruses' Detection Technique Based on the Equivalent Functional Block Search. *CEUR Workshop Proceedings*. 1844. p. 555–569.
6. Savenko O., Nicheporuk A., Hurman I., Lysenko S. (2019). Dynamic signature-based malware detection technique based on API call tracing. *CEUR Workshop Proceedings*. 2393. p. 633–643.
7. Pomorova O., Savenko O., Lysenko S., Kryshchuk A., Nicheporuk A. (2014). A Technique for detection of bots which are using polymorphic code. *Communications in Computer and Information Science*. 431. p. 265–276.
8. Jing H., J. Wang, C.L. (2022). Chen Detection of DDoS Attack within Industrial IoT Devices Based on Clustering and Graph Structure Features. *Security and Communication Networks*. 1401683. DOI: 10.1155/2022/1401683
9. Hussain F., Abbas S. G., Husnain M., Fayyaz U. U., Shahzad F., Shah G. A. (2020). IoT DoS and DDoS Attack Detection using ResNet. *Proceedings of 2020 IEEE 23rd International Multitopic Conference (INMIC)*, Bahawalpur, Pakistan, p. 1–6. DOI: 10.1109/INMIC50486.2020.9318216.
10. Hong L., Wehbi K., Alsalah T. H. (2022). Hybrid Feature Selection for Efficient Detection of DDoS Attacks in IoT. *Proceedings of the 2022 6th International Conference on Deep Learning Technologies (ICDLT '22)*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, p. 120–127. DOI: 10.1145/3556677.3556687
11. Al-hadhrami Y., Hussain F. K. (2019). A Machine Learning Architecture Towards Detecting Denial of Service Attack in IoT. *Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems*, Springer, p. 417–429.
12. Osterlind F., Dunkels A., Eriksson J., Finne N., Voigt T. (2006). Cross-Level Sensor Network Simulation with COOJA. *Proceedings. 2006 31st IEEE Conference on Local Computer Networks*, Tampa, FL, USA, p. 641-648. DOI: 10.1109/LCN.2006.322172
13. RPL Attacks Framework. URL: <https://github.com/dhondta/rpl-attacks>

ПРАВОРСЬКА НАТАЛІЯ

Хмельницький національний університет

ORCID ID: [0000-0001-6001-3311](https://orcid.org/0000-0001-6001-3311)e-mail: margana2000007@gmail.com**ЯШИНА ОКСАНА**

Хмельницький національний університет

ORCID: [0000-0001-7816-1662](https://orcid.org/0000-0001-7816-1662)e-mail: ipzhnu@gmail.com**НЕТРЕБА ІГОР**

Хмельницький національний університет

ORCID: [0009-0009-1366-2429](https://orcid.org/0009-0009-1366-2429)e-mail: crfichyga@gmail.com**ДОМІНА АНАСТАСІЯ**

Хмельницький національний університет

ORCID: [0009-0002-2170-5299](https://orcid.org/0009-0002-2170-5299)e-mail: anastasiya.domina.2015@gmail.com**КИРИЧЕНКО ОЛЕКСАНДР**

Хмельницький національний університет

ORCID: [0009-0006-4149-212X](https://orcid.org/0009-0006-4149-212X)

МЕТОД КОНСТРУЮВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗГІДНО АНАЛІЗУ ПОМИЛОК SQL-ЗАПИТІВ

У статті наведено результати дослідження аналізу методів виявлення семантичних помилок для декларативної мови програмування – результатів аналізу Брасса і Голдберга, які здійснили аналіз виявивши, що бувають не тільки синтаксичні, але й семантичні помилки, які впливають на роботу програми. Подано список семантичних помилок, які часто зустрічаються під час створення запитів, для аналізу семантичних помилок використовувався набір з 191 834 із зібраних запитів більше ніж 36 000 містили помилку. Для кожної помилки здійснено опис проблеми, наведено приклад типічної помилки, та шляхи її вирішення, можливий варіант реалізації інструменту для їх виявлення для подальшого застосування. Аналізуючи поширеність семантичних помилок у SQL-запитах, виявилось, що найбільше поширеними помилками є відсутність предикатів сполуки, за якими слідує постійні помилки вихідного стовпця, та непотрібні аргументи лічильника. Також було виявлено, що спільна поява семантичних проблем у SQL-запитах для всього набору даних досить низька, що вказує на те, що запити рідко містять більше однієї семантичної помилки. Найбільша схожість між двома проблемами становить 20% для непотрібного аргументу підрахунку та непотрібного угруповання по атрибуту. Також було виявлено, що більш складні запити з точки зору кількості використовуваних сполук, предикатів та функцій, як правило, страждають від більшої кількості семантичних помилок, цікаве відкриття, яке може бути використане в майбутньому як метрика для раннього прогнозування того, чи буде запит може містити семантичні помилки або ні. На сьогоднішній день в Інтернеті багато ресурсів, які містять багато запитів з проблемами такого типу. Тому розробники які ознайомляться з даним дослідженням та з описаними вище проблемами, оцінять проблему та будуть виділяти більше часу для виявлення цих проблем, щоб усунути їх відразу після їх виявлення, а не в процесі роботи програми.

Ключові слова: помилки, SQL, семантичні помилки, декларативна мова програмування, аналіз, метод, програмне забезпечення, конструювання програмного забезпечення, програмування Інтернет, веб-технології.

PRAVORSKA NATALYA, YASHYNA OKSANA, NETREBA IHOR, DOMINA ANASTASIYA,
KYRYCHENKO OLEXANDER
Khmelnitskyi National University, Ukraine

A METHOD OF SOFTWARE DESIGN ACCORDING TO THE ANALYSIS OF SQL QUERY ERRORS

The article presents the results of the analysis of methods for detecting semantic errors for a declarative programming language - the results of the analysis by Brass and Goldberg, who performed the analysis and discovered that there are not only syntactic, but also semantic errors that affect the operation of the program. A list of frequently encountered semantic errors during query generation is provided, a set of 191,834 of the collected queries was used to analyze semantic errors, more than 36,000 contained an error. For each error, a description of the problem is made, an example of a typical error is given, and ways to solve it, a possible option for implementing a tool for their detection for further use. Analyzing the prevalence of semantic errors in SQL queries, the most common errors were found to be missing join predicates, followed by persistent source column errors, and unnecessary counter arguments. It was also found that the co-occurrence of semantic problems in SQL queries for the entire data set is quite low, indicating that queries rarely contain more than one semantic error. The highest similarity between the two problems is 20% for an unnecessary count argument and an unnecessary grouping by attribute. It was also found that more complex queries in terms of the number of compounds, predicates and functions used tended to suffer from more semantic errors, an interesting finding that could be used in the future as a metric to early predict whether a query might contain semantic errors or not. Today, there are many resources on the Internet that contain many queries with problems of this type. Therefore, developers who read this study and the problems described above will appreciate the problem and will allocate more time to identify these problems in order to eliminate them immediately after they are discovered, and not during the operation of the program.

Keywords: errors, SQL, semantic errors, declarative programming language, analysis, method, software, software design, Internet programming, web technologies.

Постановка проблеми

Мова структурованих запитів, також відома як SQL, є спеціальною мовою програмування, яка використовується для керування та взаємодії з системами управління реляційними базами даних. Дана мова вважається однією з перших, що використовувала реляційну модель, представлену Коддом [1] у своїй роботі, а пізніше стала стандартом ANSI та ISO. Це зробило її найпоширенішою мовою баз даних, оскільки більше 70% розробників використовують SQL. Слід зауважити, що SQL використовується не лише в IT, але й в інших галузях, таких як банківська справа, бухгалтерський облік, авіація, торгівля тощо. Це робить цю мову програмування однією з найпоширеніших. В той же час, це означає, що існує багато людей з різними рівнями навичок і досвіду, які пишуть і використовують запити SQL. Залежно від рівня розуміння SQL, деякі користувачі можуть напряму використовувати запити з форумів або інших веб-сайтів із запитаннями та відповідями, наприклад StackOverflow. Це має невід'ємний ризик, якщо ці запити містять помилки. З цієї причини, важливо мати інструменти, які можуть допомогти розробникам у виявленні не лише синтаксичних помилок у запитах SQL, а й семантичних. Подібно до того, як сучасні інтегровані середовища розробки пропонують переформатування коду для різних інших мов програмування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У своїй роботі Стефан Брас і Крістіан Голдберг[1] зосередилися на роботі з SQL-запитами, які мають коректний синтаксис, але можуть містити семантичні проблеми. Ці проблеми можуть бути розділені на дві категорії: перша категорія включає помилки, які призводять до того, що запит неможливо виконати, і друга категорія містить коректні запити, але які не повертають очікуваного результату. Перша категорія помилок легше виявити та виправити, оскільки система управління базами даних надає повідомлення про помилку. Друга категорія може бути важчою для виявлення, оскільки проблема не завжди буває очевидною.

Автори додатково класифікували семантичні помилки у своїй роботі на дві групи, для першої завдання відомо заздалегідь, а для другої було достатньо одного SQL-запиту, щоб визначити помилку. Основний внесок їхньої роботи являє собою систематизацію семантичних помилок, які часто з'являються в SQL, усі помилки було зібрані із домашніх завдань та екзаменаційних матеріалів для одного з курсів в Університеті Галле.

Формулювання цілей статті

Хоча SQL-механізми здатні виявляти значну кількість синтаксичних помилок, найчастіше не виявляються семантичні помилки, які можуть призвести до серйозних проблем з продуктивністю програмного забезпечення або навіть до вразливостей у безпеці системи. У цій статті пропонується набір з підтверджених евристик разом з новим інструментом статичного аналізу на основі правил для виявлення найбільш поширених типів семантичних помилок в SQL-запитах на основі доказів з попередніх досліджень.

Виклад основного матеріалу

Семантична помилка в SQL-запиті, як визначено Брасом і Голдбергом [1], відноситься до законного запиту, який не (завжди) дає очікуваний результат. Якщо бути більш точним, це означає, що запит використовує правильний синтаксис SQL, проте результати, які він видає, є неправильними для даного завдання, що означає, що запит має певну семантичну помилку. Це типи помилок, які інструмент, представлений у цій статті, намагається виявити. Однак це завдання є нетривіальним, особливо коли немає інформації про завдання, для якого був написаний запит, або про те, як структуровані запитовані дані.

Семантичні помилки особливо часто з'являються в запитах, написаних студентами, які ще не оволоділи мовою SQL, однак вони також можуть бути присутніми в реальних програмах, що робить їх більш небезпечними. Оскільки ці проблеми зазвичай не генерують жодних попереджень від механізмів баз даних, тому недосвідченим розробникам важче їх виявити, особливо через те, що в деяких випадках запити можуть справді давати правильні результати. Саме з цієї причини можна стверджувати, що семантичні помилки в SQL є більш небезпечними, ніж синтаксичні помилки, які є можливість дуже легко виявити та виправити.

Ось чому інструменти для виявлення таких типів проблем мають бути безпосередньо інтегровані в середовища розробки або, навіть краще, у плагіни, які можуть перевіряти правильність запитів під час виконання. Крім того, семантичні помилки часто можуть впливати на загальну продуктивність запиту, що призводить до збільшення часу обчислення або неефективного використання ресурсів. Це знову ж таки дуже важливо в програмах, де швидкість є критичною, і виконання запитів, які містять семантичні помилки, може призвести до вузьких місць, як обговорювалося Мюз та ін. [2] у своїй статті. Хоча попередні дослідження не показали значної кореляції між ознаками проблемного коду SQL та іншими традиційними, це показали Мюз та ін. [2] що як тільки семантична помилка SQL з'являється в певній системі, вона, як правило, має більший термін служби, ніж інші більш традиційні помилки семантичного коду, що робить завдання швидкого виявлення таких типів помилок ще більш важливим. У цій статті пропонується кілька евристик, які використовуються для виявлення семантичних помилок у запитах SQL. Кожне з них реалізовано, як правила в розробленому інструменті статичного аналізу. Помилки, які виявляються запропонованою евристикою, були спочатку представлені та класифіковані в роботі Браса та Голдберга [1], яка представляє повний список семантичних помилок, що зустрічаються в SQL. Невелику підмножину семантичних помилок також було зібрано за допомогою інструменту SQL Enlight. Це закритий інструмент статичного аналізу, розроблений Yubisoft Eood, який також має на меті виявити ряд проблем у запитах SQL. Іншими

інструментами для аналізу SQL і виявлення помилок коду є TOAD і SQL Prompt, які також мають закритий код і потребують набору вхідних запитів, а також схем бази даних, щоб виявити будь-які проблеми.

Крім того, жоден із згаданих раніше інструментів не може аналізувати запити, вбудовані у вихідний код. Інструмент статичного аналізу на основі правил використовує жорстку реалізацію, тобто завжди передбачається найгірше, оскільки немає додаткової інформації, пов'язаної із завданнями чи схемами бази даних. Це означає, що для певних запитів інструмент може генерувати хибні позитивні попередження, як буде обговорюватися пізніше. Однак це було краще, оскільки, це дає хороший компроміс для налаштування, коли є мало інформації про запити. У наступних підрозділах подано опис кожної помилки, приклади SQL-запитів, які містять семантичну помилку, представлено реалізацію кожної стратегії виявлення разом із будь-якими припущеннями, зробленими евристичними методами, які використовуються в даному інструменті. Короткий перелік усіх семантичних помилок, які виявляє пропонуваній інструмент, також представлено в табл. 1

Таблиця 1

Список семантичних помилок

| Семантична помилка | Опис |
|---|---|
| Порівнювання з NULL | Використання звичайних операторів порівнювання з NULL замість виразу IS NULL |
| Зайвий DISTINCT в агрегаціях | Для деяких функцій агрегації ключове слово DISTINCT не впливає на результат |
| Ділення на нуль | Можливе ділення на нуль через порядок виконання операцій |
| Відсутня умова JOIN | Відсутнє посилання для об'єднання таблиць |
| Непотрібна команда GROUP BY | Зайвий атрибут у групі GROUP BY, який не відображається в групі SELECT або HAVING поза агрегаціями. |
| Неефективне використання команди HAVING | Умова всередині виразу HAVING, яку можна перемістити всередину виразу WHERE, що робить запит більш ефективним |

Порівнювання з NULL

Проблема: у деяких системах керування базами даних синтаксично допустимо використовувати A = NULL, однак цей вираз завжди має постійне значення істинності або NULL, або невідоме. Щоб уникнути таких ситуацій, завжди слід використовувати IS NULL або IS NOT NULL. Наступний приклад на рис. 1 повинен бути виявлений як такий, що має семантичну помилку.

```
SELECT t1.id, t1.surname , t1.name FROM table t1
WHERE t1.phone <> NULL;
```

Рис. 1. Семантична помилка порівнювання з NULL

У цьому прикладі t.phone порівнюється з NULL. Для деяких механізмів баз даних це може не вважатися синтаксичною помилкою, однак умова поверне NULL або unknown. Щоб уникнути подібних ситуацій, коли використовується значення NULL, ми завжди повинні використовувати вирази IS NULL або IS NOT NULL замість операторів порівняння. Потенційне виправлення для прикладу запиту наведено на рис. 2.

```
SELECT t1.id, t1.surname, t1.name FROM table t1
WHERE t1.phone IS NOT NULL;
```

Рис. 2. Виправлення помилки порівнювання з NULL

Стратегія виявлення: щоб виявити цю семантичну помилку, щоразу, коли в запиті використовуються оператори рівний або не рівний, ми перевіряємо, чи є один із термінів ключовим словом NULL. Якщо це так, тоді оператор порівняння слід замінити виразом IS NULL або IS NOT NULL відповідно.

Зайвий DISTINCT в агрегаціях

Проблема: для функцій агрегування MIN і MAX ключове слово DISTINCT ніколи не потрібне, оскільки воно не впливає на базові результати запиту. Крім того, у більшості випадків наявність дублікатів є, ймовірно, суттєвою при обчисленні результатів функцій агрегування SUM і AVG, тому дублікати не слід виключати, якщо для цього немає вагомих причин. Таким чином, присутність ключового слова DISTINCT у цих функціях агрегації є дивною і має викликати попередження. Для інших функцій агрегування неможливо визначити, чи потрібен DISTINCT у команді, не маючи додаткової інформації про завдання запиту, тому

інші функції агрегування виключаються з цієї перевірки. У наступному прикладі на рис. 3 слід виявити семантичну помилку.

```
SELECT SUM(DISTINCT price) AS income FROM
orders
```

Рис. 3. Семантична помилка з зайвим DISTINCT в агрегації

У цьому прикладі ключове слово DISTINCT використовується всередині функції SUM. Якщо для цього немає вагомих причин, присутність тут DISTINCT вважається дивною, оскільки дублікати, швидше за все, значні в цьому випадку, однак, не маючи додаткової інформації про завдання, для якого був написаний запит, наш інструмент видасть попередження про потенційну семантичну помилку. Не маючи додаткової інформації про основне завдання, для якого був написаний запит, ми не можемо надати потенційне виправлення для цього запиту.

Стратегія виявлення: стратегія виявлення перевіряє, чи присутні в запиті будь-які функції агрегування MIN, MAX, SUM або AVG. Для кожного з них він потім визначає, чи використовувалося ключове слово DISTINCT у команді функції, і якщо так, виникає попередження.

Ділення на нуль

Проблема: Однією з поширених проблем, пов'язаних із операторами типів даних, є ділення на нуль. Оскільки в SQL немає гарантій на послідовність оцінки операторів у команді WHERE, розробникам важко уникнути таких ситуацій. Наступний приклад на рис. 4 вважається небезпечним і має бути виявлений як семантична помилка.

```
SELECT items FROM orders
WHERE (amount / count) > 500 AND count > 0;
```

Рис. 4. Семантична помилка з діленням на нуль

У цьому прикладі, хоча умова count > 0 присутня в запиті WHERE, оскільки порядок операцій не виконується, цей запит усе ще небезпечний. Таким чином, попередження повинно бути викликано, коли в запиті є ділення, за винятком ситуацій, коли ділення знаходиться в операторі SELECT, а стовпець дільника перевіряється на нерівність нулю в команді WHERE, оскільки в цих випадках WHERE буде оцінено перед SELECT будь-якою системою бази даних.

Стратегія виявлення: реалізація цього правила аналізує запит і зберігає всі знайдені оператори ділення. Окрім цього, також створюється логічний прапорець, який вказує, чи був термін поділу після SELECT чи ні. Крім того, усі стовпці, які перевіряються на нерівність нулю в команді WHERE, також зберігаються. Нарешті, ділення, яке знаходиться в запиті SELECT, але для яких стовпець дільника перевірено в операторі WHERE, видаляються з початкового набору, а решта членів ділення повертаються як результат для цього правила, яке генерує попередження про можливе ділення на нуль.

Порівнювання з NULL

Проблема: ця помилка з'являється в запитах із об'єднаними таблицями, для яких джерела об'єднаних таблиць не мають жодного стовпця, на який посилаються дані в умові JOIN, ані в WHERE. Якщо предикат JOIN відсутній, запит включатиме декартовий добуток усіх рядків, також відомий як перехресний добуток, що, безсумнівно, призведе до збільшення продуктивності для запитів і потенційно неправильних результатів. Тому важливо, щоб об'єднані таблиці посилалися в командах JOIN ON або WHERE, щоб уникнути подібних проблем. Однак є один виняток, зокрема, коли використовується CROSS JOIN. У цих випадках немає потреби, щоб залучені джерела таблиці мали посилання на будь-які стовпці, оскільки для цих запитів очевидною метою є отримання перехресного добутку всіх рядків, тому попередження не повинно створюватися. У наступному, на рис. 5, прикладі слід виявити семантичну помилку.

```
SELECT name , surname, email , phone , customer_id
FROM organizations AS t1 INNER JOIN customers as t2;
```

Рис. 5. Семантична помилка з порівнюванням з NULL

У цьому прикладі є дві об'єднані таблиці, organizations і customers, які не мають жодних посилань на стовпці ні в умовах JOIN, ні в WHERE. Це означає, що результат запиту включатиме перехресний добуток усіх рядків. Незалежно від того, чи був це намір автора запиту чи ні, відсутні умови з'єднання є потенційною причиною зайвих витрат на продуктивність і повинні бути повідомлені як семантичні

помилки. Не маючи додаткової інформації про основне завдання, для якого був написаний запит, ми не можемо надати потенційне виправлення для цього запиту.

Стратегія виявлення: Виявлення цієї семантичної помилки здійснюється шляхом аналізу запиту та відстеження всіх використаних джерел таблиці. Якщо використовується менше двох таблиць або використовується CROSS JOIN, немає потреби продовжувати перевірку відсутності умов з'єднання, тому попередження не виникатимуть. Якщо використовуються принаймні два джерела таблиць, тоді перевіряються команди ON і WHERE відповідного підзапиту, щоб визначити, чи мають ці джерела таблиці будь-які стовпці, на які посилаються. Для будь-якої таблиці, на яку немає посилання, буде створено попередження про відсутність умови об'єднання.

Непотрібний команда GROUP BY

Проблема: кожен раз, коли атрибут, який з'являється в команді GROUP BY, функціонально визначається іншими атрибутами, і якщо він не відображається в командах SELECT або HAVING поза функціями агрегації, тоді його можна взагалі видалити з GROUP BY. Для нашого інструменту ця умова послаблена, оскільки ми розглядаємо лише запит, не знаючи схеми бази даних, тому неможливо визначити, чи атрибут функціонально визначається іншими атрибутами чи ні. Тому ми перевіряємо лише атрибут, який з'являється в команді GROUP BY, але не використовується ні в командах SELECT, ні в HAVING поза будь-якими функціями агрегації. У цьому випадку буде викликано попередження про цю семантичну помилку. У наступному прикладі на рис. 6 слід виявити семантичну помилку.

```
SELECT COUNT(*) AS counter FROM customers
WHERE amount = 122342
GROUP BY amount HAVING counter > 1 ORDER BY
counter;
```

Рис. 6. Семантична помилка з непотрібною командою GROUP BY

У цьому прикладі атрибут amount присутній у команді GROUP BY, але не використовується ні в команді SELECT, ні в команді HAVING поза функціями агрегації, тому його можна видалити з GROUP BY. Це ще більше спростить запит, оскільки amount є єдиним атрибутом, наявним у GROUP BY. Крім того, цей запит містить ще одну семантичну помилку, оскільки amount може мати лише одне значення, оскільки воно прирівнюється до деякої константи в команді WHERE, тому групування не матиме впливу на результат. Потенційне виправлення для прикладу запиту наведено на рис. 7.

```
SELECT COUNT(*) AS counter FROM customers
WHERE amount = 122342
HAVING counter > 1 ORDER BY counter;
```

Рис. 7. Виправлення помилка з непотрібною командою GROUP BY

Стратегія виявлення: стратегія виявлення цієї помилки аналізує запит і відстежує атрибути, що з'являються в командах SELECT і HAVING поза функціями агрегації. Крім того, атрибути, які з'являються в команді GROUP BY, також зберігаються. Після завершення аналізу запиту ми перевіряємо атрибути, знайдені в команді GROUP BY, яких немає в жодному з двох списків з атрибутами, виявленими в командах SELECT або HAVING. Для кожного з цих атрибутів виникає попередження, яке вказує на те, що в запиті виявлено семантичну помилку.

Неефективне використання команди HAVING

Проблема: якщо запит має точно такі самі атрибути в команді SELECT, перелічених у команді GROUP BY, і якщо в жодному з двох пунктів не використовуються функції агрегації, тоді команд GROUP BY можна замінити на SELECT DISTINCT. У більшості випадків оптимізатор SQL створює однакові або схожі плани виконання для двох запитів, тому в цих випадках не завжди є вииграш у продуктивності, однак, переписавши запит, це стає коротшим і зрозумілішим. У більшості цих випадків використання команди GROUP BY по суті видаляє дублікати з набору результатів, тому оператор DISTINCT краще підходить для використання, на відміну від ситуацій, коли використовуються функції агрегації, і в цьому випадку GROUP BY справді потрібна. У наступному прикладі на рис. 8 слід виявити семантичну помилку.

```
SELECT t1.genre FROM film t1 LEFT JOIN cartoon t2
ON t1.actor = t2.actor
WHERE t2.actor IS NOT NULL GROUP BY t1.genre;
```

Рис. 8. Семантична помилка з неефективним використанням команди HAVING

У цьому прикладі всі атрибути SELECT перераховані під командою GROUP BY, а також не використовуються функції агрегації, тому команду GROUP BY можна викинути та замінити на SELECT DISTINCT, зробивши запит коротшим і зрозумілішим. Потенційне виправлення для прикладу запиту наведено на рис. 9.

```
SELECT DISTINCT t1.genre FROM film t1 LEFT JOIN
cartoon t2 ON t1. actor = t2. actor
WHERE e2. actor IS NOT NULL;
```

Рис. 9. Виправлення помилки з неефективним використанням команди HAVING

Стратегія виявлення: реалізація цієї стратегії спочатку перевіряє, чи використовуються будь-які функції агрегації в командах SELECT або GROUP BY. Якщо це так, то немає необхідності продовжувати подальшу перевірку запиту на цю семантичну помилку. В іншому випадку ми продовжуємо, виявляючи всі змінні, що використовуються в команді SELECT, а також ті, що використовуються в команді GROUP BY. Якщо існує ідеальна відповідність між цими двома наборами термінів, це означає, що команду GROUP BY можна замінити на SELECT DISTINCT і спрацює попередження про цю семантичну помилку.

Реалізація

Для того щоб виявити попередньо описані семантичні помилки, потрібно перетворити SQL в дерево класів, для якого згодом можна використовувати шаблон проектування «Відвідувач», адже від дозволяє відслідковувати поведінку програми шляхом додавання їй нових операцій, не змінюючи класи об'єктів, над якими, власне, і будуть виконуватись операції. На початку ми будемо отримувати потік, який буде починатись з якого вхідного запиту, в процесі буде перевірюватись кожне з правил, і якщо воно буде порушуватись, запит буде відмічатись як проблемний, і буде з'являтися попередження про те, що семантична помилка виявлена. Основну увагу тут слід приділити розробці інструментів для масового впровадження. Вибір цього, головного, рушійного фактора під час створення нових інструментів має допомогти переконатися, що розробники дійсно бачать цінність інструменту. Зокрема, наші висновки показують, що зараз розробникам важко перевіряти свої SQL-запити на наявність семантичних проблем через одну основну проблему, якою є відсутність відповідних інструментів і підтримки. Поточним реалізаціям інструментів, які інтегруються з IDE, дуже бракує підтримки виявлення семантичних проблем для запитів, крім того, наскільки нам відомо, також немає інструментів, інтегрованих із популярними фреймворками розробки, такими як PhpStorm, для перевірки цих проблем під час виконання програми.

Висновки

Таким чином, можна зробити висновок про те, що виявлення семантичних помилок в процесі розробки програмного забезпечення є важливим і необхідним процесом для збільшення надійності програмного забезпечення, на сьогоднішній день велика кількість додатків використовують SQL для запитів, тому важливо розуміти розробникам результати та наслідки їх запитів, які містять різні семантичні проблеми, на сьогоднішній день в Інтернеті багато ресурсів, які містять багато запитів з проблемами такого типу. Тому розробники повинні ознайомитись не тільки з описаними вище проблемами, але й виділяти більше часу для виявлення цих проблем, та їх усуненню відразу після їх виявлення.

References

1. Codd E.F. A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks, IBM Research Laboratory, San Jose, California. URL: <https://www.seas.upenn.edu/~zives/03f/cis550/codd.pdf>.
2. Muse B.A. On the prevalence, impact, and evolution of sql code smells in data-intensive systems. In Proceedings of the 17th International Conference on Mining Software Repositories, p. 327–338, 2020. DOI: 10.1145/3379597.3387467.
3. Molinaro Anthony, de Graaf Robert. SQL Cookbook: Query Solutions and Techniques for All SQL Users 2nd Edition. 2020. 567 p.
4. Allen G. Taylor. SQL For Dummies (For Dummies (Computer/Tech)). 9th Edition. 2018. 512 p.
5. Viescas John. SQL Queries for Mere Mortals: A Hands-On Guide to Data Manipulation in SQL 4th Edition. 2018. 960 p.
6. Beaulieu Alan. Learning SQL: Generate, Manipulate, and Retrieve Data 3rd Edition. 2020. 377 p.

РОЗЛОМІЙ ІННА

Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького

ORCID ID: 0000-0001-5065-9004

e-mail: inna-roz@ukr.net

НАУМЕНКО СЕРГІЙ

Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького

ORCID ID: 0000-0002-6337-1605

e-mail: naumenko.serhii1122@vu.edu.edu.ua

ШИФРУВАННЯ ТА СТИСНЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ АВТОРСЬКИХ ШАБЛОНІВ, КЕРОВАНИХ МАТРИЦЕЮ

Стаття присвячена розробці нового підходу до побудови авторських шаблонів для задач шифрування та стиснення інформації. Використання авторських шаблонів забезпечує безпечний та ефективний спосіб шифрування та стиснення інформації, оскільки вони надають унікальний прототип шифрувального трафарету, який може використовуватись для широкого спектру застосувань.

Запропонований метод побудови авторських шаблонів базується на статистичному аналізі англійських текстів та використанні модулярних криптографічних перетворень чисел з заданого діапазону. Побудований авторський шаблон є прототипом шифрувального трафарету. Авторський шаблон забезпечує безпечний спосіб шифрування та стиснення інформації, оскільки символи розподіляються випадковим способом, що ускладнює дешифрування та розпакування інформації неавторизованими користувачами.

Ключові слова: шифрувальний трафарет, авторський шаблон, решітка Кардано, шифрування, стиснення інформації, матричні криптографічні перетворення.

ROZLOMII INNA, NAUMENKO SERHII

Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy

METHOD OF BUILDING PROPRIETARY TEMPLATES FOR INFORMATION ENCRYPTION AND COMPRESSION TASKS

The article presents a novel approach to building author's templates for encryption and compression tasks. The use of author's templates provides a secure and efficient way of encrypting and compressing information, as they offer a unique prototype for cipher templates that can be used for a wide range of applications. The proposed method for constructing author's templates is based on a statistical analysis of English language texts and the use of modular cryptographic transformation of numbers from a given range. The approach involves breaking down the text into smaller chunks and analyzing the frequency of occurrence of letters and combinations of letters within each chunk. The results of this analysis are then used to construct a matrix that determines the rules for distributing symbols in the author's template. The constructed author's template is a prototype of a cipher template and is similar to the Cardano's grid. The author's template provides a secure way of encrypting and compressing information, as the symbols are distributed in a random and unique way, making it difficult for unauthorized parties to decipher or decompress the information.

The proposed method allows for the creation of author's templates for a wide range of encryption and compression tasks. The input data for constructing author's templates are an English language text and a matrix that determines the rules for distributing symbols in the author's template. Changing the input data allows for the creation of new author's templates that can be tailored to specific applications or requirements.

In conclusion, the method presented in this article offers a unique and efficient way of constructing author's templates for encryption and compression tasks. The use of author's templates provides a secure and reliable way of encrypting and compressing information, making it an ideal solution for applications that require secure data transmission and storage.

Keywords: encryption stencil, author's template, Cardano's grid, encryption, information compression, matrix cryptographic transformations.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

В сучасному світі інформація стала однією з найцінніших ресурсів, що відіграє важливу роль в різних сферах діяльності. Проте, з поширенням інтернету та швидким розвитком технологій, конфіденційність та цілісність інформації стали питаннями надзвичайної важливості. Необхідність забезпечення конфіденційності і цілісності інформації виникає в багатьох сферах діяльності, починаючи від банківської сфери і закінчуючи сферою медицини та науки. При передачі конфіденційної інформації, такої як фінансові дані, медичні записи чи дослідження, важливо забезпечити її конфіденційність та цілісність, щоб уникнути можливих наслідків, таких як крадіжка особистої інформації, порушення прав на інтелектуальну власність та інші [1–3].

Більшість існуючих методів шифрування та стискання інформації не завжди ефективні та безпечні та мають обмеження, які можуть бути використані для зламування шифрування, а також вони можуть не забезпечувати ефективного стискання даних. Методи стиснення даних можуть бути неефективними для великих файлів, і методи шифрування можуть бути піддані атакам з використанням потужних комп'ютерів. Також деякі методи можуть вимагати велику кількість ресурсів для розшифрування даних, що затримує роботу. Стиснення даних є не менш важливою проблемою в сучасному світі, оскільки кількість даних, що зберігається та передається, зростає з кожним роком. Стиснення даних дозволяє зменшити розмір файлів та зберігати більше даних на меншому просторі, що зменшує вартість зберігання та передачі даних.

Отже, постановка проблеми полягає в тому, що необхідно розробити новий метод шифрування та стиснення даних, який буде надійним та ефективним, тобто матиме високу стійкість до різноманітних атак, а також зменшувати обсяг даних без втрати інформації. Для вирішення цієї проблеми в статті запропоновано новий метод, який базується на розробці авторських шаблонів для задач шифрування та стиснення інформації.

Аналіз досліджень та публікацій

Безпека та стиснення даних є загальною вимогою для більшості програм, пов'язаних із зберіганням і передачею інформації. З метою забезпечення надійного зберігання та безпеки інформації, необхідно використовувати методи шифрування та стиснення. Застосування цих методів дозволяє зменшити ризики крадіжки даних та втрати конфіденційної інформації. В [4] представлено метод вибіркового шифрування для шифрування текстових даних. Особливість даного методу полягає в його невизначеності – для процесу шифрування даних він вибирає лише важливі дані з усього повідомлення. Це, у свою чергу, зменшує витрати часу на шифрування та підвищує продуктивність. Частина шифрування виконується за допомогою алгоритму симетричного ключа. Для цього використовується алгоритм BLOWFISH.

Авторами [5] запропоновано гібридний алгоритм стиснення даних збільшує вхідні дані, які потрібно зашифрувати за допомогою методу криптографії RSA, щоб підвищити рівень безпеки. Цю техніку можна використовувати, щоб зменшити кількість переданих даних в умовах слабкого Інтернету чи недостатніх можливостях запам'ятовувачих пристроїв. Звичайний текст стискається за допомогою алгоритму кодування Хаффмана, молодший біт LSB використано для імплантації зашифрованих даних.

В [6] запропоновано варіант адаптивного арифметичного кодування, що додає криптографічні функції до цього класичного методу стиснення. Ідея полягає в тому, щоб виконувати оновлення частотних таблиць для символів основного алфавіту вибірково, відповідно до деякого випадково вибраного секретного ключа K . Натомість, автори [7] пропонують послідовне виконання етапів стиснення та шифрування інформації та проводять в своїй роботі порівняльний аналіз різних комбінацій технік стиснення та шифрування.

В [8] автори застосовують перетворення зашифрованого тексту для стиснення з метою використання в пристроях з обмеженими ресурсами, такими як IoT, смарт-карти та програми RFID. В статті запропонована техніка решітчастого стиснення зменшує розмір зашифрованого тексту більш ніж на 40%, а також забезпечує криптографію з відкритим ключем на раніше недоступних полегшених шифрах.

Особливої уваги заслуговує робота [9], в якій представлено новий метод багаторівневої безпеки та стиснення текстових даних із використанням бітової вставки та кодування Хаффмана. Запропонований метод містить різні модулі обробки для захисту та стиснення текстових даних за допомогою процесу шифрування. Середній відсоток скорочення або зменшення пам'яті становить 45,41%.

Формулювання цілей статті

Стиснення даних та їх шифрування – дві технології, які дозволяють ефективно зменшити витрати на зберігання та передачу інформації. Стиснення передбачає перетворення даних з джерела повідомлення до меншого формату – кодового слова, тим самим зменшуючи кількість бітів, які потрібно зберегти або передати. Зокрема, стиснення даних без втрат застосовується для стиснення будь-яких текстових даних, що дозволяє ефективно зменшити їх обсяг [10–13]. Шифрування, зі свого боку, захищає дані від підслуховування, перетворюючи відкритий текст у зашифрований за допомогою ключа шифрування. Однак, наразі методи стиснення та шифрування застосовуються окремо, що може призвести до певних проблем, таких як великий час обробки та вартість. Щоб подолати ці недоліки, використовують поєднання обох технологій в один процес.

Метою роботи є побудова авторського шаблону, який би дозволяв одночасно шифрувати та стискати інформацію. Для досягнення цієї мети пропонується використання решітки Кардано, але з рядом модифікацій.

Виклад основного матеріалу

З огляду на швидкий розвиток технологій та інформаційної сфери, питання, пов'язані з інформаційною безпекою, стають все актуальнішими. Знання засобів захисту інформації є необхідними для ефективної організації процесу передачі та зберігання конфіденційної інформації. Перестановочні шифри з шифрувальними решітками є одним з методів шифрування, що застосовуються для збереження конфіденційності даних [14–17]. Цей метод полягає у переставленні символів відкритого тексту у певному порядку, що визначається шифрувальною решіткою. Результатом цього процесу є шифртекст, який може бути розшифрований лише за наявності відповідної шифрувальної решітки.

Шифрувальна решітка – трафарет з вирізаними комірками, який використовувався для шифрування відкритого тексту наприкінці шістнадцятого століття. Найвідомішою шифрувальною решіткою є решітка Кардано [18]. Вона представляє собою прямокутний трафарет з вирізаними комірками, в які записувались окремі букви, склади, слова. Фрагменти записаного в комірках відкритого тексту додатково маскувались буквами, складами, якими заповнювали порожні проміжки між текстом, який потрібно було зашифрувати. Принцип шифрування простою решіткою Кардано показаний на рис. 1.

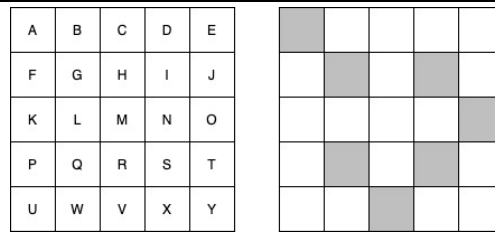


Рис. 1. Шифр перестановки на основі простої решітки Кардано

Решітка Кардано може бути простою, як показано на рис. 1, або симетрично-поворотною – рис. 2. На відміну від простої решітки, яка є прямокутною, симетрично-поворотна решітка – квадратна. Таку решітку-трафарет можна застосовувати декілька разів, повертаючи трафарет навколо центру. Симетрично-поворотна решітка Кардано дозволяє записати текст масивом символів так, що результат виглядатиме цілком незрозуміло для читання, тому такий варіант решітки володіє більшою криптографічною стійкістю ніж проста решітка Кардано.

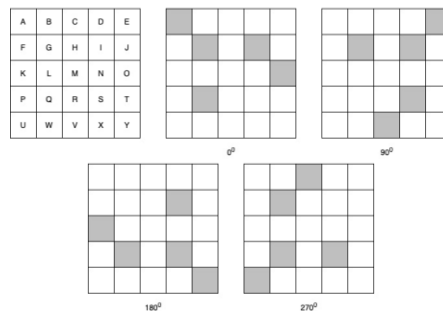


Рис. 2. Шифр перестановки на основі симетрично-поворотної решітки Кардано

В більш пізніх варіантах решітки Кардано виникають проблеми, які є загальними для всіх транспозиційних шифрів. Для всіх шифрів маршрутної перестановки характерною є невисока криптостійкість. Оскільки інформація заноситься в комірки-отвори решітки, важливим є розміщення цих комірок. Розміщення комірок-отворів отримуємо за допомогою застосування операцій матричного криптографічного перетворення.

Запропонований метод базується на принципах шифрувальної решітки Кардано. Основна ідея полягає в тому, що шифрувальний трафарет використовується для зміни порядку букв у тексті, а також для стиснення даних. Таким чином, обсяг даних може бути зменшений без втрати інформації. Крім того, розроблений метод може бути використаний для побудови надійних систем шифрування та стиснення даних. Для побудови решітки був використаний статистичний аналіз текстів, що дозволяє визначити кількість повторень кожної букви в тексті, а також їхній розподіл. Це дає змогу оптимізувати розмір шифрованого тексту та забезпечити стійкість до різноманітних атак. Для опису алгоритму формування авторського шаблону було визначено наступну послідовність дій:

1. Провести частотний аналіз англomовного тексту та обчислити кількість входжень кожної букви в шаблон, рис. 3.

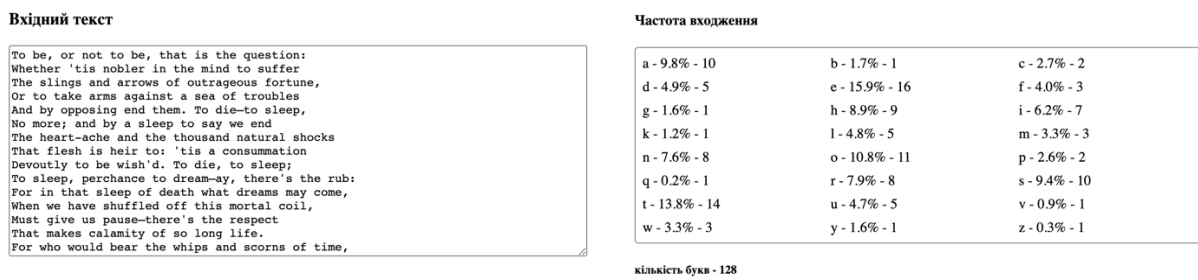


Рис. 3. Результат частотного аналізу англomовного тексту

2. Згенерувати випадковим чином матрицю та виконати матричні криптографічні перетворення [19] для чисел у діапазоні від 0 до 128.

Генерація матриці

Матриця:

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |

| | | | | | | |
|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|
| 0 => 0 | 1 => 8 | 2 => 78 | 3 => 70 | 4 => 84 | 5 => 92 | 6 => 26 |
| 7 => 18 | 8 => 40 | 9 => 32 | 10 => 102 | 11 => 110 | 12 => 124 | 13 => 116 |
| 14 => 50 | 15 => 58 | 16 => 5 | 17 => 13 | 18 => 75 | 19 => 67 | 20 => 81 |
| 21 => 89 | 22 => 31 | 23 => 23 | 24 => 45 | 25 => 37 | 26 => 99 | 27 => 107 |
| 28 => 121 | 29 => 113 | 30 => 55 | 31 => 63 | 32 => 34 | 33 => 42 | 34 => 108 |
| 35 => 100 | 36 => 118 | 37 => 126 | 38 => 56 | 39 => 48 | 40 => 10 | 41 => 2 |
| 42 => 68 | 43 => 76 | 44 => 94 | 45 => 86 | 46 => 16 | 47 => 24 | 48 => 39 |
| 49 => 47 | 50 => 105 | 51 => 97 | 52 => 115 | 53 => 123 | 54 => 61 | 55 => 53 |
| 56 => 15 | 57 => 7 | 58 => 65 | 59 => 73 | 60 => 91 | 61 => 83 | 62 => 21 |
| 63 => 29 | 64 => 10 | 65 => 2 | 66 => 68 | 67 => 76 | 68 => 94 | 69 => 86 |
| 70 => 16 | 71 => 24 | 72 => 34 | 73 => 42 | 74 => 108 | 75 => 100 | 76 => 118 |
| 77 => 126 | 78 => 56 | 79 => 48 | 80 => 15 | 81 => 7 | 82 => 65 | 83 => 73 |
| 84 => 91 | 85 => 83 | 86 => 21 | 87 => 29 | 88 => 39 | 89 => 47 | 90 => 105 |
| 91 => 97 | 92 => 115 | 93 => 123 | 94 => 61 | 95 => 53 | 96 => 40 | 97 => 32 |
| 98 => 102 | 99 => 110 | 100 => 124 | 101 => 116 | 102 => 50 | 103 => 58 | 104 => 0 |
| 105 => 8 | 106 => 78 | 107 => 70 | 108 => 84 | 109 => 92 | 110 => 26 | 111 => 18 |
| 112 => 45 | 113 => 37 | 114 => 99 | 115 => 107 | 116 => 121 | 117 => 113 | 118 => 55 |
| 119 => 63 | 120 => 5 | 121 => 13 | 122 => 75 | 123 => 67 | 124 => 81 | 125 => 89 |
| 126 => 31 | 127 => 23 | | | | | |

Рис. 4. Результати матричних криптографічних перетворень чисел

3. За результатами матричного криптографічного перетворення чисел 0...128 заповнити комірки авторського шаблону, відповідно до кількості входжень кожної літери, рис. 5.

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----|---|-----|---|-----|---|-----|---|-----|---|-----|---|-----|---|-----|
| t | 0 | p | 2 | u | 5 | o | 7 | t | 8 | n | 10 | u | 13 | o | 15 |
| n | 16 | t | 18 | r | 21 | z | 23 | o | 24 | t | 26 | r | 29 | y | 31 |
| s | 32 | o | 34 | t | 37 | r | 39 | s | 40 | o | 42 | t | 45 | r | 47 |
| o | 48 | s | 50 | s | 53 | u | 55 | o | 56 | t | 58 | s | 61 | u | 63 |
| p | 65 | w | 67 | n | 68 | t | 70 | p | 73 | v | 75 | n | 76 | t | 78 |
| w | 81 | r | 83 | t | 84 | n | 86 | w | 89 | q | 91 | t | 92 | n | 94 |
| r | 97 | t | 99 | o | 100 | s | 102 | r | 105 | t | 107 | o | 108 | r | 110 |
| u | 113 | r | 115 | s | 116 | o | 118 | t | 121 | s | 123 | s | 124 | o | 126 |

Рис. 5. Заповнений авторський шаблон

Авторський шаблон є керованим матрицею, оскільки саме матриця визначає правила розташування літер. Це означає, що кожна матриця, що генерується випадковим чином, надає унікальний авторський шаблон.

За допомогою матриці, можна створити безліч різних авторських шаблонів, які будуть відрізнятися один від одного розташуванням літер в решітці.

На рис. 5 показано принцип шифрування текстової інформації із застосуванням авторського шаблону. Результатом шифрування є послідовність пар чисел, що складаються з зсуву та кількості літер, що повторюються в авторському шаблоні.

Текст шифрування

In his plays, Shakespeare revealed a very wide knowledge of many areas of life. The characters in his plays discuss many different topics, often with the knowledge of experts. But what is even more impressive about these plays is Shakespeare's use of the English language. His vocabulary was very large, and Shakespeare seems to have introduced many words to the language! Also, many of the phrases that are said by Shakespeare's characters are now used in everyday conversation. Today, writers often use quotations from Shakespeare's plays in their own works.

Вихідний текст: 457 байт

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| r | 0 | n | 1 | u | 1 | s | 10 | z | 11 | o | 14 | p | 15 |
| 0 | 16 | t | 17 | 1 | 20 | 18 | 21 | 20 | 1 | 23 | 24 | 26 | 27 |
| 0 | 32 | 0 | 33 | 34 | 36 | 38 | 37 | 1 | 42 | 43 | 45 | 46 | 47 |
| 0 | 48 | 0 | 49 | 50 | 52 | 54 | 53 | 1 | 58 | 59 | 61 | 62 | 63 |
| t | 64 | 0 | 65 | 66 | 68 | 70 | 69 | 1 | 76 | 77 | 79 | 80 | 81 |
| 0 | 80 | 8 | 81 | 84 | 86 | 88 | 87 | 1 | 94 | 95 | 97 | 98 | 99 |
| 0 | 96 | 7 | 97 | 100 | 102 | 104 | 103 | 1 | 110 | 111 | 113 | 114 | 115 |
| s | 112 | 11 | 113 | 116 | 118 | 120 | 119 | 1 | 126 | 127 | 129 | 130 | 131 |

Результат шифрування

1,4,7,26-2,4,4,7,0,0,61,61,0,26,12,47-2,12,6,1,26,0,39-2,3,0,3,0,4,1,4,7,26-2,4,52-2,4,1,26,0,57-3,6-2,39-2,3,1,12,53,47-2,12,6,7,9-2,4,2-2,12,2,4,6,1,1,48-2,7,0,4,6,61,6,43-3,4,7,26-2,4,4,4,0,42-2,4,6,3,1,4,1,2,60-3,0,29,12,00-3,0,26,0,1,4,4,7,0,4,27-3,6,61,97-2,32-2,1,2,6,12,48-2,7,6,3,1,2,39-2,1,26,6,3,0,4,27-2,3,0,26-2,4,7,0,4,0,3,0,4,0,47-2,12,52-2,1,61,0,26,26,6,1,61,0,4,3,6,57-2,6,26,12,0,3,0,39-2,3,1-2,4,4,1,2,6,3,6,38-3,32-2,4,4,7,0,4,7,26-2,57-2,52-3,1,12,48-2,4,

Зашифрований текст: 275 байт

Рис. 6. Принцип шифрування текстової інформації із застосуванням авторського шаблону

Стаття пропонує новий метод шифрування та стиснення даних, який базується на розробці авторських шаблонів. Ідея створення авторського шаблону була заснована на концепції шифрувальної решітки Кардано. Використання цієї ідеї дозволило створити надійний та ефективний авторський шаблон. Запропонований метод використовує графарет шифрування, що був розроблений на основі статистичного аналізу тексту. Крім шифрування запропонований метод дозволяє стискати дані. Як видно з рис. 6, результат шифрування на 65: менший за вихідний текст. Згідно з результатами досліджень, запропонований метод шифрування та стиснення даних має кілька переваг порівняно з іншими методами. Зокрема, він ефективно працює з текстовими даними та вимагає меншої кількості ресурсів для шифрування та розшифрування.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Таким чином, запропонований метод побудови авторських шаблонів є ефективним та перспективним інструментом для задач шифрування та стиснення інформації. Використання цього методу дозволяє зберігати конфіденційність та цілісність даних, що є особливо важливим в сучасному світі, де обмін інформацією здійснюється в масштабах, небачених раніше.

У загальному, стаття пропонує новий метод шифрування та стискання інформації, який має потенціал для використання в різних галузях, включаючи безпеку даних, зберігання та передачу інформації.

Результати дослідження можуть бути корисні для вдосконалення технологій шифрування та стиснення даних у майбутньому. Також метод побудови авторських шаблонів може знайти застосування в інших галузях, де важливо зберігати конфіденційність та цілісність даних. Наприклад, його можна використовувати в системах безпеки інформації, в банківській сфері, в телекомунікаційних мережах тощо.

Література

1. Yassein M. B., Aljawarneh S., Qawasmeh E., Mardini W., Khamayseh Y. (2017). Comprehensive study of symmetric key and asymmetric key encryption algorithms. In 2017 international conference on engineering and technology, 1–7.
2. Koko S. O. F. M., Babiker A. (2015). Comparison of Various Encryption Algorithms and Techniques for improving secured data Communication. *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)*, 17(1), 62–69.
3. Teng L., Li H., Yin S., Sun Y. (2020). A Modified Advanced Encryption Standard for Data Security. *Int. J. Netw. Secur.*, 22(1), 112–117.
4. Kushwaha A., Sharma H. R., Ambhaikar A. (2016). A novel selective encryption method for securing text over mobile ad hoc network. *Procedia Computer Science*, 79, 16–23.
5. Wahab O. F. A., Khalaf A. A., Hussein A. I., Hamed H. F. (2021). Hiding data using efficient combination of RSA cryptography, and compression steganography techniques. *IEEE access*, 9, 31805–31815.
6. Klein S. T., Shapira D. (2021). Integrated encryption in dynamic arithmetic compression. *Information and Computation*, 279, 104617.
7. Sharma R., Bollavarapu S. (2015). Data security using compression and cryptography techniques. *International Journal of Computer Applications*, 117(14).
8. Saarinen M. J. O. (2017, April). Ring-LWE ciphertext compression and error correction: Tools for lightweight post-quantum cryptography. In *Proceedings of the 3rd ACM International Workshop on IoT Privacy, Trust, and Security*, 15–22.
9. Kodabagi M. M., Jerabandi M. V., Gadagin N. (2015). Multilevel security and compression of text data using bit stuffing and Huffman coding. In 2015 International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology, 800–804.
10. Лебіга М.М., Пасічник О.А., Скрипник Т.К., Медведчук В.В. (2019). Комбінований алгоритм стиснення даних, представлених в текстовому форматі. *Вісник ХНУ. Технічні науки*, 6(279), 131–133.
11. Кулібаба С.О., Курченко О.А. (2022). Криптографічний метод шифрування даних Pattern reverse multiplication. *Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка»*, 3(15), 216–223.
12. Kaur A. (2017). A Review on Symmetric Key Cryptography Algorithms. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 8(4).
13. Jha D. P., Kohli R., Gupta A. (2016). Proposed encryption algorithm for data security using matrix properties. In 2016 International conference on innovation and challenges in cyber security, 86–90.
14. Sajay K. R., Babu S. S., Vijayalakshmi Y. (2019). Enhancing the security of cloud data using hybrid encryption algorithm. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 1–10.
15. Gupta H., Sharma V. K. (2013). Multiphase encryption: A new concept in modern cryptography. *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 5(4), 638.
16. Alenezi M. N., Alabdulrazzaq H., Mohammad N. Q. (2020). Symmetric encryption algorithms: Review and evaluation study. *International Journal of Communication Networks and Information Security*, 12(2), 256–272.
17. Mushtaque M. A., Dhiman H., Hussain S. (2014). A hybrid approach and implementation of a new encryption algorithm for data security in cloud computing. *International Research Publication House*, 7, 669–675.
18. Грицюк Ю. І., Грицюк П. Ю. (2015). Математичні основи процесу генерації ключів перестановки з використанням шифру Кардано. *Науковий вісник НЛТУ України*, 25(10), 311–323.
19. Розломій І.О. (2022). Метод побудови матричних решіток Кардано для стиснення інформації. *Вісник ХНУ. Технічні науки*, 1(305), 85–90.

References

1. Yassein M. B., Aljawarneh S., Qawasmeh E., Mardini W., Khamayseh Y. (2017). Comprehensive study of symmetric key and asymmetric key encryption algorithms. In 2017 international conference on engineering and technology, 1–7.
2. Koko S. O. F. M., Babiker A. (2015). Comparison of Various Encryption Algorithms and Techniques for improving secured data Communication. *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)*, 17(1), 62–69.
3. Teng L., Li H., Yin S., Sun Y. (2020). A Modified Advanced Encryption Standard for Data Security. *Int. J. Netw. Secur.*, 22(1), 112–117.
4. Kushwaha A., Sharma H. R., Ambhaikar A. (2016). A novel selective encryption method for securing text over mobile ad hoc network. *Procedia Computer Science*, 79, 16–23.
5. Wahab O. F. A., Khalaf A. A., Hussein A. I., Hamed H. F. (2021). Hiding data using efficient combination of RSA cryptography, and compression steganography techniques. *IEEE access*, 9, 31805–31815.
6. Klein S. T., Shapira D. (2021). Integrated encryption in dynamic arithmetic compression. *Information and Computation*, 279, 104617.
7. Sharma R., Bollavarapu S. (2015). Data security using compression and cryptography techniques. *International Journal of Computer Applications*, 117(14).
8. Saarinen M. J. O. (2017, April). Ring-LWE ciphertext compression and error correction: Tools for lightweight post-quantum cryptography. In *Proceedings of the 3rd ACM International Workshop on IoT Privacy, Trust, and Security*, 15–22.

9. Kodabagi M. M., Jerabandi M. V., Gadagin N. (2015). Multilevel security and compression of text data using bit stuffing and huffman coding. In 2015 International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology, 800–804.
10. Lebiga M., Pasichnyk T., Skrypnyk T., Medvedchuk, V. (2019). Combed text data compression algorithm. Herald of Khmelnytskyi national university, 6 (279), 131–133.
11. Kulibaba S., Kurchenko O. (2022). Cryptography data encryption method Pattern reverse multiplication. Electronic professional scientific publication «Cybersecurity: education, science, technology», 3(15), 216–223.
12. Kaur A. (2017). A Review on Symmetric Key Cryptography Algorithms. International Journal of Advanced Research in Computer Science, 8(4).
13. Jha D. P., Kohli R., Gupta A. (2016). Proposed encryption algorithm for data security using matrix properties. In 2016 International conference on innovation and challenges in cyber security, 86–90.
14. Sajay K. R., Babu S. S., Vijayalakshmi Y. (2019). Enhancing the security of cloud data using hybrid encryption algorithm. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 1–10.
15. Gupta H., Sharma V. K. (2013). Multiphase encryption: A new concept in modern cryptography. International Journal of Computer Theory and Engineering, 5(4), 638.
16. Alenezi M. N., Alabdulrazzaq H., Mohammad N. Q. (2020). Symmetric encryption algorithms: Review and evaluation study. International Journal of Communication Networks and Information Security, 12(2), 256–272.
17. Mushtaque M. A., Dhiman H., Hussain S. (2014). A hybrid approach and implementation of a new encryption algorithm for data security in cloud computing. International Research Publication House, 7, 669–675.
18. Gryciuk Y., Grytsyuk P. (2016). Implementation details for the cipher key generation Cardano permutation. In 2016 13th international conference on modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science, 498–502.
19. Rozlomii I.O. (2022) Method of construction matrix Cardano's grids for compression of information. KHNU Bulletin: Technical Sciences, 1(305), 85–90.

ФАНТ МИКОЛА

Державний університет «Житомирська політехніка»

ORCID ID: 0000-0002-4994-8009

e-mail: fantkolja@gmail.com

АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ПАРАЛЕЛЬНИХ ДВОМОВНИХ КОРПУСІВ ТЕКСТІВ

Паралельні двомовні корпуси текстів – одна з основних частин будь-якого інструменту автоматизованого перекладу (CAT), а також важливі для інших завдань, пов'язаних із будь-яким типом перетворення тексту з однієї мови на іншу. У цій статті пропонується унікальна архітектура сервісу вирівнювання тексту, який базується на технологіях машинного навчання. Запропонована архітектура враховує новітні підходи до побудови систем мікросервісів, беручи до уваги легке розгортання і обслуговування таких систем. У статті детально розглядаються вимоги до системи створення паралельних корпусів текстів як вирішальної передумови розробки архітектури. Встановлені вимоги враховують обидві сторони системи: систему як застосунок машинного навчання та систему як CAT-сервіс. Запропонована архітектура дає можливість побудувати універсальну систему з декількома точками входу для кінцевих споживачів, системних адміністраторів і дата-інженерів. Вона також дозволяє різні варіанти використання системи: із власних користувацьких інтерфейсів або за допомогою викликів REST API зі стороннього сервера. Система містить три різні користувацькі інтерфейси, призначені для звичайних користувачів, системних адміністраторів, а також дата-інженерів. Такий гетерогенний підхід UX має вирішальне значення для безпечної, але гнучкого обслуговування системи. Система, побудована на запропонованій архітектурі, може охоплювати різні користувацькі сценарії: використовувати загальну модель для прогнозування власних двомовних текстових корпусів клієнтів, навчати власну модель або просто використовувати сервіс як сховище вирівняних двомовних текстів. Щоб досягти такої універсальності використання, велика увага приділяється підтримці керування версіями моделі, оскільки система повинна керувати різними паралельними версіями моделей прогнозування. Сервіс планується як система мікросервісної архітектури з оркестратором як центральним компонентом. Важливою частиною системи є служба моніторингу, яка буде оцінювати ефективність моделей, а також отримувати відгуки користувачів на основі дій користувачів після прогнозування моделі. У статті пропонується стек технологій, необхідний для легкої та безпечної розробки, розгортання та доставки продукту з нульовим часом простою за допомогою синьо-зеленої моделі розгортання.

Ключові слова: машинне навчання, модель, архітектура, двомовний корпус, інструмент CAT.

FANT MYKOLA

State University «Zhytomyrska Politehnika»

ARCHITECTURE OF A MACHINE LEARNING SYSTEM FOR TEXT ALIGNMENT

The text alignment service is one of the essential parts of any Computer Aided Translation (CAT) tools and also important for other tasks, related to any kind of text transformation from one language to another. This article proposes a unique architecture of a text alignment service, which is based on machine learning technologies. The suggested architecture considers the newest approaches to constructing micro-services systems considering both easy deployment and maintenance of such systems. The article elaborates on requirements for the text alignment system as a crucial precondition of developing the architecture. The established requirements take into account both sides of the system: the system as a machine learning application and the system as a CAT service. The suggested architecture gives the possibility to build a universal system with several entry points for end customers, system administrators, and data scientists. It also preserves different options of the system usage: e.g. from the own user interfaces or with REST API calls from a third-party server. The system contains three different user interfaces designed for ordinary users, system administrators as well as data-scientists. That heterogenous UX approach is crucial for secure yet flexible system maintenance. The service built on the proposed architecture will be able to cover different user scenarios: using a general model for predicting customers' own bilingual text corpora, training their own model, or just using the service as a storage of aligned bilingual texts. To achieve such usage universality a great emphasis is given to model versioning support since the system should manage different parallel versions of the predicting models. The system is planned as a microservice architecture system with an orchestrator as its central component. An important part of the system is the monitoring service which will estimate the efficiency of trained models as well as get user feedback based on user actions after model predictions. The article suggests the technology stack needed for easy and secure development, deployment, and delivery of the product with zero downtime using the blue-green model of the deployment.

Keywords: machine learning, model, architecture, text alignment, CAT-tool.

Постановка проблеми

Паралельні корпуси текстів і сервіси для вирівнювання текстів (text aligners) є одним з центральних компонентів будь-якої CAT-системи. Водночас такі сервіси, та їх продукти мають велике значення як самостійна сутність для лінгвістики, особливо в перекладознавстві та корпусній лінгвістиці [1, 2]. Студії, присвячені вивченню застосування технологій машинного навчання для розробки інструментів автоматизації перекладу, тобто інструментів CAT, здебільшого орієнтовані на проблему побудови правильної моделі, підбору оптимального алгоритму або аналіз вхідного матеріалу [3–5]. Питання створення цілісної системи машинного навчання, готової до споживання кінцевим користувачем, особливостей її життєвого циклу, підтримки такої системи з подальшим натреноуванням та удосконаленням використаної моделі, залишається часто поза увагою науковців [6].

Аналіз останніх джерел

При аналізі останніх набутоків у цій сфері важливо охопити загальні підходи до вибудовування архітектури систем машинного навчання, а вже на їх тлі розглянути, що було запропоновано саме в сфері САТ-інструментів.

В статтях *Луї Дорара* [7, 8] детально зображено узагальнену систему машинного навчання, яку було апробовано в декількох платформах для генерування моделей з необроблених текстових (Lateral – <https://www.lateral.io>, Google AutoML Natural Language – <https://cloud.google.com/natural-language>) або візуальних (Clarifai – <https://docs.clarifai.com>, Google AutoML Vision – <https://cloud.google.com/vision>) даних. В книзі *Джефа Сміта* подано та обґрунтовано цілісну загальну архітектуру системи машинного навчання. Варто зазначити, що автор вибудовує свою архітектуру базуючись на постулатах маніфесту реактивних систем (<https://www.reactivemanifesto.org>) і надає системі машинного навчання всіх ознак і переваг *реактивної системи*. Особливе місце в поданій архітектурі займають пайплайни (напр., для навчання моделі, для оцінки моделі тощо), що пояснюється бажанням автора створити справді безперебійну систему з системою “відкатів” у випадку виникнення помилки. *Джеоф Гультен* в своїй книзі розглядає системи машинного навчання як підвид “розумних систем” (intelligent system). Автор підходить до опису системи здебільшого з концептуальної точки зору, аналізує ситуації де такі системи взагалі матимуть значення, загострює свою увагу на проблемах збору даних, оцінки моделі. Також важливим є аналіз взаємодії між користувачем та “розумною системою”, зокрема автор класифікує типи такої взаємодії як автоматизуюча, спонукальна, організуюча, анотаційна і гібридна. В нашому випадку система машинного навчання для створення паралельних двомовних корпусів відноситься до *автоматизуючої*, тобто така система матиме на меті замінити рутинні дії користувача.

Іоаніс Тріантафілу, Іасон Демірос, Крістос Малавазос та Стеліос Піперідіс [4] одними з перших спробували запропонувати архітектуру для вирівнювання текстів як елементу САТ-інструментів, проте на той час ще не було інтеграції з технологіями машинного навчання, крім того запропонована архітектура є дуже схематичною і складається всього з чотирьох здебільшого концептуальних елементів: обробки тексту, побудови двомовного лексикону, усунення неоднозначності опорної точки та фреймворку для динамічного програмування. Основна частина статті базується на визначенні найкращого алгоритму для визначення ступеня подібності між двома паралельними послідовностями слів. *Тетяна Вакалюк, Черниш Оксана та Левківський Віталій* провели широкий аналіз архітектур сучасних електронних словників для різних мов, з використанням різних технологій [9]. Авторам вдалося здійснити досить детальний розгляд, який охоплював як конкретні технології і сервіси, які входили до складу систем, так і загальний опис архітектури з зображенням відношень та ролі кожної складової, а також можливості користувацьких інтерфейсів зображених електронних словників. Проведений аналіз став важливим підґрунтям для розробки власного алгоритму проектування електронного тлумачного словника. *Едуардо Сендехас, Гретель Барсело, Александер Гельбух та Грігорій Сідоров* [10] дослідили можливості включення лінгвістичної інформації до системи вирівнювання текстів на статистичному лексичному рівні. У статті було запропоновано загальну архітектуру вирівнювача текстів, яка експліцитно не включає технології машинного навчання, проте залишає простір для їх застосування. Головну увагу статті все ж приділено спробі поєднання статистичного та лінгвістичного підходів під час побудови двомовного корпусу текстів. Вважаємо можливим використання такого підходу для розбудови системи властивостей (features) для навчання моделі.

Метою статті є розробка власної архітектури системи машинного навчання для створення паралельних двомовних корпусів текстів для її подальшої реалізації на основі аналізу існуючих підходів та зразків архітектур систем машинного навчання для розв’язання задач обробки природної мови в цілому та моделювання САТ-інструментів зокрема, а також на основі аналізу вимог до запланованого застосування.

Виклад основного матеріалу

Запланований застосунок переслідуватиме дві головні цілі – автоматичне створення та використання двомовного корпусу текстів, а також можливість створення нового (в тому числі на основі кастомізації загального) користувацького корпусу, доступного лише для користувача, чи групи користувачів-авторів цього корпусу. Крім цього застосунок можна буде використовувати просто як сховище готових двомовних корпусів. У всіх випадках створення корпусу буде відбуватися за допомогою технологій машинного навчання, базуючись на загальній або похідній користувацькій моделі. Така система відношень між загальною і користувацькою моделями має бути зручною і продуктивною, з огляду на спосіб генерування та використання пам’яті перекладів у open-source САТ-системі *Matecat* (<https://www.matecat.com>). Адже важко не провести паралелі між моделлю, як ядром системи машинного навчання, та пам’яттю перекладів, як ядром будь-якої САТ-системі: в обох випадках ядро акумулює досвід (машинний у машинному навчанні, та перекладацький у САТ-системі) і допомагає генерувати рішення для розв’язання подальших нових задач (обраних типових задач у машинному навчанні або нових сегментів для перекладу тексту-оригіналу в САТ-системі) на основі цього досвіду.

Таким чином, важливими *факторами*, які будуть впливати на систему, є:

- здатність підтримувати та варіювати версійність моделі;
- удосконалення існуючої моделі шляхом отримання даних користувача і шляхом додавання нових даних від одного з внутрішніх сервісів;

- можливість використання окремо за допомогою власного користувачького інтерфейсу, поряд з можливістю інтегрування в інші САТ-інструменти, сервіси і системи, наприклад за допомогою публічного REST або GraphQL API.

Наведені фактори впливають на загальні *вимоги* до застосунку як до однієї з систем машинного навчання.

Вимоги до системи: Загалом системи машинного навчання вимагають спеціальної архітектури, розробленої для підтримки ефективного навчання та високої точності передбачень. Важливо розрізнити поняття *застосунку машинного навчання* (machine learning application) та *системи машинного навчання* (machine learning system). *Застосунок машинного навчання* – це програма, яка базується на алгоритмах, які уможливають навчання та вдосконалення машини на базі аналізу даних без експліцитного програмування [11]. *Система машинного навчання* – це набір програмних компонентів, які вирішують певну прикладну проблему, організовані певним чином для їх використання кінцевим споживачем, включають в себе застосунок машинного навчання і передбачають можливості для безперебійної роботи, розгортання, удосконалення, постачання нових версій та покращення моделі застосунку машинного навчання [12].

З огляду на своє призначення і будову архітектура системи машинного навчання диктується з одного боку механізмом функціонування застосунку машинного навчання, а з іншого боку прикладним аспектом створеної системи та способу її постачання кінцевому споживачу.

Процес машинного навчання зазвичай складається з наступних фаз [13]:

1. *Визначення бізнес-задачі.* На цьому етапі вирішується питання доцільності використання застосунку машинного навчання, наявні альтернативи, ресурсо- і трудозатрати.

2. *Отримання даних.* Цей етап фокусується на пошуку і отриманні даних, потрібних для тренування моделі. В залежності від специфіки даних визначається вид машинного навчання (контрольоване, неконтрольоване, підкріплене). Дані є основою будь-якої системи машинного навчання. Якість і кількість даних, які використовуються для навчання системи, мають значний вплив на точність її прогнозів. Тому збір даних і попередня обробка є вирішальними кроками в створенні системи машинного навчання.

3. *Розробка властивостей даних (feature engineering).* Цей етап передбачає обробку сирих даних з другого етапу у систему даних, представлених спеціальним чином (напр., як стовпці в електронній таблиці) для можливості їх споживання алгоритмами машинного навчання.

4. *Тренування моделі.* На цьому етапі відбувається вибір алгоритму та налаштування його параметрів на базі підготовлених на третьому етапі даних. У контрольованому навчанні модель навчається на позначених даних, тоді як неконтрольоване навчання покладається на непозначених дані. Навчання з підкріпленням передбачає метод проб і помилок із системою винагород. Тренування моделі відбувається в ході почергового споживання даних та оцінки отриманої моделі. Важливим при цьому є також розподілення даних на тренувальну, оціночну та тестувальну частини.

5. *Розгортання моделі.* На цьому етапі відбувається перевірка, наскільки якісно модель здатна справлятися з новими даними, тобто наскільки оптимально вирішується бізнес-задача, встановлення на першому етапі.

Крім вище згаданих ключових фаз процесу машинного навчання, існують також інші фактори, які необхідно враховувати при розробці архітектури системи машинного навчання. До них належать:

- апаратне забезпечення;
- програмне забезпечення;
- постачання.

Вибір *апаратного забезпечення* може значно вплинути на продуктивність системи машинного навчання. Спеціалізоване обладнання, таке як GPU і TPU, зазвичай використовується для прискорення процесів навчання та використання моделі машинного навчання, зокрема TPU було розроблено компанією Google виключно для виконання задач машинного навчання [14].

Стек програмного забезпечення, що використовується для створення системи машинного навчання, має бути оптимізовано для забезпечення продуктивності, масштабованості та простоти використання. Популярні програмні інфраструктури, такі як *TensorFlow*, *PyTorch* і *Keras*, забезпечують високорівневий інтерфейс для створення та навчання моделей машинного навчання.

Постачання системи машинного навчання включає її інтеграцію у виробниче середовище. Архітектура розгортання повинна бути розроблена для забезпечення масштабованості, надійності та безпеки.

Пропозиція архітектури системи машинного навчання для вирівнювання текстів. Для легкості функціонування системи бажано організувати її таким чином, щоб була єдина точка входу для взаємодії з цією системою. Проте у випадку з системою машинного навчання потрібно на архітектурному рівні забезпечити можливість не лише кінцевих користувачів системи і адміністраторів, а і дата-інженерів, які повинні мати змогу без додаткової публікації нової версії сервісу, в режимі реального часу вносити зміни у характеристики (features) для підготовки даних і навчання моделі.

З огляду на вищевказане, слід розрізнити *користувачький*, *адміністраторський* та *дата-інженерний* виміри роботи цієї системи. Під *користувачьким* виміром ми розуміємо можливості та способи взаємодії з системою сервісів або клієнтів кінцевого користувача. Центральною користувачькою точкою входу є сервіс REST API, з яким може комунікувати сервіс користувачького інтерфейсу або зовнішній сервіс, який входить до САТ-системи з інтеграцією в нашу систему. Адміністраторський вимір володітиме власним сервісом з

окремим користувацьким інтерфейсом. Користувацький та адміністраторський користувацькі інтерфейси розділені в окремі docker-контейнери для того щоб мінімізувати ймовірні небезпеки та вразливості системи, внаслідок маніпуляції з фронтендом. В тому числі для цього доступ до адміністраторський фронтенду можливий лише через VPN-під'єднання. Для дата-інженерів виділено окремий контейнер з фронтендом, який через сервіс оркестратора має доступ до сервісу генерування характеристик, сервісу оцінки і побудови моделі. Таким чином дата-інженери матимуть змогу продовжувати розробку додатку машинного навчання в системі безпосередньо під час її функціонування.

Зображена архітектура є мікросервісною. Кожен із сервісів, в тому числі фронтенд-сервіси запущено в окремому докер-контейнері (<https://www.docker.com>). Запуск цих контейнерів та комунікація між ними здійснюється за допомогою автоматизованої системи постачання, масштабування і менеджменту контейнеризованих систем – Kubernetes (<https://kubernetes.io>). Версійність кожного сервісу відповідає версійності образів (image) контейнерів. Образи розміщено в приватному сховищі докер-образів Quay (<https://quay.io>). Завдяки цьому досягається безпека та приватність програмного забезпечення.

Розгортання сервісів та підняття версії відбувається автоматично через вбудовану у git процедуру (pipeline) безперервної інтеграції і безперервного постачання (CI/CD). CI/CD реалізовано за допомогою GitHub Actions та ArgoCD (<https://argo-cd.readthedocs.io>). Сервіс ArgoCD відповідає за безперебійність роботи контейнерів, а також за їх версійність і параметризацію. Параметризація відбувається шляхом задавання змінних середовища, з якими запускається відповідний контейнер.

Що стосується баз даних для зберігання готових корпусів і для зберігання готових моделей, то до них не висувається особливих вимог. Оптимальною буде будь-яка нереляційна база даних, на кшталт MongoDB. Як альтернативу можна розглянути базу даних в парі з хмарним файловим сховищем, для зберігання корпусів у вигляді XML файлів, а моделей у серіалізованих JSON файлах.

Центральне місце в системі займає сервіс оркестратора. Він поєднує всі інші сервіси, зокрема головну точку входу, REST API, з сервісами для побудови і оцінки моделі, а також сервісом для генерування характеристик (feature store). Процедура створення нової версії моделі починається з обробки вхідних даних через сервіс генерування характеристик. Після цього натреноується нова модель в сервісі побудови моделі, яка потім проходить через етап оцінки в сервісі оцінки моделі. Якщо модель задовольняє вимоги системи, вона стає відкритою для використання. Частиною роботи оркестратора є також процес планувальника (scheduler), який з певною періодичністю запускає процес оновлення версії моделі з використанням нових даних. Моделі зберігаються в базах даних версійно, а також відповідно до користувача, якщо користувач вирішив створити свою власну модель, на базу загальної.

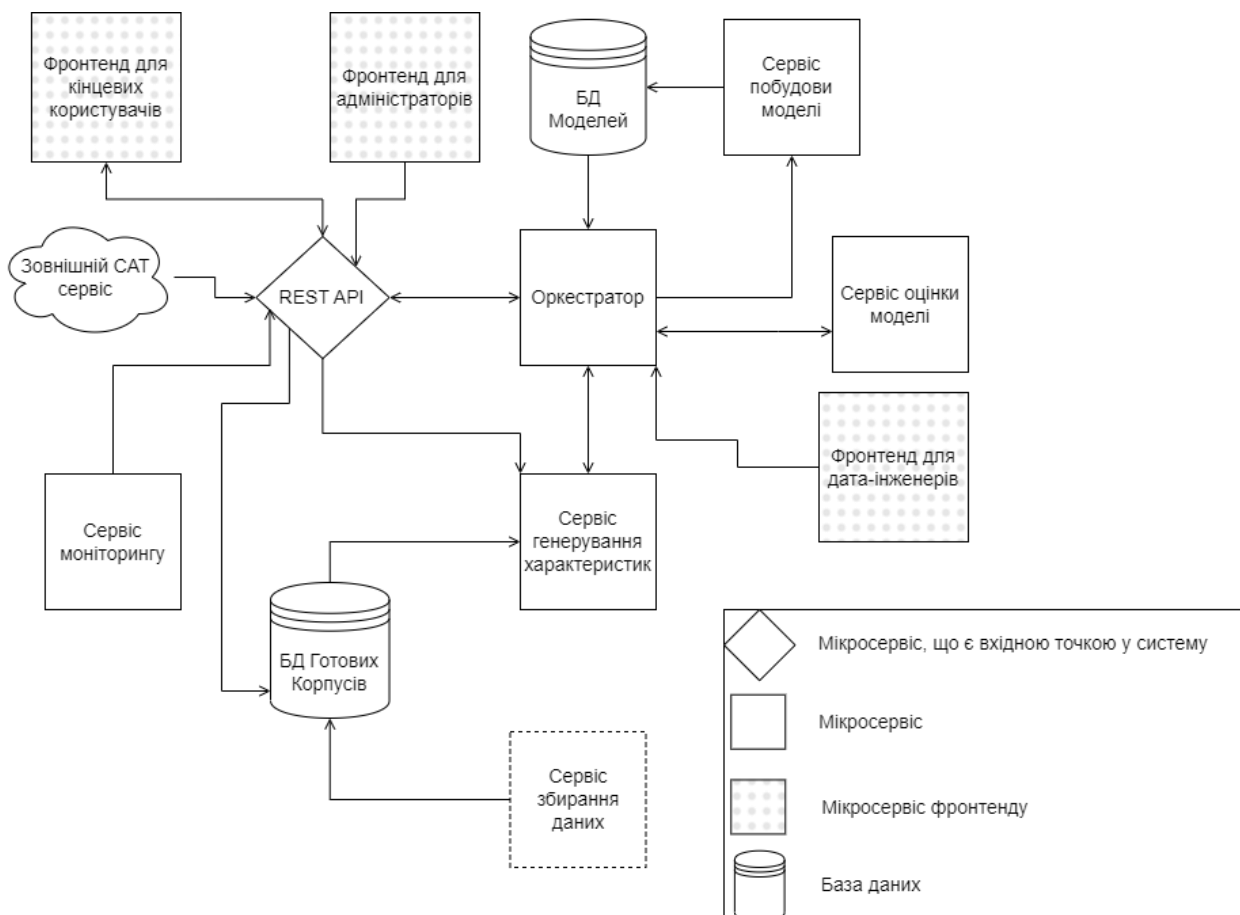


Рис. 1. Архітектура СМШ для створення двомовних корпусів

Важливим елементом системи є можливість інтеграції з будь-якими САТ-сервісами через REST API з двома цілями: використання готової моделі для виконання припущень, а також імпортування готових корпусів на базі подальшого редагування користувачем. Таким чином відбувається постійний приріст готових корпусів, а також приховано ведеться моніторинг за ефективністю роботи тієї чи іншої моделі, порівнюючи первинні результати припущення моделі та фінальну версію від користувача. Крім такого прихованого моніторингу слід також додати можливість безпосереднього зворотного зв'язку від користувача для отримання його суб'єктивної оцінки продуктивності моделі. Крім того, для підбору оптимальної моделі сервіс моніторингу може застосовувати так зване "тестування канарок" (canary testing), тобто випадковим чином обирати групу користувачів, яким надавати доступ до нової версії моделі і порівнювати їх результати з результатами користувачів з поточною версією, таким чином робити висновки про продуктивність нової версії.

Висновки

Розроблена архітектура уможливила ефективний збір даних і попередню обробку, навчання моделі та прогнозування, а також розгортання у виробничому середовищі. При проектуванні було враховано останні напрацювання та проекти у відповідній сфері. Для забезпечення масштабованості, надійності та безпеки в тому числі враховано питання апаратного забезпечення, програмного забезпечення та постачання сервісу до кінцевого споживача. Архітектура надає можливість отримати доступ до сервісу з різних точок входу: через користувацький інтерфейс для кінцевих користувачів, за допомогою REST API для сторонніх САТ-сервісів, а також через окремі фронтенд-сервіси для адміністраторів і дата-інженерів. Таким чином, система може обслуговувати різні потреби користувачів: полегшене створення нових двомовних корпусів текстів на базі загальної моделі або власної створеної в межах цієї ж системи моделі або просто використання наявної бази готових двомовних корпусів.

Література

1. Онищук М. Застосування паралельних корпусів текстів в перекладознавстві. Переяславська мовознавча толока. Переяслав-Хмельницький, 2019. С. 198–199.
2. Рубана Є. С. Конструювання лінгвістичного корпусу: від теорії до практики (на матеріалі німецької фахової мови архітектури та будівництва). 2022. URL: <https://archer.chnu.edu.ua/handle/123456789/6005>.
3. Марченко О. О., Никоненко А. О., Россада Т. В., Мельников Є.А. Метод машинного навчання для ідентифікації парафрази. Штучний інтелект, 2016, № 3. С. 128-136.
4. Triantafyllou I., Demiros I., Malavazos C., Piperidis S. An alignment architecture for Translation Memory bootstrapping. BCS International Academic Conference. URL: <https://www.aclanthology.org/2000.bcs-1.3.pdf>.
5. Giguët E., Luquet P. Multilingual Lexical Database Generation from Parallel Texts in 20 European Languages with Endogenous Resources. Proceedings of the COLING/ACL. Main Conference Poster Sessions. 2006. P. 271-278.
6. Лісік Ю. А., Грайворонський М. В. Архітектура аналітичної системи для виявлення шахрайських транзакцій. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/20805/1/9.Лісік.с.151-154.pdf>.
7. Dorard L. Architecture of a real-world Machine Learning system. 2020. URL: <https://medium.com/louis-dorard/architecture-of-a-real-world-machine-learning-system-795254bec646>.
8. Dorard L. An overview of ML development platforms. 2020. URL: <https://medium.com/louis-dorard/an-overview-of-ml-development-platforms-df953060b9a9>.
9. Вакалюк Т., Черниш О., Левківський В. Зарубіжний досвід проектування електронних словників. Збірник наукових праць Уманського державного педагогічного університету. Вип. 2. 2021. С. 74-83.
10. Cendejas E., Barcelo G., Gelbukh A., Sidorov G. Incorporating Linguistic Information to Statistical Word-Level Alignment. Progress in Pattern Recognition, Image Analysis, Computer Vision, and Applications. 2009. P. 387-394.
11. Kanade V. What Is Machine Learning? Definition, Types, Applications, and Trends for 2022. URL: <https://www.spiceworks.com/tech/artificial-intelligence/articles/what-is-ml>.
12. Smith J. Machine Learning Systems: Designs that scale. Manning. 2018. 200 p.
13. Hulten G. Building Intelligent Systems – A Guide to Machine Learning Engineering. Apress Berkeley, CA. 2018. 339 p.
14. Fahim F. CPU vs GPU vs TPU: Understanding the Difference Between Them. 2022. URL: <https://serverguy.com/comparison/cpu-vs-gpu-vs-tpu>.

References

1. Onyshchuk M. Zastosuvannia paralelnykh korpusiv tekstiv v perekladoznavstvi. Pereiaslavska movoznavcha toloka. Pereiaslav-Khmelnytskyi, 2019. S. 198–199.
2. Rubana Ye. S. Konstruiuvannia linhvistychnoho korpusu: vid teorii do praktyky (na materialii nimetskoj fakhovoi movy arkhitektury ta budivnytstva). 2022. URL: <https://archer.chnu.edu.ua/handle/123456789/6005>.
3. Marchenko O. O., Nykonenko A. O., Rossada T. V., Melnykov Ye. A. Metod mashynnoho navchannia dlia identyfikatsii parafrazy. Shtuchnyi intelekt, 2016, № 3. S. 128-136.

4. Triantafyllou I., Demiros I., Malavazos C., Piperidis S. An alignment architecture for Translation Memory bootstrapping. BCS International Academic Conference. URL: <https://www.aclanthology.org/2000.bcs-1.3.pdf>.
5. Giguët E., Luquet P. Multilingual Lexical Database Generation from Parallel Texts in 20 European Languages with Endogenous Resources. Proceedings of the COLING/ACL. Main Conference Poster Sessions. 2006. P. 271-278.
6. Lisik Yu. A., Hraivoronskyi M. V. Arkhitektura analitychnoi systemy dlia vyivlennia shakhraiskykh tranzaktsii. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/20805/1/9.Lisik.s.151-154.pdf>.
7. Dorard L. Architecture of a real-world Machine Learning system. 2020. URL: <https://medium.com/louis-dorard/architecture-of-a-real-world-machine-learning-system-795254bec646>.
8. Dorard L. An overview of ML development platforms. 2020. URL: <https://medium.com/louis-dorard/an-overview-of-ml-development-platforms-df953060b9a9>.
9. Vakaliuk T., Chernysh O., Levkivskyi V. Zarubizhnyi dosvid proektuvannia elektronnykh slovnykiv. Zbirnyk naukovykh prats Umanskoho derzhavnogo pedahohichnoho universytetu. Vyp. 2. 2021. S. 74-83.
10. Cendejas E., Barcelo G., Gelbukh A., Sidorov G. Incorporating Linguistic Information to Statistical Word-Level Alignment. Progress in Pattern Recognition, Image Analysis, Computer Vision, and Applications. 2009. P. 387-394.
11. Kanade V. What Is Machine Learning? Definition, Types, Applications, and Trends for 2022. URL: <https://www.spiceworks.com/tech/artificial-intelligence/articles/what-is-ml>.
12. Smith J. Machine Learning Systems: Designs that scale. Manning. 2018. 200 p.
13. Hulten G. Building Intelligent Systems – A Guide to Machine Learning Engineering. Apress Berkeley, CA. 2018. 339 p.
14. Fahim F. CPU vs GPU vs TPU: Understanding the Difference Between Them. 2022. URL: <https://serverguy.com/comparison/cpu-vs-gpu-vs-tpu>.

ZAKHARKEVICH OKSANA

Khmelnytskyi National University
<https://orcid.org/0000-0002-6542-9727>
e-mail: zakharkeycho@khmnu.edu.ua

KOSHEVKO JULIA

Khmelnytskyi National University
<https://orcid.org/0000-0001-7275-0853>
e-mail: koshevkoju@khmnu.edu.ua

ELSAYED ELNASHAR

Kaferelsheikh University, Egypt
<https://orcid.org/0000-0002-7963-1926>

SHVETS GALINA

Khmelnytskyi National University
<https://orcid.org/0000-0001-7980-5474>
e-mail: svetsh@khmnu.edu.ua

SELEZNEVA ANNA

Khmelnytskyi National University
<https://orcid.org/0000-0002-8238-5340>
e-mail: seleznovaA@khmnu.edu.ua

IMPLEMENTATION OF THE VISUAL DICTIONARY ON TEXTILE AND FASHION INTO THE MOBILE APPLICATION

The article reveals the essence of mobile applications as one of the modern education methods in higher education among students majoring in clothing design. The paper described implementing the existing form of a book dictionary into the mobile application as a customized visual dictionary that meets the national guidelines' requirements and the learning outcomes declared in them. The article substantiates the content of the conceptual and categorical apparatus of the mobile application (dictionary) for students majoring in clothing design. It proves the effectiveness of its use in the educational space.

Keywords: mobile learning, mobile application, visual dictionary, mobile education.

ЗАХАРКЕВИЧ ОКСАНА, КОШЕВКО ЮЛІЯ

Хмельницький національний університет

ЕЛЬНАШАР ЕЛЬСАЄД

Каферельшейхський університет, Єгипет

ШВЕЦЬ ГАЛІНА, СЕЛЕЗНЬОВА АННА

Хмельницький національний університет

ВПРОВАДЖЕННЯ ВІЗУАЛЬНОГО СЛОВНИКА З ТЕКСТИЛЮ ТА МОДИ У МОБІЛЬНИЙ ДОДАТОК

У статті розкрито сутність мобільних додатків як одного із сучасних методів навчання у вищих навчальних закладах студентів спеціальності «Дизайн одягу». У статті описано впровадження існуючої форми книжкового словника в мобільний додаток як налаштованого візуального словника, що відповідає вимогам національних рекомендацій і заявленим у них результатам навчання. Дослідження спрямоване на формування понятійно-категоріального апарату мобільного додатку для текстильно-швейного виробництва, що міститься у «Візуальному словнику з текстилю та одягу», та вивчення його впливу на формування та вдосконалення професійних компетенцій як студентів, так і викладачів. У цьому дослідженні також йдеться про впровадження мобільного додатку в навчальний процес як методу мобільного навчання у вищих навчальних закладах. У статті обґрунтовано зміст понятійно-категоріального апарату мобільного додатку (словника) для студентів спеціальності «Дизайн одягу». Доведено ефективність його використання в освітньому просторі на основі соціальних опитувань викладачів та студентів різних рівнів навчання.

Ключові слова: мобільне навчання, мобільний додаток, візуальний словник, мобільна освіта.

Introduction

All over the globe, scientists in different research areas significantly try to understand each other and write their reports in the same language. It is no secret that the most popular language nowadays is English. English is now considered a global language, with approximately 400 million native speakers. Not only is there this amount of native speakers, but over a million more speak the language as a second or foreign language. Due to this, English has now been considered the language of science. English is necessary to keep up with fellow scientists and see your work reach a global audience.

The sewing industry and apparel design are familiar to most works for readers. However, professionals in the area need help with standard terminologies due to the endless variety of clothing types and styles. Ever-changing fashion trends do not help to overcome such difficulties. Moreover, emerging techniques and designs of clothes spread new terminologies every day. The question of differences between the specific garment types might need to be clarified in the design due to the unclear definitions that lead designers to completely different appearances of the clothing items. Furthermore, such terms take their origin in other countries simultaneously. Therefore, there is more than one proper term for some clothing items.

Different definitions of garment types, especially in different languages, are obstacles to successful online search, preparing technical documentation, developing and implementing expert systems, and other elements of artificial intelligence in apparel design. Therefore, to do a qualified fashion review or perform an online search of

specific garments with keywords, it is necessary to determine the description of each garment type and its main features. A popular means of the new technology era is deep learning [1], which can exclude human factors and differences in experts' opinions from specific design process steps.

Organizing the database of properly labeled images of garments is the first step to performing automatic fashion reviews, online searching, and forming descriptions of garments. It is advisable to label specific features of the particular garment type rather than its name because the parts are standard and can be explicitly determined.

Understanding fashion includes knowing many specific fashion and apparel terms. Such information is provided in the visual dictionaries, containing words that are explained and contextualized. An example of such a book is "Visual Dictionary In Textiles & Apparel," [2] which includes terms with concise definitions accompanied by samples taken from traditional and modern fashion design. Some online visual glossaries of fashion provide similar visual information on the subject. However, they are mostly restricted to the simple sketches of the fashion items with labels and terms which need to be explained or contextualized.

Nowadays, reading information from objects is becoming more critical, so mobile applications are being created to make it easier for students to stay at the university. The mobile application can be accessed at any time and almost anywhere. It is available continuously, without breaks or weekends. In addition, the presence of the application on the device saves users the time spent opening the browser and finding the right site.

Every day, more and more people use the Internet through mobile devices. Using the mobile application involves the high-quality and rapid acquisition of knowledge, teaching students the techniques of independent work with the material, and increasing the productivity of educational career as a student and teacher. Today's market for mobile applications is very developed, and interest in integrating them into learning will continue to grow as current trends in education require new, modern, and, most importantly, effective teaching methods. In addition, mobile technology can make learning more enjoyable, meet today's requirements, and provide the correct information at the right time. Today's mobile applications available for use in the garment industry are primarily focused on supporting the market for finished products in the fashion industry and not on the development and improvement of the educational process, which is extremely important in a pandemic and globalization of the educational space. Thus, there is an urgent need to develop such mobile applications that will be aimed at their use by specialists and educators in the garment industry.

Developing a mobile application for students majoring in clothing design will help students quickly find information about the conceptual and categorical apparatus of the specialty. Therefore, it is an urgent task.

Higher educational institutions require both practical and theoretical approaches to learning, including new constructivist theories of learning that emphasize students' active use of the latest methods and mobile environments in the 21st century.

The conceptual and categorical apparatus of textile and garment production, contained in the "Visual Dictionary In Textiles & Apparel," is part of the professional competencies of teachers and students and is the mobile application's content. Therefore, it is essential to study the development and formation of knowledge and skills of students and teachers with the help of mobile technologies in teaching and learning.

Learning outcomes are commonly understood as the learning results students achieve from their learning experiences and studies. Each study course (a.k.a learning component (LC)) provides several specific learning outcomes. The national guidelines usually declare learning outcomes (LO) for the particular subject expertise. The following learning outcomes are the most relevant for students working with clothing design.

Analysis of published data and stating the problem

More than several scientific works are dedicated to the question of the digital transformation of apparel design and manufacturing [1, 3, 4]. Most papers describe pattern design systems and their implementation into design processes. Some works [3] introduce the basic concept of digital enterprise management, analyzes the shortcomings of the current clothing enterprise management, and discuss the key points of digital transformation of clothing enterprise management combined with the characteristics of clothing enterprises. Researchers are unanimous on the advisability of digital transformation of apparel design on all steps of garment development and its manufacturing.

During the last several years, the study of mobile applications in the different manufacturing fields has been an emerging trend in the scientific literature. Such a statement is proved by the number of scientific works dedicated to the question [4–14].

Nowadays, buying clothing online through brand stores, general online stores, or circular economy platforms is possible. The paper [4] proposes the analysis of an innovative taxonomy of mobile applications about the circular economy and presents a study on mobile applications supporting online commerce for clothing. Findings include that almost all the mobile applications analyzed have pictures illustrative of the clothes and accessories available for trading and their brief description.

In the research project [5], an independent case study on the new contactless 3D body measuring native mobile applications has been carried out. The research [5] analyzes body data obtained by mobile scanning apps with the help of various methods. The presented approach combines three measurements: manual body measuring with traditional instruments, 3D full-body scanning technology, and contactless body measuring via smartphone applications.

The study [6] developed a mobile app for the personal color analysis system, which determines the clothing

colors harmonized with a user's skin and hair coloring. The mobile application employs photographs of a user's skin and hair colors to automatically calculate and categorize personal coloring instead of using fabrics as an analyzing material. The application applies virtual packets of fabric swatches to virtual tee shirts and overlays them on the user's photographs to obtain a personal color analysis. Through this process, the application dramatically reduces personal time and cost and allows users to analyze individual colors repeatedly. The application is likely to assist consumers in choosing clothing colors substantively.

Scientific literature extensively covers the potential of learning using smartphones. Scientists and teachers recognize the pedagogical and technological advantages of mobile learning [9]. The most used mobile applications are in language learning and teaching [13, 14]. The analysis performed in papers [13, 14] has revealed that the quality and feasibility of individual tasks in different apps are not similar. Nevertheless, students expressed a positive attitude towards such learning tools.

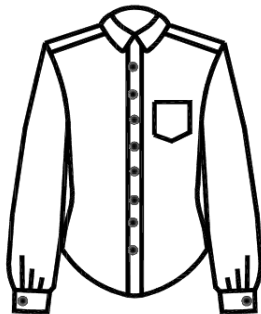
Scientists of the world conducted studies of mobile applications in learning/teaching in various fields. Among them are interactive learning environments for children [9, 10], training in clinical medicine [11, 12], language learning [13, 14], and the study of using smartphones and developing mobile applications for the students majoring in clothing design [7, 8], etc. Researchers find no evidence that mobile technology has improved students' ability to apply their skills in the field. However, students have said that one advantage of mobile technologies is accessing the necessary educational information even in extracurricular activities.

The purpose of present work is to provide a tool for mobile education for the students using their mobile phones equipped with the Android application program, which helps to view a book called "Visual Dictionary In Textiles & Apparel" [2]. Besides that, one of the objectives of the current study is to find out how accessible the conceptual apparatus of visual vocabulary is to students and teachers, whether it promotes rapid learning, whether users need an interactive transition, and what visual vocabulary assessment is during use.

Methodology

Evaluation of the visual dictionary. The visual dictionary consists of the most commonly used concepts and terms used in the professional field by teachers and students majoring in clothing design (Fig. 1). The dictionary covers the conceptual and categorical apparatus of materials science, clothing design, color, anthropometry, and many types of clothing.

Visual Dictionary In Textiles & Apparel



Shirt or shirtwaist
Blouse styled similar to a man's tailored shirt including one- or two-piece high stand collar, yoke, left chest patch pocket, and button band front opening. Hem is usually curved. (Also called **tailored blouse**).



Fig. 1. Page example of "Visual Dictionary In Textiles & Apparel"

We performed the survey aimed at quality assessment of "Visual Dictionary In Textiles & Apparel" by students and teachers during teaching and learning using a questionnaire (Fig. 2). This questionnaire is a scale with several bipolar (opposite) concepts that characterize the properties of an object, in this case, a visual dictionary. Choosing a value of 0 means neutrality, 1 (-1) – a low degree of expression of this quality in the evaluated dictionary, 2 (-2) – medium degree, 3 (-3) – high. The survey's respondents are garment industry representatives, faculty members (group 1), and students studying clothing design and manufacturing (group 2).

| | -3 | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 | |
|--|----|----|----|---|---|---|---|---|
| Unreachability of the conceptual apparatus | | | | | | | | Availability of the conceptual apparatus |
| Slow assimilation of the learning material | | | | | | | | Rapid assimilation of the learning material |
| The inexpediency of interactive transition | | | | | | | | The practicality of interactive transition |
| The irrelevance of the visual dictionary | | | | | | | | Relevance of the visual dictionary |

Fig. 2. Example of the questionnaire

Analysis of the market of mobile applications for fashion studies. The global market of mobile applications is constantly changing. Thus, in the next stage of the comparative study, an analysis of the already existing apps for learning/teaching fashion vocabulary and ones allowing the creation of visual dictionaries was carried out. We recognized mobile apps hosted on the Google Play and App Store platforms as the general statistical population of mobile applications used in textile and clothing production.

We have searched the mobile applications related to fashion dictionaries or guidelines according to the following criteria: (1) the availability of a component of clothing items definitions; (2) the download and registration are free; (3) the existence of updates between 2018 and 2022; (4) the availability in English; and (5) the availability on Google Play Store.

Analyzed mobile applications have the same characteristics. The search of the mobile applications consisted of the following combination of keywords: "Clothes dictionary," "Fashion dictionary," "Apparel dictionary," and "Textile glossary." This study aimed to implement the visual dictionary into the mobile application fitting Google Android OS, which has at least 80% of the global market share, so many smartphone users could use it [6]. Thus, we applied the keywords in the Google Play Store. Before choosing the application, we collected and analyzed data on about 279 applications we got as a result of the search. The following information was extracted from the mobile applications (Table 1): name, description, user ranking, number of downloads, author, and year of the last update.

Table 1

List of mobile applications analyzed

| Name | Description | Language | Number of Downloads | Author | Year |
|--------------------|--|----------|---------------------|----------------|------|
| Textile Dictionary | Sometimes, textile learners fall problems with understanding textile terms. This application is created based on textile-related words. It is composed of 4000 words at the first step, and more words will be added in the next update. | English | 500+ | TEX-CUE | 2020 |
| Textile eBook | Textile eBook is the best website that supports textile, apparel, and fashion design students and professionals by uploading and sharing free ebooks related to material, clothing, and fashion. | English | 10000+ | Textile Expert | 2019 |
| Textile Dictionary | Textile Dictionary will help the automobile industries, homemakers, dressmakers, interior decorators, retail-store customers, and even students studying these subjects to find the most common textile word. With this app, one will be able to find out and see the word | English | 10000+ | Textile Facts | 2020 |

As one can see in table 1, there are only three applications that meet all the criteria. However, these apps do not allow customizing. That is why we applied the same methodology to search and extract mobile applications that will enable the creation of personalized dictionaries.

We have searched the mobile applications related to dictionaries and their creation according to the following criteria: (1) the availability to add words, their definitions, and images; (2) the download and registration are free; (3) the existence of updates between 2018 and 2022; (4) the availability in English; (5) the availability on Google Play Store, and (6) the availability to merge dictionaries and share them with fellow users. The keywords for the second search were "Create dictionary" and "Create glossary." As a result of it, we found 30 applications. Five of them meet the criteria (Table 2).

Table 2

List of mobile applications for creating personalized dictionaries

| Name | Description | Users rank | Language | Number of Downloads | Author | Year |
|-------------------|---|------------|----------|---------------------|----------|------|
| Word note: create | An app is a words saver app that helps one memorize words and phrases a user adds. Create a | - | English | 50+ | Velonder | 2022 |

| | | | | | | |
|--|--|-----|---------|---------|---------------------|------|
| dictionary | personal dictionary, and remember the vocabulary. | | | | | |
| Dictionary.com English Word Meanings & Definitions | A free dictionary app with English language learning tools is built for every learner's level. With more than 2 million trusted definitions and synonyms, the app is optimized with the owner's mobile device to help one learn English or improve their English vocabulary. It works offline. | 4.4 | English | 10 МЛН+ | Dictionary.com, LLC | 2022 |
| Build Own Dictionary | Using this app, one can create dictionaries while learning a foreign language. | 4.4 | English | 10000+ | BitDeveloper | 2022 |
| Kalimaty – Create Your Own Dictionary | An app is a simple dictionary crafted for people who prefer to create their dictionaries for the English language or any language you want to learn and memorize its words. | 3.7 | English | 10000+ | ARABTEAM | 2021 |
| Create Dictionary | An app allows one to create customized dictionaries for themselves and add words with meanings, examples, and pictures of one's choice. | 4.4 | English | 10000+ | Hazzam | 2021 |

Results and discussion

Assessment of the book "Visual Dictionary In Textiles & Apparel". After receiving grades from all respondents, the arithmetic means values for each pair of antonyms were calculated. Constructed curve based on the obtained data reflects the average subjective perception of the characteristics of the studied dictionary (Tables 3, 4, Fig. 3).

Table 3

The results of the evaluation of the "Visual Dictionary In Textiles & Apparel" (students)

| Question | Code | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | Average |
|----------------|------|---|----|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---------|
| Reachebility | a1 | 3 | -3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 0 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 1.947 |
| Assimilation | a2 | 3 | 0 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 | 3 | 0 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 2.263 |
| Interactivness | a3 | 3 | 0 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2.526 |
| Relevance | a4 | 3 | 0 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 0 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2.263 |

Table 4

The results of the evaluation of the "Visual Dictionary In Textiles & Apparel" (teachers)

| Question | Code | Experts | | | | | | | Average |
|----------------|------|---------|---|---|---|---|---|---|---------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| Reachebility | a1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 2.857 |
| Assimilation | a2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 0 | 2.286 |
| Interactivness | a3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 2.857 |
| Relevance | a4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2.857 |

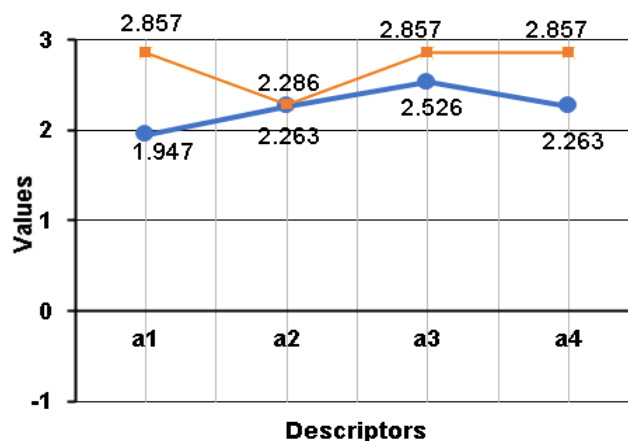


Fig. 3. Psychographic profiles of the "Visual Dictionary In Textiles & Apparel"

Analyzing the curve (Fig. 3), one can note that the visual dictionary satisfies the target consumers in the following characteristics: rapid assimilation of material, availability of conceptual apparatus, and interactive transition. Applicants also recommended the use of visual vocabulary in the workplace.

In addition, the respondents indicated which media they prefer in teaching/learning (Fig. 4). Among the surveyed experts on which media they like, the majority of respondents singled out books (71.4%), videos (85.7%), and visual vocabulary (71.4%). Students prefer online texts (78.9%), videos, and books (57.9). None of the respondents used podcasts (0.0%).

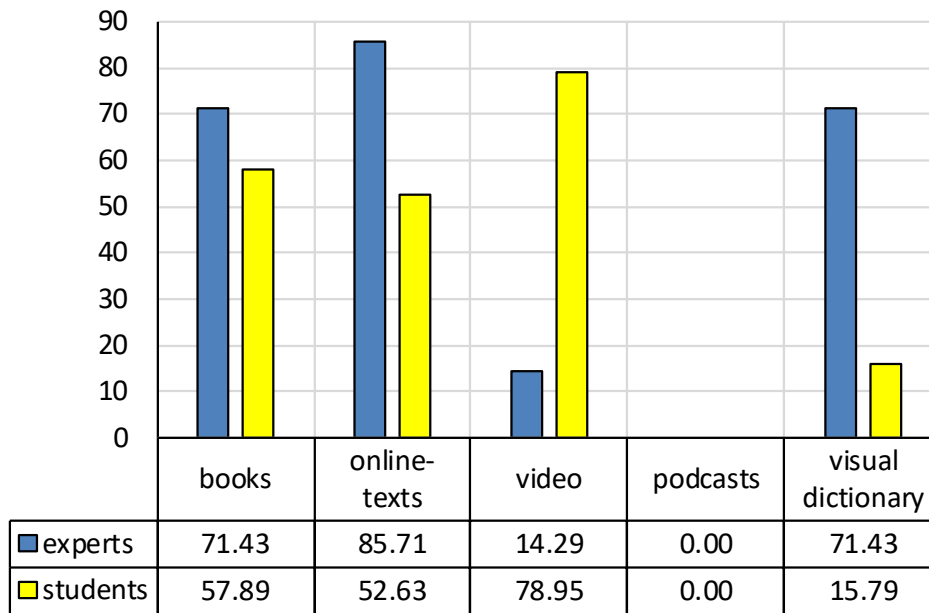


Fig. 4. The results of a survey of respondents on their use of media

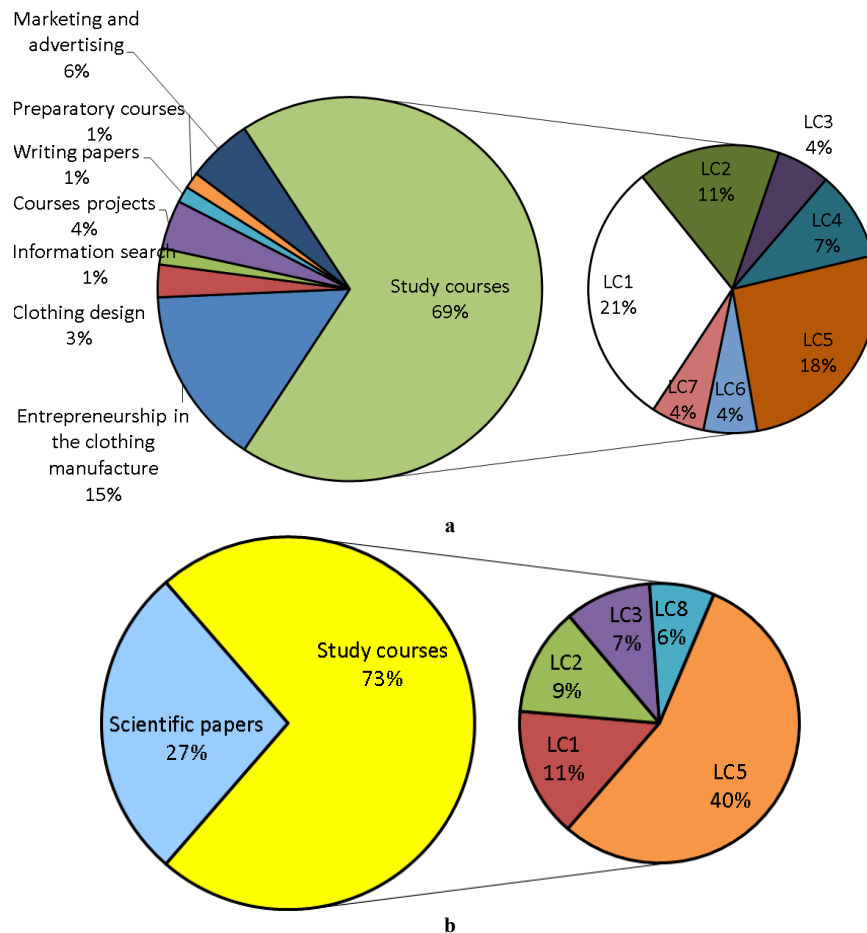


Fig. 5. The results of a survey on the advisability of using the visual dictionary in different areas: a – students; b – teachers

Respondents were also asked to answer the questions in which areas or situations it is necessary to use the "Visual Dictionary In Textiles & Apparel." Among the experts' answers can be identified such study courses as Fundamentals of Product Desing (LC1), Fundamentals of Technology of Goods (LC2), Introduction to the specialty (LC3), Computer-aided Clothing Design (LC4), Foreign Language (LC5), Colour Science (LC6), Drawing and Fundamentals of Artistic Graphics (LC7), Research Methodology and Organization (LC8) (Fig. 5). Beside the studying all the respondents chose several other possible ways of implementation of the visual dictionary.

The majority of respondents also believe that the best format for a visual dictionary will be a mobile application (85.7%) or a printed version (57.1%) (Fig. 6). Compared to teachers, students provide the maximum percentage of mobile application use (78.9%). Only 14.3% of respondents prefer pdf format and online texts.

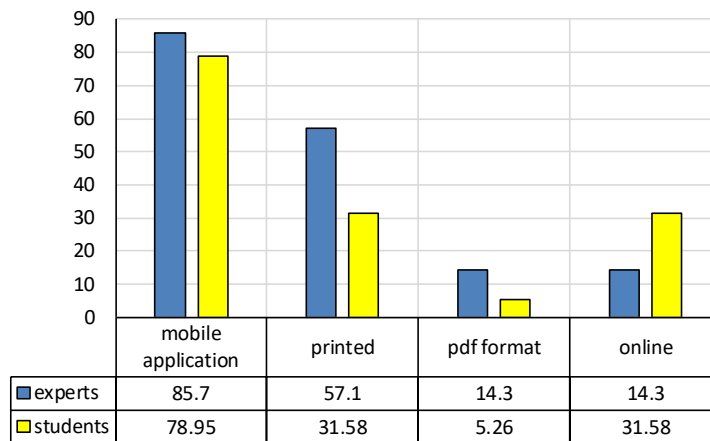


Fig. 6. The results of a survey of respondents on the preferability of the dictionary format

Customization of the mobile application for implementation of "Visual Dictionary In Textiles & Apparel". For the customization of the mobile application, we considered three possible solutions such as: "Build Own Dictionary," "Kalimaty," and "Create Dictionary."

The application called "Build Own Dictionary" allows one to create a dictionary or import it from one's device into the app. Users can delete or rename the dictionary and export it from the app to their devices. A student can add a word quickly with its translation and, optionally, its description to the dictionary. Other features of the app are: deleting or editing words in the dictionary, assigning a category name to the terms, and sorting the comments alphabetically, by time added, or by category. Users can search for a word or description in the dictionary and customize the colors and font sizes. It is possible to save all created dictionaries as an SQLite database in a DB file. The premium version enables the export/import feature, adding descriptions, assigning categories, customizing colors and font sizes, and sentence translation. In addition, it removes from the app all advertisements.

Another app named "Kalimaty" is a simple dictionary crafted for people who prefer to create their dictionaries for the English language or any other language. This app is a dynamic database of users' new words and phrases linked to real examples of these words, related to specific users' reading and listening, not just learner content. This application allows users to add categories and vocabulary lists with images and icons and add/modify words or sentences with their translation and pictures. Users can provide an explanation, illustration, and translation. There is an auto-translation for most English words, and users can listen to the pronunciation of those words. The functions of arranging, sorting, and searching a word in the customized dictionary are also available. The app allows word translation to retrieve the definition of unknown words. The application is free, and it does not contain any advertisements. It is working entirely offline, with no need for the Internet.

Using the app "Create Dictionary" allows creating customized dictionaries for themselves and adding words with meanings, examples, and pictures of the user's choice. This application will enable students to save glossaries on their professional activity subject areas. For separate languages/books, users can create different dictionaries. A feature allowing import of the backup dictionaries to any of their devices and sharing created dictionaries with friends will be very convenient when working on team projects. In addition, students can add words in a different language and their definitions in another. The application provides auto backup and custom word categories. The premium version of the app is free of any advertisement.

To implement the existing in the form of a book dictionary into the mobile application, we choose the app "Create Dictionary," available at the link <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.hazzam.createdictionary&hl=ru&gl=US>. One can see in Fig. 7 the resulting screenshots of the customized visual dictionary.

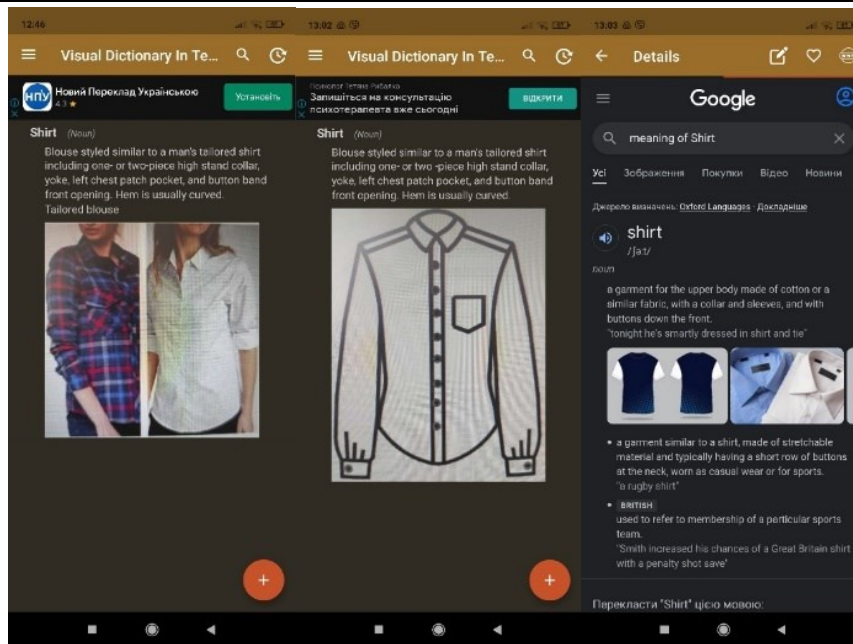


Fig. 7. Screenshots of the customized visual dictionary

Thus, combining the key features of the app "Create Dictionary" and the advantages of the book "Visual Dictionary In Textiles & Apparel," a resulting mobile dictionary app allows students to customize a dictionary by adding words, their meanings, and examples. A student can add a related picture to the word from the Internet or device memory even when there is no such image in the book. Besides that, the mobile format adds such a feature as sorting words based on alphabet/date/random.

As a result of customizing the dictionary, we achieved the study's objectives: the learning outcomes declared in the national guidelines (Bachelor's degree and Master's degree in clothing design) are reached using the customized mobile application for the study courses identified by respondents of the survey (Fig. 5).

For the Bachelor's degree, the learning outcomes are as follows:

- LO3. Students can use modern informational systems, technologies, and general and specific software in their professional activities.
- LO6. Students can use a professional glossary and basic definitions in materials science, design, technology, and garment manufacturing, as well as their quality indexes.
- LO7. Students can describe, identify and categorize the garments.
- LO14. Students can form a range of garments that meet the consumers' requirements and national standards.

The learning outcome for the Master's degree is as follows: LO3. Students can fluently communicate in state and foreign languages orally and in writing on scientific, engineering, and production issues in apparel design and manufacturing, presenting the results of their activities.

Conclusion

This study presented the "Visual Dictionary In Textiles & Apparel" implementation in the form of a mobile application based on existing mobile apps allowing customized dictionaries. The study is based on a survey of students majoring in clothing design and teachers with experience in fashion and apparel manufacturing. Most respondents preferred the customized visual dictionary in the mobile app format. The mobile application has many advantages in teaching students: it promotes faster assimilation of information, preparation for classes in the specialty, and is relevant in the professional and scientific field. In addition, it assists teachers in teaching activities in teaching various professional disciplines, writing scientific articles, and conducting research startups.

In the next stage of this research, it is advisable to study the exact impact of using the customized visual dictionary on learning outcomes, which are declared in the work programs of the study courses and national guidelines for the specialty of a clothing designer.

References

1. Zakharkevich O., Selezneva A., Kuleshova S., Slavinskaya A., Vovk J., Shvets G. Defining the main features of clothing to apply deep learning in apparel design. *Vlákna a textil*. 2018. № 25(4). P. 103-109.
2. Elnashar E., Zakharkevich O., Shvets G., Selezneva A. *Visual Dictionary In Textiles & Apparel*. Khmnelnytskyi: KhNU, 2019. 183 p.
3. Papachristou E., Kyratsis P., Bilalis N. A Comparative Study of Open-Source and Licensed CAD

Software to Support Garment Development Learning. *Machines*. 2019. Vol. 7(2). 30. <https://doi.org/10.3390/machines7020030>

4. Faria R., Lopes I., Pires I.M., Marques G., Fernandes S., ... Trajkovik V. Circular economy for clothes using web and mobile technologies. A systematic review and a taxonomy proposal. *Information*. 2020. Vol. 11 (3). 161. <https://doi.org/10.3390/info11030161>

5. Strunevich E., Detering-Koll U., Quattelbaum B. Investigation of usability and measurement accuracy of 3D body scanning mobile applications. *Communications in Development and Assembling of Textile Products*. 2020. Vol. 1(2). P. 130–140. <https://doi.org/10.25367/cdatp.2020.1.p130-140>

6. Hye R., In Kim Young, Liu Shaofeng. A mobile application for personal colour analysis. *Cogent Business & Management*. 2019. Vol. 6(1). P. 1–11. <https://doi.org/10.1080/23311975.2019.1576828>

7. Zakharkevich O., Poluchovich I., Kuleshova S., Koshevko J., Shvets G., Shvets A. “CloStyler” – mobile application to calculate the parameters of clothing blocks. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. 1031(1). 012031. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1031/1/012031>

8. Zakharkevich O., Koshevko Y., Kuleshova S., Tkachuk S., Dombrovskyi A. Development of the mobile applications for using in apparel and shoes design. *Vlákna a textil*. 2021. № 28(2). P. 105–122. http://vat.ft.tul.cz/2021/2/VaT_2021_2_13.pdf

9. Kim Y., Smith D. Pedagogical and technological augmentation of mobile learning for young children interactive learning environments. *Interactive Learning Environments*. 2017. Vol. 25(1). P. 4–16. <https://doi.org/10.1080/10494820.2015.1087411>

10. Zaranis N., Kalogiannakis M., Papadakis S. Using Mobile Devices for Teaching Realistic Mathematics in Kindergarten Education. *Creative education*. 2013. Vol. 4(7). P. 1–10. <http://dx.doi.org/10.4236/ce.2013.47A1001>

11. Mackaya B., Andersona J., Hardingb T. Mobile technology in clinical teaching. *Nurse Education in Practice*. 2017. Vol. 22. P. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.nepr.2016.11.001>

12. Lumsden C., Byrne-Davis L. Th., Mooney J., Sandars J. Using mobile devices for teaching and learning in clinical medicine. *Archives of Disease in Childhood - Education and Practice*. 2015. Vol. 100(5). P. 244–251. <http://dx.doi.org/10.1136/archdischild-2014-306620>

13. Rosell-Aguilar F. Taxonomy and Framework for Evaluating Language Learning Mobile Applications. *Calico journal*. 2017. Vol. 34(2). P. 243–258. <https://doi.org/10.1558/cj.27623>

14. Pereira C., Terra R. A mobile app for teaching formal languages and automata. *Computer Applications in Engineering Education*. 2018. Vol. 26 (5). P. 1742–1752. <https://doi.org/10.1002/cae.21944>

БОРТНИК ГЕННАДІЙ

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7083-2775>e-mail: bgen88@gmail.com**КИРИЛЮК СЕРГІЙ**

Вінницький національний технічний університет

e-mail: kso1996.08@gmail.com**БРИЛЬ МИХАЙЛО**

Вінницький національний технічний університет

e-mail: mishkabrill@gmail.com

ШВИДКОДІЙНИЙ АНАЛОГО-ЦИФРОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ З КОРИГУВАННЯМ ЧАСОВИХ ЗСУВІВ ІМПУЛЬСІВ ДИСКРЕТИЗАЦІЇ

У роботі запропоновано метод розширення динамічного діапазону швидкодіючих аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) на базі коригування часових зсувів імпульсів дискретизації. Наведена структура швидкодіючого пристрою аналого-цифрового перетворення з багатофазовою дискретизацією, що базується на паралельному нарощуванні декількох каналів АЦП. Доведено, що зменшення динамічних похибок у швидкодіючих АЦП можна досягнути шляхом мінімізації часових зсувів тактових імпульсів. При цьому здійснюється калібрування кожного каналу АЦП шляхом внесення регульованої затримки фронтів імпульсів дискретизації. Аналіз ефективності запропонованого методу підтвердив, що завдяки розробленому методу вдається розширити динамічний діапазон 8-розрядного швидкодіючого АЦП на 15 дБ у смузі високих частот.

Ключові слова: швидкодіючі аналого-цифрові перетворювачі, апертурна невизначеність, багатофазова дискретизація, динамічний діапазон.

BORTNYK GENNADIY, KYRYLYUK SERGIY, BRYL MYKHAILO

Vinnytsia National Technical University

HIGH-SPEED ANALOG-DIGITAL CONVERTER WITH ADJUSTMENT OF TIME SHIFT OF SAMPLING PULSE

The paper proposes a method of expanding the dynamic range of high-speed analog-to-digital converters (ADCs) based on the correction of time shifts of sampling pulses. It is shown that high-speed ADCs with multiphase sampling are built on the basis of turning on several ADC modules in parallel on inputs and signal samples shifted relative to each other. Multiplexing the outputs of the ADC samples makes it possible to increase the sampling frequency by several times. But at the same time, dynamic errors of analog-digital conversion occur due to the occurrence of aperture uncertainty of conversion results in individual ADC modules. The aim of the work is to expand the dynamic range of high-speed ADCs with multiphase sampling by adjusting the phase shifts of sampling pulses.

The parameters of the analog-to-digital conversion device with multiphase sampling are determined by the set of parameters of the component blocks of the ADC, as well as the relative spread of these parameters. At the same time, the dominant effect is the aperture uncertainty, which causes the occurrence of amplitude errors, which are numerically equal to the increase of the signal during the aperture time. A scheme for calibrating the time shift in the ADC channel is proposed. The value of the time shift of the signal readings in the studied ADC1 channel is estimated relative to the readings formed in the ADC reference channel. The generated error signal from the output of the digital computer with the help of a feedback circuit through the digital-to-analog converter controls the time delay of the sampling pulses formed in the multiphase pulse generator. Such calibration is performed for each ADC channel. In the operating mode of the device, the time delays formed during calibration correct the time shifts of the ADC sampling pulses. To analyze the effectiveness of the proposed correction method, a model of a high-speed analog-to-digital conversion device based on four channels of 8-bit parallel ADCs was developed. An expression for determining the dynamic range of the ADC under study is given. The research results confirmed that thanks to the developed method, it is possible to expand the dynamic range of the 8-bit high-speed ADC by 15 dB in the high frequency band.

Keywords: high-speed analog-to-digital converters, aperture uncertainty, multiphase sampling, dynamic range.

Постановка проблеми

Перспективність методів цифрового оброблення сигналів (ЦОС) вимагає підвищення швидкодії та розширення динамічного діапазону аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), які є ключовими елементами будь-якої системи з ЦОС. Метод структурного розпаралелювання процесу аналого-цифрового перетворення є ефективним напрямком побудови швидкодіючих АЦП. Такі АЦП можуть функціонувати зі швидкістю, що значно перевищує швидкодію окремих мікросхем перетворювачів [1].

Швидкодіючі АЦП з багатофазовою дискретизацією будуються на базі ввімкнення кількох модулів АЦП паралельно по входам і вибірками сигналу, що зсунені одна відносно одної. Мультиплексування виходів M зразків АЦП дає можливість підвищити частоту дискретизації в M разів. Але при цьому виникають динамічні похибки аналого-цифрового перетворення, що обумовлені виникненням апертурної невизначеності результатів перетворення в окремих модулях АЦП [2]. Традиційний метод вирішення такої проблеми полягає у ретельному виборі мікросхем АЦП з ідентичними динамічними параметрами. Але реалізація такого підходу ускладнює процес виготовлення пристроїв аналого-цифрового перетворення, тому що вимагає використання складних інформаційно-вимірювальних систем контролю динамічних параметрів АЦП. Тому, незважаючи на певні результати, досягнуті при застосуванні методів структурного розпаралелювання АЦП, питання підвищення ефективності швидкодіючих засобів аналого-цифрового перетворення як і раніше залишається актуальним.

Аналіз останніх джерел

Реальний динамічний діапазон швидкодіючих АЦП з багатофазовою дискретизацією не досягає своїх потенційно теоретичних можливостей внаслідок впливу апертурної невизначеності результатів аналого-цифрового перетворення і це відображено у відповідних публікаціях [3, 4].

Методи коригування фазового зсуву імпульсів дискретизації на базі статистичного оброблення вхідних сигналів АЦП характеризуються обмеженнями у використанні, тому що вони є коректними лише для певного класу оброблюваних сигналів [5, 6].

Судячи з останніх публікацій [2–6], не дивлячись на широке використання методів швидкодіючого аналого-цифрового перетворення, розробка нових швидкодіючих АЦП з багатофазовою дискретизацією продовжується зараз і не може вважатись цілком завершеною.

Метою роботи є розширення динамічного діапазону швидкодіючих АЦП з багатофазовою дискретизацією за рахунок коригування фазових зсувів імпульсів дискретизації.

Виклад основного матеріалу

Структура швидкодіючого пристрою аналого-цифрового перетворення з багатофазовою дискретизацією базується на паралельному нарощуванні декількох АЦП (рис. 1). Перший результат оброблення сигналу на виході такого пристрою з'являється через проміжок часу T , що є базовим періодом синхронізації АЦП. Усі наступні результати будуть з'являться на виході з інтервалом T/M , де M – число каналів оброблення.

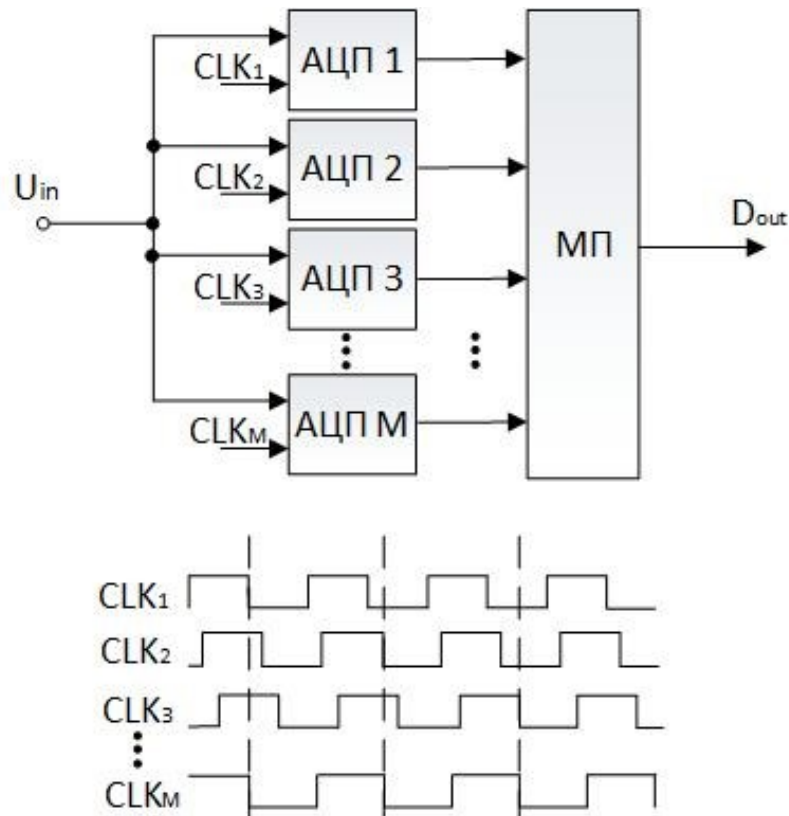


Рис. 1. Структура і часова діаграма швидкодіючого АЦП з багатофазовою дискретизацією

Сигнал на виході i -го каналу АЦП дорівнює

$$D_{out_i} = U_{in}[t - (nM + i)T_s], \tag{1}$$

де U_{in} – вхідний сигнал;

T_s – період дискретизації.

Відцифровані значення вхідного сигналу з кожного каналу АЦП через мультиплексор МП надходять на вихід пристрою аналого-цифрового перетворення, вихідний сигнал якого дорівнює

$$D_{out}(n) = U_{in}[nT_s]. \tag{2}$$

Таким чином, сигнали на виході пристрою з'являються з частотою, що в M разів вища, ніж частота перетворення одного каналу АЦП.

Параметри пристрою аналого-цифрового перетворення з багатофазовою дискретизацією визначаються сукупністю параметрів складових блоків АЦП, а також відносним розкидом цих параметрів. При цьому домінуючим є ефект апертурної невизначеності, що спричиняє виникненню амплітудних похибок, які чисельно дорівнюють приросту сигналу ΔU протягом апертурного часу Δt (рис. 2).

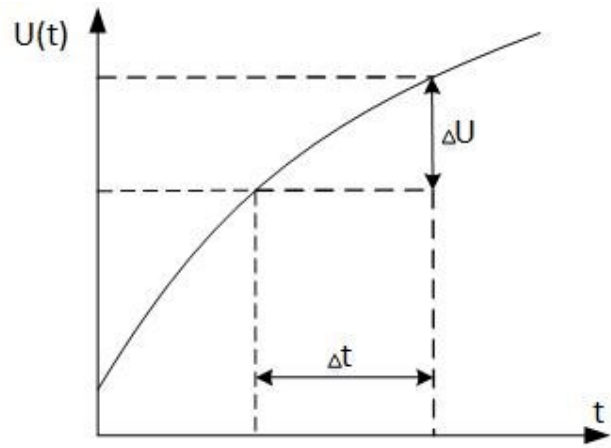


Рис. 2. Утворення апертурної похибки АЦП

Наявність апертурної невизначеності в i -му каналі АЦП призводить до часового зсуву моментів дискретизації на Δt_i між фактичним фронтом тактового імпульсу та ідеальним фронтом. Значення апертурної похибки можна знайти за допомогою розкладання виразу для вхідного сигналу у ряд Тейлора в межах точок відліків, який для r -ї точки має вигляд [1]:

$$U(t) = U(t_r) + \Delta t \cdot U'(t_r) + \dots + \frac{\Delta t^k}{k!} U^k(t_r). \tag{3}$$

Враховуючи, що $|\Delta t_i| \leq 0,1T_s$, похибку вихідних значень i -го каналу АЦП можна представити у першому наближенні з виразу (3) в такому вигляді:

$$\Delta U_i \approx \Delta t_i \left. \frac{\partial U_{in}(t)}{\partial t} \right|_{t=(nM+i)T_s}. \tag{4}$$

Відліки вхідного сигналу i -го каналу АЦП здійснюються багаторазово і в результаті генерується послідовність різних ΔU . Сумарне значення похибки невизначеності для набору з N відліків можна представити у вигляді

$$\Delta U_{S_i} = \sum_{n=n_i}^{n_i+N} \left| \Delta t_i \frac{\partial U_{in}(t)}{\partial t} \right|_{t=(nM+i)T_s}, \tag{5}$$

де n_i – початкова точка накопичення похибки невизначеності.

Для випадку $N \rightarrow \infty$ вираз (5) можна записати у такому вигляді:

$$\Delta U_{S_i} = |\Delta t_i| \cdot N \cdot \left| \frac{\partial U_{in}(t)}{\partial t} \right|_{t=nT_s}. \tag{6}$$

З виразу (6) видно, що значення ΔU пропорційні модулю часового зсуву $|\Delta t|$. Таким чином, часові зсуви можна оцінити за значеннями ΔU (рис. 3).

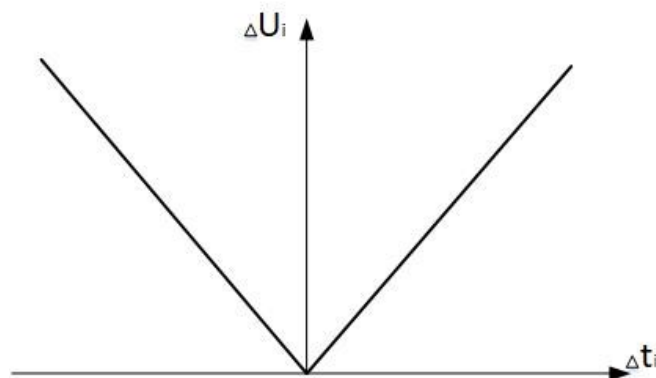


Рис. 3. Залежність між значеннями часового зсуву і похибкою невизначеності

На рис. 4 представлено схему калібрування часового зсуву в каналі АЦП. Значення часового зсуву відліків сигналу в досліджуваному каналі АЦП оцінюється відносно відліків, що формуються в опорному каналі АЦПО.

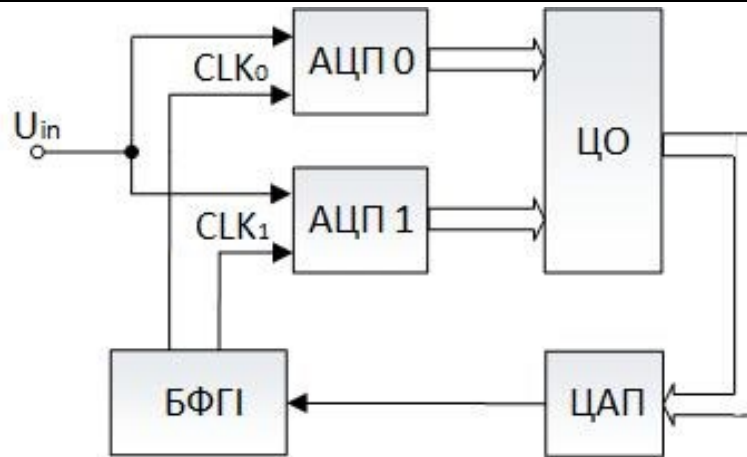


Рис. 4. Схема калібрування часового зсуву в каналі АЦП

Фронти відліків опорного каналу АЦП повинні збігатись з фронтами відліків досліджуваного каналу АЦП. Цифровий обчислювач (ЦО) визначає і накопичує похибку невизначеності, яка є функцією часового зсуву між фронтами імпульсів дискретизації цих двох каналів АЦП. Ця похибка стає мінімальною за умови, коли $|\Delta t| \rightarrow 0$. Сформований сигнал похибки з виходу ЦО за допомогою кола зворотного зв'язку через цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) керує часовою затримкою імпульсів дискретизації, що формуються в багатофазовому генераторі імпульсів (БФГ). Таке калібрування здійснюється для кожного каналу АЦП.

У робочому режимі функціонування пристрою, сформовані при калібруванні часові затримки коригують часові зсуви імпульсів дискретизації АЦП.

Для аналізу ефективності запропонованого методу коригування розроблено модель швидкодіяного пристрою аналого-цифрового перетворення на базі чотирьох каналів 8-розрядних АЦП паралельного типу. Для визначення динамічного діапазону досліджуваного АЦП можна використовувати вираз [7]:

$$D_{ADC} = \frac{1}{6,02} \left(20 \lg \left(\frac{1}{2\pi f_{in} \Delta t} \right) - 1,76 \right), \quad (7)$$

де f_{in} – частота вхідного синусоїдального сигналу.

На рис. 5 наведено залежність динамічного діапазону АЦП від частоти вхідного сигналу в режимі без коригування (нижня крива) і з коригуванням часових зсувів (верхня крива).

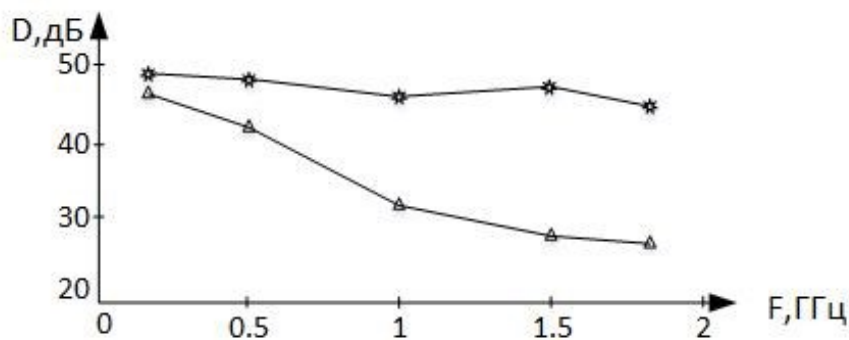


Рис. 5. Залежність динамічного діапазону АЦП від частоти вхідного сигналу

Як видно з графіків у смузі низьких частот динамічний діапазон пристрою аналого-цифрового перетворення обмежується лише розрядністю використаних АЦП. Зі збільшенням частоти вхідних сигналів динамічний діапазон АЦП без коригування зменшується на 20 дБ, а використання режиму коригування часових зсувів демонструє незначне зменшення динамічного діапазону на 5 дБ.

Висновки

У роботі запропоновано метод розширення динамічного діапазону швидкодіяних АЦП на базі коригування часових зсувів імпульсів дискретизації. Встановлено, що джерелом динамічних похибок у швидкодіяних АЦП з багатофазовою дискретизацією є апертурна невизначеність вибірок сигналу у кожному каналі. Доведено, що зменшення цих похибок можна досягнути шляхом мінімізації часових зсувів тактових імпульсів. При цьому здійснюється калібрування кожного каналу АЦП шляхом внесення регульованої затримки фронтів імпульсів дискретизації.

Аналіз ефективності запропонованого методу підтвердив, що завдяки розробленому методу

вдається розширити динамічний діапазон 8-розрядного швидкодіючого АЦП на 15 дБ у смузі високих частот.

Запропонований швидкодіючий АЦП можна використовувати в аналого-цифрових трактах пристроїв програмно-керованого радіо.

Література

1. Бортник Г.Г., Бортник С.Г., Кичак В.М. Методи та засоби аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2013. 128 с.
2. Бортник Г.Г., Кичак В.М., Стальченко О.В. Аналого-цифрові тракти комп'ютерних систем з цифровим обробленням високочастотних сигналів : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2016. 140 с.
3. Salib A., Flanagan M. F., Cardiff B. A High-Precision Time Skew Estimation and Correction Technique for Time-Interleaved ADCs. *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, Oct. 2019. vol. 66, no. 10, pp. 3747–3760.
4. Reyes B. T., Sanchez R. M., Pola A. L., Hueda M. R. Design and Experimental Evaluation of a Time-Interleaved ADC Calibration Algorithm for Application in High-Speed Communication Systems. *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, May 2017. vol. 64, no. 5, pp. 1019–1030.
5. Mafi H., Yargholi M., Yavari M. Digital Blind Background Calibration of Imperfections in Time-Interleaved ADCs. *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, Jun. 2017. vol. 64, no. 6, pp. 1504–1514.
6. Ali A. M. A., Dinc H., Bhoraskar P., Bardsley S., Dillon C., McShea M., Periathambi J. P., Puckett S. A 12-b 18-GS/s RF Sampling ADC With an Integrated Wideband Track-and-Hold Amplifier and Background Calibration. *IEEE J. Solid-State Circuits*, Dec. 2020. vol. 55, no. 12, pp. 3210–3224.
7. Бортник Г.Г. Швидкодіючий аналого-цифровий перетворювач підвищеної точності. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2002. № 5, С. 47–50.

References

1. Bortnyk H.H., Bortnyk S.H., Kychak V.M. Metody ta zasoby analoho-tsyfrovoho peretvorennia vysokochastotnykh syhnaliv : monohrafiia. Vinnytsia : VNTU, 2013. 128 s.
2. Bortnyk H.H., Kychak V.M., Stalchenko O.V. Analoho-tsyfrovii trakty kompiutemykh system z tsyfrovym obroblenniam vysokochastotnykh syhnaliv : monohrafiia. Vinnytsia : VNTU, 2016. 140 s.
3. Salib A., Flanagan M. F., Cardiff B. A High-Precision Time Skew Estimation and Correction Technique for Time-Interleaved ADCs. *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, Oct. 2019. vol. 66, no. 10, pp. 3747–3760.
4. Reyes B. T., Sanchez R. M., Pola A. L., Hueda M. R. Design and Experimental Evaluation of a Time-Interleaved ADC Calibration Algorithm for Application in High-Speed Communication Systems. *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, May 2017. vol. 64, no. 5, pp. 1019–1030.
5. Mafi H., Yargholi M., Yavari M. Digital Blind Background Calibration of Imperfections in Time-Interleaved ADCs. *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, Jun. 2017. vol. 64, no. 6, pp. 1504–1514.
6. Ali A. M. A., Dinc H., Bhoraskar P., Bardsley S., Dillon C., McShea M., Periathambi J. P., Puckett S. A 12-b 18-GS/s RF Sampling ADC With an Integrated Wideband Track-and-Hold Amplifier and Background Calibration. *IEEE J. Solid-State Circuits*, Dec. 2020. vol. 55, no. 12, pp. 3210–3224.
7. Bortnyk H.H. Shvydkodiuchy analoho-tsyfrovii peretvoriuvach pidvyshchenoi tochnosti. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*. 2002. № 5, S. 47–50.

ГОРЯЩЕНКО СЕРГІЙ

Хмельницький національний університет

ORCID ID: [0000-0001-6623-2523](https://orcid.org/0000-0001-6623-2523)e-mail: horishchenko@khmnu.edu.ua**СИНЮК ОЛЕГ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-9615-0729>e-mail: synyukom@khnu.km.ua**ДРАПАК ГЕОРГІЙ**

Хмельницький національний університет

ORCID ID: [0000-0002-4908-0887](https://orcid.org/0000-0002-4908-0887)e-mail: g_drapak@i.ua**ГОРЯЩЕНКО КОСТЯНТИН**

Хмельницький національний університет

ORCID ID: [0000-0002-7034-8702](https://orcid.org/0000-0002-7034-8702)e-mail: kostyakst@ukr.net**РОМАНЕЦЬ ТАРАС**

Хмельницький національний університет

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0848-0825>e-mail: romanetsta@khmnu.edu.ua

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ НАНЕСЕННЯ ПОЛІМЕРНОГО ПОКРИТТЯ НА ДЕТАЛІ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Автоматизація процесу нанесення полімерних покриттів на деталі легкої промисловості пропонує численні переваги, починаючи від підвищеної точності та сталості до підвищеної ефективності та продуктивності. Застосовуючи автоматизацію, виробники можуть досягти найвищої якості покриття, зменшити витрати на оплату праці, підвищити безпеку та використовувати технології Industry 4.0. Оскільки виробничий ландшафт продовжує розвиватися, впровадження автоматизованих систем у легкій промисловості стає все більш важливим для збереження конкурентоспроможності та задоволення вимог сучасного ринку.

Ключові слова: Автоматизація, нанесення, полімерні покриття, деталі легкої промисловості

HORIASHCHENKO SERHIY, SYNUYK OLEG, DRAPAK GEORHIY,
HORIASHCHENKO KOSTYANTUN, ROMANETS TARAS

Khmelnytskyi National University

AUTOMATING THE PROCESS OF APPLYING POLYMER COATING ON PARTS OF THE LIGHT INDUSTRY

In today's rapidly evolving manufacturing landscape, automation has become a driving force behind increased productivity, efficiency, and quality. One area where automation is making significant strides is the application of polymer coatings on parts of the light industry. By automating this process, manufacturers can achieve consistent and precise coating application, reduce labor costs, and improve overall production output. In this article, we explore the benefits and advancements of automating the polymer coating application process in the light industry.

Automation in a small shop working with leather parts, several conditions and equipment considerations are essential was showed.

Automation line with Automated Spray Systems significantly enhances efficiency and productivity in coating applications. These systems can operate continuously, 24/7, minimizing downtime and maximizing throughput. With faster application speeds and reduced cycle times, manufacturers can achieve higher production volumes within the same time frame. The automated process also eliminates the need for manual labor-intensive tasks, allowing workers to focus on more skilled and value-added activities. Overall, the integration of Robotic Arms and Automated Spray Systems leads to streamlined processes and improved manufacturing output.

The automation of the process of applying polymer coatings on parts of the light industry offers numerous benefits ranging from increased precision and consistency to enhanced efficiency and productivity. By embracing automation, manufacturers can achieve superior coating quality, reduce labor costs, improve safety, and leverage Industry 4.0 technologies. As the manufacturing landscape continues to evolve, the adoption of automated systems in the light industry becomes increasingly crucial for staying competitive and meeting the demands of the modern market.

Keywords: Automation, application, polymer coatings, parts of light industry

Постановка проблеми

У сучасному виробничому середовищі, що швидко розвивається, автоматизація стала рушійною силою підвищення продуктивності, ефективності та якості. Однією з сфер, де автоматизація досягає значних успіхів, є нанесення полімерних покриттів на частини легкої промисловості. Автоматизуючи цей процес, виробники можуть досягти послідовного та точного нанесення покриття, зменшити витрати на оплату праці

та підвищити загальну продуктивність. У цій статті ми досліджуємо переваги та досягнення автоматизації процесу нанесення полімерного покриття в легкій промисловості.

Нанесення полімерного покриття на деталі в легкій промисловості вимагає точності, щоб забезпечити рівномірне покриття та постійну товщину. За допомогою роботизованих систем виробники можуть програмувати конкретні моделі покриття, контролювати параметри розпилення та регулювати такі змінні, як тиск, відстань і швидкість. Цей рівень контролю гарантує, що кожна деталь отримує однаково високоякісне покриття, що сприяє покращенню продуктивності продукту та задоволенню клієнтів.

Аналіз останніх джерел

Роботизовані системи нанесення покриттів використовують промислових роботів, оснащених передовою технологією розпилення для автоматизації нанесення полімерних покриттів. Ці системи пропонують точний контроль параметрів розпилення, таких як тиск, швидкість потоку та малюнок розпилення, забезпечуючи постійне та рівномірне покриття покриття. Популярним прикладом є серія роботів FANUC Paint Mate [1].

Автоматизоване обладнання для нанесення покриттів розпиленням включає конвеєрні системи, які транспортують деталі через контрольоване середовище нанесення покриття. Ці системи оснащені автоматизованими механізмами розпилення, як правило, з використанням безповітряного або електростатичного розпилення високого тиску. Приклади включають систему порошкового покриття Nordson Encore LT [2] та електростатичні пістолети Graco Pro Xp [3, 4].

Системи покриття з псевдозрідженим шаром включають занурення деталей у псевдозріджений шар полімерного порошку, який прилипає до поверхні. Автоматизовані системи контролюють процеси потоку порошку, попереднього нагрівання та затвердіння, забезпечуючи постійну та рівномірну товщину покриття. Прикладом є система киплячого шару WAGNER [5]

Машини для нанесення покриттів зануренням автоматизують занурення та вилучення деталей у резервуар із рідким полімерним покриттям. Ці машини контролюють швидкість занурення, час витримки та швидкість вилучення, що забезпечує рівномірну та контрольовану товщину покриття. Система покриття зануренням SCS PrecisionCoat [6] є широко використовуваним прикладом у галузі.

Лінії порошкового покриття — це комплексні автоматизовані системи, які об'єднують кілька етапів процесу покриття, включаючи підготовку деталей, нанесення порошку, затвердіння та охолодження. Ці лінії часто включають конвеєри, роботизовані руки та передові системи керування для оптимізації всього процесу нанесення покриття. Приклади включають лінію порошкового покриття Gema OptiFlex [7, 8] і систему Eisenmann Eco+Paint [9]

Виклад основного матеріалу

Загальні вказівки щодо факторів, які слід враховувати під час розробки алгоритмів або моделей для автоматизації процесу нанесення покриття з урахуванням досліджень, що були проведені у [10, 11, 12]:

1) Параметри покриття: визначте ключові параметри, які впливають на процес покриття, такі як тиск розпилення, відстань, швидкість потоку, температура та час затвердіння. Дослідіть і проаналізуйте взаємозв'язок між цими параметрами та бажаною якістю покриття.

2) Оптимізація процесу: розробіть алгоритми для оптимізації процесу нанесення покриття з урахуванням таких факторів, як бажана товщина покриття, геометрія поверхні та властивості матеріалу. Ці алгоритми можуть допомогти визначити оптимальну техніку розпилення, конфігурацію сопла та траєкторії руху робота.

3) Контроль за зворотним зв'язком: запровадьте механізми контролю за зворотним зв'язком для постійного моніторингу та коригування змінних процесу під час нанесення покриття. Це може передбачати включення датчиків для вимірювання таких параметрів, як товщина покриття, температура або в'язкість, і використання алгоритмів для підтримки оптимальних умов.

4) Моделювання та моделювання: використовуйте комп'ютерне моделювання та методи моделювання для прогнозування поведінки покриття та оптимізації параметрів процесу. Це може включати використання моделювання обчислювальної гідродинаміки (CFD), аналізу кінцевих елементів (FEA) або алгоритмів машинного навчання для прогнозування товщини покриття, покриття та характеристик висихання/твердіння.

5) Аналіз даних і машинне навчання: збирайте та аналізуйте дані процесу нанесення покриття, щоб виявити закономірності та кореляції між параметрами процесу та якістю покриття. Алгоритми машинного навчання можна використовувати для розробки прогнозних моделей, які оптимізують параметри покриття на основі історичних даних.

Конкретні алгоритми та моделі залежатимуть від методу покриття, обладнання та унікальних характеристик застосування.

Запропонований пристрій [13] для виконання способу містить такі конструктивні елементи: тканина 1, рулон 2, валок підтримуючий 3, валок притискний до підтримуючого 4, наносний привідний валок 5, притискний валок 6, сопла 7, роботизована система позиціонування сопел 8, патрубок подачі полімеру 9, компресор 10, патрубок повітряний 11, сушильний пристрій 12, згладжувальний валок 13, підтримуючий валок 14, рухомий валок 15, пружний елемент валка 16, рулон 17, 55 ємність для полімеру 18, патрубок відводу 19, бак з полімером 20.

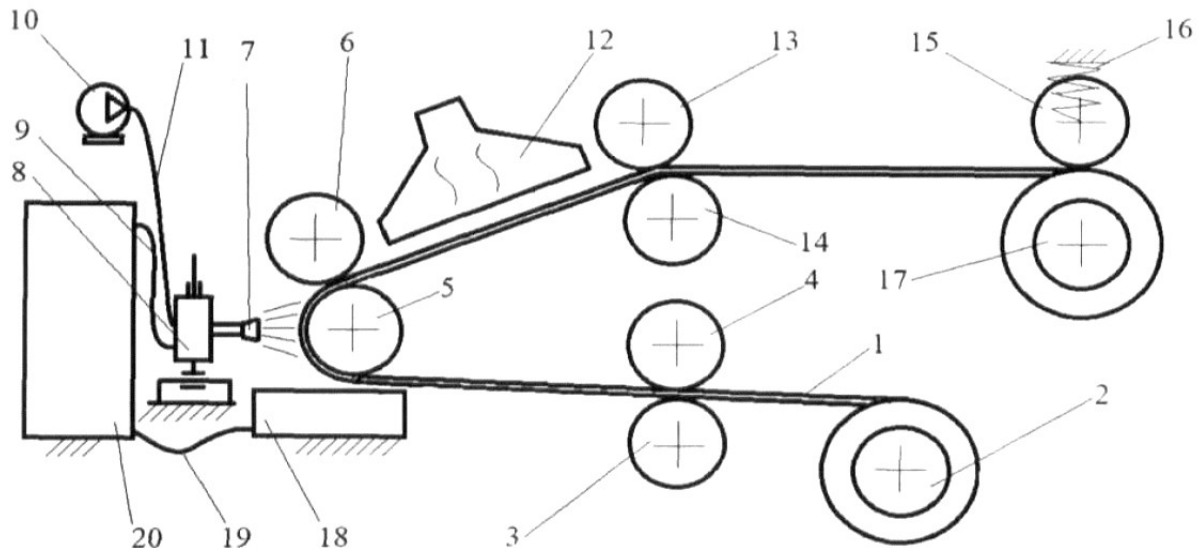


Рис. 1. Модель автоматизованої лінії нанесення полімерного покриття на рулонні матеріали

Спосіб полягає в наступному: тканина 1, яка намотана на рулон 2, подається через підтримуючий валок 3 та притискний валок 4 до зони нанесення полімеру. В зоні нанесення тканина 1 огинає наносний привідний валок 5 таким чином, що внутрішня сторона йде по валку, а зовнішня розтягується під час огинавання. Після проходження половини валка 5 тканина попадає під дію струменя полімеру, що розпилюється через сопла 7 горизонтально, та подається догори. Сам полімер розташовано у баку 20 і звідти подається через патрубок 9 до системи сопел, які можуть переналагоджуватися відповідно до потреб та умов нанесення у роботизованій системі 8. Компресор 10 через повітряний патрубок нагнітає необхідний для нанесення тиск у сопла 7, які розташовані вздовж ширини тканини у лінію. Полімер, що наноситься розпиленням через сопла 5 7, повністю пориває ширину тканини. Решта, що вийшла за ширину тканини, падає та потрапляє у ємність 18. Після нанесення на виході з огинаючої частини валка 5 тканина вирівнюється і у дотичній точці її зовнішня поверхня ковзає під притискний валок 6. Під час цього полімер ще вдавлюється у структуру тканини, а решта відкидається вниз, де розташована ємність 18. Далі тканина рухається в зоні сушіння під сушильним пристроєм 12. Потім тканина 10 подається під згладжувальний валок 13, якій вирівнює зовнішню сторону, притискаючи тканину до підтримуючого валка 14, після чого тканина намотується на новий рулон 17, який має ще рухомий валок 15, що оснащений пружним елементом 16, завдяки якому тканина рівномірно розгладжується під час намотування. З ємності 18 рештки полімеру через патрубок відводу 19 подаються до бака 20 і можуть бути знову використані для нанесення. 15

Таким чином наноситься невеликий шар полімеру, рівномірність нанесення якого забезпечується групою валків та геометрією проходження наносного привідного валка. Товщина матеріалу при цьому не змінюється.

Умови автоматизації

Щоб провести автоматизацію в невеликому цеху, що працює зі шкіряними деталями, необхідно врахувати кілька умов і обладнання. Ключові фактори, які слід враховувати:

1) Стандартизовані процеси: автоматизація працює найкраще, коли є стандартизовані та повторювані процеси. Важливо встановити чіткі та послідовні робочі процеси для підготовки, покриття та фінішної обробки шкіряних деталей, щоб забезпечити плавну інтеграцію з автоматизованим обладнанням.

2) Відповідна конструкція та поводження з деталями: деталі мають бути розроблені таким чином, щоб їх було легко використовувати та автоматизувати. Враховуйте такі фактори, як розмір, форма, вага та гнучкість деталей. Плоскі або напівплоскі шкіряні деталі, як правило, більш сумісні з автоматизацією, ніж деталі складної або неправильної форми.

3) Відповідний робочий простір: оцініть доступний робочий простір у вашому магазині для розміщення автоматизованого обладнання. Визначте, чи достатньо місця для обладнання, конвеєрних систем (якщо застосовно) і будь-яких додаткових заходів безпеки або бар'єрів, які можуть знадобитися.

4) Обладнання для автоматизації: розгляньте конкретне обладнання, необхідне для автоматизації процесу нанесення покриття. Деякі ключові варіанти обладнання для невеликого магазину, що працює зі шкіряними деталями, можуть включати:

5) Роботизована рука або автоматизована система розпилення: Роботизовану руку з насадкою для розпилювача можна запрограмувати для точного нанесення полімерного покриття на шкіряні деталі. В якості альтернативи можна використовувати автоматизовану систему розпилення з контрольованими параметрами розпилення.

5) Конвеєрна система: залежно від робочого процесу та обсягу виробництва, конвеєрна система може допомогти в переміщенні деталей у процесі нанесення покриття. Він забезпечує безперервну обробку та може інтегруватися з іншим обладнанням автоматизації.

6) Обладнання для сушіння або затвердіння: після нанесення покриття може знадобитися обладнання для сушіння або затвердіння. Це може включати печі, інфрачервоні лампи або системи УФ-затвердіння, залежно від матеріалу покриття.

7) Інструменти контролю та інспекції якості: Впровадження заходів контролю якості має важливе значення. Розгляньте можливість використання інструментів перевірки, таких як датчики або камери, щоб забезпечити товщину покриття, покриття та загальну якість.

8) Заходи безпеки: Обладнання автоматизації має супроводжуватися відповідними заходами безпеки. Це може включати бар'єри безпеки, кнопки аварійної зупинки та протоколи безпеки для захисту операторів і запобігання нещасним випадкам.

9) Навчання та кваліфіковані оператори: Переконайтеся, що оператори належним чином навчені працювати та обслуговувати автоматизоване обладнання. Наявність кваліфікованого персоналу, який розуміє обладнання та процес нанесення покриття, має вирішальне значення для успішного впровадження.

Висновки

Автоматизація нанесення полімерного покриття позбавляє від необхідності виконання трудомістких процесів вручну, зменшуючи трудовитрати та звільняючи людські ресурси для більш кваліфікованих завдань. Зводячи до мінімуму участь людини, виробники також можуть пом'якшити загрози безпеці, пов'язані з поводженням з хімікатами та роботою в потенційно небезпечних середовищах. Інтегруючи автоматизовані системи, виробники можуть значно скоротити час обробки, забезпечуючи швидші виробничі цикли та коротші терміни виконання. Автоматизовані системи можуть працювати безперервно, 24/7, мінімізуючи час простою та максимізуючи пропускну здатність. Ця підвищена ефективність перетворюється на вищий рівень продуктивності та покращення загальної продуктивності виробництва.

Автоматизовані системи оснащені функціями безпеки, такими як датчики та захисні бар'єри, що забезпечує більш безпечне робоче середовище для працівників. Трім того, це забезпечує невід'ємні переваги в контролі якості та відстежуваності. Інтегровані датчики та системи моніторингу можуть надавати дані в режимі реального часу про такі змінні, як температура, тиск і в'язкість, що дозволяє негайно коригувати та забезпечувати постійну якість покриття. Крім того, автоматизовані процеси полегшують збір і аналіз даних, дозволяючи виробникам відстежувати та відстежувати параметри покриття, виявляти потенційні проблеми та впроваджувати коригувальні дії. Цей рівень відстежуваності покращує заходи контролю якості та підтримує безперервне вдосконалення.

Автоматизація процесу нанесення полімерного покриття відповідає принципам Industry 4.0, що робить акцент на інтеграції передових технологій для оптимізації виробничих процесів. Їх можна легко інтегрувати з іншими інтелектуальними технологіями, такими як пристрої Інтернету речей (IoT), штучний інтелект (AI) і платформи аналізу даних. Ця інтеграція забезпечує моніторинг у реальному часі, прогнозне технічне обслуговування та інтелектуальну оптимізацію процесів, що ще більше підвищує ефективність і продуктивність.

Література

- 1) FANUC Paint Mate robot series, Industrial robots for manufacturing [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.fanucamerica.com/products/robots/paint-mate-series>
- 2) Industrial Coating Systems [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://www.nordson.com/en/products?search#sort=relevancy&f:@applicationsz32xcf=\[Fluid%20Coating\]](https://www.nordson.com/en/products?search#sort=relevancy&f:@applicationsz32xcf=[Fluid%20Coating]).
- 3) Prevent substrate deterioration with spray-on chemical resistant coatings [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.graco.com/us/en/in-plant-manufacturing/products/protective-coatings/chemical-resistant-coatings-sprayers.html>.
- 4) Protective coatings [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.graco.com/us/en/in-plant-manufacturing/products/protective-coatings.html>.
- 5) Application equipment for powder coating [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.wagner-group.com/en/industry/products/powder-coating/applying/>
- 6) Graco Pro Xp electrostatic spray guns: Spray Tanks [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://scsequipment.com/project/spray-tanks/>
- 7) Reduce spray to waste after color change [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.gemapowdercoating.com/en/solutions/reduce-powder-consumption>.
- 8) Robot application with Gema [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.gemapowdercoating.com/fileadmin/documents/Brochures/English/Whitepaper-Gema-Robotcoating-EN.pdf>.
- 9) Conveyor systems. The inverted power & free system for ground-based conveying tasks of light loads in the coating process [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: https://www.eisenmann.com/wp-content/uploads/2021/07/Inverted-PowerFree-Bodenfoerderer_en.pdf.

- 10 Horiashchenko S. Research Spray and Device for Polymer Coatings on Fabric/ *Mechanika 2015 Proceedings Of The 20th International Scientific Conference, Kaunas - 2015*, p.101-104
11. Simulation and Research of the Nozzle with an Ultrasonic Resonator for Spraying Polymeric Materials / S. Horiashchenko, I. Golinka, A. Bubulis, V. Jurenas // *Mechanika*. – 2018. – Vol. 24, No 1. – P. 61-64.
12. Musiał, J.; Horiashchenko, S.; Polasik, R.; Musiał, J.; Kałaczyński, T.; Matuszewski, M.; Śrutek, M. Abrasion Wear Resistance of Polymer Constructional Materials for Rapid Prototyping and Tool-Making Industry. *Polymers* 2020, 12, 873.
13. Патент України № 122945, Спосіб нанесення полімерних покриттів на рулонні матеріали/ Горященко С.Л., Карван С. А.// Опублік. 25.01.2018, бюл. № 2

References

- 1) FANUC Paint Mate robot series, Industrial robots for manufacturing [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.fanucamerica.com/products/robots/paint-mate-series>
- 2) Industrial Coating Systems [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://www.nordson.com/en/products?search#sort=relevancy&f:@applicationsz32xcf=\[Fluid%20Coating\]](https://www.nordson.com/en/products?search#sort=relevancy&f:@applicationsz32xcf=[Fluid%20Coating]).
- 3) Prevent substrate deterioration with spray-on chemical resistant coatings [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.graco.com/us/en/in-plant-manufacturing/products/protective-coatings/chemical-resistant-coatings-sprayers.html>.
- 4) Protective coatings [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.graco.com/us/en/in-plant-manufacturing/products/protective-coatings.html>.
- 5) Application equipment for powder coating [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.wagner-group.com/en/industry/products/powder-coating/applying/>
- 6) Graco Pro Xp electrostatic spray guns: Spray Tanks [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://scsequipment.com/project/spray-tanks/>
- 7) Reduce spray to waste after color change [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.gemapowdercoating.com/en/solutions/reduce-powder-consumption>.
- 8) Robot application with Gema [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.gemapowdercoating.com/fileadmin/documents/Brochures/English/Whitepaper-Gema-Robotcoating-EN.pdf>.
- 9) Conveyor systems. The inverted power & free system for ground-based conveying tasks of light loads in the coating process [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: https://www.eisenmann.com/wp-content/uploads/2021/07/Inverted-PowerFree-Bodenfoerderer_en.pdf.
- 10 Horiashchenko S. Research Spray and Device for Polymer Coatings on Fabric/ *Mechanika 2015 Proceedings Of The 20th International Scientific Conference, Kaunas - 2015*, p.101-104
11. Simulation and Research of the Nozzle with an Ultrasonic Resonator for Spraying Polymeric Materials / S. Horiashchenko, I. Golinka, A. Bubulis, V. Jurenas // *Mechanika*. – 2018. – Vol. 24, No 1. – P. 61-64.
12. Musiał, J.; Horiashchenko, S.; Polasik, R.; Musiał, J.; Kałaczyński, T.; Matuszewski, M.; Śrutek, M. Abrasion Wear Resistance of Polymer Constructional Materials for Rapid Prototyping and Tool-Making Industry. *Polymers* 2020, 12, 873.
13. Patent Ukrainy № 122945, Sposib nanessenia polimernykh pokryttiv na rulonni materialy/ Horiashchenko S.L., Karvan S. A.// Опублік. 25.01.2018, биул. № 2

VLADIMIR KRASILENKO

Vinnytsia National Agrarian University

ORCID ID: [0000-0001-6528-3150](https://orcid.org/0000-0001-6528-3150)e-mail: krasvg@i.ua

PIDLUBNYI VLADISLAV

Vinnytsia National Agrarian University

ORCID ID: [0000-0002-4676-4271](https://orcid.org/0000-0002-4676-4271)e-mail: vladpodlubny@gmail.com

DIANA NIKITOVICH

Vinnytsia National Technical University

ORCID ID: [0000-0002-8907-1221](https://orcid.org/0000-0002-8907-1221)e-mail: diananikitovych@gmail.com

RESEARCH AND SIMULATION OF THE METHOD OF GENERATION OF THE FLOW OF MATRIX KEYS OF PERMUTATIONS AND THEIR CHARACTERISTICS FOR ENCRYPTION-MASKING OF VIDEO FRAMES

Abstract - The article proposes and considers a method of generating and forming a stream of secret matrix keys (MK) in the form of permutation matrices. Based on consideration of the advantages of matrix models and algorithms for cryptographic transformations (CT) of images (I), textographic documents, aspects of the application of these matrix-type cryptosystems for creating blind electronic digital signatures (BEDS), masking of video frames, etc., the urgent need to form a set or a consistent series of secret keys. It is shown that, taking into account the peculiarities of crypto-transformations in multi-page, block ciphers, in matrix affine-permutation ciphers, a series of keys in the form of permutation matrices (PM) is necessary. To solve this problem, the article proposes a new approach and method of generating a series of MK (PM), based on the use of a series of sequential cryptotransformations of the base key using affine encryption when changing the keys of this cipher in accordance with the generated random digital sequence. Functionality and advantages of generating a series of secret keys in the form of permutation matrices (PM) are demonstrated by model experiments in the Mathcad Professional software environment, screenshots from the created software modules. The properties of a series of MK PM were investigated using correlation and mutually equivalent normalized functions, which are more effective than correlation functions, and the adequacy and stability of the method were confirmed. The advantage of the proposed method and its matrix models and computational procedures is the consideration of the specificity of images and the ease of adaptation to different types and formats of images, the clarity and isomorphism of the visualization of both the components of the MK PM and the entire flow of keys. Formulas and algorithmic steps of procedures for creating a set of secret matrix keys and intermediate steps of closing, encrypting and decrypting images are given. The obtained results of modeling the method and the processes of creating a series of secret keys of matrix permutations in the Mathcad software environment confirmed the correct functioning and advantages of the proposed method.

Keywords: cryptography, matrix models of cryptographic transformations, keys stream generation method, secret matrix key, permutation matrix, text-graphic document, electronic digital signature, modeling, Mathcad Professional, image encryption-decryption, video frame masking, affine cipher, cryptographic nonlinear transformations of image pixel intensities, correlation function, spatial equivalence function.

КРАСИЛЕНКО ВОЛОДИМИР

ПІДЛЮБНИЙ ВЛАДИСЛАВ

НІКІТОВИЧ ДІАНА

Вінницький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДУ ГЕНЕРУВАННЯ ПОТОКУ МАТРИЧНИХ КЛЮЧІВ ПЕРЕСТАНОВОК ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ЗАШИФРУВАННЯ-МАСКУВАННЯ ВІДЕОКАДРІВ

Анотація - У статті запропоновано та розглянуто метод генерації та формування потоку секретних матричних ключів у вигляді матриць перестановок. На основі розгляду переваг матричних моделей та алгоритмів криптоперетворень (КП) зображень (З), текстографічних документів, аспектів застосування цих криптосистем матричного типу для створення сліпих електронних цифрових підписів (СЕЦП), маскування відеокadrів, тощо, обґрунтовано гостру необхідність формування набору чи послідовної серії секретних ключів. Показано, що з урахуванням особливостей криптоперетворень у багатосторінкових, блокових шифрах, у матричних афінно-перестановочних шифрах, необхідна в тому числі низка ключів у вигляді матриць перестановок (МП). Для вирішення цієї проблеми у статті пропонується новий підхід і метод генерації низки МК (МП), що базується на використанні серії послідовних криптоперетворень базового ключа за допомогою афінного шифрування при зміні ключів цього шифру у відповідності до згенерованої випадкової цифрової послідовності. Модельними експериментами у програмному середовищі Mathcad Professional, скрінами зі створених програмних модулів продемонстровані функціональні можливості та переваги методу генерації послідовної серії секретних ключів у вигляді матриць перестановок (МП). Досліджені властивості низки МК (МП) за допомогою кореляційних та взаємно еквівалентнісних нормованих функцій, що є ефективнішими за кореляційні, та підтверджено адекватність, стійкість методу. Перевагою запропонованого методу та його матричних моделей, обчислювальних процедур є врахування специфіки зображень та простота адаптації до різних типів та форматів зображень, наочність та ізоморфність візуалізації, як складових МК МП, так і всього потоку ключів. Наведені формули та алгоритмічні кроки процедур створення набору секретних матричних ключів та проміжних кроків закриття, зашифрування та розшифрування зображень. Отримані результати моделювання методу та процесів створення послідовної серії секретних ключів матричних перестановок у програмному середовищі Mathcad підтвердили правильність функціонування та переваги запропонованого методу.

Ключові слова: криптографія, матричні моделі криптографічних перетворень, метод генерування потоку ключів, секретний матричний ключ, матриця перестановок, текстографічний документ, електронний цифровий підпис, моделювання, Mathcad Professional, зашифрування-розшифрування зображень, маскування відеокадрів, афінний шифр, криптографічні нелінійні перетворення інтенсивностей пікселів зображення, кореляційна функція, просторова функція еквівалентності.

Introduction

Actuality of theme. Digital visual information in the form of images of various formats and streams of video frames is the most common type of data used today in the most diverse areas of industrial, scientific and technical activity, as well as in everyday life. A large number of scientific, scientific and technical, regulatory, educational and other documentation contain a significant amount of visual information in the form of halftone, color images of various objects, diagrams, schemes, drawings, photographs, etc. Regardless of the diversity of such documentation and the options and formats of its digital representation and encoding, all such text-graphic documents (TGD) are visualized as a set of images of pages or fragments of these TGD, stored and displayed using display devices, including monitors, displays personal computers. The constant increase in the bandwidth of information transmission channels and the speed of its processing in distributed communication systems, in hardware and software tools and built-in accelerators of new classes and computer architectures is compensated, firstly, by the constant growth of the volume of both public and confidential visual digital information transmitted in real time, and secondly, the increasing requirements for the dimensionality and resolution of such information. This leads to the necessity improving, and often, revising the foundations of building methods and means of transforming such information in objects of distributed systems based on heterogeneous networks, including on the basis of a radio channel. The main transformations of images are reduced to compression, protection in the channel from unauthorized access, from obstacles of natural and artificial origin, which are based on matrix transformations, for example, orthogonal, affine, etc. In this regard, the interest of researchers in discrete matrix transformations of information in general, as well as in the cryptographic aspect for the purpose of its encryption, today is connected with the fact that the expansion of the set of basic matrix operations and matrix transformation procedures allows choosing the most rational operation or their a set to solve a specific task, and the achievement of great success in the field of digital signal processing processors and programmable logic with the possibility of structural implementation of algorithms of any complexity contributes to the emergence of new, more effective representations of the proposed matrix models and transformations into hardware high-performance implementations and digital processing devices.

And this will make it possible to process large data sets, TGD or whole streams of video frames at an accelerated pace, to solve new and more complex tasks. At the same time, the main aspect of relevance is the improvement of the basic characteristics of transmission processes, protection against unauthorized access and information hiding in telecommunication systems based on matrix models, their new basic operations and necessary transformation procedures. One of the urgent issues is the study and assessment of the prospects for the application of an extended family of matrix models and transformations, taking into account their properties and features, in algorithms for compression, masking of images and video frames, which requires separate research. Solving this issue will significantly increase the security of transmission of digital visual information in telecommunication channels. Development of a method of frame-by-frame masking matrix transformation of visual data to protect against unauthorized access when storing images or video files and transferring them in open communications is a very urgent task, which has already been studied at the level of cryptotransformation models of individual images, including color ones, or individual frames. However, for the direct or reverse crypto-transformation of the entire flow of frames or image matrices based on new, specifically matrix models and procedures, additional research and solving of such a task as forming a series of frame-by-frame masking or encryption-decryption keys is required. Advantages of cryptographic transformations (CT) of textual documents (TGD) with visas, signatures, images (I), tables, diagrams, etc., in cryptosystems of the matrix type (MT) [1-4] based on algorithms and matrix-algebraic models (MAM), including generalized matrix affine and affine-permutation ciphers were demonstrated in works [5-10]. Modifications of MAM were used in the creation of blind and other digital signatures [11-17], they allow checking the presence of distortions in cryptograms of black and white and color images, their integrity [5,7], creating block [6], multifunctional parametric models [8], multi-page [9] and investigate their stability characteristics [10]. The basic operations of MAM are element-by-element multiplication, addition modulo matrices, and matrix permutation models (MP_M) with matrix multiplication procedures.

To implement CT, it is necessary to multiply byte matrices on the left and right by permutation matrices (PM), a matrix of rows, columns, vectors that display symbols, codes, bytes in unitary codes, can also be replaced and rearranged using such permutations. In order to change and equalize the histograms of all spectral components of the image with equal probability, to increase the entropy of the cryptogram of the image during its cryptographic transformations based on MP_M, the decomposition of R, G, B components and their bit slices and several matrix keys (MKs) and vector keys (VKs) are necessary [3-5]. That is, for MAM there is an urgent need to form a whole series of MPs from the main MK, which would satisfy a number of requirements.

Formulation of the problem

Since in [18,19, 20, 21] the issue of coordination of only the main matrix key of a general type was considered, and not a number (flow) of PMs, the aim of the work is to model and study the processes of formation of the permutation matrices (PMs) flow for MAM CT in MT systems, to check the statistical and correlation properties of a number of generated PMs.

Presentation of the main material, research results

Let us consider the situation when PMs of size 256*256, described in [2-5], are used for the cryptographic transformations of blocks 256*256 bytes long, presented in the form of a black-and-white image matrix, or vectors 256 bytes long (2048 bits), described in [2-5], where the processes are given their generation, MAM of their transformations and cryptographic transformations based on them. Since for each block, several round, cyclic cryptographic transformations it is desirable to have a number of matrix keys generated from the master key, for example, the same MK, then, taking into account the requirements for the crypto-statistical characteristics of MKs, the task of researching the processes of fast and reliable generation of MK sequences in the form of MKs becomes very relevant. Let's assume that their number is also equal to 256. The results of modeling the processes of generating a number of PMs for such a situation in Mathcad with formulas and matrices of PMs are shown in Fig. 1. If the main MK is the generated random PM KPX (Fig. 1), then it is uniquely displayed by a 256-component permutation (vector) V_KPX and also in the form of image or a byte matrix (BM) of size 16*16 with the peculiarity that all 256 of its gradations of intensity are different.

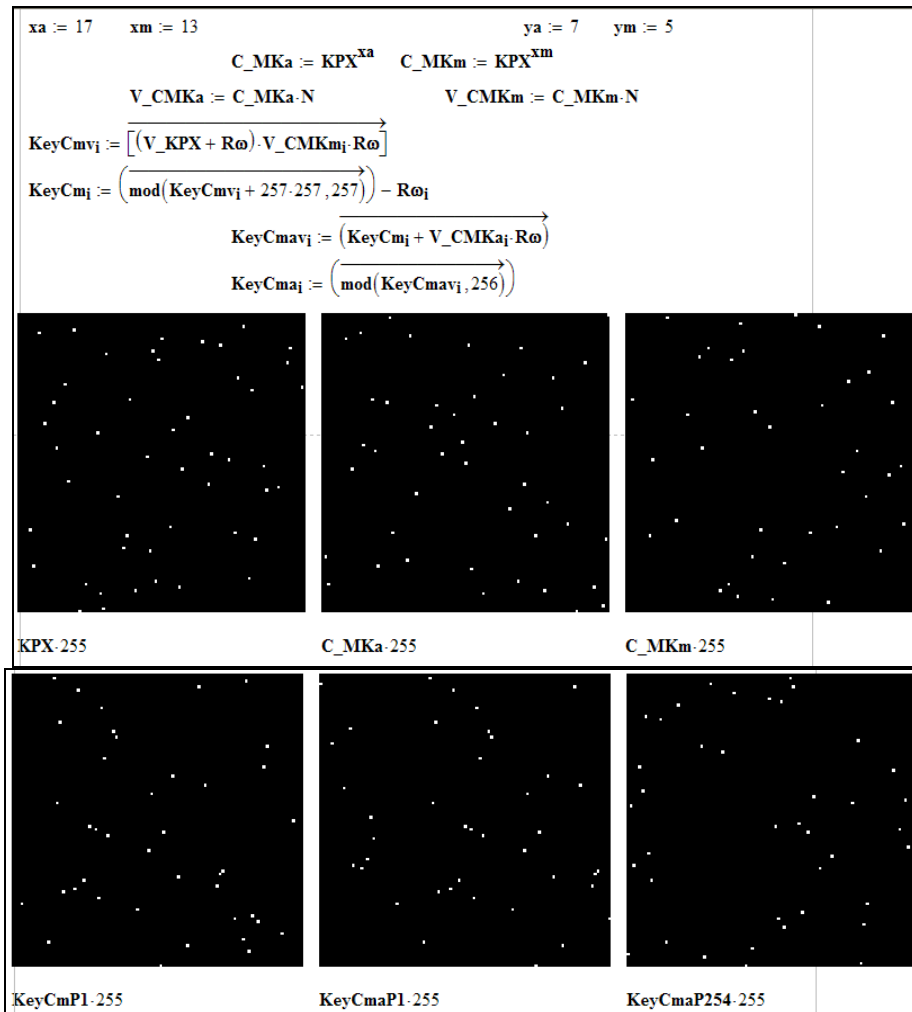


Fig. 1. Results of simulation of MKs (PMs) array generation processes

Using the scalars x_a and x_m agreed by the parties, as powers of KPX, we form from KPX two additional matrices C_MKa , C_MKm , see Fig. 1, and their corresponding vectors V_CMKa , V_CMKm , which together with the vector V_KPX (vector representation of KPX) are shown in Fig. 2. Histograms of all these vectors (basic!) are horizontal lines, see Fig. 3, as well as all vector representations of generated permutations formed from V_KPX , as its i -th cryptograms, using an affine cipher and a pair of i -th components of vectors V_CMKa , V_CMKm (additive and multiplicative components). These cryptograms are the i -th current permutations (vectors) of $KeyCma$, which can also be unambiguously represented in the form of $KeyCmaP$ bit matrices with dimensions (256*256), for example, $KeyCmaP1$ - $KeyCmaP254$, Fig. 1. Fragments from Mathcad windows are shown in Fig. 4. Since the histograms of all PMs (their vectors) are horizontal lines, and their entropy is equal to 8 bits, crypto-analysis based on them is impossible. In addition, the main and 2 auxiliary MKs are secret, allowing only parties to the CT to create or have this series of MKs (PMs). In principle, only the master and the aforementioned x_a and x_m scalar keys can be secret or negotiated parties.

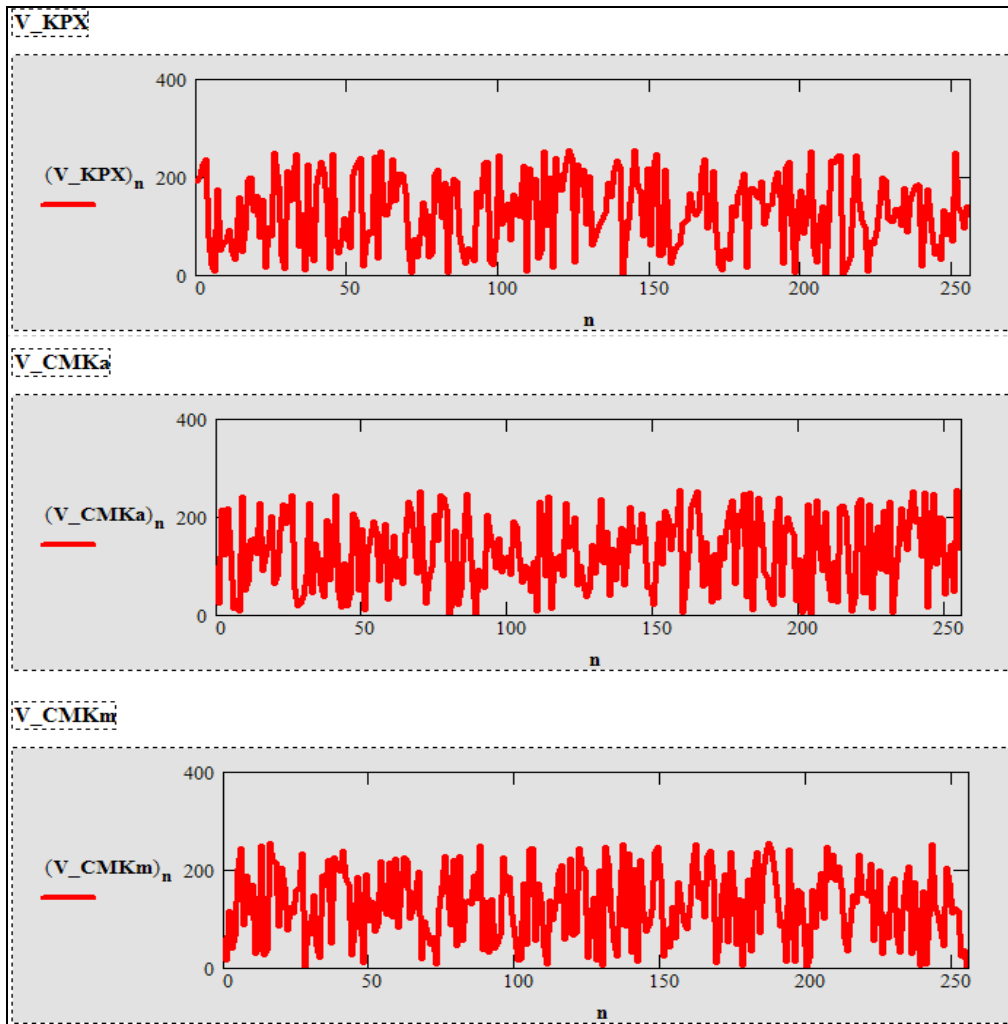


Fig. 2 Vector representations of basic MKs for generating an array of MKs (PMs) from them

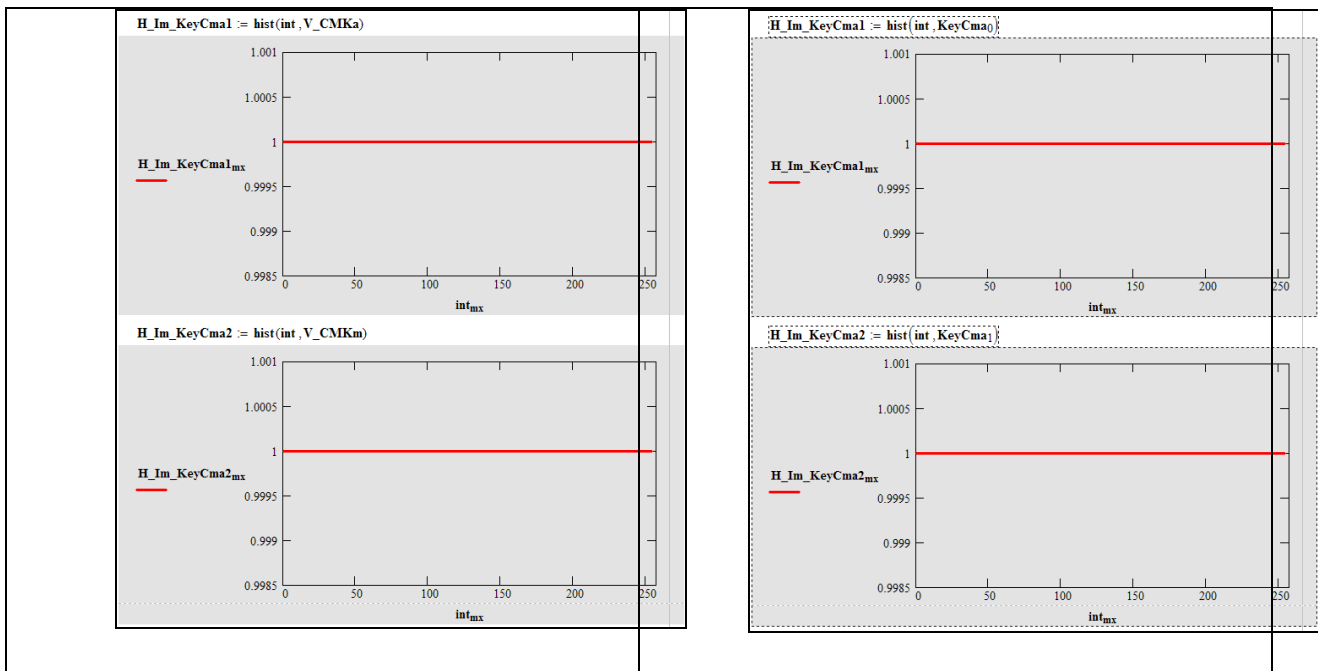


Fig. 3 Histograms of vector representations of basic (left) and some (first, second) generated (right) MKs (PMs)

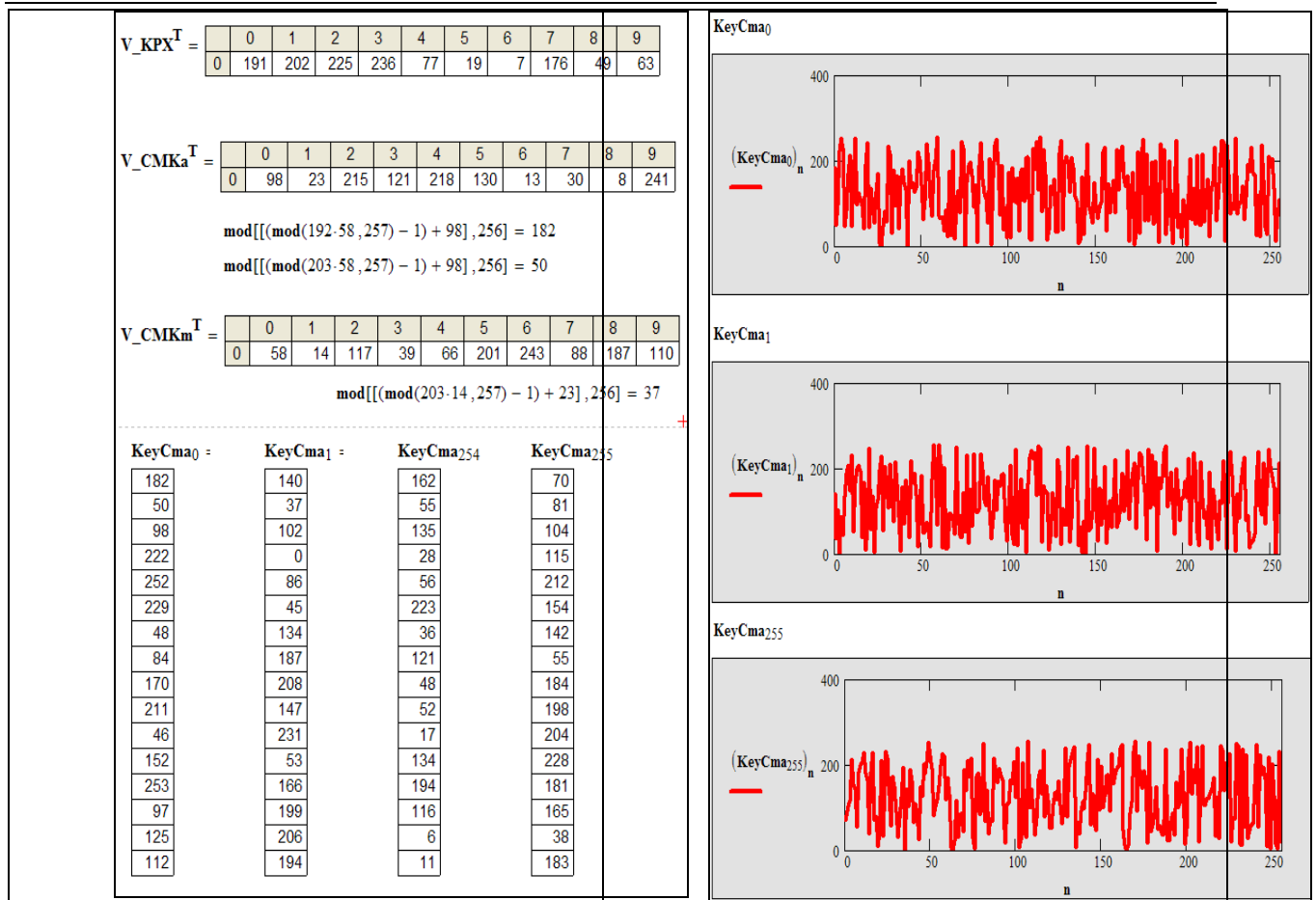


Fig. 4 Fragments from Mathcad windows: one of the key formation procedures (left) and vector representations of some (zero, first, 255-th) generated (right) MKs (PMs)

To study the quality of MKs (PMs) of the created series, to study their properties, we calculated all their possible mutual-correlation and equivalence normalized functions, which are displayed in the form of fragments of Mathcad windows in fig. 5-7 and confirm the achievement of surprisingly good properties. Note that the obtained results and their comparison also indicate that mutual-equivalence normalized functions are better than mutual-correlation functions.

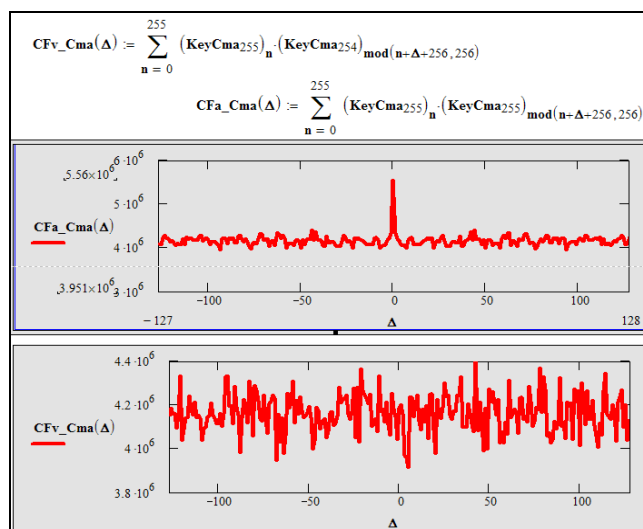


Fig. 5 Formulas and form of auto-correlation CFa_Cma and cross-correlation CFv_Cma functions depending on cyclic shift, displacement of elements of PM vectors

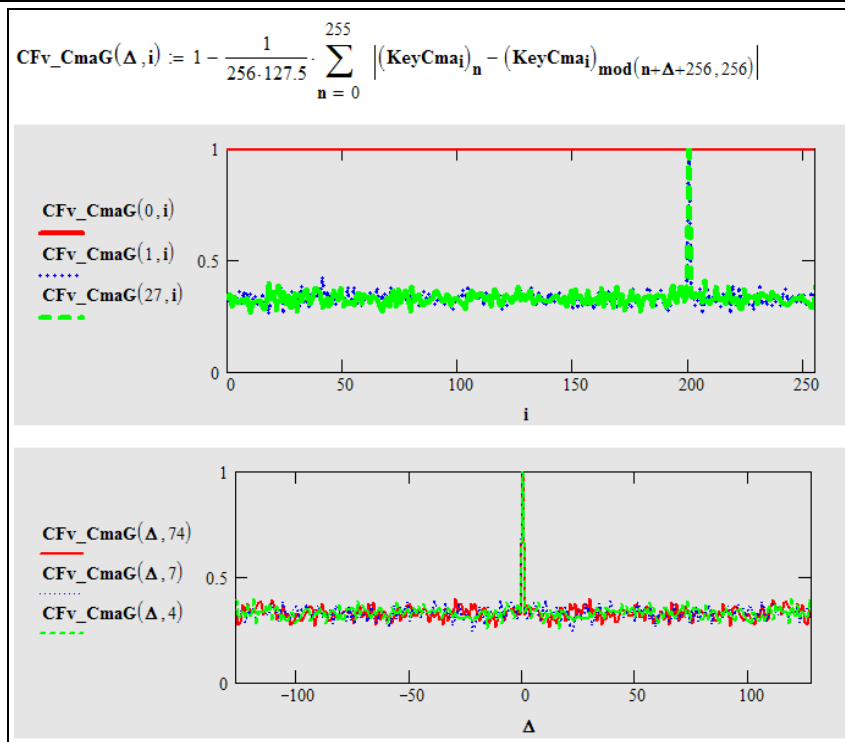


Fig. 6 Formulas and form of mutual-equivalence CFv_CmaG functions depending on the MP number (i) and cyclic shift, displacement of elements of the PM vectors

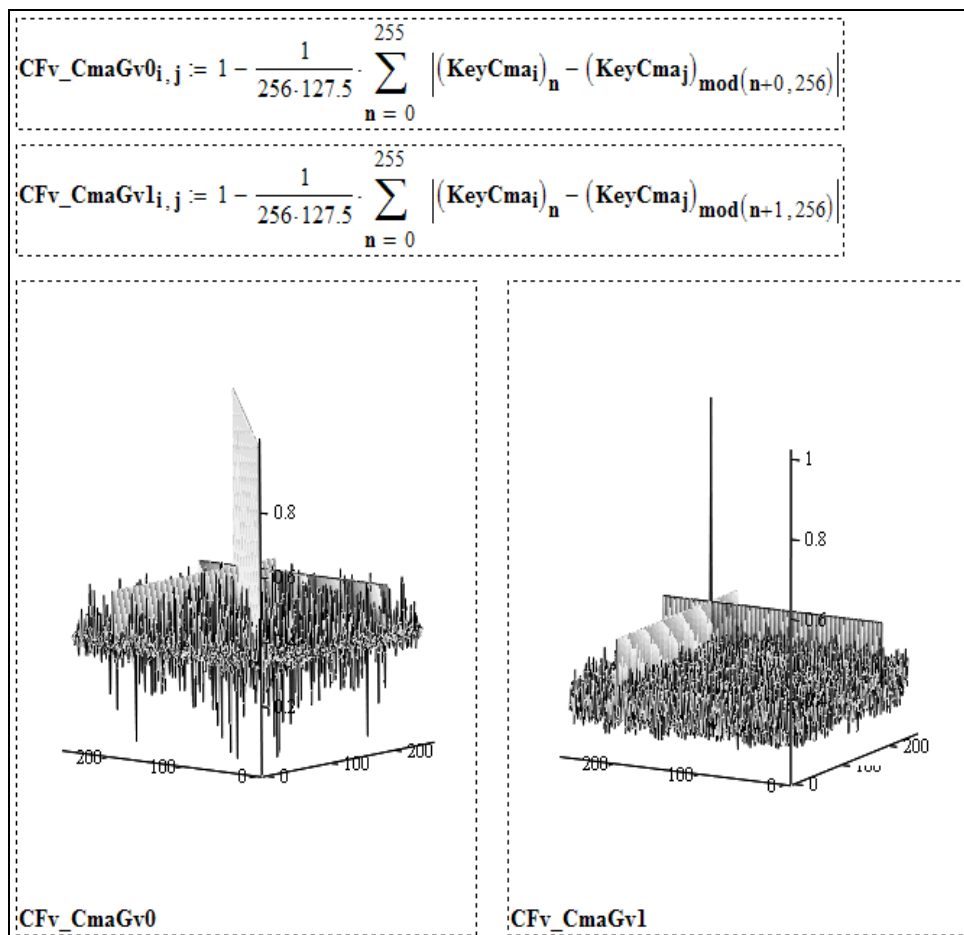


Fig. 7 Formulas and form (3D) of mutual equivalence CFv_CmaG functions depending on the PM numbers (i,j) for the "0-th" and "1-th" displacements of the elements of the PM vectors

For better perception and more effective transmission of basic MK (PM) and the sequence of created PMs, the latter are converted with the help of software modules into color or black and white image, shown in fig.8 and can go as frames of a video stream (colored image corresponds to three basic MKs).

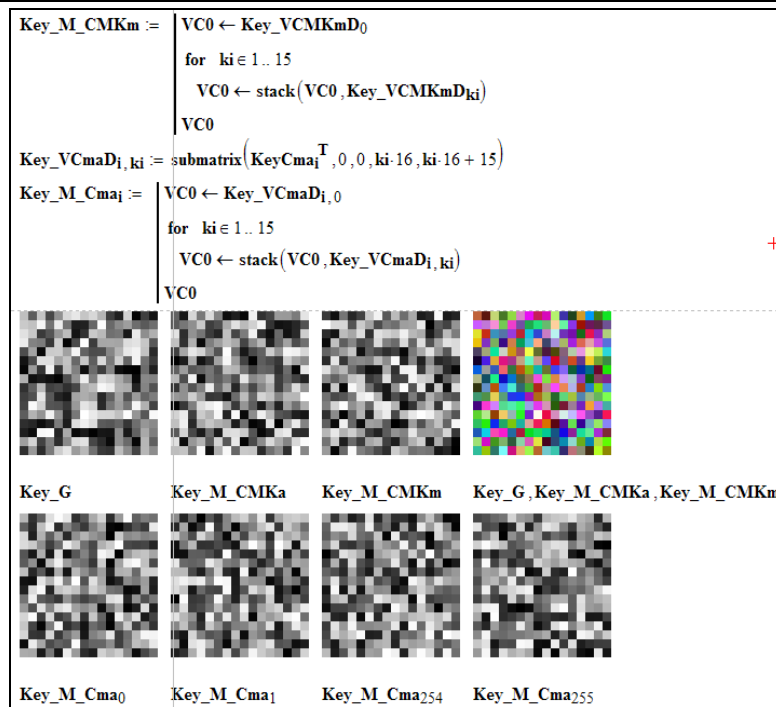


Fig. 8 Matrix representation of basic MK and a number of MPs

As can be seen from fig. 6-7, for one PM (in the 200-th experiment) there is a similarity with another key, but this is explained by the fact that for it x_m is equal to "1". This is easily eliminated if the number of PMs in the sequence is reduced from 256 to 255 for the situation chosen in the simulation and described here

Conclusion

The proposed and modeled in Mathcad method of generating a series of MKs (PMs) for multi-page, block, matrix affine-permutation algorithms and matrix-algebraic models of cryptographic transformations. The properties of a series of MKs (PMs) were investigated using mutually equivalent normalized functions, which are more effective than correlation functions, and the adequacy and stability of the method were confirmed.

References

1. Красиленко В.Г. Моделювання матричних алгоритмів криптографічного захисту / В.Г. Красиленко, Ю.А. Флавицька // Вісн. НУ "Львів. політехніка". - 2009. - № 658. - С. 59-63.
2. Красиленко В. Г. Матричні афінно-перестановочні алгоритми для шифрування та дешифрування зображень / В. Г. Красиленко, С. К. Грабовляк // Системи обробки інформації. - 2012. - Вип. 3(2). - С. 53-61. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2012_2_3_15
3. Красиленко В.Г. Криптографічні перетворення зображень на основі матричних моделей перестановок з матрично-бітовозрізовою декомпозицією та їх моделювання / В. Г. Красиленко, В. М. Дубчак // Вісник Хмельн. НУ. Технічні науки. - 2014. - № 1. - С. 74-79.
4. Красиленко В.Г. Моделювання криптографічних перетворень кольорових зображень на основі матричних моделей перестановок зі спектральною та бітово-зрізовою декомпозиціями / В.Г. Красиленко, Д.В. Нікітович // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво : наук. журн. – Луцьк: Видавництво Луц. нац. техн. ун-т., - 2016. - № 23. - С. 31-36. – Режим доступу: <http://ki.lutsk-ntu.com.ua/node/132/section/9>
5. Красиленко В.Г. Моделювання та дослідження криптографічних перетворень зображень на основі їхньої матрично-бітовозрізової декомпозиції та матричних моделей перестановок з верифікацією цілісності / В.Г. Красиленко, Д.В. Нікітович // Електроніка та інформаційні технології. – Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2016. – Вип. 6. – С 111-127. – Режим доступу: http://elit.lnu.edu.ua/pdf/6_12.pdf
6. Красиленко В.Г. Моделі блокових матричних афінно-перестановочних шифрів (МАПШ) для криптографічних перетворень та їх дослідження / В.Г. Красиленко, Д.В. Нікітович // 72 НТК: матеріали конференції (13-15 грудня 2017 р.). – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2017. – Частина 1. – С.117-122.
7. Красиленко, В.Г. Моделювання матричних афінних алгоритмів для шифрування кольорових зображень / В. Г. Красиленко, К. В. Огородник, Ю.А.Флавицька // Комп'ютерні технології: наука і освіта: тези доповідей V Всеукр. НПК– К., 2010. – С.120-124.
8. Красиленко В.Г. Багатофункціональні параметричні матрично-алгебраїчні моделі (МММ) криптографічних перетворень (КП) з операціями за модулем та їх моделювання. / В.Г. Красиленко, Д.В. Нікітович. // 72 НПК: матеріали конференції (13-15 грудня 2017 року). – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2017. – Частина 1. – С.123-128.

9. Красиленко В.Г. Моделювання сторінкових криптографічних перетворень масивів кольорових зображень на основі матричних моделей та перестановок / В.Г. Красиленко, Д.В. Нікітович // «Інформаційно-комп'ютерні технології – 2018»: Збірник тез доповідей ІХ Міжнародної НТК, 20-21 квітня 2018 року. – Житомир: Вид. О. О. Євенок, 2018. – С. 73-77.
10. Красиленко В.Г. Дослідження покращеного багатокрокового 2D RSA шифру та його гістограмно-ентропійних характеристик / В.Г. Красиленко, Д.В. Нікітович // «Інформаційна безпека та комп'ютерні технології»: Збірник тез доповідей ІІІ Міжнародної НПК, 19-20 квітня 2018 року. – Кропивницький: ЦНТУ, 2018. – С. 78-82. Режим доступу: <http://it-kntu.kr.ua/wp-content/uploads/2015/01/Zbirnyk-tez-InfoSecCompTech-2018.pdf>
11. Красиленко В.Г. Матричні афінні шифри для створення цифрових сліпих підписів на текстографічних документах / В.Г. Красиленко, С.К. Грабовляк // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2011. – Вип. 7(97). – С. 60 – 63.
12. Красиленко В.Г. Демонстрація процесів створення сліпих електронних цифрових підписів на текстографічну документацію на основі моделей матричного типу / В.Г. Красиленко, Р.О. Яцковська, Ю.М. Тріфонова, // Системи обробки інформації. – 2013. – Вип. 3(110). – Т. 2. – С. 18 – 22.
13. Красиленко В.Г. Вдосконалення та моделювання електронних цифрових підписів матричного типу для текстографічних документів / В.Г. Красиленко, Д.В. Нікітович // Матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні управляючі системи та технології» (ІУСТ-Одеса-2017), Одеський національний морський університет, 20-22 вересня 2017р. – Одеса: «ВидавІнформ НУ «ОМА», 2017. - С. 312 -318.
14. Krasilenko V.G., Lazarev A.A., Nikitovich D.V. The Block Parametric Matrix Affine-Permutation Ciphers (BP MAPCs) with Isomorphic Representations and their Research. Actual problems of information systems and technologies. 2020. P. 270-282..
15. Krasilenko V.G., Lazarev A.A., Nikitovich D.V. Models of matrix block affine-permutation ciphers (mbapcs) for cryptographic transformations and their research. Problems of cyber security of information and telecommunication systems: Collection of reports and articles. 2020. P. 314–321.
16. Krasilenko V.G., Lazarev A.A., Nikitovich D.V. Matrix Models of Cryptographic Transformations of Video Images Transmitted from Aerial-Mobile Robotic Systems. In Control and Signal Processing Applications for Mobile and Aerial Robotic Systems. Hershey, PA: IGI Global, 2020. P. 170-214. <http://doi:10.4018/978-1-5225-9924-1.ch005> ISBN13: 9781522599241 ISBN10: 152259924X EISBN13: 9781522599265 ISBN13 Softcover: 9781522599258 (eBook)
17. Красиленко В. Г., Нікітович Д. В. Моделювання покращених сліпих електронних цифрових підписів 2D типу для систем захисту інформації. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2022. №1 (305). С. 72-77.
18. Красиленко В.Г. Моделювання протоколів узгодження секретного матричного ключа для криптографічних перетворень та систем матричного типу / В.Г. Красиленко, Д.В. Нікітович // Системи обробки інформації. – 2017. – Вип. 3 (149). – С 151-157.
19. Красиленко В.Г. "Моделювання багатокрокових та багатоступеневих протоколів узгодження секретних матричних ключів" / В.Г. Красиленко, Д.В. Нікітович // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво: науковий журнал. – Луцьк: ЛНТУ, 2017. – Вип. 26. – С 111-120. - Режим доступу: <http://ki.lutsk-ntu.com.ua/node/134/section/27>
20. Красиленко В. Г., Нікітович Д. В. Криптографічний кооперативний протокол узгодження ізоморфно представленого спільного секретного матричного ключа-перестановки великої розмірності: матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні управляючі системи та технології» (ІУСТ), 24– 26 вересня 2020 р. Одеса, 2020. С. 45-50. URL: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/30698>
21. Красиленко В. Г., Юрчук Н. П., Нікітович Д. В. Застосування ізоморфних матричних представлень для моделювання протоколу узгодження секретних ключів-перестановок значної розмірності. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. Хмельницький, 2021, Вип. № 2. С. 78-88. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/32827/83207.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

References

1. Krasilenko V.G. Modeliuvannya matrychnykh alhorytmiv kryptohrafichnoho zakhystu / V.G. Krasilenko, Yu.A. Flavytska // Visn. NU "Lviv. politekhnik".- 2009. - № 658. - S. 59-63.
2. Krasilenko V. G. Matrychni afinno-perestanovochni alhorytmy dlia shyfruvannya ta deshyfruvannya zobrazen / V. G. Krasilenko, S. K. Hrabovliak // Systemy obrobky informatsii. - 2012. - Vyp. 3(2). - S. 53-61. - Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2012_2_3_15
3. Krasilenko V.H. Kryptohrafichni peretvorennia zobrazen na osnovi matrychnykh modelei perestanovok z matrychno-bitovozrizovoiu dekompozitsiieiu ta yikh modeliuvannya / V. H. Krasilenko, V. M. Dubchak // Visnyk Khmel'n. NU. Tekhnichni nauky. - 2014. - № 1. - S. 74-79.
4. Krasilenko V.G. Modeliuvannya kryptohrafichnykh peretvoren kolorovykh zobrazen na osnovi matrychnykh modelei perestanovok zi spektralnoi ta bitovo-zrizovoiu dekompozitsiieiu / V.G. Krasilenko, D.V. Nikitovich // Kompiuterno-intehrovani tekhnolohii: osvita, nauka, vyrobnytstvo : nauk. zhurn. – Lutsk: Vydavnytstvo Luts. nats. tekhn. un-t., - 2016. - № 23.

- S. 31-36. – Rezhym dostupu: <http://ki.lutsk-ntu.com.ua/node/132/section/9>

5. Krasilenko V.G. Modeliuvannia ta doslidzhennia kryptohrafichnykh peretvoren zobrazhen na osnovi yikhnoi matrychno-bitovozrizovoi dekompozycji ta matrychnykh modelei perestanovok z veryfikatsiieiu tsilisnosti / V.G. Krasilenko, D.V. Nikitovich // Elektronika ta informatsiini tekhnologii. – Lviv: LNU imeni Ivana Franka, 2016. – Vyp. 6. – S 111-127. – Rezhym dostupu: http://elit.lnu.edu.ua/pdf/6_12.pdf

6. Krasilenko V.G. Modeli blokovykh matrychnykh afinno-perestanovochnykh shyfriv (MAPSh) dlia kryptohrafichnykh peretvoren ta yikh doslidzhennia / V.G. Krasilenko, D.V. Nikitovich // 72 NTK: materialy konferentsii (13-15 hrudnia 2017 r.). – Odesa: ONAZ im. O.S. Popova, 2017. – Chastyna 1. – S.117-122.

7. Krasilenko V.G. Modeliuvannia matrychnykh afinykh alhorytmiv dlia shyfruvannia kolorovykh zobrazhen / V.G. Krasilenko, K.V. Ohorodnyk, Yu.A. Flavytska // Kompiuterni tekhnologii: nauka i osvita: tezy dopovidei V Vseukr. NPK– K., 2010. – S.120-124.

8. Krasilenko V.G. Bahatofunktsionalni parametrychni matrychno-algebraichni modeli (MAM) kryptohrafichnykh peretvoren (KP) z operatsiiami za modulem ta yikh modeliuvannia. / V.G. Krasilenko, D.V. Nikitovich. // 72 NPK: materialy konferentsii (13-15 hrudnia 2017 roku). – Odesa: ONAZ im. O.S. Popova, 2017. – Chastyna 1. – S.123-128.

9. Krasilenko V.G. Modeliuvannia storinkovykh kryptohrafichnykh peretvoren masyviv kolorovykh zobrazhen na osnovi matrychnykh modelei ta perestanovok / V.G. Krasilenko, D.V. Nikitovich // «Informatsiino-kompiuterni tekhnologii – 2018»: Zbirnyk tez dopovidei IX Mizhnarodnoi NTK, 20-21 kvitnia 2018 roku. – Zhytomyr: Vyd. O. O. Yevenok, 2018. – S. 73-77.

10. Krasilenko V.G. Doslidzhennia pokrashchenoho bahatokrokovoho 2D RSA shyfru ta yoho histohramno-entropiinykh kharakterystyk / V.G. Krasilenko, D.V. Nikitovich // «Informatsiina bezpeka ta kompiuterni tekhnologii»: Zbirnyk tez dopovidei III Mizhnarodnoi NPK, 19-20 kvitnia 2018 roku. – Kropyvnytskyi: TsNTU, 2018. – S. 78-82. Rezhym dostupu: <http://it-ntu.kr.ua/wp-content/uploads/2015/01/Zbirnyk-tez-InfoSecCompTech-2018.pdf>

11. Krasilenko V.G. Matrychni afinni shyfry dlia stvorennia tsyfrovnykh slipykh pidpysiv na tekstohrafichni dokumenty / V.G. Krasilenko, S.K. Hrabovliak // Systemy obrobky informatsii. – Kh.: KhUPS, 2011. – Vyp. 7(97). – S. 60 – 63.

12. Krasilenko V.G. Demonstratsiia protsesiv stvorennia slipykh elektronnykh tsyfrovnykh pidpysiv na tekstohrafichnu dokumentatsiiu na osnovi modelei matrychnoho typu / V.G. Krasilenko, R.O. Yatskovska, Yu.M. Trifonova, // Systemy obrobky informatsii. – 2013. – Vyp. 3(110). – T. 2. – S. 18 – 22.

13. Krasilenko V.G. Vdoskonalennia ta modeliuvannia elektronnykh tsyfrovnykh pidpysiv matrychnoho typu dlia tekstohrafichnykh dokumentiv / V.G. Krasilenko, D.V. Nikitovich // Materialy VI mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Informatsiini upravliaiuchi systemy ta tekhnologii» (IUST-Odesa-2017), Odeskyi natsionalnyi morskyy universytet, 20-22 veresnia 2017r. – Odesa: «VydavInform NU «OMA», 2017. – S. 312 -318.

14. Krasilenko V.G., Lazarev A.A., Nikitovich D.V. The Block Parametric Matrix Affine-Permutation Ciphers (BP_MAPCs) with Isomorphic Representations and their Research. Actual problems of information systems and technologies. 2020. P. 270-282.

15. Krasilenko V.G., Lazarev A.A., Nikitovich D.V. Models of matrix block affine-permutation ciphers (mbapcs) for cryptographic transformations and their research. Problems of cyber security of information and telecommunication systems: Collection of reports and articles. 2020. P. 314–321.

16. Krasilenko V.G., Lazarev A.A., Nikitovich D.V. Matrix Models of Cryptographic Transformations of Video Images Transmitted from Aerial-Mobile Robotic Systems. In Control and Signal Processing Applications for Mobile and Aerial Robotic Systems. Hershey, PA: IGI Global, 2020. P. 170-214. <http://doi:10.4018/978-1-5225-9924-1.ch005> ISBN13: 9781522599241 ISBN10: 152259924X EISBN13: 9781522599265 ISBN13 Softcover: 9781522599258 (eBook)

17. Krasilenko V. H., Nikitovich D. V. Modelyuvannia pokrashchenykh slipykh elektronnykh tsyfrovnykh pidpysiv 2D typu dlia system zakhystu informatsiyi. Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu. Tekhnichni nauky. 2022. №1 (305). S. 72-77.

18. Krasilenko V.G. Modeliuvannia protokoliv uzgodzhennia sekretneho matrychnoho kliucha dlia kryptohrafichnykh peretvoren ta system matrychnoho typu / V.G. Krasilenko, D.V. Nikitovich // Systemy obrobky informatsii. – 2017. – Vyp. 3 (149). – S 151-157.

19. Krasilenko V.G. "Modeliuvannia bahatokrokovykh ta bahatostupenykh protokoliv uzgodzhennia sekretnykh matrychnykh kliuchiv" / V.G. Krasilenko, D.V. Nikitovich // Komp'uterno-intehrovani tekhnologii: osvita, nauka, vyrobnytstvo: naukovyi zhurnal. – Lutsk: LNTU, 2017. – Vyp. 26. – S 111-120. - Rezhym dostupu: <http://ki.lutsk-ntu.com.ua/node/134/section/27>

20. Krasilenko V.G., Yurchuk N.P., Nikitovich D.V. Zastosuvannia izomorfnykh matrychnykh predstavlen dlia modeliuvannia protokolu uzgodzhennia sekretnykh kliuchiv-perestanovok znachnoi rozmirnosti. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. Khmelnytskyi, 2021, Vyp. № 2. S. 78-88. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/32827/83207.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

21. Krasilenko V.G., Nikitovich D.V. Kryptohrafichni kooperatyvnyi protokol uzgodzhennia izomorfno predstavlenoho spilnoho sekretneho matrychnoho kliucha-perestanovky velykoi rozmirnosti: materialy IX Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Informatsiini upravliaiuchi systemy ta tekhnologii» (IUST), 24–26 veresnia 2020 r. Odesa, 2020. S. 45-50. URL: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/30698>

МИХАЙЛОВСЬКА ОКСАНА

ORCID ID: 0000-0001-5025-6571

e-mail: mykhailovskao@khmnu.edu.ua

Хмельницький національний університет

НАДОПТА ТЕТЯНА

ORCID ID: 0000-0002-9338-7827

e-mail: nadoptate@khmnu.edu.ua

Хмельницький національний університет

ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ДЛЯ СПЕЦІАЛЬНОГО ВЗУТТЯ ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

У статті розглянуті поняття та категорії якості взуттєвих виробів, зокрема, для спеціального взуття військового призначення.

Запропоновано визначення спеціального взуття військового призначення. Це взуття, яке призначене для захисту стопи від впливів навколишнього середовища у специфічних умовах експлуатації військовослужбовцями та створення комфортних умов функціонування стопи в цих умовах. Під «комфортністю» будемо розуміти комплексну властивість взуття забезпечувати умови для фізіологічного функціонування стопи та всього організму людини при різних зовнішніх умовах і протягом заданого терміну експлуатації. Комфортність взуття обумовлюється ергономічними, водо-, тепло- або морозозахисними властивостями, створенням оптимального мікроклімату у внутрішньовзуттєвому просторі.

Розроблено класифікацію показників якості спеціального взуття військового призначення, використовуючи фасетний метод розподілу ознак. Якість спеціального взуття військового призначення розглядаємо як сукупну характеристику основних властивостей виробу, що обумовлюють його придатність задовольняти вимоги найбільш прийнятним і економічним способом відповідно до призначення взуття

До споживчих показників, котрі, в свою чергу, поділяються на ергономічні та експлуатаційні характеристики, відносяться такі якісні характеристики показників якості: антропометричні, гігієнічні, надійність, виробниче виконання. Виробничо-економічні показники характеризують технологічне та економічне забезпечення виробництва спеціального взуття військового призначення.

Запропонована класифікація показників якості спеціального взуття військового призначення дозволяє у повній мірі охопити структуру процесу проектування взуття, враховуючи при цьому анатомо-морфологічні особливості стоп, забезпечуючи комфортність, захищеність стопи від впливів зовнішнього середовища, використовуючи сучасні пакети матеріалів. Також при цьому зростає рівень продуктивності процесу виготовлення взуття та забезпечується максимальна економічна ефективність.

Ключові слова: спеціальне взуття, комфортне взуття, якість, показники якості, споживчі властивості, виробничо-економічні показники, надійність.

OKSANA MYKHAILOVSKA, TETYANA NADOPTA

Khmelnitskyi National University, Ukraine

QUALITY INDICATORS FOR SPECIAL MILITARY SHOES

The article examines concepts and quality categories of footwear products, in particular, for special military footwear.

The definition of special military footwear is proposed. These are shoes that are designed to protect the foot from environmental influences in specific conditions of operation by military personnel and to create comfortable conditions for the functioning of the foot in these conditions. By «comfort» we mean the complex property of footwear to provide conditions for the physiological functioning of the foot and the entire human body under various external conditions and during the specified period of operation. The comfort of shoes is determined by ergonomic, water, heat or frost protection properties, the creation of an optimal microclimate in the space inside the shoes.

The classification of quality indicators of special military footwear was developed using the facet method of feature distribution. We consider the quality of special military footwear as a collective characteristic of the main properties of the product, which determine its suitability to meet the requirements in the most acceptable and economical way according to the purpose of the footwear

Consumer indicators, which, in turn, are divided into ergonomic and operational characteristics, include the following qualitative characteristics of quality indicators: anthropometric, hygienic, reliability, production performance. Production and economic indicators characterize the technological and economic support for the production of special military footwear.

The proposed classification of quality indicators of special military footwear allows to fully cover the structure of the footwear design process, taking into account the anatomical and morphological features of the feet, ensuring comfort and protection of the feet from the effects of the external environment, using modern material packages. At the same time, the level of productivity of the shoe manufacturing process increases and maximum economic efficiency is ensured.

Keywords: special shoes, comfortable shoes, quality, quality indicators, consumer properties, production and economic indicators, reliability.

Постановка проблеми

Проблема якості на сьогодні стає актуальною абсолютно для всіх виробів та послуг, яка з другорядного фактору стає найважливішою умовою успішної діяльності підприємств та розвитку економіки в цілому. При цьому важливим фактором виступає управління якістю відповідно сучасних вимог до якості продукції [1].

Пріоритетним напрямком розвитку легкої промисловості та викликів сьогодення є розробка та розширення асортименту спеціального взуття, особливо для військових. Асортимент такого взуття постійно розширюється, змінюються конструктивні елементи та вузли, удосконалюється технологія виготовлення [2]. Спеціальне взуття, як один із елементів засобів індивідуального захисту, має відповідати певним вимогам та показникам якості.

Згідно ДСТУ ISO 9000-2001 «Системи управління якістю. Основні положення та словник», якість – це здатність продукції задовольняти потреби відповідно до її призначення.

До основних вимог показників якості для спеціального взуття належать комфортність, гігієнічність, надійність, безпечність. Вимоги визначаються умовами експлуатації спеціального взуття та екстремальним впливом на взуттєві матеріали з боку навколишнього середовища: контрастні кліматичні зміни, вплив різноманітних хімічних речовин, термохімічна дія, тощо. До особливих умов експлуатації спеціального взуття відноситься значна тривалість безперервного носіння порівняно з періодом відпочинку виробу [3].

У комплексі властивостей, що визначають в загальному якість спеціального взуття, одним із найважливіших показників є формостійкість виробу. Формостійкість взуття нерозривно пов'язана з конструкцією верху, способом формування та властивостями матеріалів, котрі застосовуються для деталей верху та низу. Для деталей низу взуття використовуються штучні та синтетичні матеріали, які зберігають повною мірою ці властивості під час експлуатації. Тому основні зміни розмірів та форми взуття, а отже, і формостійкості виробу в цілому, залежать від матеріалів верху та конструктивних елементів.

Як показує практика сучасного виробництва, насамперед надзвичайно важливим є аналіз і оцінка якості спеціального взуття та розробка сучасної методики оцінки якості спеціального взуття на відповідність стандартам [4].

Аналіз останніх джерел

В сучасних умовах жорсткої конкуренції товаровиробників не втрачає свого значення удосконалення технологій виготовлення спеціального взуття. На зміну старим підходам формуються нові, сутність яких полягає у створенні принципово нових технологій, що забезпечують економію ресурсів, насамперед матеріальних і енергетичних, та, що першочергово, високу якість виробів.

Ступінь проблеми характеризується значною кількістю наукових досліджень та робіт щодо забезпечення якості продукції та підвищення ефективності управління промисловими підприємствами. Зокрема, обговорюються питання організації управління якістю, порівняння світової та вітчизняної практики в цій галузі, засобів забезпечення конкурентоспроможності підприємства з застосуванням сучасної концепції менеджменту якості, можливості застосування статистичних методів контролю [5].

В даний час створені передумови для ефективної діяльності підприємств на основі постійного вдосконалення систем управління якістю продукції [6]. Однак, наявні наукові розробки не містять теоретично обґрунтованих і практично реалізованих рекомендацій щодо формування механізму забезпечення якості взуттєвих виробів. Так, у [7] запропоновано оціночно-аксіологічну модель підвищення якості швейної продукції та розроблено науково-методичні підходи оцінки якості цієї продукції на основі споживчого профілю якості. Проте, така модель не може бути застосована у взуттєвому виробництві, оскільки дещо інші показники якості, котрі застосовуються до виробів.

Автором [8] розглянуто стан споживчого ринку взуття в умовах конкурентного середовища та запропоновано системно-комплексний підхід до управління якістю взуттєвої продукції. Однак, запровадження такої методики оцінки інвестиційної привабливості суб'єктів споживчого ринку взуття більш актуальне з точки зору економічної складової, а не з ергономічної.

Для спеціального взуття, є також актуальним визначення показників якості натуральних шкір та текстильних матеріалів. В загальному обсязі споживання різних матеріалів для виробництва взуття текстильні матеріали становлять 30% [9]. Тканини дедалі більше стають необхідним матеріалом виробництва взуття, оскільки це відкриває великі можливості для розширення сировинної бази взуттєвої промисловості та асортименту взуття відповідної якості [10].

Також залишаються не вирішеними задачі розробки і впровадження системи забезпечення якості спеціального взуття, організації та реалізації заходів щодо підвищення якості, використання інформаційних технологій, котрі дадуть змогу вивести взуттєву галузь на сучасний, інноваційний рівень.

Формулювання цілей статті

Метою дослідження є теоретико-методичне обґрунтування системи формування показників якості, які характеризують конкурентоспроможність та якість спеціального взуття.

Для досягнення поставленої мети необхідне вирішення наступних завдань:

- визначити основні чинники забезпечення конкурентоспроможності продукції взуттєвої галузі;
- охарактеризувати зміст системи управління якістю продукції на основі процесного підходу;
- розробити класифікацію показників якості взуття спеціального призначення взуття на основі аналізу параметрів якості взуттєвих виробів.

Виклад основного матеріалу

Згідно [11], спеціальне взуття в залежності від призначення поділяється на:

- спеціальне взуття, яке використовується працівниками конкретної спеціальності або професії;
- виробниче взуття, котре призначене захисту працівників, які працюють в однакових умовах різних галузей виробництва.

Також окремо у класифікації, виділяють військове взуття – це взуття, призначене для військовослужбовців.

Однак, зважаючи на реальні умови використання військового взуття в умовах сьогодення, запропоновано визначення спеціального взуття військового призначення. Це взуття, яке призначене для захисту стопи від впливів навколишнього середовища у специфічних умовах експлуатації

військовослужбовцями та створення комфортних умов функціонування стопи в цих умовах. Під «комфортністю» будемо розуміти комплексну властивість взуття забезпечувати умови для фізіологічного функціонування стопи та всього організму людини при різних зовнішніх умовах і протягом заданого терміну експлуатації. Комфортність взуття обумовлюється ергономічними, водо-, тепло- або морозозахисними властивостями, створенням оптимального мікроклімату у внутрішньовзуттєвому просторі.

При цьому до кожного етапу розробки та виготовлення спеціального взуття військового призначення визначаються конкретні показники якості у відповідності до умов експлуатації.

Якість спеціального взуття військового призначення розглядаємо як сукупну характеристику основних властивостей виробу, що обумовлюють його придатність задовольняти вимоги найбільш прийнятним і економічним способом відповідно до призначення взуття [12].

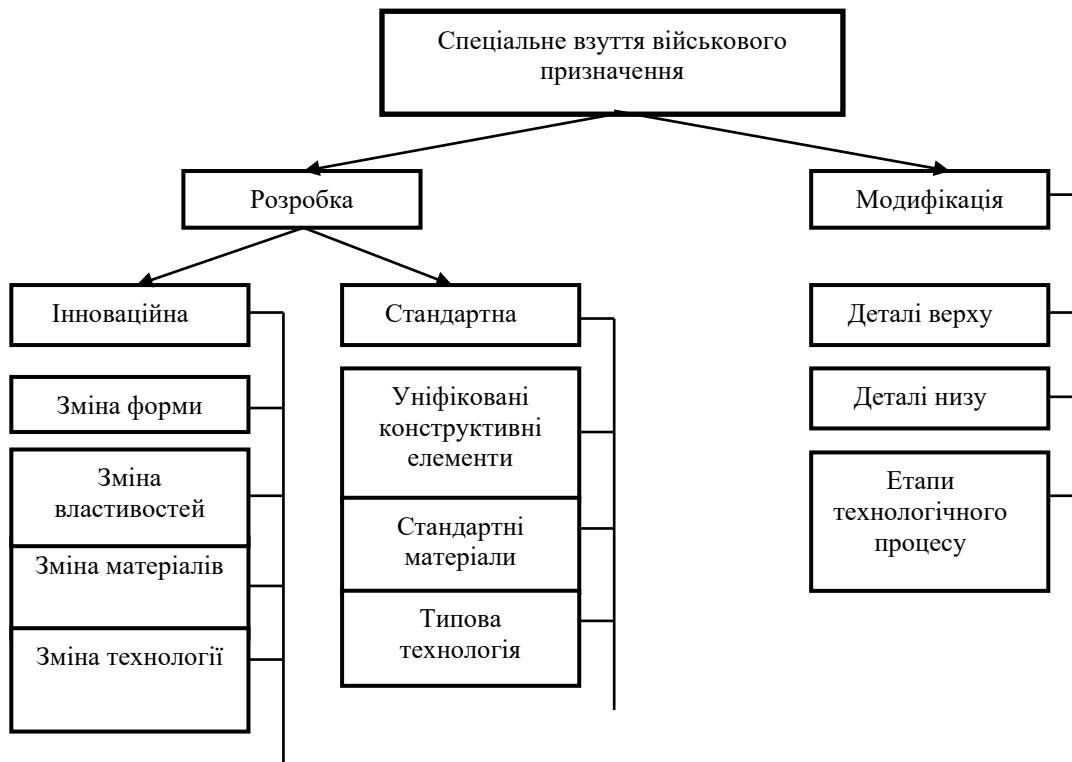


Рис. 1 Формування спеціального взуття військового призначення

Для подальших розробок з метою уникнення плутанини у термінах властивості, які визначають якість взуття, прийнято характеризувати за:

- параметрами якості (кількісна характеристика одної або декількох властивостей виробу розглянута стосовно до певних умов його розробки та експлуатації або споживання, тобто кількісна характеристика якості);

- ознаками якості (якісні характеристики показників якості);

- критеріями якості (показники реальних властивостей виробу і правила їх оцінювання).

Отже, для формування системи показників якості спеціального взуття військового призначення слід:

- виявити основні напрямки діяльності щодо забезпечення якості продукції на взуттєвих підприємствах;

- обґрунтувати класифікацію показників якості взуття на етапах його життєвого циклу з метою підвищення ефективності забезпечення якості та конкурентоспроможності виробів;

- розробити інформаційно-структурну модель системи забезпечення якості, котра науково-обґрунтовано врахує застосування конструкторських та технологічних показників;

- розробити кваліметричний інструментарій комплексного оцінювання якості взуття, що сприяє досягненню цілей забезпечення якості продукції;

- перевірити адекватність комплексного оцінювання якості зразків продукції і його стійкість до випадкових похибок;

- розробити організаційні принципи постійного удосконалення інформаційно-структурної моделі та інструментарію оцінювання якості продукції.

Запропоновано, в загальному, модель системи якості виробів легкої промисловості базувати на таких основних засадах: орієнтація на споживача та задоволення його потреб; політика та забезпечення керівництвом єдності мети та напрямів діяльності; комплексність оцінки показників якості; оптимальність проведення дослідження показників якості; якість підготовки працівників; використання інформаційних систем та сучасних методів проектування, матеріалів та технологій.

Першочергово, для характеристики показників якості спеціального взуття військового призначення слід використовувати найбільш важливі з точки зору виробництва та споживання властивості такого взуття і відповідні їм показники. З одного боку, номенклатура цих показників повинна бути достатньою, щоб охарактеризувати повною мірою якість цих виробів. З іншого боку, кількість цих показників не повинна бути занадто громіздкою, оскільки при оцінюванні комплексного показника якості сумарна похибка цього показника може суттєво вплинути на кінцевий результат якості виробу.

Виділяючи певний параметр або групу параметрів якості, можна досить ефективно впливати на якість продукції в кінцевому результаті. Однак, слід мати на увазі, що один параметр завжди знаходиться у взаємозв'язку з іншими.

Параметри якості спеціального взуття військового призначення повинні відповідати наступним вимогам:

- кількісно описувати основні характеристики взуття;
- об'єктивно відображати зміни, які відбуваються в якості продукції;
- забезпечувати порівнюваність при проведенні аналізу рівня якості виробів.

Для створення класифікації якості спеціального взуття військового призначення було обрано фасетний метод, оскільки це дасть змогу провести паралельний поділ множини об'єктів на незалежні класифікаційні угруповання. Фасетний метод класифікації — це паралельний розподіл великої кількості об'єктів на незалежні класифікаційні угруповання за однією з ознак в кожній групі. Особливістю фасетного методу є те, що різні ознаки класифікації не зв'язані між собою, що особливо зручно для визначення різних показників якості [13].

На рисунку 2 наведено класифікацію якості спеціального взуття військового призначення в найбільш узагальнюючому вигляді, з використанням фасетного методу розподілу ознак.



Рис. 2. Класифікація показників якості спеціального взуття військового призначення

Забезпечення показників якості взуття військового призначення на всіх етапах життєвого циклу продукції нерозривно пов'язані з точно заданими параметрами та ознаками якості. Визначення показників якості, суттєвих для майбутнього споживача, їх кількісних значень та вагомості потребує чіткої класифікації споживчих та виробничо-економічних показників (рис.3, 4).

Вимоги, які висуваються до взуття військового призначення, без виконання яких нормальна робота неможлива, називають споживчими показниками, які в свою чергу поділяються на ергономічні та експлуатаційні. Ергономічні показники якості передбачають антропометричні та гігієнічні характеристики. Гнучкість взуття військового призначення – це показник, котрий визначає опір взуття згинанню. Жорсткість – це здатність деталей чинити опір зміні форми під дією навантажень та є одним із важливих показників при виборі матеріалів. Антропометричні показники забезпечують повною мірою анатомо-морфологічні характеристики стопи та раціональність виробу в цілому. Гігієнічні показники якості спеціального взуття військового призначення характеризуються гігроскопічністю, водонепроникністю, повітро- та паропроникністю; електропровідністю та теплопровідністю [13]. Дотримання цих вимог дозволяє регулювати мікроклімат всередині взуття, забезпечуючи споживачу відчуття комфортності.

Надійність – властивість виробів виконувати протягом заданого часу свої функції, зберігаючи в заданих межах експлуатаційні показники. Надійність взуття військового призначення обумовлюється довговічністю, безвідмовністю, формостійкістю та ремонтпридатністю. Довговічність взуттєвих виробів – це показник якості, що забезпечує здатність виконувати задані функції з параметрами, встановленими вимогами технічної документації (стандартів, технічних умов).

Виробничо-економічні показники якості поділяються на виробничі та економічні. Основні технологічні характеристики забезпечують процес виробництва взуття: мінімальна кількість операцій; раціональний метод кріплення; наявність груп операцій, які виконуються одночасно; уніфікація деталей. Також одним з важливих технологічних показників якості спеціального взуття, що пов'язаний зі зручністю та надійністю в експлуатації, ефективним захистом від впливу зовнішніх факторів, є вибір сучасних матеріалів, зокрема, текстильних матеріалів, які виготовлені з хімічних волокон та додатково продубльовані підкладковими матеріалами. Використання таких пакетів сприяє підвищенню як експлуатаційних властивостей, так і ефективності роботи підприємства завдяки скороченню кількості деталей, спрощенню технологічного процесу та зниженню трудомісткості його виготовлення.

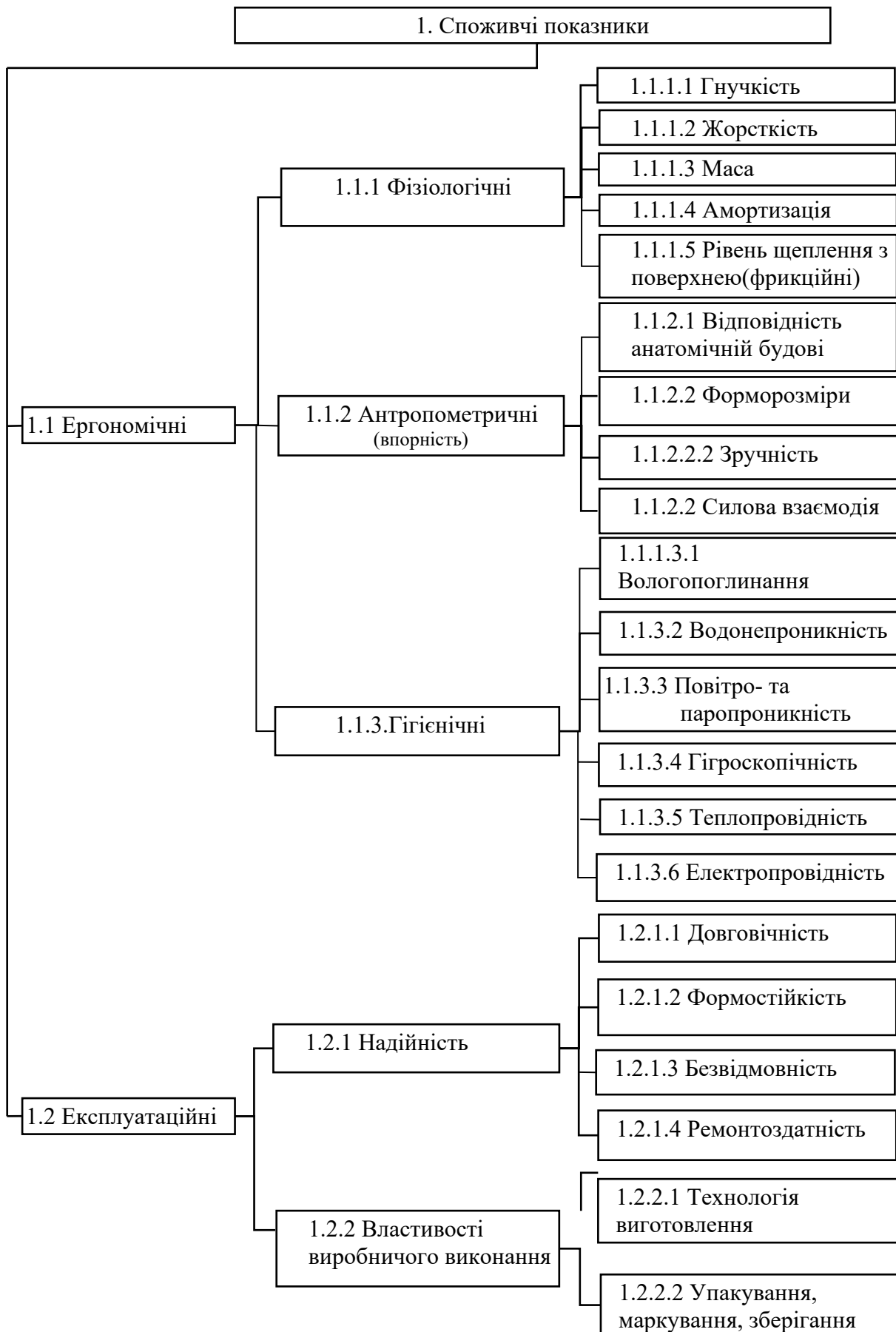


Рис.3. Споживчі показники якості взуття військового призначення

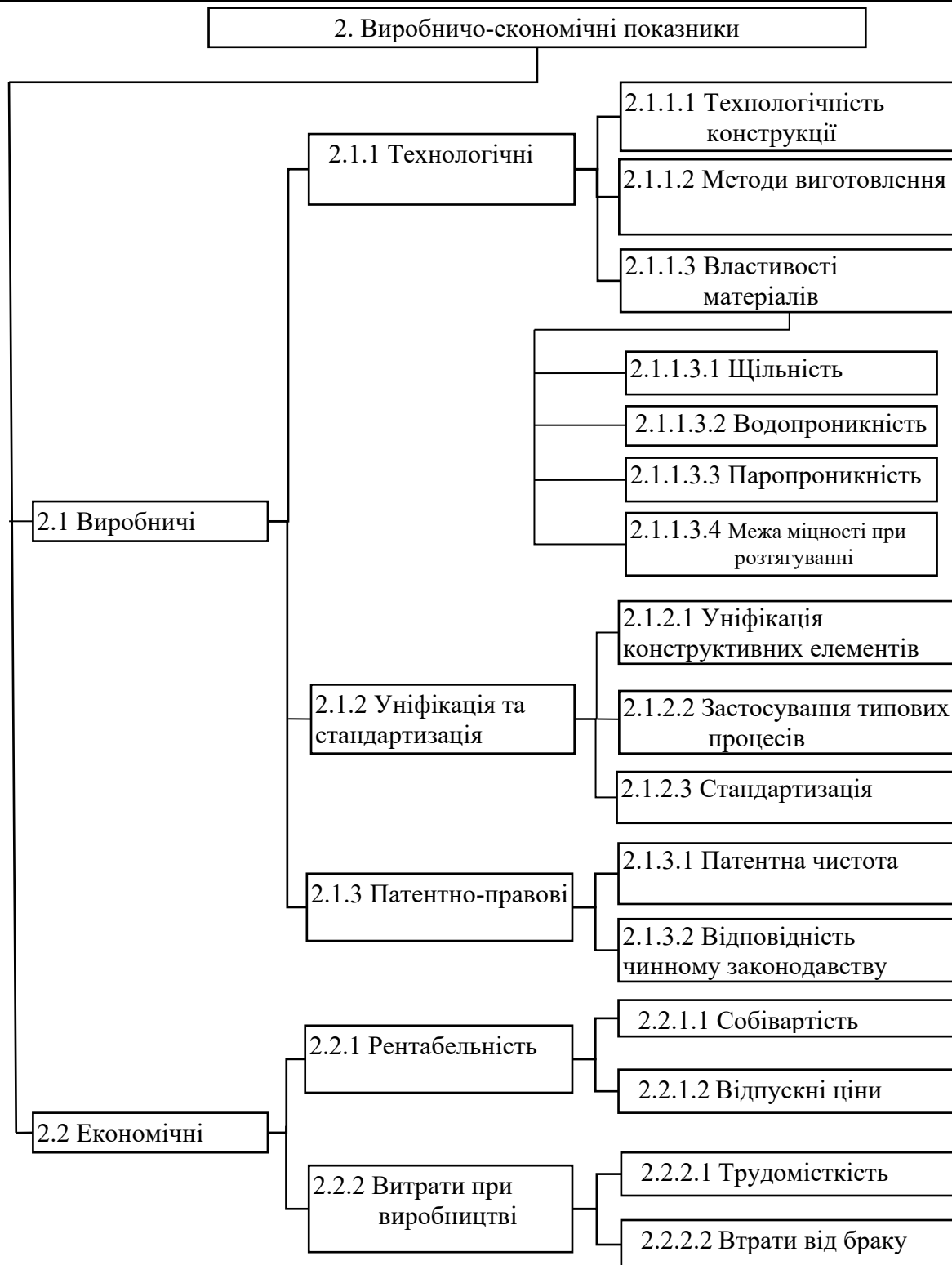


Рис. 4 Виробничо-економічні показники якості взуття військового призначення

Згідно наведених показників, раціональна форма конструкції взуття військового призначення має бути функціонально-конструктивною, тобто форма взуття повинна відповідати його призначенню, конструктивному та технологічному рішенню; враховувати анатомо-морфофункціональні особливості стоп; задовольняти умови використання виробів; захищати організм від негативного впливу зовнішнього середовища, різного виду механічних ушкоджень; матеріали мають забезпечувати функціональне призначення та умови використання виробу (захист впливу температур, вологи); забезпечувати підвищені вимоги зносостійкості і надійності.

Висновки

Якість взуття військового призначення тісно взаємодіє з багатьма показниками, оскільки покликана задовольняти специфічні потреби. Потреби визначають вибір, а ступінь їх задоволення у конкретних умовах і на цей період закладається в розуміння та визначення показників якості виробів. Систематизовано основні

та специфічні вимоги, що пред'являються до взуття військового призначення. При оцінці якості спеціального взуття військового призначення необхідно використовувати показники якості, які дозволять враховувати якісні характеристики за стандартами й потребами споживачів.

Література

1. Зайцева Л.О. Якість продукції – необхідна передумова конкурентоспроможності підприємства / Л.О. Зайцева // Актуальні проблеми економіки. – 2014. - № 9 (159). – С. 196-200.
2. Спецвзуття [Електронний ресурс]. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.sop.com.ua/article/385-qqq-16-m1-05-01-2016-spetsvzuttya>.
3. Вимоги до матеріалів верху, низу, конструкції та технології виготовлення спеціального взуття / [Олійникова В. В., Бабич А. І., Луканюк Я. С., Марущенко О. В.] // Легка пром-сть. — 2010. — № 3. — С. 14-15.
4. Мамонов П. Д. Розробка комплексної методики товарознавчої експертизи спеціального взуття [Електронний ресурс] / П. Д. Мамонов, А. В. Вергелес. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://naukajournal.org/index.php/naukajournal/article/view/594/764>.
5. Левкулич В.В. Зовнішні та внутрішні фактори впливу на забезпечення та покращення якості продукції // Науковий вісник Ужгородського університету.– Серія Економіка.– 2012.–№2(36). – С. 187–193.
6. Легка промисловість України: стан, проблеми, перспективи економічного розвитку: монографія / О. І. Волков та ін.; за ред. О. І. Волкова, Ю. В. Гончарова. Київ: КНУТД, 2009. 446 с.
7. Вознюк Т.К. Підвищення управління якістю продукції підприємств легкої промисловості // Т.К. Вознюк / Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки. – № 2 (Т. 3). – 2011. – С. 17–19.
8. Безпарточний М. Г. Формування споживчого ринку взуття [Текст] : Дис. канд. екон. наук: 08.07.05 / Безпарточний Максим Григорович; Полтавський ун-т споживчої кооперації України. - Полтава, 2006. - 254 ст.
9. Грищенко І.М. Поліфункціональні шкіряні матеріали : монографія / І.М. Грищенко, А.Г. Данилкович, О.Р. Мокроусова. – К. : Фенікс, 2013. – 295 с.
10. Данилкович А.Г. Технологія і матеріали виробництва шкіри : навч. посібник / А.Г. Данилкович, О.Р. Мокроусова, О.А. Охмат ; під ред. А.Г. Данилковича. – К. : Фенікс, 2009. – 580 с
11. Взуття. Терміни та визначення: ДСТУ 2157-93 [Чинний від 2002-09-01]. – К. : Державний комітет стандартизації, метрології та сертифікації України, 1993. – 69 с. – (Національний стандарт України)
12. Взуття спеціальне. Номенклатура показників якості : ДСТУ 3242-95 – [Чинний від 1996-07-01]. – К. : Державний комітет стандартизації, метрології та сертифікації України, 1995. – 22 с. – Національний стандарт України.
13. Недашківський О.М.. Планування та проектування інформаційних систем. – Київ, 2014. – 215 с.
14. Михайловська О. А. Характеристика показників якості спеціального дитячого взуття для занять спортивними бальними танцями / Оксана А. Михайловська. // Вісник Хмельницького національного університету. – № 4 (36). – 2008. – С. 137–139.

References

1. Zaitseva L.O. Yakist produktsii – neobkhdna peredumova konkurentospromozhnosti pidprijemstva / L.O. Zaitseva // Aktualni problemy ekonomiky. – 2014. - № 9 (159). – S. 196-200.
2. Spetsvzuttya [Elektronnyi resurs]. – 2019. – Rezhym dostupu do resursu: <https://www.sop.com.ua/article/385-qqq-16-m1-05-01-2016-spetsvzuttya>.
3. Vymohy do materialiv verkhu, nyzu, konstruktсии ta tekhnolohii vyhotovlennia spetsialnogo vzuttia / [Oliinykova V. V., Babych A. I., Lukaniuk Ya. S., Marushchenko O. V.] // Lehka prom-st. — 2010. — № 3. — S. 14-15.
4. Mamonov P. D. Rozrobka kompleksnoi metodyky tovaroznavchoi ekspertyzy spetsialnogo vzuttia [Elektronnyi resurs] / P. D. Mamonov, A. V. Verheles. – 2019. – Rezhym dostupu do resursu: <https://naukajournal.org/index.php/naukajournal/article/view/594/764>.
5. Levkulych V.V. Zovnishni ta vnutrishni faktory vplyvu na zabezpechennia ta pokrashchennia yakosti produktsii // Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho universytetu.– Serii Ekonomika.– 2012.–№2(36). – S. 187–193.
6. Lehka promyslovist Ukrainy: stan, problemy, perspektyvy ekonomichnoho rozvytku: monohrafiia / O. I. Volkov ta in.; za red. O. I. Volkova, Yu. V. Honcharova. Kyiv: KNUVD, 2009. 446 s.
7. Vozniuk T.K. Pidvyshchennia upravlinnia yakistiu produktsii pidprijemstv lehkoii promyslovosti // T.K. Vozniuk / Visnyk Khmelnytskoho natsionalnogo universytetu. Ekonomichni nauky. – № 2 (T. 3). – 2011. – S. 17–19
8. Bezpartochnyi M. H. Formuvannia spozhyvchoho rynku vzuttia [Tekst] : Dys... kand. ekon. nauk: 08.07.05 / Bezpartochnyi Maksym Hryhorovych ; Poltavskiy un-t spozhyvchoi kooperatsii Ukrainy. - Poltava, 2006. - 254 st.
9. Hryshchenko I.M. Polifunktsionalni shkiriani materialy: monohrafiia / I.M. Hryshchenko, A.H. Danylkovych, O.R. Mokrousova. – K. : Feniks, 2013. – 295 s.
10. Danylkovych A.H. Tekhnolohiia i materialy vyrobnytstva shkiry : navch. posibnyk / A.H. Danylkovych, O.R. Mokrousova, O.A. Okhmat ; pid red. A.H. Danylkovycha. – K. : Feniks, 2009. – 580 s
11. Vzuttia. Terminy ta vyznachennia: DSTU 2157-93 [Chynnyi vid 2002-09-01]. – K. : Derzhavnyi komitet standartyzatsii, metrolohii ta sertyfikatsii Ukrainy, 1993. – 69 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy)
12. Vzuttia spetsialne. Nomenklatura pokaznykiv yakosti : DSTU 3242-95 – [Chynnyi vid 1996-07-01]. – K. : Derzhavnyi komitet standartyzatsii, metrolohii ta sertyfikatsii Ukrainy, 1995. – 22 s. – Natsionalnyi standart Ukrainy.
13. Nedashkivskiy O.M.. Planuvannia ta proektuvannia informatsiinykh system. – Kyiv, 2014. – 215 s.
14. Mykhailovska O. A. Kharakterystyka pokaznykiv yakosti spetsialnogo dytyachoho vzuttia dlia zaniat sportyvnyimi balnymi tantsiamy / Oksana A. Mykhailovska. // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnogo universytetu. – № 4 (36). – 2008. – S. 137–139.

ПАВЛОВСЬКИЙ ПАВЛО
Вінницький національний технічний університет
ПРИСЯЖНИЙ ДМИТРО
Вінницький національний технічний університет
АБРАМЧУК ІГОР
abramchuk@vntu.edu.ua
Вінницький національний технічний університет
САВРАЦЬКИЙ В.В.
Вінницький національний технічний університет
БІЛОУС В.М.
Вінницький національний технічний університет

ПІДВИЩЕННЯ ЗАХИСТУ ВІД НЕСАНКЦІОНОВАНОГО ДОСТУПУ ПІД ЧАС ГОЛОСУВАННЯ В ОРГАНАХ ДЕРЖАВНОЇ ВЛАДИ НА ОСНОВІ АПАРАТНОЇ БІОМЕТРИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ГОЛОСУЮЧОГО

Запропоновано пристрій для забезпечення захисту від несанкціонованого доступу до інформації на основі використання автентифікації користувачів з можливістю розмежування доступу до інформаційного середовища. Пристрій дозволяє завчасно виявляти спроби несанкціонованого доступу та надавати доступ до інформаційних ресурсів санкціонованим користувачам; має підвищену довговічність і стійкість до фізичного зламу, підвищує захищеність системи захисту інформації; є простим для користувача і не вимагає спеціальних знань у сфері технічного захисту інформації; а також дозволяє завчасно виявити спроби несанкціонованого доступу, відновити основні функції пристрою в аварійних ситуаціях і має значно нижчу ціну порівняно з аналогами.

Ключові слова: несанкціонований доступ, ідентифікація користувача, біометричне сканування відбитків пальців, паролна ідентифікація.

PAVLOVSKIY PAVLO, PRUSIAZHNYI DMITRO, ABRAMCHUK IGOR, SAVRATSKIY V., BILOUS V.
Vinnytsia National Technical University

INCREASING PROTECTION AGAINST UNAUTHORIZED ACCESS DURING VOTING IN STATE AUTHORITIES BASED ON HARDWARE BIOMETRIC IDENTIFICATION OF THE VOTER

A device is proposed to provide protection against unauthorized access to information based on the use of user authentication with the possibility of delimiting access to the information environment. The device allows early detection of unauthorized access attempts and provides access to information resources to authorized users; has increased durability and resistance to physical breaking, increases the security of the information protection system; is simple for the user and does not require special knowledge in the field of technical information protection; and also allows early detection of unauthorized access attempts, recovery of basic device functions in emergency situations and has a much lower price compared to analogues.

Keywords: unauthorized access, user identification, biometric fingerprint scanning, password identification.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Під захистом інформації розуміють сукупність організаційно-технічних заходів і норм, що спрямовані на запобігання заподіянно шкоди інтересам власника цієї інформації, а також осіб, які користуються нею. При цьому об'єктом захисту є не лише інформація, що обробляється, передається та зберігається у будь-якому вигляді як в автоматизованій системі, так і за допомогою інших засобів оброблення інформації, але й права власників цієї інформації і власників автоматизованої системи, а також права користувача. Захист прав суб'єктів у аспектах формування, користування інформаційними ресурсами, розроблення, виробництва та застосування інформаційних систем, технологій і засобів їхнього забезпечення здійснюється з метою попередження правопорушень, неправомірних дій, відновлення порушених прав і відшкодування заподіяної шкоди [1].

Розвиток системи голосування має визначатися прогнозованими напрямками розвитку законодавства України, визначення режиму використання її програмно-технічних засобів та інформаційних ресурсів, правового статусу документів, підготовлених з використанням системних засобів, захисту інформації в системі та цільового фінансування її розробок. Науково-методичне забезпечення створення системи голосування має базуватися на аналізі та впровадженні сучасних світових досягнень у сфері інформатизації процесів підготовки та проведення голосування, залученні вітчизняного науково-виробничого потенціалу до розробки проектів і механізмів розвитку, а також на прогнозуванні тенденцій розвитку інформаційних технологій [2]. Матеріально-технічне забезпечення системи голосування має базуватися на сучасній комп'ютерній, телекомунікаційній техніці, системному програмному забезпеченні та оргтехніці. Інформаційно-аналітичне забезпечення системи голосування повинно базуватися на цілісності інформації у єдиному інформаційному просторі організаційної інфраструктури виборів і референдумів. До складу інформаційно-аналітичного забезпечення системи

голосування можуть входити сегменти баз даних, довідники та кодифікатори, що створюються та підтримуються іншими установами. Склад та функціональне призначення інформаційно-аналітичного забезпечення визначаються переліком завдань, що покладаються на систему голосування. Системне програмно-технічне забезпечення (операційні системи, системи телекомунікаційного зв'язку, системи приймання-передавання інформації, системи управління базами даних, системи захисту інформації) у системі голосування спрямоване на організацію функціонування корпоративної інформаційної комп'ютерної мережі, управління її компонентами і рівнями, а також організацію інформаційних потоків та інформаційної безпеки. Системне програмно-технічне забезпечення базується на принципах єдиної платформи та сумісності, забезпечує передачу даних, контроль за їх цілісністю, моніторинг передачі даних, а також моніторинг функціонування системи голосування, контроль повноважень і прав доступу користувачів. Системне програмно-технічне забезпечення на кожному рівні системи голосування має відповідати функціональному навантаженню рівня та його місцю у системі. Система голосування має будуватись за принципом відкритих систем, що надає можливості використання розподілених баз даних та обчислень, масштабованості та можливості перенесення на інші платформи у процесі розвитку, забезпечення сумісності та інтеграції з іншими системами. Система голосування розширюється за модульним принципом організації та поетапним нарощуванням функціональних можливостей, що дозволяє розвивати складові, не порушуючи функціонування системи у цілому. Прикладне програмне забезпечення системи голосування повинно базуватися на сучасних засобах управління базами даних та забезпечувати формування, обробку, накопичення та підготовку інформації для передавання за узгодженими форматами. Прикладне програмне забезпечення повинно виконувати максимально можливий перелік функцій для інформаційної підтримки діяльності системи голосування. Прикладне програмне забезпечення системи голосування має підтримувати усі види формування і обробки інформації, автоматизацію виборчих процедур на усіх етапах підготовки та проведення голосування. Інформаційна безпека системи забезпечується нормативно-організаційними, стандартними програмно-технічними та спеціалізованими засобами захисту інформації. Стійкість системи у цілому не повинна залежати від працездатності будь-якої складової єдиного програмно-інформаційного простору системи. Створювані програмні засоби повинні забезпечувати запобігання втратам інформації та несанкціонованого втручання, знищення, спотворення, підробки, копіювання інформації. Система голосування повинна забезпечити контроль за інформаційними потоками, шифрування трафіка, ідентифікацію як суб'єкта програмно-інформаційного простору [3].

Аналіз існуючих систем голосування показав, що основним недоліком біометричної ідентифікації є вартість устаткування, адже для кожного пульта для голосування, що входять до системи голосування, необхідно придбати власний сканер. Варто також відзначити, що подібні дешеві сканери недовговічні. Крім того, у них досить високий відсоток помилок другого роду (відмова у доступі зареєстрованому користувачеві), а також недостатній рівень захищеності під час ідентифікації користувачів. Виходячи з цього актуальним для систем голосування є таке.

Постановка задачі та метод дослідження. Розроблення нового функціонального пристрою з використанням підсистеми апаратної біометричної ідентифікації голосуючого та паролльної ідентифікації, що уможливує усунення недоліків існуючих підходів та забезпечує високий рівень захисту інформації.

Формулювання цілі статті. Метою статті є підвищення рівня захисту від несанкціонованого доступу шляхом розроблення та застосування пристрою підсистеми апаратної біометричної ідентифікації голосуючого.

Моделювання пристрою трифакторної ідентифікації

Пропонується пристрій, що використовує біометричну ідентифікацію у вигляді сканера відбитків пальців (дактилоскопічний сканер), який буде встановлено на кожний із пультів для голосування і буде забезпечувати захист результатів голосування та зберігати їхню достовірність.

У даному пристрої буде використано сканер відбитку пальця FPM10A, що базується на оптичному методі. Даний сканер є найбільш мініатюрним, стійким до муляжів та має помірну цінову категорію [3].

Оптичні датчики відбитків пальців FPM10A зазвичай використовуються у системах безпеки, ці сенсори включають у себе чіп, який обробляє зображення, робить необхідні розрахунки для виявлення відповідності між записаними і поточними даними. З використанням відповідного програмного забезпечення можна навіть відобразити фотографію відбитка на дисплеї (рис. 1).

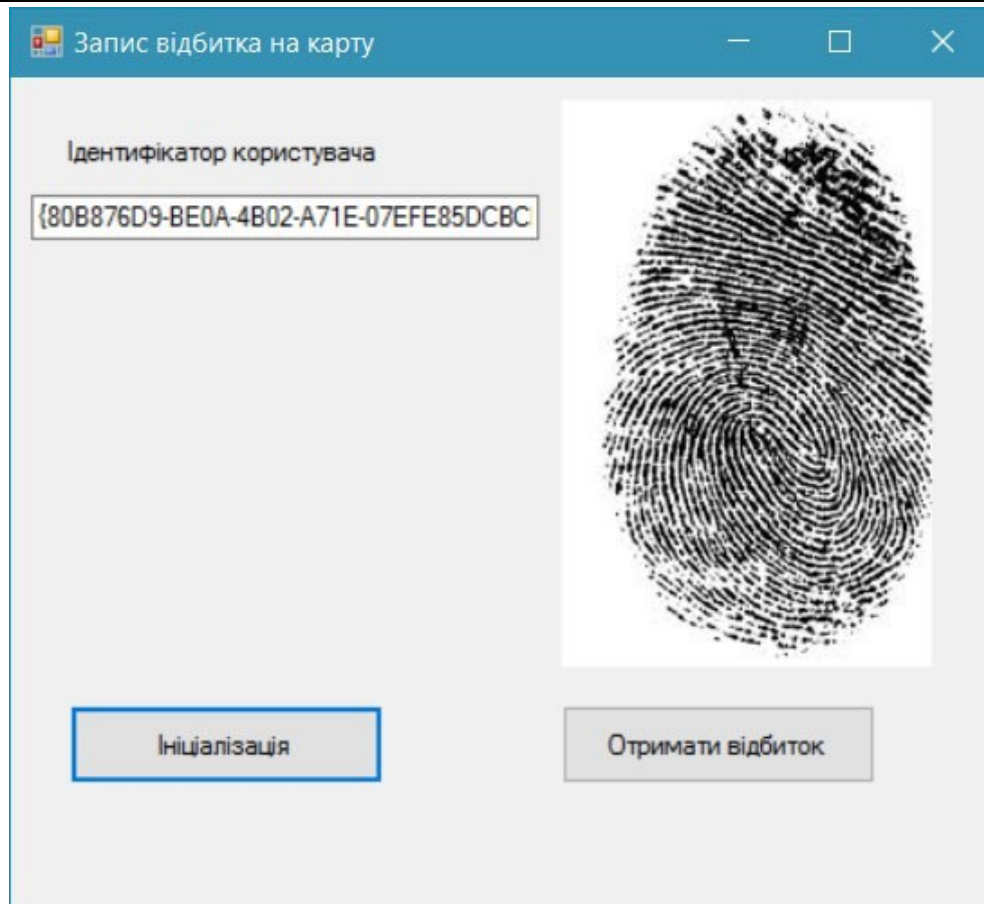


Рис. 1. Запис відбитку пальця на персональний ідентифікатор

При використанні датчика відбитку пальців є два основних етапи. Спочатку треба записати дані у пам'ять сенсора, тобто привласнити свій унікальний ідентифікатор кожного відбитка, який буде використовуватись для порівняння у подальшому. Після запису даних, здійснюється перехід до пошуку, порівнюючи поточне зображення відбитка з тими, які записані у пам'яті датчика. Для запису відбитків пальців можна використовувати запропоноване програмне забезпечення або скетч для Arduino (рис. 2) (у залежності від платформи, під яку встановлюється сканер). Найпростіший шлях запису нових даних у пам'ять оптичного датчика відбитків пальців – програма для Windows. Нажаль, для інших операційних систем програмне забезпечення не передбачено. Спочатку треба підключити сенсор до комп'ютера, після чого записати скетч на Arduino. Провідники на датчику даної модифікації FPM10A скріплені для більш зручного підключення, але за необхідності їх можна розділити. Так як провідники на датчику тонкі і короткі, можна припаяти їх до окремих рейок контактів, або просто нанести на кінці припою для надійного контакту з роз'ємами мікроконтролера. Після підключення живлення буде блимати червоний світлодіод, позначаючи, що сенсор працює [4].

Кожен голосуючий має свою персональну картку, яка містить персональні дані та біометричний відбиток пальця.

Для того, щоб голосування було достовірним, використаємо програму, яка буде звіряти відбиток пальця голосуючого з відбитком, що збережений у персональній картці.

Запис відбитку пальця на картку проводиться адміністратором за допомогою програмного засобу біометричної ідентифікації.

У ході даного дослідження було розроблено дослідний зразок пульта голосуючого, схема електрична-принципова пристрою наведена на рисунку 3. Основою пристрою є мікроконтролерна платформа сімейства Arduino, версії Nano, яка займається обробкою результатів голосування та біометричної ідентифікації. На входи D2, D3 плати підключено біометричний датчик зчитування відбитків, моделі FPM10A, даний датчик є функціонально завершеним модулем і для його роботи достатньо пройти процедуру ініціалізації відповідного протоколу роботи у програмному коді пристрою, обмін даними між датчиком і мікроконтролером відбувається у послідовному коді через зазначені входи. До входів D4 – D6 підключені кнопки для голосування, при натисканні яких зараховуються відповідні голоси «За», «Проти», «Утримався». До входу D7 підключена кнопка, натискання якої імітує сигнал запуску голосування з головного пульта системи. На вхід D12 підключено активний бузер для звукової сигналізації етапів роботи пристрою, а на входи A0 – A4 підключені світлодіоди для світлової індикації відповідних етапів та результатів голосування.

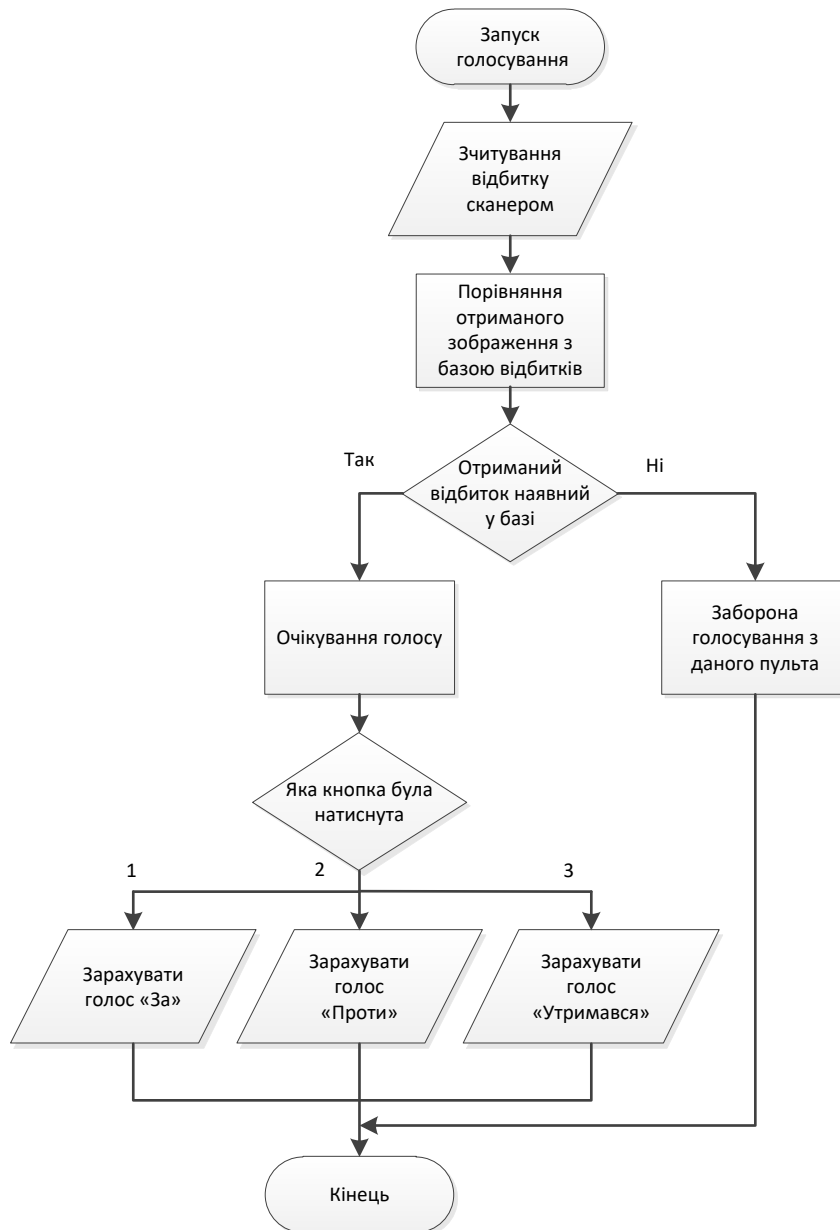


Рис. 2. Алгоритм роботи програми

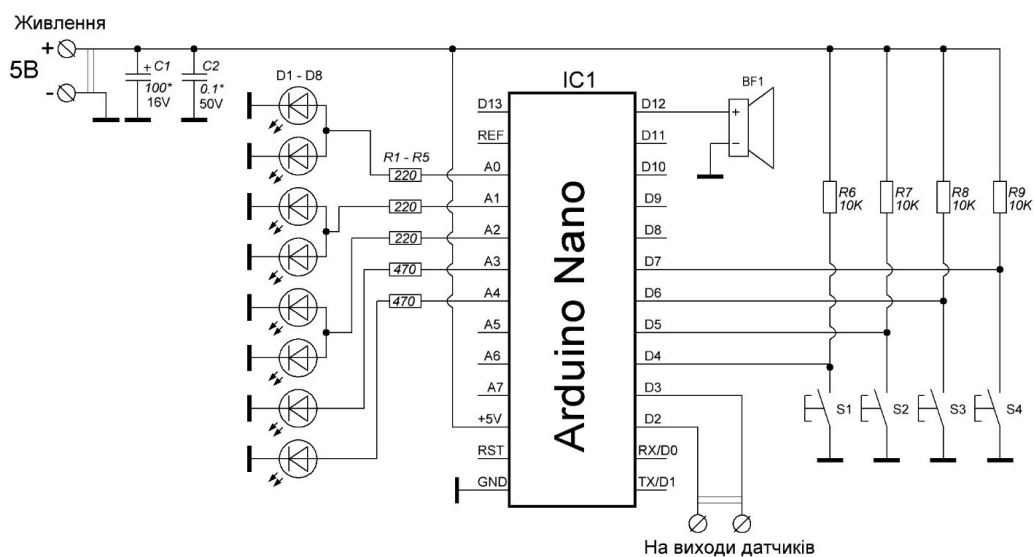


Рис. 3. Принципова схема підсистеми апаратної біометричної ідентифікації голосуючого

Аналіз роботи та можливостей запропонованого пристрою показав, що він за рахунок трифакторної біометричної ідентифікації підвищує захищеність системи захисту інформації, є більш інформативним і простим для користувача; не вимагає спеціальних знань у сфері технічного захисту інформації; дозволяє завчасно виявити спроби несанкціонованого доступу, відновити основні функції пристрою у аварійних ситуаціях; має значно нижчу ціну, що прискорює його впровадження у системах безпеки.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Запропоновано пристрій, який на основі біометричної ідентифікації дозволяє завчасно виявляти спроби несанкціонованого доступу, надавати доступ до інформаційних ресурсів санкціонованим користувачам, навіть у випадку відмови пристрою та під час виникнення аварійних ситуацій; має підвищену довговічність і стійкість до фізичного зламу.

Поєднання біометричного сканування відбитків пальців та паролльної ідентифікації дозволило значно підвищити захищеність систем голосування від несанкціонованого доступу та безпеку інформаційних ресурсів у цілому.

Література

1. Закон України «Про захист інформації в автоматизованих системах».
2. Концепція технічного захисту інформації в Україні, затверджена постановою КМУ від 08.10.97 р., №1126
3. Азаров О.Д., Хорошко В.О., Шелест М.Є., Яремчук Ю.Є. Основи комп'ютерної стеганографії: навч. посіб. — Вінниця: ВДТУ, 2003. 143 с
4. Кулішов В.В. Мікро-макроекономіка : підручник / В.В. Кулішов. – Львів: Магнолія, 2008. – 468 с.
5. Системи охорони периметра [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://guard-lviv.com.ua/oxrana-perimetra/index.html>

References

1. Law of Ukraine "On Information Protection in Automated Systems".
2. The concept of technical protection of information in Ukraine, approved by the resolution of the CMU of October 8, 1997, No. 1126.
3. Azarov O.D., Khoroshko V.O., Shelest M.E., Yaremchuk Yu.E. Basics of computer steganography: training manual, Vinnytsia: VDTU, 2003. 143 p.
4. Kulishov V.V. Micro-macroeconomics: a textbook, Lviv: Magnolia, 2008, 468 p.
5. Perimeter protection systems [Electronic resource] - Access mode: <http://guard-lviv.com.ua/oxrana-perimetra/index.html>

ОЛІЙНИК ГАЛИНА

Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0002-6519-7938>
e-mail: oliinykha@khmnu.edu.ua

КОРНИЦЬКА ЛАРИСА

Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0002-8816-096X>
e-mail: kornitskala@khmnu.edu.ua

ДАНЧЕНКО ЮЛІЯ

Національний університет національної гвардії України, м. Харків
<https://orcid.org/0000-0003-3865-2496>
e-mail: yuliyadanchenko7@gmail.com

РАСТОРГУЄВА МАРІЯ

Херсонський національний технічний університет
<https://orcid.org/0009-0003-2612-508X>
e-mail: mrastorgueva65@gmail.com

ЄВТУШЕНКО ВАЛЕНТИНА

Херсонський національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0002-8720-5804>
e-mail: teacher472@ukr.net

КЛАСИФІКАЦІЯ МЕБЛЕВО-ДЕКОРАТИВНИХ ТКАНИН

В роботі наведено результати досліджень меблево – декоративних тканин для сучасного інтер'єру. Розглянуто різні види меблево – декоративних тканин. Дано аналіз споживчих властивостей, які залежать від хімічного складу та структури формування тканин, способів і технологій виробництва, захисних методів обробки. Досліджено питання необхідності створення та впорядкування класифікації меблево – декоративних тканин. Запропонована класифікація меблево – декоративних тканин, яка побудована на застосуванні ієрархічного методу, що дозволило відобразити високу інформативність, ємність та логічну послідовність.

Ключові слова: меблево – декоративні тканини, інформативність, споживчі властивості, сучасний інтер'єр, ієрархічний метод.

OLIJNYK HALINA, KORNYTSKA LARYSA
Khmelnitski National University
DANCHENKO YULIYA

National Academy of the National Guard of Ukraine
RASTORHUEVA MARIYA, YEVTUSHENKO VALENTYNA
Kherson National Technical University

CLASSIFICATION OF FURNITURE AND DECORATIVE FABRICS

One of the promising and dynamic segments of the light industry market in Ukraine and Europe is the market of furniture and decorative materials for modern interiors. The production of furniture and decorative fabrics is dynamically developing all over the world and is the most knowledge-intensive and multi-vector. The domestic and global market of furniture and decorative fabrics demonstrates considerable stability due to the wide range of demand and variety of this product.

The need for different production methods, hygienic and aesthetic furniture, decorative fabrics, and a significant expansion and optimization of the assortment pose the task of providing information to consumers of the domestic market. The importance of furniture and decorative materials in the modern interior is difficult to overestimate since the areas of their application are constantly updated and improved.

Recently, there has been a tendency to increase the capacity of furniture and decorative fabrics in the market of Ukraine. According to the results of literary research, the volume of consumption of furniture and decorative fabrics from the beginning of the XXI century. increased by 50%. However, such growth is ensured not by a significant increase in the volume of domestic production, but at the expense of imports. A characteristic feature of the Ukrainian market of furniture and decorative fabrics nowadays is a too great advantage of imported goods over similar goods of domestic production. Today, there is such a situation that the rate of growth of domestic production of furniture and decorative fabrics in Ukraine is significantly inferior to the rate of import growth. Ukraine's light industry is in a state of protracted systemic crisis: business ties with traditional suppliers of raw materials have been destroyed, and production of equipment for the light industry has practically stopped. In Ukraine, there are no state-owned enterprises for the production of furniture and decorative fabrics, they are produced only at private enterprises.

At the same time, there is no consensus in the textile industry regarding the creation and organization of the classification of furniture and decorative fabrics. That is why, for the further development of the production of furniture and decorative fabrics, a more in-depth study of their properties, and the unification of work on the quality assessment of this product, it is important to have a clear classification of it.

Currently, in Ukraine, the classification of furniture and decorative fabrics is carried out in accordance with the Ukrainian Classification of Goods of Foreign Economic Activity (UKTZED). Since there is currently no information and analytical center for the light industry in Ukraine, there is no extensive statistical accounting of production volumes and other economic indicators of enterprises, and the presence of a clear classification of fabrics according to certain characteristics will limit access to the domestic market of potentially dangerous products. That is why further scientific research is aimed at creating a classification system for furniture and decorative fabrics.

The purpose of the classification of furniture and decorative fabrics is to study the origin of the raw materials from which they are made, the method of production, and the functional purpose of the products obtained on their basis. According to the results of scientific research, the object of classification - furniture - decorative fabrics is proposed to be divided according to the following classification

features: raw material (class), origin (group, subgroup), production method (genus), and product purpose (functional purpose). When developing the system of classification of furniture and decorative fabrics, all methodical rules of its construction were taken into account. The compilation of such a scheme was based on the application of a hierarchical method of classification, which made it possible to display high informativeness, capacity, and logical sequence. In this classification system, it is proposed to divide the totality of furniture and decorative fabric products according to the classification feature "origin". Its name reflects the method of obtaining and predicts the scope of further industrial application.

The classification of furniture and decorative fabrics proposed by the authors can complete and improve the informative market, and eliminate technological and marketing barriers in the production, sale, and consumption of finished products.

Keywords: furniture - decorative fabrics, modern interior, consumer properties, functional purpose, informative support, market completion, hierarchical method, classification.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Одним із перспективних і динамічних за темпами розвитку сегментів ринку товарів легкої промисловості в Україні та в Європі є ринок меблево – декоративних тканин для сучасного інтер'єру. Виробництво меблево – декоративних тканин динамічно розвивається у всьому світі і є найбільш наукоємним і багатовекторним. Вітчизняний та світовий ринок меблево – декоративних тканин демонструє неабияку стійкість завдяки широкій номенклатурі попиту і різноманітності цього товару. Потреба в різних за способом виробництва, гігієнічних та естетичних меблево – декоративних тканинах, суттєвому розширенні та оптимізації асортименту ставить завдання по інформативному забезпеченню споживачів вітчизняного ринку [1]. Важливість меблево – декоративних тканин у сучасному інтер'єрі складно переоцінити, оскільки сфери застосування його постійно оновлюються та вдосконалюються. Водночас в текстильній галузі немає єдиної думки щодо створення та впорядкування класифікації меблево – декоративних тканин. Саме тому, для подальшого розвитку виробництва меблево – декоративних тканин, більш глибокого вивчення властивостей тканин та уніфікації робіт щодо оцінки якості цієї продукції важлива наявність її чіткої класифікації.

Аналіз досліджень та публікацій

Високі темпи розвитку виробництва меблево – декоративних тканин супроводжується зростанням кількості відповідних наукових публікацій. Зокрема, відомі роботи вітчизняних дослідників Г.О. Пушкар, Б.Д. Семак [4-5], які досліджували функціональні властивості інтер'єрного текстилю, зокрема стійкість до світла, прання, тертя та шляхи оптимізації асортименту вітчизняного ринку. Цікавими є розробки, що стосуються текстильної нанопродукції в Україні [6]. Відомі дослідження текстильних матеріалів, що пов'язані з антимікробною обробкою для покращення стійкості [7]. Дослідниками представлені інноваційні технології при виготовленні та обробці меблево – декоративних тканин [8-9]. Відомі роботи зарубіжних дослідників присвячені дослідженню текстилю в інтер'єрному середовищі [10]. Дослідження, які присвячені складу та споживчим вимогам до меблево – декоративних тканин присвячені праці [11-12]. При цьому автори практично не розглядають проблеми формування та розвитку вітчизняного ринку меблево – декоративних тканин, а також особливості їх класифікації.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є аналіз існуючих особливостей меблево – декоративних тканин та їх класифікація.

Виклад основного матеріалу

Протягом останніх років меблево – декоративні тканини набули великої популярності завдяки розширенню їх асортименту.

На основі проведеного аналізу світового ринку меблево – декоративних тканин можна зробити висновок, що останнім часом виробництво текстильної продукції розвивається досить швидкими темпами, для нього характерні інвестиційна привабливість та швидка окупність витрат.

До складу меблево – декоративних тканин можуть входити різні нитки (волокна) – акрил, бавовна, льон, пенька, нейлон, поліестер, поліпропілен, рафія, шовк, віскоза, вовна. Комбінація волокон і спосіб виготовлення тканин в сукупності створюють різні види меблево – декоративних тканин [2]. У залежності від складу тканини мають різні властивості. Для правильного вибору потрібно розуміти, які з споживчих властивостей меблево – декоративних тканин найбільше важливі. Наявність тих або інших властивостей визначається хімічним складом і структурою формування тканини. При виробництві меблів використовуються натуральні і синтетичні волокна. Сучасні меблево – декоративні тканини нерідко мають у своєму складі синтетичні добавки, що підвищують експлуатаційні якості меблів і її зносостійкість. Але все ж натуральні складові у меблево – декоративних тканинах необхідні. Часто матеріал для оббивки складається з бавовни або льону з додаванням віскози або синтетики (поліестеру, поліакрилу або поліаміду). Саме ці добавки дозволяють значно продовжити термін служби тканинної меблево – декоративної оббивки і надають нову, цікаву фактуру матеріалу і меблів в цілому. На відміну від звичайних бавовняних тканин, сучасні меблево – декоративні тканини, також складаються з бавовни, не схильні до значної усадки: оббивка після вологого прибирання або прання практично не змінює свою форму. Крім того, оброблені в процесі виробництва спеціальним складом, меблево – декоративні тканини можуть не боятися забруднення і навіть плям.

Забарвлення сучасних меблево – декоративних тканин досить різноманітні. Не в останню чергу це пов'язано з тим, що значно спростився і подешевшав сам процес нанесення малюнка на тканину. Це відбувається за допомогою трансфертного друку, або нанесенням малюнка за допомогою термопаперу. Дизайнерам доводиться змагатися у створенні різноманітних набивних малюнків, здатних задовольнити практично будь-який смак споживача. У деяких моделях для меблево – декоративних тканин використовують комбінацію з декількох тканин [3]. Меблево – декоративні тканини зовні схожі на звичайні для верхнього одягу, але насправді вони мають специфічні властивості. Мова йде про стійкість до зношування, вогнетривкість, спеціальний захисний шар (**тефлонове і скотчгардове просочення**), який перешкоджає появі брудних плям і підвищує вологостійкість тканини. Зовнішній вигляд тканинного матеріалу залишається бездоганим, що дозволяє купувати не тільки міцні, але й гарні меблево – декоративні тканини.

На ціну меблів впливає вибір меблево – декоративних тканин. Продавці відмічають, що останнім часом смаки і запити споживачів змінюються. Багато з них хочуть, щоб меблі були не лише довговічними і зручними, але й відрізнялися оригінальним дизайном, використанням модних оздоблювальних тканин. Можливість вибору меблево – декоративних тканин величезна. Є тканини різних найменувань різного вигляду, якості, фактури, кольору, а відповідно, і різної вартості. Як не заплутатися в цьому різноманітті, як підібрати таку тканину, яка володіла б високою зносостійкістю, міцністю і одночасно мала хороші гігієнічні показники, була б модною та сучасною? Для цього необхідно знати деякі особливості тканин і уміти самим їх визначати. Льняні і бавовняні тканини, як правило, легко мнуться, шовк слизький на дотик. Тканини з натуральних волокон добре відпрасовуються і зберігають форму, вони «дихають», шви на них непомітні, але вони піддаються усадці. Синтетичні тканини не зберігають форму, можуть «плавитися» при гладінні, та зате вони дуже міцні, світлостійкі, легкі у догляді і дешевші [3].

З практичної та естетичної точки зору цікавим є використання меблево – декоративних тканин на стінах, замість декоративних панелей. Меблево – декоративні тканини для стін доступні різної зручної ширини, щоб використовувати їх у кімнатах з різними конфігураціями стін, для того, щоб уникнути швів. Меблево – декоративні тканини для стін створені на основі джгуту. Джгут був початковим вибором матеріалу для стінових тканин, і хоча наразі його використання знизлося на користь інших матеріалів, наприклад льону, який з точки зору контакту є більш стабільним. Також використовуються системи нетканної основи з великою різноманітністю волокон і текстур. Використання для облаштування стін «системи повної пряжі» стає все більш популярною, таке полотно можна легко зняти для чищення та заміни (стрічка на липучці з самоклеючою підкладкою). Відомо, що підвісна система настінної тканини поглинає звук. Поглинання – це властивість поглинати звукові хвилі матеріалом, і цього найкраще досягають матеріали волокнистої природи, такі як мінеральна та скловата, зараз поглинальними властивостями наділяють меблево – декоративні тканини для облаштування стіни і для створення захисту від шуму та звукоізоляції. Меблево-декоративні тканини впливають на композицію та колорит інтер'єру. Ті з них, що використовуються у якості штор мають практичні функції, що полягають у регулюванні природного освітлення, тепла та інсоляції, поглинанні шуму.

Меблево – декоративні тканини набувають популярності завдяки розширенню асортименту, напрямів застосування, появі нових прогресивних способів і технологій виробництва, появі різноманітних захисних методів обробки, використанню нових видів сировини. Проте, незважаючи на широкий асортимент меблево – декоративних тканин, на сьогодні відсутня єдина думка, щодо створення та впорядкування класифікації меблево – декоративних тканин.

Останнім часом спостерігається тенденція до зростання ємності меблево – декоративних тканин на ринку України. Згідно з результатами літературних досліджень, обсяг споживання меблево – декоративних тканин з початку XXI ст. зріс на 50 %. Однак таке зростання забезпечується не суттєвим збільшенням обсягів вітчизняного виробництва, а за рахунок імпорту. Характерною рисою українського ринку меблево – декоративних тканин у наш час є надто велика перевага імпортованих товарів над аналогічними товарами вітчизняного виробництва. Сьогодні спостерігається така ситуація, що темпи приросту внутрішнього виробництва меблево – декоративних тканин в Україні суттєво поступаються темпам приросту імпорту. Легка промисловість України перебуває в стані затяжної системної кризи: зруйновано ділові зв'язки з традиційними постачальниками сировини, практично припинено виробництво устаткування для легкої промисловості. В Україні не існує державних підприємств із виробництва меблево – декоративних тканин, їх виробляють лише на приватних підприємствах.

На даний час в Україні класифікацію меблево – декоративних тканин здійснюють згідно із Українським класифікатором товарів зовнішньоекономічної діяльності (УКТЗЕД). В УКТЗЕД товари систематизовано за розділами, групами, товарними позиціями, товарними підпозиціями, найменування і цифрові коди яких уніфіковано з Гармонізованою системою опису та кодування товарів [13]. Меблево – декоративні тканини відносяться до XI розділу – текстильні матеріали та текстильні вироби, 58 групи та мають код товару 5805 00 00 00 - меблево-декоративні тканини ручної роботи типу французьких, фламандських, об'юсонських, бовезьких гобеленів та аналогічних гобеленів, гобелени вишиті (наприклад, гладдю чи хрестом), оброблені чи необроблені [13]. Така класифікація не враховує даний вид тканин промислового виробництва.

Так як в Україні наразі відсутній інформаційно-аналітичний центр легкої промисловості, не здійснюється розгорнутий статистичний облік обсягів випуску продукції та інших економічних показників роботи підприємств, то наявність чіткої класифікації тканин за певними ознаками дозволить обмежити доступ на внутрішній ринок потенційно небезпечної продукції. Саме тому подальші наукові дослідження спрямовано на створення системи класифікації меблево – декоративних тканин.

Класифікація – це розподіл заданої множини на підмножину згідно зі встановленими методами. Множина ділиться на підмножину за однією ознакою, а кожна підмножина – на дрібніші класифікаційні категорії. Розподіл множини продукції на групи за декількома ознаками класифікації називається класифікаційним групуванням. При цьому підрозділи множини складають єдину систему, всі частини якої взаємопов'язані, підпорядковані та являють собою сукупність спільних ознак з головним об'єктом класифікації.

Класифікація продукції зазвичай має кілька взаємопідпорядкованих рівнів розподілу, які в сучасних умовах задовольняють такі основні вимоги:

- забезпечує максимальну оглядовість номенклатури продукції;
- сприяє повному вияву основних властивостей і особливостей продукції;
- враховує можливі зміни в асортименті товарів і поповнення її номенклатури новими видами;
- сприяє подальшому вдосконаленню торговельно-оперативної роботи на всьому шляху товарообігу;
- відповідає принципам кодування товарів, сприяє вдосконаленню обліку промислової продукції і складає кон'юнктурний огляд у сфері товарообігу.

Існують чотири основні елементи класифікації: об'єкт класифікації, мета класифікації, класифікаційні ознаки та класифікаційна одиниця. Головним елементом, що визначає широту та функціональні можливості використання тієї чи тієї системи класифікації, є об'єкт класифікації. Для позначення ланок систематизації й класифікації товарів народного споживання, з позиції товарознавчої науки, використовують такі категорії: розподіл, клас, підклас, група, підгрупа, рід, вид, різновид, тип. Кількість категорій в певній системі залежить від ступеня деталізації та глибини класифікації продукції.

В основу класифікації сукупності ознак (категорій) розподілу покладено класифікаційну одиницю "вид". При глибокій багатоступеневій класифікації об'єктів вид як класифікаційна одиниця розташовується на одній із середніх сходинок ієрархічної драбини. Залежно від деталізації системи, ознаки класифікації поділяють на вищі й нижчі. На вищих рівнях систематики (до виду включно) можуть використовуватися узагальнені ознаки, не пов'язані з властивостями об'єкта, які базуються на функціональних ознаках. Нижчі, які охоплюють усі різновиди категорії "вид", повинні відображати усі властивості продукції. Отже, у загальній схемі систематики класифікаційна одиниця "вид" ділить усі ієрархічні ступені класифікації на дві частини: вищу й нижчу. Саме це має важливе значення для надання товарознавчої характеристики певної продукції [14- 16].

Отже, метою класифікації меблево – декоративних тканин є вивчення походження сировини, з якої його виготовляють, спосіб виробництва та заключна обробка продукції, отриманої на їх основі. За результатами наукових досліджень, об'єкт класифікації – меблево – декоративні тканини – запропоновано розподілити за такими класифікаційними ознаками: сировина (клас), походження (групи), спосіб виробництва (рід), заключна спеціальна обробка (сфера застосування) (рис. 1).

При розробці системи класифікації меблево – декоративних тканин враховувалися всі методичні правила її побудови. Складання такої схеми базувалося на застосуванні ієрархічного методу класифікації, що уможливило відобразити високу інформативність, ємність та її логічну послідовність.

У цій системі класифікації запропоновано сукупність продукції меблево – декоративних тканин розподілити за класифікаційною ознакою "походження". Її найменування відображає спосіб отримання і прогнозує сферу подальшого галузевого застосування.

На основі проведеного аналізу, експертного опитування, здійсненого на підприємствах із виготовлення меблево – декоративних тканин нами було зроблено висновки, згідно з якими меблево – декоративні тканини можна розділити за такими ознаками: походження волокон, на основі яких виготовляють меблево – декоративні тканини (натуральні, хімічні та змішані); спосіб виробництва (тканій, трикотажний, нетканій); обробка (пістроткані, гладкофарбовані, вибивні); будова (гобеленові, ворсові, жакардові, ажурні, гардинні); оздоблення (геометричний чи художній малюнок; з патиною чи зістарене; фактурне, об'ємне, гладке; ручної роботи в'язаного чи плетеного типу; ручної роботи вишитої гладдю чи хрестиком); заключна спеціальна обробка (сфера застосування).

Заклучна спеціальна обробка меблево-декоративних тканин полягає в наданні матеріалам стійких характеристик: вологостійкості, зменшення зминаємості та усадки, декоративне тиснення, надання блиску, ефекту гофре, ефекту «клок», вогнестійкості, антистатичного ефекту, металізації, брудовідштовхувальних можливостей, ефекту витравлення, жировідштовхуючих та пиловідштовхуючих властивостей (рис.1). На основі проведеного аналізу існуючих підходів до класифікації меблево – декоративних тканин, яким користуються у всьому світі, нами було виділено класифікаційні ознаки, за якими можна класифікувати меблево – декоративні тканини в Україні та запропоновано ієрархічну класифікацію меблево – декоративних тканин (рис. 1).

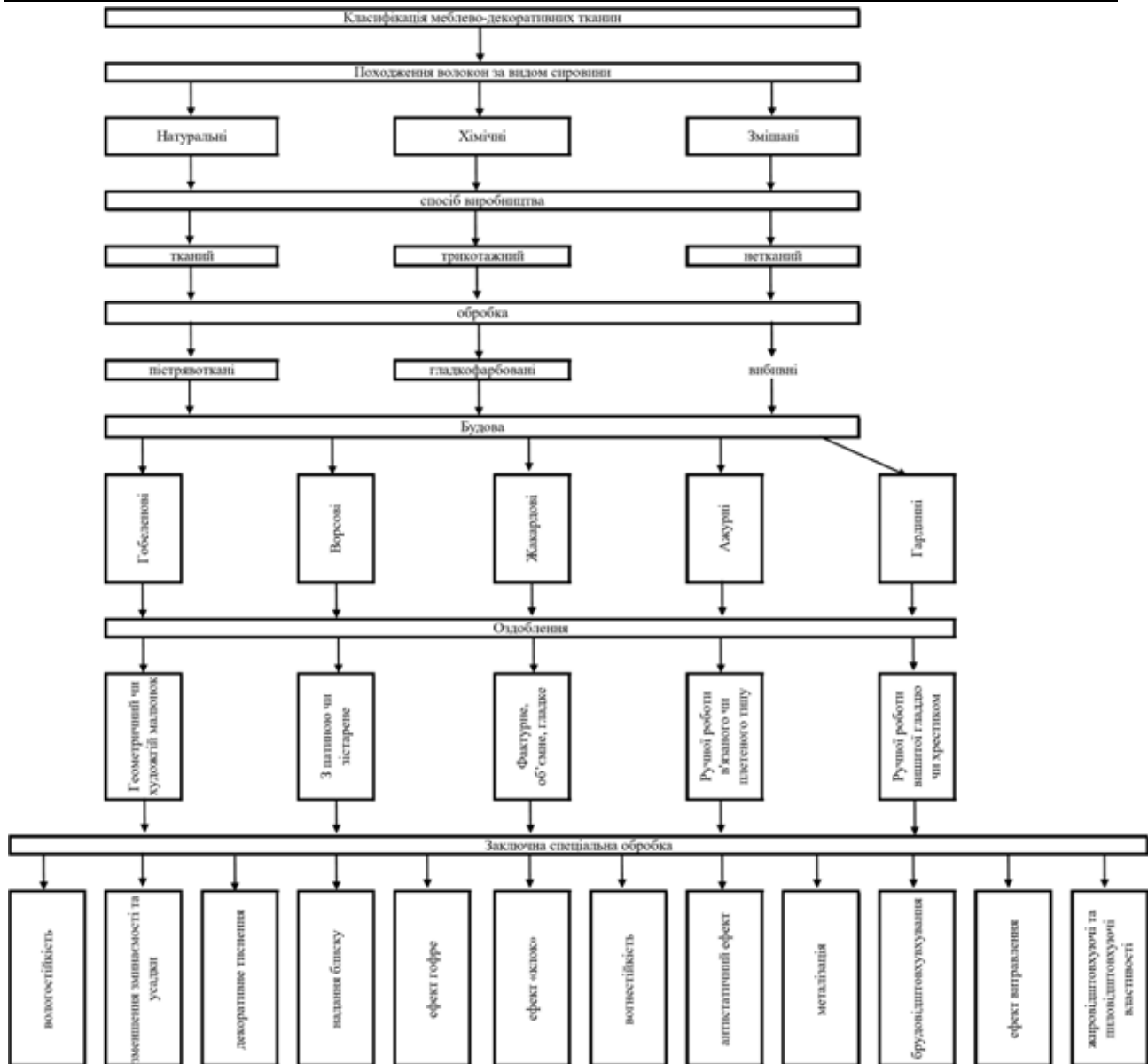


Рис. 1. Ієрархічна класифікація меблево-декоративних тканин

Меблево-декоративні тканини можуть бути однотонні або з малюнком; гладкі, фактурні або об’ємні (рис.1). Малюнок може бути пов’язаний зі структурою тканини або ж не бути пов’язаним з структурою, а бути набивним. Набивний малюнок ніби накладається на тканину. Малюнок тканини може бути геометричний і художній. Але характер малюнка має відповідати загальному характеру інтер’єру, найчастіше вибирають лаконічний, з невеликою кількістю кольорних відношень. Малюнок може бути художній або геометричний, залежно від атмосфери самого приміщення.

У промислових умовах меблево-декоративним тканинам може надаватися ефект патини та зістареності. При цьому створюється безліч приглушених фарб і м’яких переливів кольору. Заслужують уваги меблево-декоративні матеріали у вигляді гобелєнів ручної роботи, що дозволяє створювати складні малюнки. Технологія ручного плетіння (в’язання) забезпечує меблево-декоративним матеріалам особливу м’якість і витонченість, дозволяє отримати цікаві поєднання кольорів. Технологія ручної вишивки гладдю чи хрестиком забезпечує створення ажурного візерунку і є результатом майстерності, терпіння і уваги до деталей чи особливостей, може відроджувати стародавні традиції.

Заключна обробка меблево-декоративних тканин покращує зовнішній вигляд і полегшує подальшу роботу з матеріалом. Обробка тканини – це процеси хімічної (рідше – механічної) обробки тканин. При таких процесах застосовуються різні хімічні речовини, на відміну від прядильного та ткацького виробництва, де волокна піддаються тільки механічному впливу. Заключна обробка полягає в апретуванні, вирівнюванні та усуванні перекосів, у розпрямлянні ниток; проходячи через каландрові прес, тканина набуває щільність, рівність і гладкість. До заключної спеціальної обробки вдаються, коли тканини необхідно надати особливі властивості, створити особливий ефект або усунути наявні недоліки, підвищити опірність тканин при експлуатації. До заключних спеціальних видів обробки меблево-декоративних тканин відносяться такі обробки: вологостійкість, брудовідштовхування, надання антистатичного ефекту, зменшення зминаємості та усадки тощо. Також спеціальна обробка дозволяє поліпшити і відітніти

естетичні властивості полотна. Створюється декоративне тиснення, металізація, надається блиск, використовується гофре, ефект тиснення, ефект клока, ефект блиску чи лакування тощо (рис.1).

Ефект тиснення отримують, коли просочену смолами тканину у промислових умовах пропускають через розігріті каландри з гравіюванням, видавлюючи візерунок, а потім піддають термообробці, утворюється плівка смоли яка міцно фіксує візерунок. Металізація полягає в нанесенні на поверхню тонкого шару металу, серед яких можуть бути навіть дорогоцінні: золото та срібло. Додаткова обробка меблево-декоративних тканин свідчить про використання захисних просочень, найбільш поширеними з яких є тефлон і скотчгард; тканина, оброблена цими складами міцніша і проста в догляді, так як набуває пило-водо-і жировідштовхуючі властивості.

Межі застосування декоративно-меблевих тканин постійно розширюються. Наразі існують різні підходи до класифікації декоративно-меблевих тканин, тому для подальшого розвитку його виробництва, більш глибокого вивчення властивостей матеріалів та уніфікації робіт з оцінки якості цієї продукції важливою є наявність чіткої класифікації.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Незважаючи на зростаючий попит на продукцію декоративно-меблевих тканин та постійне розширення асортименту, в текстильній галузі немає єдиної думки щодо створення та впорядкування її класифікації в Україні та у світі. Запропонована авторами класифікація декоративно-меблевих тканин здатна укомплектувати та покращити інформативний ринок, усунути технологічні та маркетингові бар'єри при виробництві, реалізації та споживанні готової продукції.

Література

1. Олійник Г.С. Дослідження властивостей декоративно-меблевих тканин /Г.С. Олійник//Вісник Хмельницького національного університету, серія: технічні науки. – 2012. – № 2. – С.96-100. URL: <http://elar.khmnu.edu.ua/jspui/handle/123456789/151/> (дата звернення 01.05.2023).
2. Олійник Г.С. Дослідження ринку меблевих тканин./Г.С. Олійник//Вісник Хмельницького національного університету, серія: технічні науки. – 2011. – № 3. – С.137-141.URL: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewiTitLHW6JT_AhX4hf0NHVpBBc8QFnoECAwQAQ&url=http%3A%2F%2Fjournals.khnu.km.ua%2Fvestnik%2Fpdf%2Ftech%2F2011_2%2F24_oli.pdf&usq=AOvVaw1EDTzOOyEJphwFs0o_Pg6q/ (дата звернення 02.05.2023).
3. Олійник Г.С. Декоративно- меблеві тканин: формування асортименту./Г.С. Олійник//Вісник Хмельницького національного університету, серія: технічні науки. – 2011. – № 2. – С.86-88.
4. Пушкар Г.О. Класифікація і характеристика функціональних властивостей інтер'єрного текстилю. /Г.О. Пушкар, Б.Д. Семак// Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. –2013. – №5 (73). – С.124-132.
5. Пушкар Г.О. Інтер'єрний текстиль: формування вітчизняного ринку та шляхів оптимізації асортименту./ Г.О. Пушкар, Б.Д.Семак/ Ефективна економіка. – 2010. URL:<http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=166/> (дата звернення 02.05.2023).
6. Пахолук О.В. Текстильна нанопродукція України: сучасний стан та особливості експертизи. /О.В. Пахолук, Г.О. Пушкар, Г.С.Галик, Б.Д.Семак// Вісник Хмельницького національного університету, серія: технічні науки. – 2020. – №4. – С.233-238.
7. Мартиросян І.А. Вплив нової тіо сульфатної антимікробної обробки на стійкість текстильних матеріалів./ І.А. Мартиросян, О.В. Бочарова, О.В. Пахолук // Вісник Хмельницького національного університету, серія: технічні науки. – 2020. – №1. – С.158-162.
8. Бабич А.І. Інновації в дизайні виробів індустрії моди, не типові матеріали та технології їх виготовлення./ А. І. Бабич, В. П. Кернеш, П.В. Білоус //Вісник Хмельницького національного університету, серія: технічні науки. – 2021. – №6. – С.229-234.
9. Кулешова С.Г. Інноваційні технології декорування виробів легкої промисловості./С.Г. Кулешова, Ю.В. Кошево, Д.Л. Найчук //Вісник Хмельницького національного університету, серія: технічні науки. – 2022.– №4. – С.125-132.
10. M. Mathur. Textiles in home furnishing. /M. Mathur, Mannisha Anoop Hira//Veermata JiJabai Technological Institute V. – 2002. URL: https://www.researchgate.net/publication/294216014_Textiles_in_home_furnishing/ (дата звернення 06.05.2023).
11. D. Franke. Furnishings and the Indoor Environment./D. Franke, Coleen M. Northeim// The Journal of The Textile Institute 85(4):496-504. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00405009408631296/> (дата звернення 06.05.2023). DOI:[10.1080/00405009408631296](https://doi.org/10.1080/00405009408631296)
12. Muhammad Babar Ramzan. Fibers for Geotextiles// Muhammad Babar Ramzan, Salman Naem, Ali Raza Fibers for Technical Textiles , 2020, pp.129-149. URL:https://www.researchgate.net/publication/343790573_Fibers_for_Geotextiles/ (дата звернення 06.05.2023). DOI:[10.1007/978-3-030-49224-3_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-49224-3_7)

13. Український класифікатор товарів зовнішньоекономічної діяльності (УКТЗЕД). URL: <http://broker-service.com.ua/htmlPages/313/menuid/103/> (дата звернення 07.05.2023).
14. Товарознавство непродовольчих товарів: підруч. / [Войнаш Л. Г., Дудла І. О., Козьмич Д. І., Павловська Н. В., Приходько М. В.]. – К.: НМЦ "Укоопосвіта", 2004. – 436 с.
15. Михайлов В. І. Непродовольчі товари: підруч./ Михайлов В. І., Глушкова Т. Г., Зельніченко О. І. – К.: Книга, 2005. – 556 с.
16. Чурсіна Л. Класифікація технічного текстилю. / Л. Чурсіна, О. Горач//Товари і ринки. – 2018. – №2. – С.57-69.

References

1. Olijnyk H.S. Study of the properties of decorative and furniture fabrics / H.S. Olijnyk//Bulletin of the Khmelnytskyi National University, series: technical sciences. – 2012. – No. 2. – P.96-100. URL: <http://elar.khmn.edu.ua/jspui/handle/123456789/151/> (date of application 01/05/2023).
2. Olijnyk H.S. Furniture fabric market research. /H.S. Olijnyk//Bulletin of the Khmelnytskyi National University, series: technical sciences. – 2011. – No. 3. – P.137-141. URL: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewiTiLHW6JT_AhX4hf0HHVpBBc8QFnoECAwQAQ&url=http%3A%2F%2Fjournals.khnu.km.ua%2Fvestnik%2Fpdf%2Ftech%2F2011_2%2F24_oli.pdf&usq=AOvVaw1EDTzOOyEJphwFs0o_Pg6q// (date of application 02/05/2023).
3. Olijnyk H.S. Decorative and furniture fabrics: assortment formation. /H.S. Olijnyk//Bulletin of the Khmelnytskyi National University, series: technical sciences. – 2011. – No. 2. – P.86-88.
4. Pushkar G.O. Classification and characteristics of functional properties of interior textiles. /H.O. Pushkar, B.D. Semak// Bulletin of Kyiv National University of Technology and Design. -2013. – No. 5 (73). - P.124-132.
5. Pushkar G.O. Interior textiles: formation of the domestic market and ways to optimize the assortment. /G.O. Pushkar, B.D. Semak/ Effective economy. - 2010. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=166/> (date of application 02/05/2023).
6. Pakholiuk O.V. Textile nanoproduction of Ukraine: current state and features of expertise. /O.V. Pakholiuk, G.O. Pushkar, G.S. Halyk, B.D. Semak // Bulletin of the Khmelnytskyi National University, series: technical sciences. – 2020. – No. 4. - P.233-238.
7. Martirosyan I.A. The effect of a new thio sulfate antimicrobial treatment on the durability of textile materials. /I.A. Martirosyan, O.V. Bocharova, O.V. Pakholiuk // Bulletin of the Khmelnytskyi National University, series: technical sciences. – 2020. – No. 1. - P.158-162.
8. Babich A.I. Innovations in the design of products of the fashion industry, non-typical materials and technologies of their production. /A. I. Babych, V. P. Kernesh, P.V. Bilous // Bulletin of the Khmelnytskyi National University, series: technical sciences. – 2021. – No. 6. - P.229-234.
9. Kuleshova S.G. Innovative technologies for decorating products of light industry. /S.G. Kuleshova, Yu.V. Koshevko, D.L. Naichuk // Bulletin of the Khmelnytskyi National University, series: technical sciences. – 2022. – No. 4. - P.125-132.
10. M. Mathur. Textiles in home furnishing. /M. Mathur, Mannisha Anoop Hira//Veer mata JiJabai Technological Institute V. – 2002. URL: https://www.researchgate.net/publication/294216014_Textiles_in_home_furnishing/ (date of application 06/05/2023).
11. D. Franke. Furnishings and the Indoor Environment./D. Franke, Coleen M. Norheim// The Journal of The Textile Institute 85(4):496-504. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00405009408631296/> (date of application 06/05/2023). DOI: [10.1080/00405009408631296](https://doi.org/10.1080/00405009408631296)
12. Muhammad Babar Ramzan. Fibers for Geotextiles// Muhammad Babar Ramzan, Salman Naeem, Ali Raza Fibers for Technical Textiles, 2020, pp.129-149. URL: https://www.researchgate.net/publication/343790573_Fibers_for_Geotextiles/ (date of application 06/05/2023). DOI: [10.1007/978-3-030-49224-3_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-49224-3_7)
13. Ukrainian classifier of goods of foreign economic activity (UKTZED). URL: <http://broker-service.com.ua/htmlPages/313/menuid/103/> (date of application 07/05/2023).
14. Commodity science of non-food products: tutorial. / [L. G. Voynash, I. O. Dudla, D. I. Kozmych, N. V. Pavlovskaya, M. V. Prykhodko]. - K.: NMC "Ukooposvita", 2004. - 436 p.
15. Mykhaylov V. I. Non-food products: textbook / Mykhaylov V. I., Glushkova T. G., Zelnichenko O. I. - K.: Book, 2005. - 556 p.
16. Chursina L. Classification of technical textiles. / L. Chursina, O. Horach//Goods and markets. – 2018. – No. 2. - P.57-69.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-321-3-367-375
УДК 629.3: 620.19-048.38

МАКАРЕНКО ВАЛЕРІЙ

Херсонський національний технічний університет
<https://ORCID.org/0000-0001-9178-9657>

МЄШКОВ ЮРІЙ

Херсонський національний технічний університет
<https://ORCID.org/0000-0002-2506-7020>

СЕЛІВЕРСТОВ ІГОР

Херсонський національний технічний університет
<https://ORCID.org/0009-0009-6135-8165>

ЛАЗОРИК ВЛАДИСЛАВ

Херсонський національний технічний університет

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ КОРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ ТРУБОПРОВОДІВ

Дослідженнями встановлена закономірність корозійної стійкості вуглецевих трубних сталей в умовах агресивних середовищ підприємств, яка визначається, в основному, вмістом і типом (складом) неметалевих включень в сталі. Показано, що корозійна стійкість трубних сталей тривалого терміну експлуатації залежить як від кількості неметалевих включень, так і від їх складу. Встановлено, що найбільш корозійно небезпечні в трубних сталях виявились кальцієві силікати та марганецьмісні сульфідні. Показано, що для забезпечення високої корозійно-механічної стійкості трубних сталей і подовження експлуатаційного безаварійного (проектного) ресурсу потрібно максимально знизити вміст НВ і очистити сталь від КАНВ, що досягається металургійним шляхом при виплавці і позапичній обробці трубних сталей. Із використанням математичного апарату дислокаційної теорії міцності розрахована енергія, необхідна для зародження мікротріщини в присутності каталізатора – водню, причому при швидкості росту мікротріщини $v_{p,mp} = 10^{-2}$ мм/с рухомості атомів водню в інтервалі температур +40...-30 °С цілком достатньо (коефіцієнт дифузії $DH \approx 10^{-4} \dots 10^{-6}$ см²/с), щоб підсилувати корозійний розвиток тріщини в металі. Багаторічні дослідження аварійно-зруйнованих трубопроводів свідчать про те, що переважно місцями зародження дефектів будь-якого виду є зони листового прокату або зварних швів з аномально високою густиною неметалевих включень. У зв'язку з цим при виробництві листового прокату необхідно приділяти особливу увагу очистці сталі і модифікуванню неметалевих включень. Обробка сталі силікокальцієм чи РЗМ сприятиме глобулярності сульфідних НВ і підвищуватиме спротив проти руйнування резервуарів. Діючі нормативні документи (ТУ, стандарти) на виробництво листової сталі ці вимоги не регламентують.

Ключові слова: транспорт, корозія, труби, руйнування, напруження, мікротріщини, дифузія, дислокаційної теорії

MAKARENKO VALERIY, MESSHKOV YURII, SELIVERSTOV IGOR, LAZORIK VLADISLAV
Kherson National Technical University

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE WAYS OF INCREASING THE CORROSION RESISTANCE OF STEEL PIPELINES

Research has established the regularity of corrosion resistance of carbon pipe steels in the conditions of aggressive environments of enterprises, which is mainly determined by the content and type (composition) of non-metallic inclusions in steel. It is shown that the corrosion resistance of pipe steels with a long service life depends on both the number of non-metallic inclusions and their composition. It was established that calcium silicates and manganese-containing sulfides were the most corrosively dangerous in pipe steels. It is shown that in order to ensure high corrosion-mechanical resistance of pipe steels and to extend the operational accident-free (design) resource, it is necessary to reduce the content of ferrous metals as much as possible and to clean the steel from ferrous metals, which is achieved by metallurgical methods during smelting and out-of-furnace processing of pipe steels. With the use of the mathematical apparatus of the dislocation theory of strength, the energy required for the nucleation of a microcrack in the presence of a catalyst - hydrogen was calculated, and at the microcrack growth rate $v_{p,mp} = 10^{-2}$ mm/s, the mobility of hydrogen atoms in the temperature range +40...-30 °C is quite sufficient (diffusion coefficient $DH \approx 10^{-4} \dots 10^{-6}$ cm²/s) to enhance the corrosion development of a crack in the metal. Long-term studies of accident-destroyed pipelines indicate that the places where defects of any kind originate are mainly the areas of sheet metal or welds with an abnormally high density of non-metallic inclusions. In this regard, special attention must be paid to steel cleaning and modification of non-metallic inclusions during the production of rolled products. Treatment of steel with silico-calcium or RZM will contribute to the globularity of sulphide NPs and increase the resistance against the destruction of reservoirs. Current regulatory documents (TU, standards) for the production of sheet steel do not regulate these requirements.

Key words: transport, corrosion, pipes, destruction, stresses, microcracks, diffusion, dislocation theory

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Відомо [1-14], що більшість зварних трубопроводів для постачання води транспортним підприємствам, а також відводу побутових і промислових стоків побудовані ще в часи бувшого СРСР і знаходяться в стадії природнього і температурно-деформаційного старіння та інтенсифікації відмов. Аналіз технічного стану трубопроводних мереж транспортних підприємств свідчить про те що 40% з них в експлуатації знаходяться більше 40 років, а близько 20% експлуатуються більше 50 років. Крім того, 10% знаходиться в експлуатації більше 60 років.

Аналіз досліджень та публікацій

Важливість проблеми дослідження корозійно-механічної стійкості сталевих трубопроводів, які тривалий термін часу експлуатуються в умовах контакту з агресивним середовищем, обумовлена великим розміром втрат від корозії, які вже зараз стали майже рівні витратам на розвиток цілої галузі автомобільної промисловості [3-7]. Крім того, з ростом корозійних втрат стає все більш очевидним, що великі витрати на продовження терміну служби виробленого металу, який був і залишається основним конструкційним матеріалом в промисловості, зокрема будівництві трубопровідних конструкцій на транспортних підприємствах.

Досвід експлуатації трубопроводів різного призначення на протязі тривалого терміну часу свідчить, що можливе як дострокове вичерпання проектного ресурсу (20 років), яке проявляється в руйнуванні трубопроводів, так і безаварійна робота об'єктів по закінченню встановлених (проектних) термінів експлуатації. Таким чином, проблема корозійно-механічної стійкості та впливу на неї різних чинників, зокрема неметалевих включень, вельми актуальна та вимагає детального дослідження.

Формулювання цілей статті

Метою роботи являється вивчення закономірностей корозійної стійкості вуглецевих трубних сталей в умовах агресивних середовищ підприємств, яка визначається, в основному, вмістом і типом (складом) неметалевих включень в сталі.

Виклад основного матеріалу

Життєвий цикл трубопровідних конструкцій включає наступні стадії – конструювання, виготовлення, експлуатацію та реновацію.

На рисунку 1 представлена залежність питомого показника інтенсивності відмов та несанкціонованих зупинок від терміну експлуатації трубопроводів. Інтенсивність відмов – це відношення числа відмовних об'єктів в одиницю часу до середнього числа об'єктів, які продовжують справно працювати в даний інтервал часу:

$$\lambda = [\Delta n(\Delta t) / N(t) \cdot \Delta t], \quad (1)$$

де $\Delta n(\Delta t)$ – число відмов об'єктів за проміжок часу від $(t - \Delta t/2)$ – до $(t + \Delta t/2)$;

$$N(t) = (N_{i+1} + N_i) / 2, \quad (2)$$

N_{i+1} – число справно працюючих об'єктів на початку інтервалу часу Δt ,

N_i – число справно працюючих об'єктів в кінці інтервалу часу Δt [11].

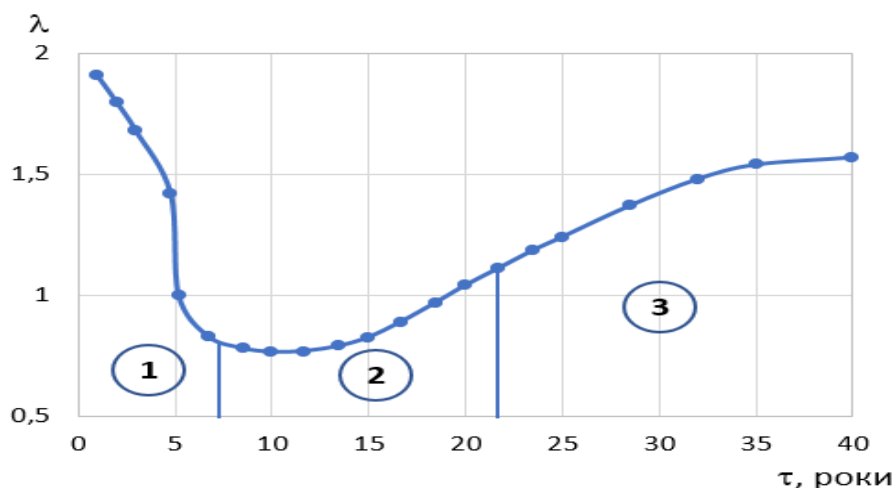


Рис. 1. Залежність питомого показника інтенсивності відмов λ від терміну експлуатації трубопроводу τ

Аналіз наведених на рисунку 1 даних вказує на три характерні періоди:

I - прилаштування, як період рівних відмов при зменшенні їх інтенсивності, коли виявляються недоліки проектування і будівельно-монтажних робіт;

II - нормальна робота з відмовами переважно випадкового характеру;

III - вікова інтенсивність відмов.

Така закономірність інтенсифікації відмов пов'язана з посиленням деградаційних процесів старіння конструкційного матеріалу трубопроводів і корозії, перш за все корозії під напруженням (КРН) та локальних видів, зокрема, пітингів тощо.

Хімічний склад корозійних відкладень на поверхні сталевого трубопроводу виконували за допомогою рентгенівського дифрактометра моделі “ДРОН-3”, а також оптичного мікроскопу “ММ-6” фірми “Leitz” (Німеччина) [1; 2]. Механічні випробування зразків, вирізаних з металу експлуатованого резервуару, проводили відповідно стандартних методик [10]. Хімічний склад і механічні властивості наведені в таблицях 1 і 2.

Таблиця 1

Хімічний склад резервуарної сталі ВСтЗсп (ДСТУ 2651: 2005)

| Вміст хімічних елементів | | | | | | | |
|--------------------------|----------|----------|------|------|-----|-----|-----|
| C | Mn | Si | S | P | Cr | Ni | Cu |
| 0,14-0,22 | 0,4-0,65 | 0,12-0,3 | 0,05 | 0,04 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| не більше | | | | | | | |

Таблиця 2

Механічні властивості сталі ВСтЗсп (ДСТУ 2651: 2005)

| Товщина листа, мм | σ_b , МПа | σ_t , МПа | δ , % | КСУ, Дж/см ² , при температурі, °С | | |
|-------------------|------------------|------------------|--------------|---|-----|-----|
| | | | | +20 | -20 | -40 |
| до 20 | 370-480 | 245 | 26 | 69 | 29 | 28 |

Як показали додаткові дослідження, основні елементи дослідної сталі марки ВСтЗсп відповідали вимогам ДСТУ 2651: 2005. Відхилення від норми виявили тільки для сірки (в два-чотири рази). В подальших металографічних дослідженнях було виявлено неоднорідність розподілу легуючих елементів, зокрема кремнію і марганцю. Відомо [3-7,8;9], що хімічний склад, який відповідальний за формування структури, може значно впливати на схильність сталі до корозійних уражень і руйнувань. Так, сірка, марганець і кремній в конструкційних сталях можуть не тільки розчиняться в матриці, але і приймати участь в утворенні неметалевих включень. Корозійна стійкість сталей, як відмічають автори [6-9], визначається хімічним складом завжди присутніх сульфідних, оксидних і силікатних включень. Згідно рекомендацій наукової роботи, види неметалевих включень і ступінь забрудненості дослідної сталі визначали на нетравлених шліфах відповідно ДСТУ4046: 2001. Встановлено, що в нормалізованій сталі ВСтЗсп присутні наступні види неметалевих включень (рис. 2):

- а) оксиди точкові з балом 3-4;
- б) сульфідні стрічкові виду з балом 4-5;
- в) силікатні пластичні з балом 4-5;
- г) силікатні, які важко піддаються деформації, з балом 2-3.

Важливо відмітити, що сильна забрудненість неметалевими включеннями зафіксована в сталі тільки поблизу осередків руйнувань та корозійних локальних ушкоджень у вигляді пітінгів, що відповідало балу 2-3.

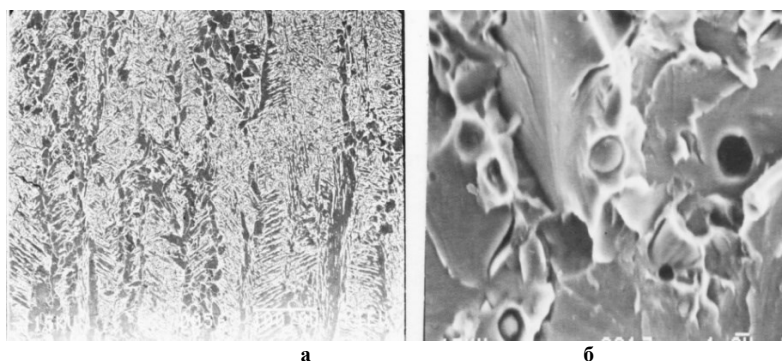


Рис. 2. Неметалеві включення в основному металі резервуарів:
а – силікати пластичні; б – силікати недеформовані; а – $\times 100$; б – $\times 3000$

Як показали обстеження тривало експлуатованих аварійних трубопроводів (більше 10-20 років) безпосередньо на промислових ділянках транспортних підприємств, антикорозійна ізоляція в місцях аварій трубопроводів мала численні ушкодження, що сприяло протіканню хімічної адсорбції хімічно-активних елементів (сірки, водню, кисню та ін.).

Враховуючи електрохімічну гетерогенність поверхні сталі з неметалевими включеннями в поєднанні з наявними зовнішніми навантаженнями і внутрішніми напруженнями, можна зробити висновок про підвищену корозійне пошкодження внутрішніх стінок трубопроводів з подальшим їх руйнуванням.

Відомо [8; 9], що неметалеві включення слугують катодами по відношенню до металевої матриці, що в підсумку і приводить до електрохімічного розчинення металу навколо включень при дії агресивної суміші як електроліту.

Аналогічну металографічну картину спостерігаємо при дослідженні корозійно-механічних руйнувань зварних з'єднань трубопроводів тривалої експлуатації (рис. 3).

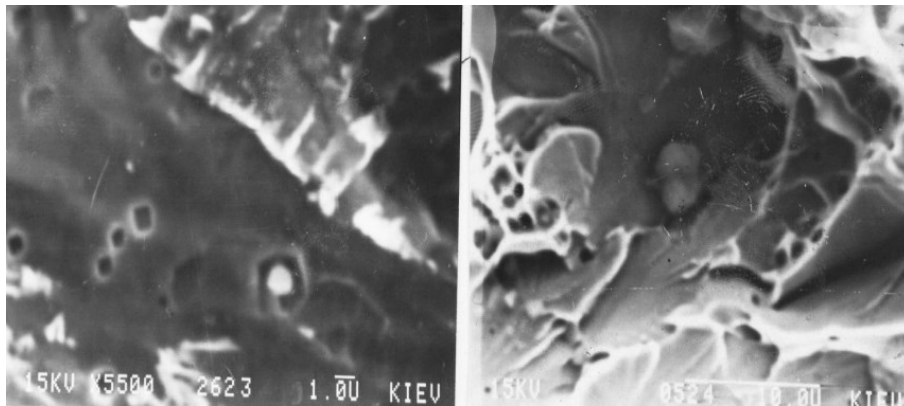


Рис. 3. Неметалеві включення в зоні зварного кореневого шва монтажного стику резервуарів: а – оксиди на границях зерен; б – порожнини навколо оксидних включень; а – $\times 2000$; б – $\times 3500$

Мікроструктура руйнування зварних швів резервуарів показана на рисунку 4. Із наведеного рисунку видно, що мікротріщини зароджуються, переважно, від неметалевих включень – сульфідів, оксидів і силікатів Fe і Mn, а їх ріст і розповсюдження відбувається по границях зерен (рис. 4.4, а, г).

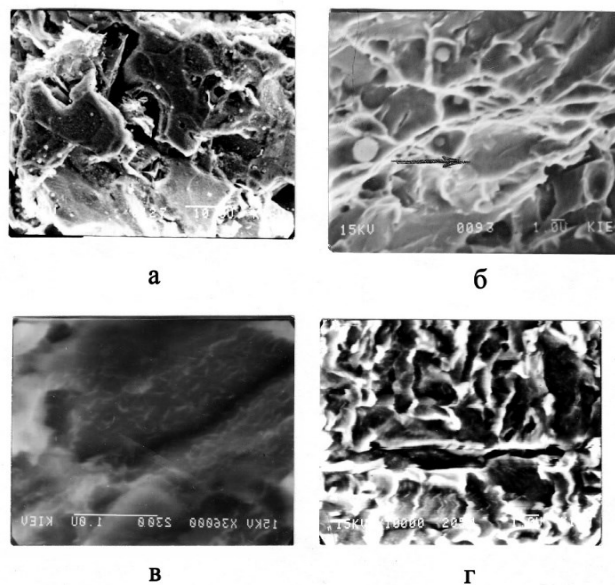
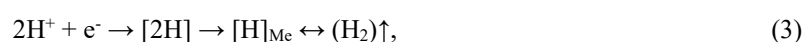


Рис. 4. Мікрокартина руйнування зварного шва на трубній сталі VСт3сп; а; б – джерела зародження мікротріщини знаходяться поблизу неметалевих включень (оксидів і силікатів Mn і Ti); в; г – картина утворення мікротріщин і їх розповсюдження на границях зерен; а, б – $\times 3000$; в – $\times 4500$; г – $\times 2500$

Таким чином, вищенаведені результати експериментальних досліджень дають можливість запропонувати концепцію процесу знеміцнення з подальшим корозійно-механічним руйнуванням металу в умовах тривалої експлуатації трубних конструкцій. В цілому механізм корозійного руйнування металу, який містить корозійно-активні неметалеві включення, і в якому приймає безпосередню участь дифузійно-активний водень, на наш погляд, полягає в наступному.

Атомарний водень може проникати в метал раніш, ніж утворюються молекули. Умовою для цього, крім малого радіуса атома водню, може бути наявність неметалевих включень, які слугують колекторами водню і місцями його інтенсивного проникнення в метал. Причому механізм ініційованого воднем зародження мікротріщини і її подальший ріст передбачає послідовний ряд наступних окремих процесів:

- розряд іонів водню на поверхні тіла зерна (неметалевих включень, фаз впроваджень, дислокаційних пасток, блоків і ін.) в результаті катодної реакції



де $[H]_{Me}$ – концентрація розчиненого атомарного водню в металі; (H_2) – його концентрація в газовій фазі;

- проникнення і транспортування (за дифузійним чи дислокаційним механізмом) атомів водню в області з підвищеною концентрацією напружень, тобто до межі “неметалева включення (КАНВ) – матриця”, тобто до вершини зародження мікротріщини;

- полегшене підростання мікротріщини в місці безпосереднього контакту “НВ – матриця” за рахунок обумовленого воднем зниження пластичності наводненої межі розмежування.

Перш за все слід враховувати, що на межі пластичної фази – металу і крихкої фази – силікатне чи оксидне НВ завжди присутні концентратори напружень [3-7]. Вони сприяють розриву міжатомних зв'язків між матрицею і НВ в місці взаємодії рухомих дислокацій чи дислокаційних кластерів, які завжди присутні в структурі металу з недеформованими НВ, в результаті чого утворюються зародки субмікротріщини (розрив зав'язків на рівні кристалографічних зв'язків на границях контакту зерен металу і НВ). Далі на процес підростання субмікротріщини в мікротріщини починає впливати водень, який під дією напружень і енергетичного стану звільнюється від дислокацій, хемосорбується на ювенільних поверхнях зародженої мікротріщини з утворенням шару позитивних (H^+) і негативних (H^-) іонів водню. Локалізація водню на поверхні і в гострих вершинах мікротріщин суттєво полегшує подальший розрив максимально напружених міжатомних зв'язків (рис. 5). Крім того, цій стадії процесу підростання і розшарування металу сприяє атомарний водень, який розміщений на околицях мікротріщини і який в свою чергу окрихчує прилеглі області і знижує їх спротив розшаруванню.

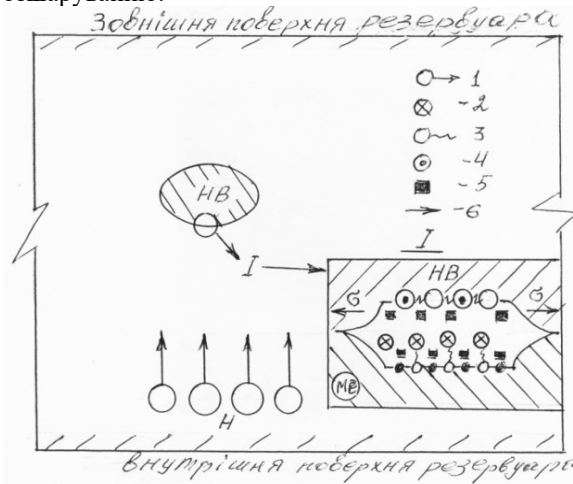


Рис. 5. Модель зародження мікротріщини на межі “неметалева включення-матриця металу” з участю водню: 1 – атоми водню; 2 – молекулярний водень; 3 – розірваний зв'язок між кристалічною ґраткою заліза і неметалевим включенням; 4 – атоми заліза; 5 – адсорбційні атоми водню; 6 – площа розщеплення; σ – внутрішні напруження, спричинені наводненням навколишніх областей неметалевого включення

Слід відмітити, що на ці процеси здійснює вплив і вміст сірки, яка, уповільнюючи рекомбінацію атомів водню, підвищує ефективну концентрацію водню який поглинається металом і знижує тріщиностійкість в зоні максимальних двовісних напружень. Основна роль включень силікатів типу SiO_2 , Al_2O_3 і сульфідів типу MnS зводиться до утворення порожнин на межі розділу “матриця–включення”, які слугують колекторами молізованого водню. При цьому важливе значення має природа включення – крихкі силікати, глинозем і гідриди руйнуються в процесі термомеханічної обробки листового прокату (при виготовленні і термічній обробці штрипсів), збільшуючи чисельність “пасток”, тоді як пластичні сульфідні включення типу FeS і MnS здатні деформуватися без порушення межі розділу.

Встановлено [2; 10], що при позитивних температурах водневій “атмосфері” можуть легко переміщуватися в об'ємі металу за допомогою дислокацій, які їх захоплюють при русі до поверхні кристалів.

Таблиця 3

Коефіцієнти дифузії вуглецю і водню в α -Fe

| $t, ^\circ C$ | $+20, ^\circ C$ |
|---------------|---|
| H | $1.5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{c}$ |
| C | $2 \cdot 10^{-17} \text{ cm}^2/\text{c}$ |

Відомо [1;3;6;7;10], що мікротріщини утворюють атомарно-чисті поверхні, на яких водень, звільнений з дислокацій, хемосорбується. Термодинамічними розрахунками з використанням рівняння Гіббса показано, що адсорбція водню різко знижує поверхневу енергію, особливо при малих його концентраціях на поверхні (приблизно на $6,0-7,5 \text{ Дж}/\text{cm}^2$ [8]). Коли врахувати фактичні затрати енергії на руйнування заліза ($\approx 10-20 \text{ Дж}/\text{cm}^2$), то ця зміна буде вельми чутлива.

Крім того, зародженню субмікротріщини на околиці зіткнення дислокацій сприяють напруження, які на відстані 1 мкм від ядра дислокацій рівні (для гвинтової дислокації по закону Гука [2]):

$$\tau_{\theta\chi} = (G_{Fe} \cdot b) / 2\pi r = (0.8 \cdot 10^{12} \cdot 2.5 \cdot 10^{-8}) / 2\pi \cdot 10^{-4} = 0.32 \cdot 10^8 \text{ дін/см}^2 = 3,2 \text{ Н/мм}^2; \quad (4)$$

де $G_{Fe} = 0,8 \cdot 10^8 \text{ дін/см}^2$ – модуль пружності заліза;

$b = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ – вектор Б'юргерса;

$r = 1 \text{ мкм} = 10^{-4} \text{ см}$ – відстань до ядра дислокацій;

θ і χ – координати циліндричної системи, у якій вісь χ направлена уздовж ліній дислокацій.

Відповідно до цієї формули, напруження зменшуються обернено пропорційно відстані від ядра дислокацій.

Величина $b/2\pi = J_{\theta\chi}$ – відносний зсув. Повна енергія пружної деформації гвинтової дислокації на одиницю її довжини рівна:

$V_{\text{гвинт}} = (G \cdot b^2) / 4\pi \cdot \ln(R/V_0) = \{0.5 \cdot 10^{12} \cdot (3 \cdot 10^{-8})^2\} / 4\pi \cdot \ln(1/5 \cdot 10^{-8}) = 6 \cdot 10^{-4} \text{ ерг/см}^2 = 18 \cdot 10^2 \text{ ерг/міжатомна}$
відстань $= 12.5 \cdot 10^7 \text{ еВ/см} \approx 4 \text{ еВ/міжатомна відстань}$.

Цієї енергії достатньо для зародження мікротріщин в присутності каталізатора – водню [7].

Розрахунок ефективної маси дислокацій, віднесена до одиниці її довжини (для гвинтової дислокації) показав наступне:

$$m_{\text{еф}} = (b^2 \cdot \gamma) / 2 = \{ (2.5 \cdot 10^{-8})^2 \cdot 7.85 \} / 2 = 2.45 \cdot 10^{-15} \text{ г/см}, \quad (5)$$

де $\gamma = 7.85 \text{ г/см}^3$ – густина металу. Так як в 1 см довжини дислокації уміщується $1/(2.5 \cdot 10^{-8})$ міжатомних відстаней ($\alpha = 2,5 \text{ \AA} = 25 \cdot 10^{-8} \text{ см}$, де \AA – ангстрем), тоді:

$m_{\text{еф}} = (2.45 \cdot 10^{-15}) / (1/2.5 \cdot 10^{-8}) = 6.1 \cdot 10^{-23} \text{ г/міжатомна відстань}$.

Маса 1 атома Fe рівна:

$$m = M / (6.02 \cdot 10^{23}) = 5.6 / (6.02 \cdot 10^{23}) = 9.3 \cdot 10^{-23} \text{ г}, \quad (6)$$

де M – атомна вага Fe, рівна 1г-атом.

Таким чином, ефективна маса дислокацій на одну міжатомну відстань приблизно рівна масі одного атому. Це свідчить про те, що робота зародження і росту тріщини, в зв'язку з високими напруженнями і рухомістю дислокацій, знижується в присутності адсорбованого на поверхні тріщин водню.

Для безперервного підростання і розповсюдження тріщин необхідна швидка дифузія атомів водню. Коли прийняти швидкість розповсюдження тріщини $v_{p,тр} = 10^{-2} \text{ мм/с}$, що порівняно зі швидкістю руху дислокацій у ферито-перлітних сталях, до яких відносяться дослідна трубна сталь марки ВСтЗсп, а коефіцієнт дифузії водню, наприклад, в α -Fe рівним $D_H \approx 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$, а в якості критерія оцінки розповсюдження мікротріщини прийняти параметр

$$\zeta^2 = 2 \cdot D_H \cdot t, \quad (7)$$

де t – час, то звідси витікає, що за визначений проміжок часу t , при $v_{p,тр} = 10^{-2} \text{ мм/с}$ рухомості атомів водню, сповна достатньо атому водню для ініціювання зародження мікротріщин в металі стінок трубопроводів (див. таблицю).

Встановлено [9], що в стінці оболонкових конструкцій (труб, резервуарів і ін.) напруження за рахунок коливання внутрішнього тиску технологічного середовища змінюються від 0,3-0,5 до 3-5 МПа і досягають максимуму 100-150 МПа, що складає 0,3-0,4 межі плинності матеріалу в залежності від товщини стінки. Під дією змінних напружень в кристалічних зернах відбувається генерація додаткових дислокацій як у феритних, так і у перлітних зернах. Рухомі дислокації розрізають цементитні пластинки, видаляючи при цьому частину атомів вуглецю. Фрагментація перлітних зерен приводить до зміни морфології цементитних пластин, в результаті чого частина цементиту, у якій частинки менше критичної величини, розчиняються, а частина роздрібнюється так, що перестає давати самостійні рентгенівські рефлекси. Крім того, атоми вуглецю, які звільнилися в результаті розпаду цементиту, накопичуються в полосах ковзання, переходять в твердий розчин, накопичуються на границях зерен і в мікротріщинах, де утворюються зародки нових карбідних частинок. Ці процеси, як правило, призводять до локального окрихчення металу резервуарів і при сприятливих умовах (при знакозмінних, циклічних навантаженнях) поблизу цих частинок утворюються мікропори, коагуляція яких може також приводити до утворення тріщин.

Аналіз викладених результатів досліджень багатьох авторів [8,9,11-14] вказує на те, що максимально негативний вплив водню на окрихчення металу спостерігається при температурах нижче кімнатної; при низьких швидкостях деформування; при напруженнях, які досягають межі плинності. Крім того, важливо відмітити, що окрихчення відбувається навіть при зверхнизькій концентрації розчиненого водню – 0,1 $\text{см}^3/100\text{г}$, що при рівномірному розподілі відповідає 1 атому водню на декілька мільйонів атомів металу [9].

В результаті іонізації металу в безпосередній близькості від вершини мікротріщини, вона корозійно заглиблюється в метал (рис. 6).

Процес утворення корозійних виразок описується наступними реакціями:



Окиснення середовища сприяє відновленню водню і його концентрації поблизу вершини, де діють максимальні тривісні напруження. Внаслідок цього проходить водневе окрихчення металу переважно в околицях вершини (гирла) тріщини, що сприяє її чисто механічному розвитку шляхом розриву міжкристалічних зав'язків в металі. Мабуть, механічний ріст тріщини полегшує і адсорбційне знеміцнення металу. Механізм реалізації у вершини тріщини фізико-хімічних процесів локальної корозії і наводнення металу поки не знайшов однозначного пояснення.

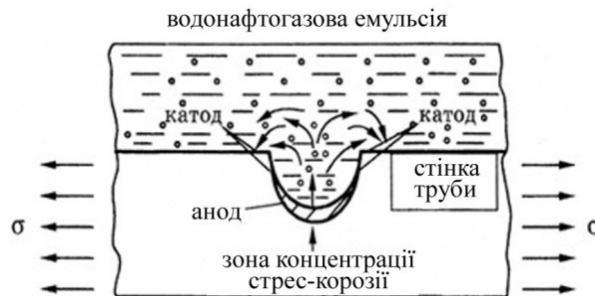


Рис. 6. Схема утворення корозійної виразки на поверхні металу внутрішньої стінки трубопроводу

Наводнення спільно з окрихченням знижують корозійний опір металу і зменшують його електродні потенціали у від'ємну сторону. Зміщення електродних потенціалів залежить від об'ємної концентрації водню, складу сталі і її структури. З ростом концентрації водню воно посилюється, причому наводнення одного з електродів спричиняє формування, так званого, водневого гальванічного елементу, електрорушійна сила якого спричинена різною об'ємною концентрацією адсорбованого водню в його електродах. Робота «водневого ГЕ», як стверджують автори [8], може прискорити розчинення наводненого електроду в сотні і навіть тисячі раз. Тому існує підґрунтя вважати, що «водневий ГЕ» грає вирішальну роль в процесі локальної корозії поверхні тріщин і наводнення їх близько розташованих об'ємів металу.

Оскільки водень постійно генерує в процесі розвитку тріщини і адсорбується металом, зменшуючи хіміко-механічний спротив матеріалу, що інтенсифікує корозійно-механічний ріст тріщин, його можна вважати автокаталізатором розширення тріщин. З іншої сторони, деформація генерує в металі дислокації, які просуваючись до поверхні, формують активні адсорбційні центри [67]. Найбільша поверхнева концентрація адсорбційних центрів, які одночасно служать центрами активної корозії (корозія починається з адсорбції на поверхні металу компонентів середовища), буде, ймовірно, у вершини тріщини. Це додатково підсилює локальну корозію і локальне адсорбційне знеміцнення металу.

Детальний аналіз результатів таких досліджень, виконаний вітчизняними і іноземними вченими, наведено в роботі [2], основні положення яких викладено в інтерпретації О. І. Радкевича і В. І. Похмурського.

Авторами роботи [9] запропонована своя концепція зародження і росту мікротріщини, яка основана на хімічній взаємодії атомарного водню з термодинамічно нестійкими неметалевими включеннями, яка приводить до утворення мікропорожнин на межі «метал-включення». При наявності готових мікропорожнин, водень, який дифундує в кристалічну ґратку металу, молізується в них з утворенням колекторів. Ця концепція щодо ролі водню в процесі корозійно-водневого і корозійно-механічного руйнування сталей, які експлуатуються тривалий час в сірководеньвмісних середовищах, дає можливість оцінити вплив легуючих елементів і мікродомішок в сталях на їх роботоздатність в агресивних умовах. Отже, згідно даної концепції водень, адсорбований на поверхні металу, дифундує до межі розділу «метал – НВ», молізується в мікропорожнинах, утворюючи колектори. Мікропорожнини на межі «метал – НВ» формуються внаслідок різниці між коефіцієнтами термічного розширення основного металу і НВ. Виключення складають сульфід РЗМ, Са, глинозем, на яких такі мікропорожнини не виникають.

Відомі з літератури гіпотези не пояснюють механізм зародження мікротріщини та її ріст; надходження водню в близько розміщені околиці тріщини і до її вершини; розповсюдження тріщини з великою швидкістю під дією прикладених напружень. Тому Кусковим Ю. М. і Макаренко В. Д. була запропонована удосконалена гіпотеза, особливості якої полягає в наступному.

Перш за все процес корозійного водневого руйнування під напруженням представимо у вигляді феноменологічної моделі, в основу якої покладені:

- адсорбційно-дислокаційна стадія зародження мікротріщини;
- стадія формування концентрації напружень у вершині мікротріщини;
- окрихчення околиць тріщини дифузійно-рухомим воднем;

г) підростання з подальшим розповсюдженням тріщини в окрихченій структурі за механізмом мікровідколу під дією внутрішніх напружень (рис. 7).

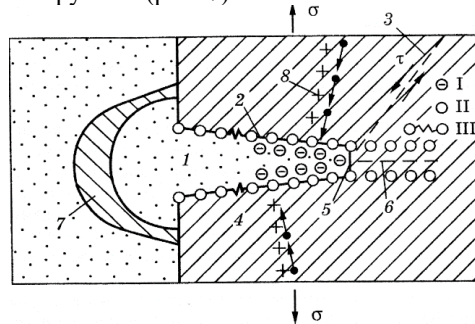


Рис. 7. Феноменологічна модель адсорбційно-дислокаційного механізму зародження і розповсюдження мікротріщини СКРН трубних сталей:

(I) абсорбція аніонів на атомах ґратки; (II) послаблює зв'язок між атомами металу в основі вершини мікротріщини (III): 1 - H_2S - вмісне корозійне середовище; 2 – адсорбовані аніони; 3 – площина зрізу (відколу); 4 – метал; 5 – послаблений в результаті адсорбції зв'язок між атомами в металі; 6 – площина розщеплення, 7 – продукти корозії; 8 – дислокації; транспортування атомів і іонів водню дислокаціями при пластичній деформації металу трубопроводу

На першій стадії відбувається утворення атомів і іонів (H^+ і H^-) водню в результаті проходження анодно-катодних реакцій взаємодії хімічно-активного середовища з поверхнею металу. При цьому утворені атоми і іони водню адсорбуються на атомах Fe в окремих активно-адсорбційних місцях, а утворені продукти корозії, наприклад, сульфід чи оксиди виділяються у вигляді бугорків, в результаті чого створюється макрогоальванічний елемент катод (сульфід заліза) і анод (поверхня мікрОВИРАЗКИ металу).

Хемоадсорбований водень створює на поверхні субмікрОВИРАЗКИ (сама початкова стадія зародження субмікротріщини) шар від'ємних іонів водню (H^-). Локалізація від'ємного заряду на берегах і у вершині ідеально гострої зародженої мікротріщини значно полегшує і енергетично сприяє розриву максимально напружених міжатомних зв'язків в кристалічній ґратці металу.

Одночасно з першою стадією відбувається доставка атомів і іонів водню, завдяки дислокаціям в околицях утвореної мікротріщини і особливо до її вершини, в результаті чого підвищується інтенсивність напружень, що в подальшому приводить до послаблення міжатомних зв'язків в структурі при реалізації руйнування по механізму мікрОВИДКОЛУ.

Отже, спочатку зароджена на поверхні контакту “середовище – метал” мікротріщина розвивається в глибину металу переважно внаслідок локальної корозії її вершини. Подальший її розвиток проходить в окрихченій воднем області по відомому механізму мікрОВИДКОЛУ, причому запас енергії, який зосереджений в полі дислокацій (чи їх кластерів), і водень, перенесений ними, полегшують перехід зародженої мікротріщини до автокаталітичної в полі пружних напружень. Для заповнення адсорбційного шару на поверхнях зародженої мікротріщини необхідна порівняно невелика кількість атомів водню, яка приблизно дорівнює кількості поверхневих атомів Fe. Це створює умову крихкого росту і розповсюдження тріщини навіть при зверх низьких концентраціях водню по механізму мікрОВИДКОЛУ, коли не потрібні великі напруження.

Таким чином, характер корозійного процесу вуглецевих сталей визначається їх структурним складом і наявністю в структурі НВ, які спричиняють загострення локалізації корозійного процесу і приводять (в залежності від рН, температури, хімічного складу води, концентрації в ній розчиненого кисню) до розвитку пітингів, корозійних виразок чи корозійно-механічного руйнування.

Забезпечивши на стадії виплавки та термічних обробок і переробки високу чистоту сталей по НВ, можна досягти суттєвого збільшення стійкості резервуарних сталей проти локальної корозії, що неминуче приведе до росту безаварійної експлуатації сталевих конструкцій в 5-10 раз.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Дослідженнями встановлена закономірність корозійної стійкості вуглецевих трубних сталей в умовах агресивних середовищ підприємств, яка визначається, в основному, вмістом і типом (складом) неметалевих включень в сталі.

2. Показано, що корозійна стійкість трубних сталей тривалого терміну експлуатації залежить як від кількості неметалевих включень, так і від їх складу. Встановлено, що найбільш корозійно небезпечні в трубних сталях виявились кальцієві силікати та марганцевмісні сульфідні.

3. Показано, що для забезпечення високої корозійно-механічної стійкості трубних сталей і подовження експлуатаційного безаварійного (проектного) ресурсу потрібно максимально знизити вміст НВ і очистити сталь від КАНВ, що досягається металургійним шляхом при виплавці і позапічній обробці трубних сталей.

4. Із використанням математичного апарату дислокаційної теорії міцності розрахована енергія, необхідна для зародження мікротріщини в присутності каталізатора – водню, причому при швидкості росту мікротріщини $v_{p,тр} = 10^{-2}$ мм/с рухомості атомів водню в інтервалі температур $+40 \dots -30^\circ\text{C}$ цілком достатньо (коефіцієнт дифузії $DH \approx 10^{-4} \dots 10^{-6}$ см²/с), щоб підсилувати корозійний розвиток тріщини в металі.

5. Багаторічні дослідження аварійно-зруйнованих трубопроводів свідчать про те, що переважно місцями зародження дефектів будь-якого виду є зони листового прокату або зварних швів з аномально високою густиною неметалевих включень. У зв'язку з цим при виробництві листового прокату необхідно приділяти особливу увагу очищенню сталі і модифікуванню неметалевих включень. Обробка сталі силікокальцієм чи РЗМ сприятиме глобулярності сульфідних НВ і підвищуватиме опір проти руйнування резервуарів. Діючі нормативні документи (ТУ, стандарти) на виробництво листової сталі ці вимоги не регламентують.

Література

1. Радкевич О.І., П'ясецький О.С., Василенко І.І. Корозійно-механічна тривкість трубної сталі в сірко-водневому середовищі // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2000. – №3. – С. 93–97
2. Андрейків О.С., Никифорчин Г.М., Ткачов В.І. Міцність і руйнування металічних матеріалів і елементів конструкцій у водневомісних середовищах// Фізико-механічний інститут. Під ред. В.В. Панасюка /НАН України: Фізико-механічний інститут ім.Г.В.Карпенка. – Львів: Простір. – М. – 2001. – С. 248 – 286.
3. Trucbon M.R., Crolet J.I. Experimental limits of sourer service for tubular steels //SSC Symposium. – Saint-Cloud. – 21. – 2013.
4. Stardisco J.B., Pitts R.E. Corrosion of Iron in H₂S-CO₂-H₂O System, Mechanism of Sulfide Film Formation and Kinetics of Corrosion // Corrosion. – 2014. – №9. – P. 245 – 253.
5. Galis M.F.J., Orlans B.J., Gunts G.C. Study of metallurgical parameters influencing the behavior of line pipes in H₂S medium // SSC Symposium. – 1991. – 17p.
6. F. Francis, A.M Edwards, R.J. Espiner and G.Senior. Applying Structural Reliability Method to Aging Pipelines. Paper. C57I-/011./99//. IMcchE Conference on Aging Pipelines. Newcastle., UK, October. – 1999.
7. Henderson P.L., Hopkins P. Cosham A. Extending the Life of Ageing Pipelines. – The Offshore Pipeline Technology Conference. TX OPT USA 2001 Oct. 22–23. Houston.
8. Макаренко В.Д., Максимов С.Ю., Білик С.І. і ін. Корозійні руйнування каналізаційних систем України // Київ: НУБіП України.– 2021. – 272 с.
9. Мешков Ю. Я. Физические основы разрушения стальных конструкций. – Киев: Наукова думка. – 1981. – 229 с.
10. Макаренко В.Д., Прохоров Н.Н., Грачев С.И. и др. Сварка и коррозия нефтегазопроводов Западной Сибири. – Киев: Наукова думка. – 1996. – 512 с.
11. Makarenko V.D., Beljaev V.A., Galichenko E.N., Prohorov N.N.(2001) Effect of modifying additions on the ductility and plastic properties and the brittle strength of coldresistant, low-alloy steel// Welding International.15(1). – P. 62 – 70.
12. Pressoure G.M., Blondeau R., Cadion L. HSLA steels with in proved hydrogen sulfide cracking resistance // Proc. Conf. Amer. Soc. Metals. – Philadelphia: – 2017. – P. 827 – 843.
13. Martynova O.I., Vainman A.B. Einige Probleme der Sauerstoff-fahrweise in Anlagen mit Zwangdurchlaufkesseln // VGB Kraftwerkstechnik. – 2014. – №8. – P. 659 – 663.
14. Hydrogen Accumulation and Hydrogen-Induced Cracking of API C90 Tubular Steel / G.-H. Yu, Y.-H. Cheng, L. Chen, et al. // Corrosion. – 2017. – Vol. 53, №.10. – P. 762 – 769.

References

1. Radkevich O.I., Pyasetskyi O.S., Vasylenko I.I. Corrosion-mechanical durability of pipe steel in a hydrogen sulfide environment // Phys.-chem. mechanics of materials. – 2000. – №3. – P. 93 – 97.
2. Андрейків О.С., Никыфорчын Н.М., Ткачев В.І. Strength and destruction of metallic materials and structural elements in hydrogen-containing environments // Physical and Mechanical Institute. Under the editorship V.V. Panasyuk / NAS of Ukraine: Physical and Mechanical Institute named after H.V. Karpenko. – Lviv: Prostir-M. – 2001. – P. 248 – 286.
3. Trucbon M.R., Crolet J.I. Experimental limits of sourer service for tubular steels //SSC Symposium.- Saint-Cloud. – 21. – 2013.
4. Stardisco J.B., Pitts R.E. Corrosion of Iron in H₂S-CO₂-H₂O System, Mechanism of Sulfide Film Formation and Kinetics of Corrosion // Corrosion. – 2014. – №9. – P. 245 – 253.
5. Galis M.F.J., Orlans B.J., Gunts G.C. Study of metallurgical parameters influencing the behavior of line pipes in H₂S medium // SSC Symposium. – 1991. – 17 p.
6. F. Francis, A.M Edwards, R.J. Espiner and G.Senior. Applying Structural Reliability Method to Aging Pipelines. Paper. C57I-/011./99//. IMcchE Conference on Aging Pipelines. Newcastle., UK, October. – 1999.
7. Henderson R.L. Hopkins P. Cosham A. Extending the Life of Aging Pipelines. -The Offshore Pipeline Technology Conference. TX OPT USA 2001 Oct. 22 – 23. Houston.
8. Makarenko V.D., Maksymov S.Yu., Bilyk S.I. etc. Corrosive destruction of sewage systems of Ukraine // Kyiv: NUBiP of Ukraine. – 2021. – 272p.
9. Meshkov Yu. Ya. Physical foundations of destruction of steel structures. – Kyiv: Naukova dumka. – 1981. – 229 p.
10. Makarenko V.D., Prokhorov N.N., Grachev S.I. etc. Welding and corrosion of oil and gas pipelines of Western Siberia. – Kyiv: Naukova dumka. – 1996. – 512 p.
11. Makarenko V.D., Beljaev V.A., Galichenko E.N., Prohorov N.N. (2001) Effect of modifying additions on the ductility and plastic properties and the brittle strength of cold-resistant, low-alloy steel // Welding International.15(1). – P. 62 – 70.
12. Pressoure G.M., Blondeau R., Cadion L. HSLA steels with proven hydrogen sulfide cracking resistance // Proc. Conf. Amer. Soc. Metals. - Philadelphia: Ra. – 2017. – P. 827 – 843.
13. Martynova O.I., Vainman A.B. Einige Probleme der Sauerstoff-fahrweise in Anlagen mit Zwangdurchlaufkesseln // VGB Kraftwerkstechnik. – 2014. – №8. – P. 659 – 663.
14. Hydrogen Accumulation and Hydrogen-Induced Cracking of API C90 Tubular Steel / G.-H. Yu, Y.-N. Cheng, L. Chen, et al. // Corrosion. – 2017. – Vol. 53, №.10. – P. 762 – 769.

За зміст повідомлень редакція відповідальності не несе

Повні вимоги до оформлення рукопису
http://journals.khnu.km.ua/vestnik/?page_id=37

**Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету,
протокол № 14 від 29.06.2023 р.**

Підп. до друку 30.06.2023 р. Ум.друк.арк. 62,3 Обл.-вид.арк. 59,27
Формат 30x42/4, папір офсетний. Друк різнографією.
Наклад 100, зам. № _____

Тиражування здійснено з оригінал-макету, виготовленого
редакцією журналу “Вісник Хмельницького національного університету”
редакційно-видавничим центром Хмельницького національного університету
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1. тел (0382) 72-83-63