ISSN 2307-5732
DOI 10.31891/2307-5732

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ **5.2023**

ВІСНИК

Хмельницького національного університету

Том 1

Технічні науки

Technical sciences

SCIENTIFIC JOURNAL
HERALD OF KHMELNYTSKYI NATIONAL UNIVERSITY

2023, Issue 5, Volume 325, Part 1

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, № 5, Том 1 (325)

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=aIUP9OYAAAAJ
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

Т е х н і ч н і н а у к и

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.е.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., **Бубуліс 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)**

Технічний редактор Горященко К. Л., к.т.н.
Редактор-коректор Броженко В. О.

Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету, протокол № 6 від 25.10.2023 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
http://lib.khnu.km.ua/visnyk_tup.htm

e-mail: visnyk.khnu@khmnu.edu.ua
visnyk.khnu@gmail.com

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

АНДРІЙЧУК ВОЛОДИМИР, НАКОНЕЧНИЙ МИРОСЛАВ, ФІЛЮК ЯРОСЛАВ, КОСТИК ЛЮБОВ, ОСАДЦА ЯРОСЛАВ
ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ СВІЧЕННЯ СВІТЛОДІОДНИХ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА 9

АФТАНАЗІВ ІВАН. , СТРОГАН ОРИСЯ, ШЕВЧУК ЛІЛІЯ , СТРУТИНСЬКА ЛЕСЯ
КІНЕМАТИЧНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ЯК ЗАСІБ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПОШУКУ МОРСЬКИХ МІН 16

БАБИН ІГОР, БУРЛАКА СЕРГІЙ, ХОЛОДЮК ОЛЕКСАНДР
ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ СТРІЧКОВОЇ СУШАРКИ 26

БЕРДНИК ДАНИЛО, ПЕЛЕШКО ДМИТРО
ВІДНОВЛЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ ГЕНЕРАТИВНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ 30

БЛАЖЕНКО МАРІЯ, ФАЛЕНДИШ НАТАЛІЯ
ВИКОРИСТАННЯ ПРОДУКТІВ ПЕРЕРОБКИ НАСІННЯ КОНОПЕЛЬ У ВИРОБНИЦТВІ ХЛІБА 35

БОЙКО ЮЛІЙ, КАРПОВА ЛЕСЯ, СЕМЕНЮК ВІТАЛІЙ
ВИСОКОРІВНЕВА ОДНОПЛОЩИННА АНТЕНА MIMO ДЛЯ ДЕВАЙСІВ 5G 40

БУРЕНКО ВОЛОДИМИР
АНАЛІЗ НАПОВНЕНОСТІ ЗУПИНОК ПАСАЖИРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ ЗА ДОПОМОГОЮ АЛГОРИТМІВ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ З IP-КАМЕР «РОЗУМНОГО МІСТА» 47

ГУРКОВСЬКА ОЛЕНА , АНДРЕЄВА ОЛЬГА
ПОРІВНЯЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ СИСТЕМ ЕКСПРЕСІЇ У ВИРОБНИЦТВІ РЕКОМБІНАНТНОГО ІНСУЛІНУ 53

ДОРОГИЙ ЯРОСЛАВ, КОЛІСНІЧЕНКО ВАДИМ
ЗАСТОСУВАННЯ ЛОГУВАННЯ РІЗНИМИ УЧАСНИКАМИ БЛОКЧЕЙН-МЕРЕЖ ДЛЯ ДЕАНОНІМІЗАЦІЇ КІНЦЕВОГО КОРИСТУВАЧА 60

ЗАЛУЦЬКА ОЛЬГА, МОЛЧАНОВА МАРИНА, МАЗУРЕЦЬ ОЛЕКСАНДР, МЕЛЬНИК ОЛЕГ, СКРИПНИК ТЕТЯНА
МЕТОД ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ЕМОЦІЙНОЇ ТОНАЛЬНОСТІ ТЕКСТОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОВЕДІНКОВИХ НАМІРІВ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИМИ ЗАСОБАМИ 67

ЗАЛЮБОВСЬКИЙ МАРК, ПАНАСЮК ІГОР, КОШЕЛЬ ОЛЕКСАНДР
ВИЗНАЧЕННЯ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ ЗНАЧЕНЬ РЕАКЦІЙ У КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАХ ГАЛТУВАЛЬНОЇ МАШИНИ, У ЯКІЙ ЄМНІСТЬ ЗДІЙСНЮЄ СКЛАДНИЙ ПРОСТОРОВИЙ РУХ 74

ЗОЛОТУХА РОМАН, ГЛАЗУНОВА ОЛЕНА
РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ АЛГОРИТМУ ДЛЯ ПІДБОРУ КОМАНДИ В ІТ ПРОЄКТАХ 81

ІВАНІШЕНА ТЕТЯНА, МАНДЗЮК ІГОР, ТРУХІНА ОКСАНА, ПЕКАРСЬКА ВАЛЕРІЯ
ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ МАТЕРІАЛІВ ЯК ІНСТРУМЕНТ УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ПРИНЦИПІВ КРУГОВОЇ ЕКОНОМІКИ ВИРОБНИЦТВ 89

ІЛЛЯШ ОКСАНА, БРЕДУН ВІКТОР
ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРМІСЦЯ ДОСЛІДЖЕННЯ МОРФОЛОГІЧНОГО СКЛАДУ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ 98

КАМІНСЬКИЙ РОМАН, ПШЕНИЧНИЙ ОЛЕКСАНДР, ХУДИЙ АНДРІЙ
РОЛЬ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ФРАКТАЛЬНОЇ КОНСТАНТИ ЦИКЛІЧНОГО ЧАСОВОГО РЯДУ 103

КАМІНСЬКИЙ РОМАН, ПШЕНИЧНИЙ ОЛЕКСАНДР, ХУДИЙ АНДРІЙ
ФРАКТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЦИКЛІЧНОГО ЧАСОВОГО РЯДУ ЧИСЕЛ ВОЛЬФА (ПОКАЗНИКА СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ) 108

ГОРЯЩЕНКО КОСТЯНТИН СТЕЦЮК ВІКТОР, ГОРЯЩЕНКО СЕРГІЙ, ЛИСИЙ АНДРІЙ
МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ 117

КАЧАН РОМАН, ПЕТРОВА ЛЕСЯ, ПРОХОРЕНКО МАРІЯ, СОБОЛЄВА КАТЕРИНА
ОБҐРУНТУВАННЯ СКЛАДУ ПОЛІМЕРНОГО КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ З ФУНГІЦИДНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ 123

КОВАЛЕНКО БОГДАН, ЛУКІН ВОЛОДИМИР
АНАЛІЗ СПОТВОРЕНЬ, СПРИЧИНЕНИХ BPG-СТИСНЕННЯМ З ВТРАТАМИ БЕЗШУМНИХ І ЗАШУМЛЕНИХ ЗОБРАЖЕНЬ 128

КОВАЛЬОВ СТАНІСЛАВ, МІЩЕНКО ВЛАДИСЛАВА, ГІРІН ОЛЕГ
ВЛАСТИВОСТІ НІКЕЛЕВИХ ПОКРИТТІВ ЕЛЕКТРООСАДЖЕНИХ У МАГНІТНОМУ ПОЛІ НИЗЬКОЇ ІНДУКЦІЇ 136

КОПИТІНА ІРИНА, АНДРЕЄВА ОЛЬГА, МОКРОУСОВА ОЛЕНА
ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ЕНЗИМІЗАЦІЇ ШКІРЯНОГО ВИРОБНИЦТВА 141

КОШЛАНЬ МИКОЛА, ШАХОВСЬКА НАТАЛІЯ, МЕЛЬНИКОВА НАТАЛІЯ
МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ РОЗПІЗНАВАННЯ ЛІТАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ 150

КУТІНА МАРИНА, КОВАЛЬОВ АРТЕМ
ДІАГНОСТИЧНІ ПАРАМЕТРИ ОБ'ЄКТА МОДЕЛІ 154

ЛАКТІОНОВ ОЛЕКСАНДР, ПЕДЧЕНКО НАЗАР
КОНЦЕПЦІЯ ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ ГОТОВНОСТІ РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ДО ВИКОНАННЯ БОЙОВИХ ЗАВДАНЬ 160

НАДОПТА ТЕТЯНА, МИХАЙЛОВСЬКА ОКСАНА, ОЛІЙНИК АНАСТАСІЯ
ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ПОПЕРЕДНІХ ДЕФОРМАЦІЙ НА СТІЙКІСТЬ СПЕЦІАЛЬНОГО ВЗУТТЯ ДО БАГАТОРАЗОВОГО ЗГИНУ 166

НАКАШИДЗЕ ЛІЛІЯ, ГІЛЬОРМЕ ТЕТЯНА
ВПЛИВ СПОСОБУ ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОГЕНЕРУВАЛЬНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОНЯЧНОЇ БАТАРЕЇ 173

ПРАВОРСЬКА НАТАЛІЯ, МАРТИНЮК ВАЛЕРІЙ
КОНСТРУЮВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ СИНХРОННОГО ПІДХОДУ: ОСНОВНІ ПРОЦЕСИ ТА ІНСТРУМЕНТИ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ DEVOPS 182

ПОЛІЩУК АНДРІЙ СКИБА МИКОЛА
ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ СОПЛА ЕСТРУДЕРА 3D-ПРИНТЕРА, ЩО ВИКОРИСТОВУЄ ГРАНУЛИ ТА ПОДРІБНЕНІ ЧАСТКИ ПОЛІМЕРУ В ЯКОСТІ ВИХІДНОЇ СИРОВИНИ 192

СЕРЕНКО АНТОН , ЮДІНА ТЕТЯНА
ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СКВАШУВАННЯ МОЛОЧНИХ СУМІШЕЙ ДЛЯ НИЗЬКОЛАКТОЗНИХ ЙОГУРТІВ 205

СОКОЛАН ЮЛІЯ , ЛАРІОНОВ ІВАН , МАЙДАН ПАВЛО , СОКОЛАН КАТЕРИНА
АВТОМАТИЗОВАНЕ ГЕНЕРУВАННЯ КОДІВ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ НА ВЕРСТАТАХ З ЧИСЛОВИМ ПРОГРАМНИМ КЕРУВАННЯМ 212

СОЛОВЕЙ АНДРІЙ, ЩІПАНОВ ІГОР
ПАРАМЕТРИ НАПРАВЛЕНОГО РОЗКОЛУ ГІРСЬКИХ ПОРІД ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НЕВИБУХОВИХ РУЙНУЮЧИХ СУМІШЕЙ (НРС) 220

СТРЕЛЬБІЦЬКИЙ ВІКТОР, КІБАКОВ ОЛЕКСАНДЕР
ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ У МЕХАНІЗМІ ПІДЙОМУ ПОРТАЛЬНИХ КРАНІВ «СОКІЛ» 226

СТРИЖОВА ОКСАНА
СТИЛІЗАЦІЯ ТА ТРАНСФОРМУВАННЯ ОДЯГУ У FASHION ІЛЮСТРУВАННІ ЗА ДОПОМОГОЮ СЕРВІСІВ ГЕНЕРУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ 230

ТИМЧУК ВОЛОДИМИР
ПІДХІД ДО АНАЛІЗУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ДАНИХ ЗАЛЕЖНО ВІД ЗМІНЮВАНИХ МЕТЕОПАРАМЕТРІВ ДЛЯ МОДЕЛІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ У КОМПЛЕКСІ МЕТЕОЗОНДУВАННЯ: ЛЮДСЬКІ ПОМИЛКИ ПІД ЧАС ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ СИСТЕМ 235

ЧИГІНЬ ВАСИЛЬ, ПАЗИНЮК МИХАЙЛО
АВТОНОМНА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА СИСТЕМА І ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ЗВУКОВОГО ВИЯВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ТА ON-LINE СПОВІЩЕННЯ 240

ШІЛІНГ АННА, ПАСЬКО АНАСТАСІЯ
ЛІНГВІСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ФОРМУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО НАПОВНЕННЯ ВІРТУАЛЬНИХ СПІЛЬНОТ ПОПИТУ ТА ПРОПОЗИЦІЇ ОСВІТНІХ ПОСЛУГ 246

ШРАМ МАКСИМ, АНТОНЕНКО АРТЕМ , ЗАМКОВИЙ ОЛЕКСІЙ , ОРЛЮК ХРИСТИНА, ДУТКО ПАВЛО
ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ МАСИВУ ДАНИХ НА ОСНОВІ НЕЙРОМЕРЕЖІ У СФЕРІ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ДЛЯ ГОТЕЛЬНО-РЕСТОРАННОГО БІЗНЕСУ 252

ЩЕРБАТЮК ТЕТЯНА, АНДРЕЄВА ОЛЬГА
ЗАСТОСУВАННЯ ОЗОННИХ ТЕХНОЛОГІЙ У РОСЛИННИЦТВІ 258

ЩІПАНОВ ІГОР, СОЛОВЕЙ АНДРІЙ
АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ЗОВНІШНЬОЇ ОБОЛОНКИ ЗАРЯДУ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО НАПРАВЛЕНОГО РОЗКОЛУ ГІРСЬКИХ ПОРІД 263

ЩУР НАТАЛІЯ, ПОКОТИЛО ОЛЕКСАНДРА, БАЙЛЮК ЄЛІЗАВЕТА
ОГЛЯД ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ-ФІНАЛІСТІВ КОНКУРСУ NIST ЗІ СТАНДАРТИЗАЦІЇ ЛЕГКОВАГОВОЇ КРИПТОГРАФІЇ 269

ЯСІНСЬКИЙ АНДРІЙ, СОЛОВЕЙ ЛЮДМИЛА, ГРИСЮК АНДРІЙ
РОЗВИТОК ГЛОБАЛЬНО РОЗПОДІЛЕНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ІНФРАСТРУКТУР 279

CONTENT

ANDRIICHUK VOLODIMIR, NAKONECHYI MYROSLAV, FILIUK YAROSLAV, KOSTYK LIUBOV, OSADTSA YAROSLAV
RESEARCH OF THE KINETICS OF GLOWING OF LED LIGHT SOURCES 9

AFTANAZIV IVAN, STROGHAN ORYSIA, SHEVCHUK LILIA, STRUTYNSKA LESIA
KINEMATIC DESIGN AS A TOOL IMPROVEMENT OF NAVAL MINES SEARCH 16

BABYN IHOR, BURLAKA SERHIY, KHOLODYUK OLEKSANDR
EFFICIENCY OF A CONVEYOR DRYER 26

BERDNYK DANYLO, PELESHKO DMYTRO
IMAGE RECONSTRUCTION USING GENERATIVE NEURAL NETWORKS 30

BLAZHENKO MARIIA, FALENDYSH NATALIIA
USE OF PRODUCTS OF HEMP SEED PROCESSING IN THE PRODUCTION OF BREAD 35

BOIKO JULIY, KARPOVA LESYA, SEMENYUK VITALIY
SINGLE PLANE MIMO ANTENNA FOR 5G DEVICES 40

BURENKO VOLODYMYR
ANALYSIS OF FILLING OF PASSENGER TRANSPORT STOPS USING ALGORITHMS OF IMAGE PROCESSING FROM SMART CITY IP CAMERAS 47

HURKOVSKA OLENA, ANDREYEVA OLGA
COMPARATIVE ASSESSMENT OF EXPRESSION SYSTEMS IN THE PRODUCTION OF RECOMBINANT INSULIN 53

DOROGIY YAROSLAV KOLISNICHENKO VADIM
APPLICATION OF LOGGING IN VARIOUS PARTICIPANTS OF BLOCKCHAIN NETWORKS FOR DE-ANONYMIZATION OF THE END USER 60

ZALUTSKA OLHA, MOLCHANOVA MARYNA, MAZURETS OLEKSANDR, MELNYK OLEH, SKRYPNYK TETIANA
METHOD FOR INTELLECTUAL ANALYSIS OF TEXTUAL INFORMATION EMOTIONAL TONALITY FOR DETERMINE THE BEHAVIORAL INTENTIONS BY NEURAL NETWORKS MEANS 67

ZALYUBOVSKYI MARK , PANASYUK IGOR, KOSHEL OLEXANDR
DETERMINATION OF EXTREME VALUES OF REACTIONS IN KINEMATIC COUPLES OF A TURNING MACHINE IN WHICH THE CAPACITY PERFORMS COMPLEX SPATIAL MOVEMENT 74

ZOLOTUKHA ROMAN GLAZUNOVA OLENA
CREATING A MATHEMATICAL ALGORITHM FOR TEAM SELECTION IN IT PROJECTS 81

IVANISHENA TETIANA, MANDZYUK IGOR, TRUKNINA OKSANA, PEKARSKA VALERIY
ASSESSMENT OF THE LIFE CYCLE OF MATERIALS AS A TOOL FOR THE IMPROVEMENT OF LIGHT INDUSTRY PROCESSES AND THE IMPLEMENTATION OF THE PRINCIPLES OF THE CIRCULAR ECONOMY OF MANUFACTURING 89

ILLIASH OKSANA, BREDUN VIKTOR
JUSTIFICATION OF THE CHOICE OF THE SITE FOR STUDYING THE MORPHOLOGICAL COMPOSITION OF HOUSEHOLD WASTE 98

KAMINSKYI ROMAN, PSHENYCHNYY OLEKSANDR, KHUDYY ANDRIY
THE ROLE AND DEFINITION OF THE FRACTAL CONSTANT OF CYCLIC TIME SERIES 103

KAMINSKYI ROMAN, PSHENYCHNYY OLEKSANDR, KHUDYY ANDRIY
FRACTAL ANALYSIS OF PERIODIC TIME SERIES OF WOLF NUMBERS (SOLAR ACTIVITY METRIC) 108

KOSTYANTYN HORIASHCHENKO, VIKTOR STETSIUK, SERH IY HORIASHCHENKO, ANDRIY LYSYI
MODELLING AND TESTING OF SYNCHRONOUS MOTORS WITH PERMANENT MAGNETS 117

KACHAN ROMAN, PETROVA LESYA, PROHORENKO MARIA, SOBOLEVA KATERINA
JUSTIFICATION OF THE COMPOSITION OF THE POLYMER COMPOSITE MATERIAL WITH FUNGICIDAL PROPERTIES 123

KOVALENKO BOGDAN, LUKIN VOLODYMYR
ANALYSIS OF DISTORTIONS DUE TO BPG-BASED LOSSY COMPRESSION OF NOISE-FREE AND NOISY IMAGES 128

STANISLAV KOVALYOV, VLADYSLAVA MISHCHENKO, OLEG GIRIN
PROPERTIES OF NICKEL DEPOSITS ELECTRODEPOSITED IN A LOW INDUCTION MAGNETIC FIELD 136

KOPYTINA IRYNA, ANDREYEVA OLGA, MOKROUSOVA OLENA
INNOVATIVE APPROACHES TO ENZIMIZATION OF LEATHER PRODUCTION 141

KOSHLAN MYCOLA, SHAKHOVSKA NATALIA, MEKNYKOVA NATALIA
METHODS AND MEANS OF RECOGNITION OF FLYING OBJECTS 150

KUTINA MARYNA, KOVALOV ARTEM
DIAGNOSTIC PARAMETERS OF THE MODEL OBJECT 154

OLEKSANDR LAKTIONOV, NAZAR PEDCHENKO
THE CONCEPT OF DETERMINING THE READINESS LEVEL OF ROBOTIC SYSTEMS FOR PERFORMING COMBAT TASKS 160

TETYANA NADOPTA, OKSANA MYKHAILOVSKA, ANASTASIA OLIYNYK
DETERMINATION OF THE INFLUENCE OF PREVIOUS DEFORMATIONS ON THE RESISTANCE OF SPECIAL SHOES TO MULTIPLE BENDING 166

NAKASHYDZE LILIYA V., HILORME TETIANA V.
INFLUENCE OF THE ESTIMATION METHOD OF ENERGY-GENERATING EFFICIENCY OF SOLAR CELLS ON THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF THE SOLAR PANEL 173

PRAVORSKA NATALYA, MARTYNYUK VALERII
DEVELOPING SOFTWARE USING A SYNCHRONOUS APPROACH: KEY PROCESSES AND TOOLS FOR EFFECTIVE DEVOPS 182

POLISHCHUK ANDRII, SKYBA MYKOLA
JUSTIFICATION OF THE DESIGN OF A 3D PRINTER EXTRUDER NOZZLE USING GRANULES AND CUT POLYMER PARTICLES AS INPUTS 192

SERENKO ANTON, YUDINA TETIANA
JUSTIFICATION OF PARAMETERS OF FERMENTATION OF MILK MIXTURES FOR LOW LACTOSE YOGURTS 205

IULIIA SOKOLAN, IVAN LARIONOV, PAVLO MAIDAN, KATERYNA SOKOLAN
AUTOMATED GENERATION OF PART PROCESSING CODES ON CNC MACHINES 212

SOLOVEI ANDRII, SCHIPANOV IGOR
PARAMETERS OF DIRECTED SPLITTING OF ROCKS USING NON-EXPLOSIVE DESTRUCTIVE MIXTURES (NeDM) 220

STRELBITSKYI VIKTOR, KIBAKOV OLEXANDER
RESEARCH OF DYNAMIC LOADS IN THE LIFTING MECHANISM OF THE « SOKOL» PORTAL CRANES 226

STRYZHOVA OKSANA
STYLING AND TRANSFORMATION OF CLOTHES IN FASHION ILLUSTRATION WITH THE HELP OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IMAGE GENERATION SERVICES 230

TYMCHUK VOLODYMYR
AN APPROACH TO THE METEOROLOGICAL DATA ANALYSIS AND PREDICTION FOR THE TRAINED MODEL FOR THE METEOROLOGICAL STATION: HUMAN FAILURES IN SYSTEMS OF SYSTEMS DESIGNING 235

CHYHIN VASYL , PAZYNIUK MYHAILO
AUTONOMOUS EXPERIMENTAL SYSTEM AND SOFTWARE FOR SOUND OBJECT DETECTION AND NOTIFICATION 240

SHILINH ANNA, PASKO ANASTASIIA
LINGUISTIC ANALYSIS OF THE INFORMATION CONTENT FORMATION FOR VIRTUAL COMMUNITIES OF DEMAND AND SUPPLY OF EDUCATIONAL SERVICES 246

SHRAM MAKSYM, ANTONENKO ARTEM ZAMKOWYI OLEKSII, ORLIUK KHRYSTYNA, DUTKO PAVLO
FEATURES OF BUILDING A DATA ARRAY BASED ON A NEURAL NETWORK IN THE SPHERE OF THE INTERNET OF THINGS FOR THE HOTEL AND RESTAURANT BUSINESS 252

SHCHERBATIUK TETIANA, ANDREYEVA OLGA
APPLICATION OF OZONE TECHNOLOGIES IN CROP CULTIVATION 258

SCHIPANOV IGOR, SOLOVEI ANDRII
ANALYSIS OF PARAMETERS OF THE EXTERNAL CHARGE CASING FOR EFFICIENT DIRECTIONAL ROCK SPLITTING 263

SHCHUR NATALIIA, POKOTYLO OLEKSANDRA, BAILIUK YELYZAVETA
OVERVIEW AND COMPARATIVE ANALYSIS OF NIST COMPETITION FINALIST ALGORITHMS FOR LIGHTWEIGHT CRYPTOGRAPHY STANDARDIZATION 269

YASINSKIIY ANDRIY, SOLOVEI LIUDMYLA, HRYSYUK ANDRIY
DEVELOPMENT OF GLOBALLY DISTRIBUTED COMPUTING INFRASTRUCTURES 279

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-9-15
УДК 621.327

АНДРІЙЧУК ВОЛОДИМИР
Тернопільський національний технічний університет імені І. Пулюя
https://orcid.org/0000-0001-7124-2777
e-mail: Andriychukva31410@gmail.com
НАКОНЕЧНИЙ МИРОСЛАВ
Тернопільський національний технічний університет імені І. Пулюя
https://orcid.org/0000-0001-5434-7729
e-mail: nakmiron1984@gmail.com
ФІЛЮК ЯРОСЛАВ
Тернопільський національний технічний університет імені І. Пулюя
https://orcid.org/0000-0003-1869-4402
e-mail: filuk.slavik.91@gmail.com
КОСТИК ЛЮБОВ
Тернопільський національний технічний університет імені І. Пулюя
https://orcid.org/0000-0003-3702-8210
e-mail: kostykm1968@gmail.com
ОСАДЦА ЯРОСЛАВ
Тернопільський національний технічний університет імені І. Пулюя
https://orcid.org/0000-0002-0831-8561
e-mail: osadtca@ukr.net

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ СВІЧЕННЯ СВІТЛОДІОДНИХ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА

В роботі представлені результати дослідження енергетичних та динамічних характеристик світлодіодів FYL-3014 і ARPL-1W білого свічення з колірною температурою3000 К та 6000 К при живленні їх П-подібними імпульсами з частотою від 1 до 400 кГц. На основі спектральних та динамічних досліджень світлового потоку показано, що їх біле свічення отримане за рахунок накладання випромінювання гетероструктури InGaN-AlGaN в синій спектральній області з максимумом 450 нм та фотолюмінофора YAG:Ce з широкою смугою в жовто-оранжевій області спектру (500-710 нм). На основі отриманих осцилограм встановлено, що наростання та спадання світлового потоку в обох смугах описується експоненціальною залежністю. Постійні часу наростання та спадання світлового потоку в жовто-оранжевій смузі фотолюмінесценції тепло-білого СД перевищують у два рази постійні часу для холодно-білого (1050 нс). Зі збільшенням частоти імпульсного живлення постійні часу наростання та спадання світлового потоку в цій смузі для обох типів СД зменшуються до 350-400 нс при 400 кГц. При зміні амплітуди імпульсів напруги та струму постійні часу наростання та спадання світлового потоку не змінюються. Найбільш енергетично сприятливий частотний діапазон імпульсного живлення світлотехнічних установок з СД FYL-3014 і ARPL-1W білого свічення від 10 до 100 кГц і заповненням від 0,3 до 0,95.

Ключові слова: світлодіод, широтно-імпульсна модуляція, енергетична ефективність, коефіцієнт затухання.

ANDRIICHUK VOLODIMIR, NAKONECHYI MYROSLAV, FILIUK YAROSLAV, KOSTYK LIUBOV, OSADTSA YAROSLAV
Ternopil I. Pulyuy National Technical University

RESEARCH OF THE KINETICS OF GLOWING OF LED LIGHT SOURCES

Among the artificial light sources, LED sources (LED) are becoming the most common. For their power supply in lighting systems, pulsed power supply with pulse width modulation is used. To ensure high energy efficiency and reliability of LED lighting devices, it is necessary to have information about the kinetics of both electrical and light pulses. Currently, this problem is not sufficiently covered in the literature. The paper presents the results of the study of the energy and dynamic characteristics of FYL-3014 and ARPL-1W white light LEDs with a color temperature of 3000 K and 6000 K when they are powered by P-shaped pulses with a frequency from 1 to 400 kHz. Based on spectral and dynamic studies of the light flow, it is shown , that their white glow is obtained due to the superimposition of the radiation of the InGaN-AlGaN heterostructure in the blue spectral region with a maximum of 450 nm and the YAG:Ce photoluminophore with high quantum efficiency and a wide band in the yellow-orange spectral region (500-710 nm). Based on the obtained oscillograms, it was established that the rise and fall of the light flux in both bands is described by an exponential dependence. The time constants for the rise and fall of the light flux in the yellow-orange band of photoluminescence of a warm-white LED exceed twice the time constants for cold-white (1050 ns). With an increase in the frequency of pulsed power supply, the rise and fall time constants of the light flux in this band for both types of LEDs decrease to 350-400 ns at 400 kHz. When the amplitude of the voltage and current pulses changes, the rise and fall time constants of the light flux do not change. The most energetically favorable frequency range of pulsed power supply of lighting installations with FYL-3014 and ARPL-1W LEDs of white light is from 10 to 100 kHz and filling from 0.3 to 0.95.

Key words: LED, pulse width modulation, energy efficiency, attenuation coefficient.

Вступ. Імпульсне живлення світлодіодних джерел світла (СД) з широтною модуляцією імпульсів стало найбільш поширеним в освітлювальних системах. Це дозволяє здійснювати керування їх яскравістю, змінюючи ступінь заповнення імпульсу напруги, використовуючи уже відомі та доступні технічні засоби [1–3]. Також важливим питанням є використання СД в якості джерел світла для роботи локальних системах зв'язку від дуже короткої (<1 м) до середньої відстані (5 км), а також для моніторингу автомобільних потоків [4, 5]. Для вибору оптимальної частоти імпульсного живлення світлодіодних джерел світла необхідно мати інформацію про кінетику їх електротехнічних та світлотехнічних характеристик. Проте дана проблема в

літературних джерелах висвітлена обмежено. В роботах [6–8] представлені результати дослідження загасання випромінювання світлодіодів вузького спектру свічення, які використовувались для комутації у видимому випромінюванні. Також проведено аналіз впливу часу життя носіїв заряду на ефективність випромінювання світлодіодів. Розглянуто питання оптимізації та більш точного визначення параметрів компонентів електронних схем імпульсного живлення СД.

Дана робота є продовженням досліджень перехідних процесів в електричному колі з світлодіодами при живлені П-подібними імпульсами [9–11]**.** Її метою є проведення дослідження кінетики випромінювання СД білого свічення при імпульсному живленні з широтно-імпульсною модуляцією та визначення впливу частоти та амплітуди імпульсів на кінетичні та енергетичні параметри світлового потоку світлодіодів. На основі отриманих результатів визначити найбільш енергетично сприятливий та технічно доступний частотний діапазон імпульсного живлення світлотехнічних установок з даними джерелами світла. Для дослідження було взято комерційно доступні СД FYL-3014 і ARPL-1W, потужністю 1 і 3 Вт і колірною температурою 3000 К та 6000 К. Їх живлення здійснювали П-подібними імпульсами з частотою від 1 до 400 кГц з широтною модуляцією з заповненням від 0,3 до 0,95.

Експериментальна установка

Вимірювання спектральних та динамічних характеристик світлодіодів проводилися на експериментальній установці, блок-схема якої приведена на рис. 1**.**

Для дослідження спектрального розподілу СД та виділення окремих ділянок спектру використовували монохроматор УМ-2. Світловий імпульс вимірювався фотоприймачем (5), в якості якого використовували фотоелектронний помножувач (ФЕП) ФЕУ-85. Сигнал від ФЕП поступав на операційний підсилювач (11), який працював в режимі перетворювача струм–напруга. Керування роботою монохроматора здійснювали за допомогою ARDUINONANO (12).

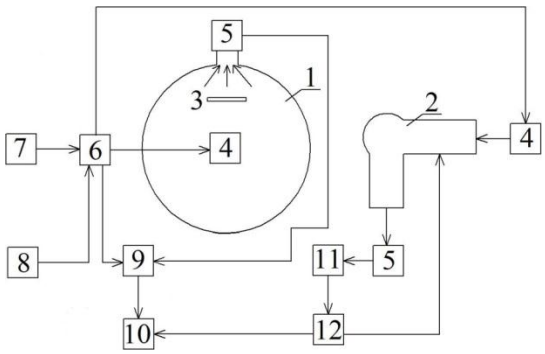


Рис. 1. Блок-схема досліджуваної установки: 1 – інтегральний фотометр; 2 – монохроматор УМ-2; 3 – екран; 4 – досліджуване джерело світла; 5 – фотоприймач; 6 – комутуючий пристрій; 7 – регульоване джерело постійної напруги SW3010D; 8 – генератор SIGLENT SDG 1050; 9 – осцилограф SEA C8-22M/1; 10 – персональний комп'ютер; 11 – перетворювач струм – напруга; 12 – блок обробки вхідних сигналів та керування роботою монохроматора УМ-2

Для дослідження енергетичних характеристик джерело світла (4) поміщалось в інтегральний фотометр (1). Електричний сигнал від фотоприймача (5) передавався на цифровий осцилограф SEAC8-22M/1 (9). Для забезпечення імпульсного живлення СД було використано регульоване джерело постійної напруги SW3010D (7), генератор сигналів SDG 1050 (8) і електронний ключ (6), який дозволяв комутувати струм до 10 А і напругу до 100 В. Це дозволяло живити джерела світла як постійним струмом, так і в імпульсному режимі з частотою імпульсів до 500 кГц з різним коефіцієнтом заповнення. Контроль струму та напруги живлення, амплітуду й тривалість імпульсів здійснювали за допомогою цифрового осцилографа SEAC8-22M/1. Обробку та збереження результатів вимірювань здійснювали за допомогою персонального комп'ютера.

Результати досліджень та їх обговорення

Дослідження кінетики наростання та спадання світлового потоку проводили для СД, в яких для одержання білого свічення використали випромінювання гетероструктури InGaN-AlGaN (450 нм) та фотолюмінофор з високою квантовою ефективністю та широкою смугою в жовто-оранжевій області спектра (500-710 нм) (рис. 2). Хімічний склад та кінетичні параметри світлодіодних люмінофорів виробники не вказують, хоча більшість із них використовують в якості люмінофора ітрій-алюмінієвий гранат, легований церієм. Максимум його випромінювання знаходиться при 550-560 нм. Модифікуючи його добавками гадолінію або галію, добиваються зміщення спектра люмінесценції в довгохвильову або короткохвильову сторону відповідно [3]. Синє свічення гетеропереходу, що збуджує свічення люмінофора, в сумі з ним дають холодно-біле або тепло-біле випромінювання. Для досягнення високого значення індексу кольоропередачі також використовують двоколірні та триколірні фотолюмінофори, але при цьому втрачається їх енергетична ефективність [3–5]**.**

На основі аналізу спектру електролюмінесценції досліджуваних СД широку смугу в жовто-оранжевій області було розбито на дві елементарні смуги з максимумами 560 та 628 нм (рис. 2). Тобто в даних СД виробник міг використати двоколірний люмінофор: жовтий YAG:Ce та невідомий червоний. Для

перевірки даного припущення були проведені дослідження кінетики свічення в кожній із окремих смуг, які виділяли за допомогою монохроматора. На рис. 3 та рис. 4 показані осцилограми наростання та спадання світлового потоку в виділених спектральних областях. Тут також приведені графіки $\ln(1-I/I_0)=f(t)$ та $\ln(I/I_0)=f(t)$. Із них видно, що кінетика світлового потоку описується експоненціальною залежністю, а на кривій затухання можна виділити дві складові – швидку і повільну. В табл. 1 наведені значення постійних наростання та затухання в кожній із виділених смуг при частоті імпульсів 50 кГц та амплітуді 3,4 В.

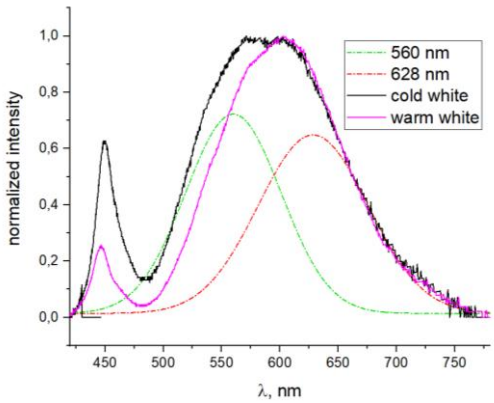
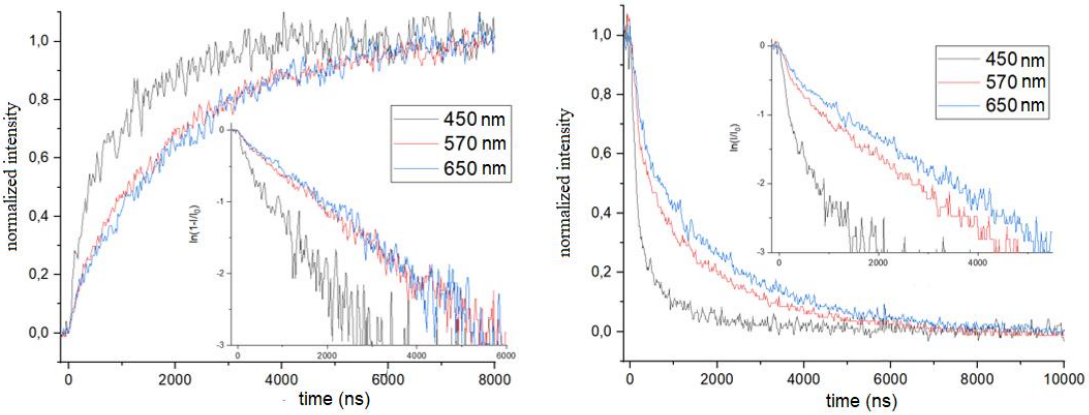
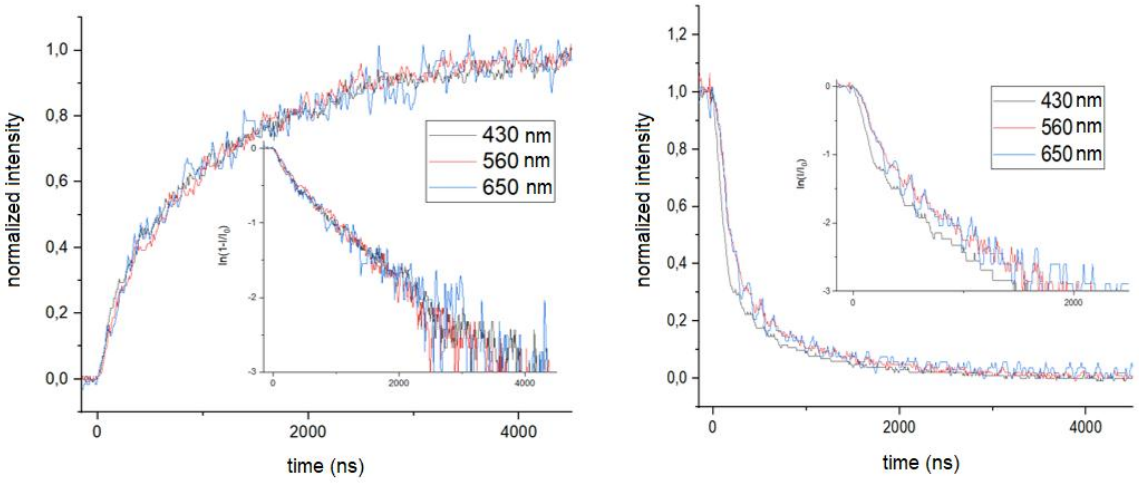


Рис. 2. Спектри свічення: 1) холодно-білого та 2) тепло-білого СД



а) **б)**

Рис. 3. Передній (а) та задній (б) фронти імпульсу світлового потоку для виділених спектральних областей тепло-білого СД ARPL-1W



а) **б)**

Рис. 4. Передній (а) та задній (б) фронти імпульсу світлового потоку для виділених спектральних областей холодно-білого СД ARPL-1W

Кінетика наростання світлового потоку як для синьої, так і для жовто-оранжевої смуг обох типів СД має одну складову. Постійні часу наростання світлового потоку в синій смузі для обох типів СД співпадають і змінюються в межах 1200–1250 нс. Швидкі та повільні складові в їх затуханні є дуже близькими і їх постійні часу лежать в межах170–180 та 800–850 нс, відповідно.

Таблиця 1

Значення постійних наростання та затухання в кожній із виділених смуг при частоті імпульсів 50 кГц та амплітуді 3,4 В

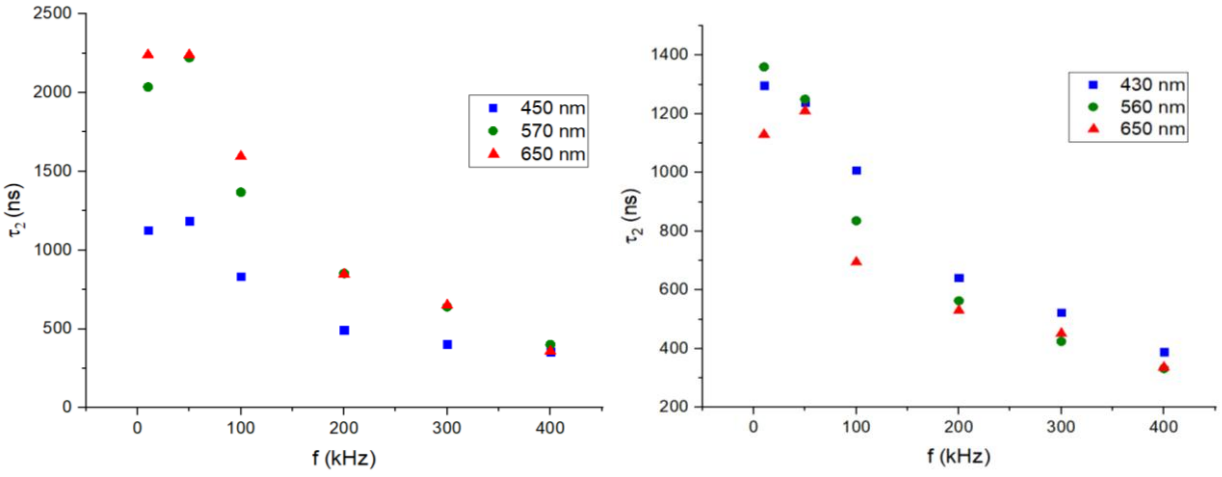
Тип	Довжина хвилі (нм)	спадання		наростання	
		τ_1,(нс)	τ_2,(нс)	τ_1,(нс)	τ_2,(нс)
Тепло-білий 1Вт	452	180	800	1250	
	560	500	1900	2200	
	628	500	1950	2250	
Холодно-білий 1Вт	460	170	850	1200	
	560	300	900	1200	
	628	300	950	1230	

Дослідження кінетики світлового потоку в жовто-оранжевій частині спектру 500-700 нм, яка пов'язана з одно- або двокомпонентним люмінофором, проводили у двох спектральних областях 560 ± 5 і 630 ± 10 нм, які виділялись за допомогою монохроматора. Постійні часу наростання і затухання в цих смугах для обох типів СД суттєво відрізняються. Для тепло-білого СД постійні наростання світлового потоку для обох смуг співпадають і змінюються в межах 2200-2250 нс, а для холодно-білого вони теж співпадають і змінюються в межах1200-1250 нс (рис.3,*а*) та (рис. 4,*а*)

Для обох типів СД спадання світлового потоку в обох смугах має дві складові швидку та повільну. Для тепло-білого СД постійні часу швидкої складової для обох смуг є дуже близькими і лежать в межах 500–550 нс (рис. 3,*б*) Те ж саме спостерігається і для холодно-білого СД, постійна їх часу знаходиться в межах 300–350 нс (рис. 4,*б*). Повільні складові обох смуг для тепло-білого і холодно-білого СД суттєво відрізняються – 2200–2250 та 1200–1250 нс, відповідно(рис. 3,*б* та 4,*б*)

Було виявлено, що кінетика свічення досліджуваних СД залежить від частоти імпульсного живлення. Для цього були проведені вимірювання наростання та спадання світлового потоку в усіх виділених спектральних ділянках при зміні частоти імпульсів від 1 до 400 кГц.

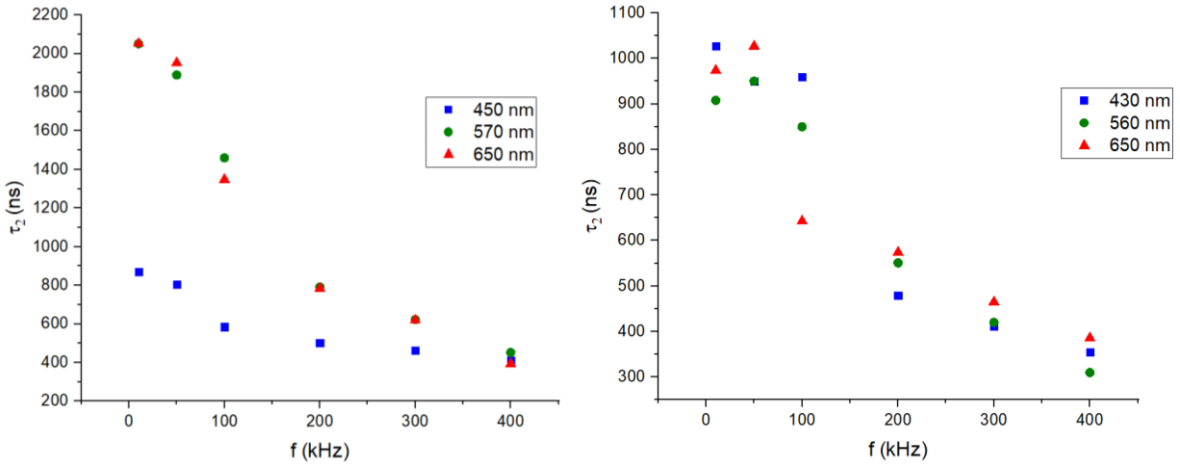
На рис.5 приведені частотні залежності постійної часу наростання світлового потоку для тепло-білого (*а*) та холодно-білого (*б*) СД ARPL-1W. Із зростанням частоти τ для обох смуг в жовто-оранжевій області спектру зменшується з 2250 нс при 10 кГц до 480 нс при 400 кГц для тепло-білого СД та з 1300 до 400 нс для холодно-білого СД. В синій області для обох СД τ спадає від 1250 до 450 нс.



а) **б)**

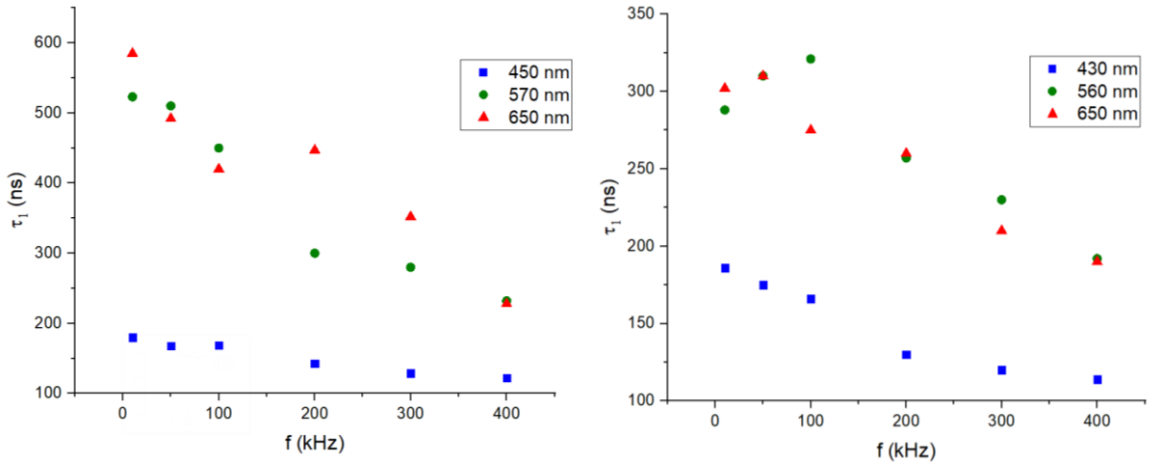
Рис. 5. Частотні залежності постійної часу наростання світлового потоку тепло-білого (а) та холодно-білого (б) СД ARPL-1W

Частотні залежності спадання світлового потоку для обох типів світлодіодів приведені на рис. 6 та рис. 7. Стала часу спадання повільної складової для обох виділених смуг при збільшені частоти від 10 до 400 кГц зменшується з 2050 до 450 нс для тепло-білого та з 1050 до 400 нс для холодно-білого СД. Постійна швидкої складової теж спадає із ростом частоти з 550-600 до 200-230 нс для тепло-білого та з 300-320 до 180-200 нс для холодно-білого СД. В синій області спектру τ повільної складової із збільшенням частоти зменшується від 850 до 500 нс для тепло-білого СД та від 1050 до 400 нс для холодно-білого. Зміна постійної спадання швидкої складової для обох типів СД є дуже близькою і відбувається в межах від 180 до 120 нс.



а) **б)**

Рис. 6. Частотні залежності постійної часу спадання повільної складової світлового потоку тепло-білого (а) та холодно-білого (б) СД ARPL-1W



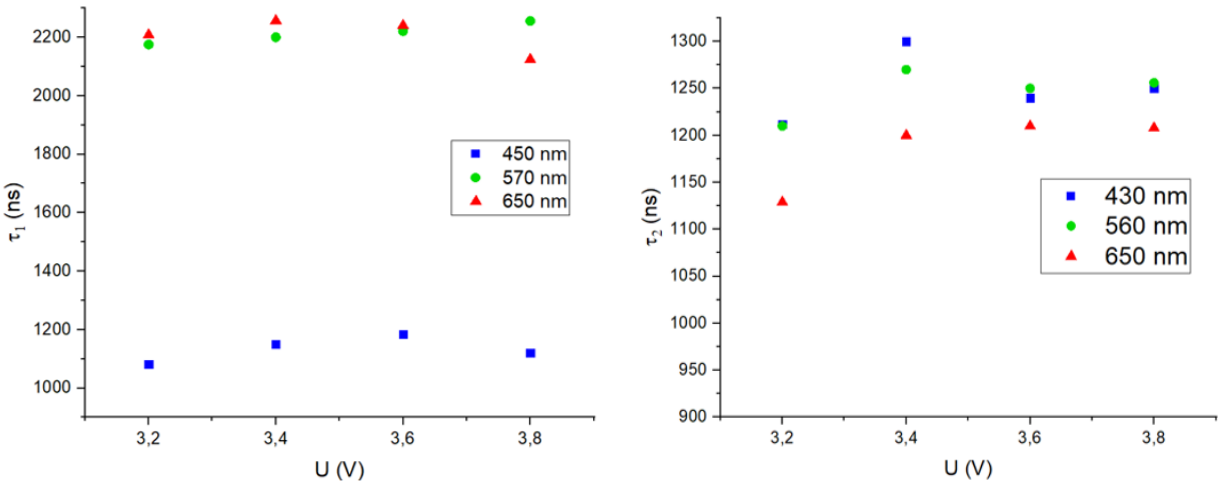
а) **б)**

Рис. 7. Частотні залежності постійної часу спадання швидкої складової світлового потоку тепло-білого (а) та холодно-білого (б) СД ARPL-1W

Були проведені експериментальні дослідження впливу амплітуди імпульсів напруги та струму на кінетику свічення досліджуваних СД. На рис. 8 та рис. 9 наведені залежності постійної часу наростання та спадання світлового потоку СД від амплітуди імпульсів напруги та струму. У жовто-оранжевій області для тепло-білого СД τ наростання світлового потоку у вибраних спектральних областях із збільшенням амплітуди імпульсів напруги та струму змінюється в межах 2200 ± 100 нс, а для смуги в синій області – в межах 1150 ± 50 нс (рис. 8,а). Для холодно-білого СД із зростанням амплітуди імпульсів τ наростання світлового потоку майже не міняється, хоча відносний розкид експериментальних даних є більший 1220 ± 80 нс (рис. 8,б).

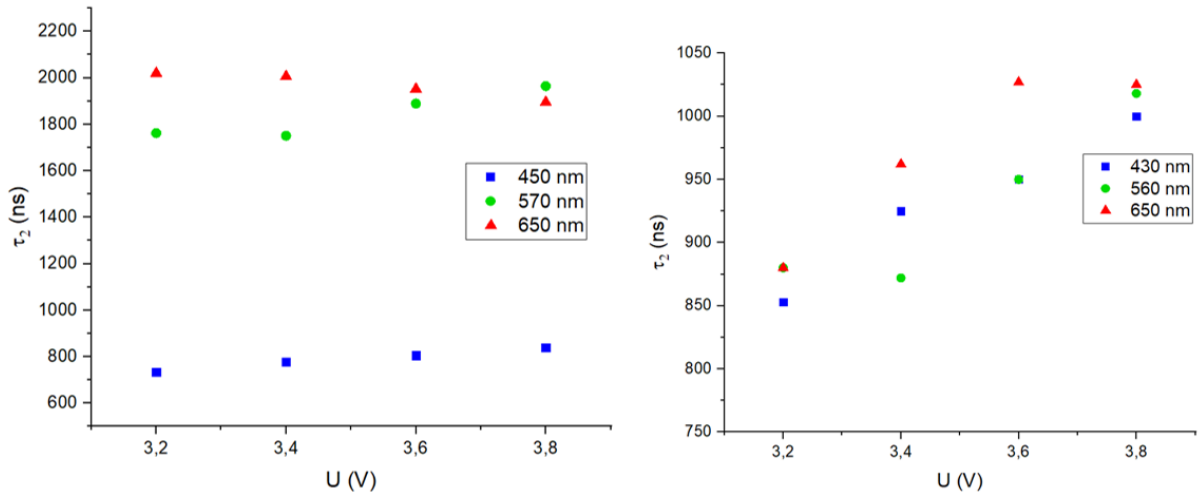
Постійна часу повільної складової спадання світлового потоку в жовто-оранжевій області для тепло-білого СД змінюється в межах 1900 ± 100 нс, а в синій області 800 ± 50 нс. Для холодно-білого СД як в синій, так і в жовто-оранжевій частині спектру вона зростає від 850 ± 50 до 1020 ± 50 нс (рис. 9).

З аналізу кінетики світлового потоку у двох виділених спектральних смугах 560 та 628 нм, отриманих в результаті розкладання жовто-оранжевої смуги тепло-білого та холодно-білого СД, і його поведінки із зміною частоти імпульсного живлення та амплітуди імпульсів можна стверджувати, що в білих СД типу FYL-3014 і ARPL-1W виробник використав однокомпонентний люмінофор YAG:Ce. Зміщення максимуму його свічення в короткохвильову область спектру, що має місце для холодно-білого СД, досягалось внесенням Ga і підбиранням значення x в $Y_3Al_{5-X}Ga_XO_{12}$:Ce.



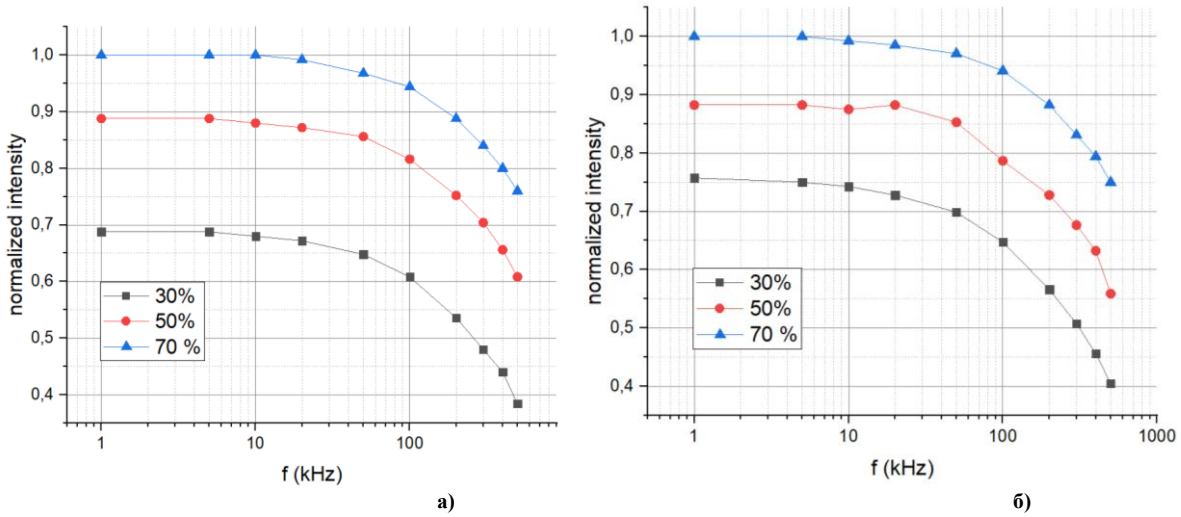
а) **б)**

Рис. 8. Залежність постійної часу наростання світлового потоку від амплітуди імпульсів напруги та струму тепло-білого (а) та холодно-білого (б) СД.



а) **б)**

Рис. 9. Залежність постійної часу спадання світлового потоку від амплітуди імпульсів напруги та струму тепло-білого (а) та холодно-білого (б) СД



а) **б)**

Рис. 10. Залежність світлового потоку а) тепло-білого та б) холодно-білого СД від частоти та ступеня заповнення імпульсів

В доповнення до досліджень кінетики свічення вибраних СД було проведено дослідження зміни величини світлового потоку від частоти імпульсів та ступеня їх заповнення. Починаючи від 1кГц і до 10 кГц світловий потік не змінював свого значення. Це добре корелює із постійною часу наростання. Менших змін світловий потік СД зазнає при заповненні 70%, ніж при 50 та 30%. При підвищенні частоти імпульсів до 100

кГц і заповненні 70% потік спадає на 5%, тоді як при 50 та 30% він спадає на 10%. Таким чином, на основі аналізу кінетики свічення білих СД типу FYL-3014 і ARPL-1W та частотної залежності їх світлового потоку випливає, що найбільш енергетично сприятливим частотним діапазоном їх імпульсного живлення є діапазон 10–100 кГц. Застосування запропонованих режимів дозволить наблизити час експлуатації елементів схем ШІМ живлення до часу експлуатації головного елемента схеми – світлодіода.

Висновки. На основі спектральних та динамічних досліджень світлового потоку СД FYL-3014 і ARPL-1W показано, що їх біле свічення отримане за рахунок накладання власного випромінювання гетероструктури InGaN-AlGaN в синій спектральній області з максимумом 450 нм та фотолюмінофора YAG:Ce з високою квантовою ефективністю та широкою смугою в жовто-оранжевій області спектра (500-710 нм).

Наростання та спадання світлового потоку описується експоненціальною залежністю. Постійна часу наростання та спадання світлового потоку в жовто-оранжевій смузі фотолюмінесценції тепло-білого СД перевищує у два рази постійну часу для холодно-білого (1050 нс). Зі збільшенням частоти імпульсного живлення постійна часу наростання та спадання світлового потоку в цій смузі для обох типів СД зменшується до 350-400 нс при 400 кГц.

Кінетичні параметри світлового потоку в синій смузі залишаються однаковими для обох типів СД. Зі збільшенням частоти імпульсів постійна часу наростання та спадання світлового потоку зменшується в однаковій мірі для обох типів СД.

Із зміною амплітуди імпульсів напруги та струму постійні часу наростання та спадання світлового потоку у жовто-оранжевій та синій спектральній області для обох типів світлодіодів залишаються постійними в межах розкиду експериментальних результатів вимірювань.

Найбільш енергетично сприятливий та технічно доступний частотний діапазон імпульсного живлення світлотехнічних установок з джерелами світла FYL-3014 і ARPL-1W тепло-білого та холодно-білого свічення є діапазон від 10 до 100 кГц заповненням від 0,3 до 0,95.

References

1. Narendran N., Gu Y., Freyssinier J.P. Solid-state lighting: failure analysis of white LEDs. J. Cryst. Growth. 2004. 268, No 3-4. P. 449–456. https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2004.04.071.

2. Baumgartner H. Metrology for III-V optosemicon-ductors, Dissertation. Espoo: Aalto University, 2017.

3. Hegedüs J., Hantos G., Poppe A. Lifetime modelling issues of power light emitting diodes. Energies. 2020. 13, No 13. P. 3370. https://doi.org/10.3390/en13133370.

4. Schubert E. Light-Emitting Diodes (2nd ed.). Cambridge University Press, 2006. https://doi.org/10.1017/CBO9780511790546.

5. Rehman S.U., Ullah S., Chong P.H.J. Visible light communication: A system perspective – overview and challenges. Sensors. 2019. 19, No 5. P. 1153. https://doi.org/10.3390/s19051153.

6. Holly Haggar J.I., Ghataora S.S., Trinito V. Study of the luminescence decay of a semipolar green light-emitting diode for visible light communications by time-resolved electro-luminescence. ACS Photonics. 2022. 9, No 7. P. 2378–2384. https://doi.org/10.1021/acsphotonics.2c00414.

7. Meng X., Wang L., Hao Z. et al. Study on efficiency droop in InGaN/GaN light-emitting diodes based on differential carrier lifetime analysis. Appl. Phys. Lett. 2016. 1

8. Aeloiza E., Kim J.-H., Enjeti P., Ruminot P. A real time method to estimate electrolytic capacitor condition in PWM adjustable speed drives and uninterruptible power supplies. 2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference, Dresden, Germany, 2005. P. 2867–2872. https://doi.org/10.1109/PESC.2005.1582040.

9. Andriichuk V., Nakonechnyi M., Osadtsa, Ya., Filiuk Ya. Study of LED light sources in the case of pulsed power supply. Technical electrodynamics. 2021. No 1. P. 68. DOI: https://doi.org/10.15407/techned2021.01.068.

10. Andriichuk V.A., Nakonechnyi M.S., Filiuk Ya.O. Kinetics of narrow-spectrum LED glow under pulsed power. Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics, 2023. V. 26, No 2. P. 230-235.

11. Andriichuk Volodimir, Nakonechyi Myroslav, Filiuk Yaroslav, Osadtsa Yaroslav, Xinzhong Gao. Kinetics of leds white lighting under pulse power supply. ICAAEIT 2021, 15-17 December 2021. Tern.: TNTU, Zhytomyr «Publishing house „Book-Druk“» LLC, 2021. P. 33–39.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-16-25
УДК 629.7:629.072.1

АФТАНАЗІВ ІВАН
Національний університет «львівська політехніка»
http://orcid.org/0000-0003-3484-7966
СТРОГАН ОРИСЯ
Національний університет «львівська політехніка»
http://orcid.org/0000-0002-1790-6736
ШЕВЧУК ЛІЛІЯ
Національний університет «львівська політехніка»
http://orcid.org/0000-0003-3484-7966
СТРУТИНСЬКА ЛЕСЯ
Національний університет «львівська політехніка»
http://orcid.org/0000-0002-0401-5475

КІНЕМАТИЧНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ЯК ЗАСІБ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПОШУКУ МОРСЬКИХ МІН

Темою даного дослідження є вдосконалення методик пошуку і визначення координат морських мін різних типів та просторово-глибинного розташування, його предметом – застосування кінематичного проєктування для уточнення координат якірних та донних мін. Мета роботи – розробка принципових схем оптимізації просторових переміщень пошукових суден та створення алгоритмів уточнених розрахунків координат якірних та донних мін засобами кінематичного проєктування. Методологією проведення досліджень було застосування положень теорії відображення координат та траєкторій просторових переміщень рухомих об'єктів засобами нарисної геометрії із врахуванням специфіки та динамічних особливостей кінематичного проєктування. Основним результатом дослідження є створення методики розрахунків уточнених координат якірних та донних мін у поєднанні із оптимізацією траєкторій пошукових переміщень плавучих пошукових суден по спіралі Архімеда. Цим забезпечується не тільки збільшення на 25-30% обстежених площ, а і пропорційна економія палива. Для керування переміщеннями пошукових плавучих засобів, для опрацювання наданих ними даних про виявлену міну, для уточнення координат виявленої міни запропонована відповідна блок-схема комп'ютерної програми.

Ключові слова: *пошук, якірна та донна міни, розмінування, катер-тралівник, човен, додатковий плавучий засіб, блок-схема, розрахунок, координати, кінематичне проєктування.*

AFTANAZIV IVAN, STROGHAN ORYSIA, SHEVCHUK LILIA, STRUTYNSKA LESIA
Lviv Polytechnic National University

KINEMATIC DESIGN AS A TOOL IMPROVEMENT OF NAVAL MINES SEARCH

The issue of demining sea raids and ports, which is relevant for Europe during the period of active deployment of military confrontations on its territory, is considered. It is proposed to expand the search capabilities of trawler boats by adding auxiliary search vessels to them. This increases the effective search area by one and a half to two times, reducing by 25-30% fuel consumption for search passages of floating vehicles. The optimal trajectory of search movements of floating vehicles along the Archimedean spiral and the method of determining the coordinates of mines by means of kinematic design are proposed. The movement of search vessels along an Archimedean spiral is recommended due to the absence of sharp turns and reciprocating movements in such a trajectory, which are undesirable for the search movements of trawler boats. At the same time, the danger of having unlimited areas of the surface of the reservoir or the sea is also eliminated. As one of the most effective options for the disposal of mines, their detonation with warheads dropped from an aerial liquidator drone has been proposed. To clarify the coordinates of the location of anchor and bottom mines, it is proposed to use the kinematic design method. This technique provides for the formation of a base plane and the designation of a "picture" projection plane in the depth of the sea, on which the projecting rays will be projected. In this case, the wanted mine serves as a design object. The use of kinematic design techniques and an auxiliary floating search vessel to search for mines allows not only to carry out search operations without direct participation in the search of people, but also to increase the productivity and speed of search operations. In order to manage the movements of the search floats, to process the data provided by them about the detected mine, to specify the coordinates of the detected mine, a corresponding block diagram of the computer program is proposed. It was established that at speeds of 5÷5.5 knots of search movements of floating vessels, using the proposed search scheme, it is possible to survey up to 6 square kilometers of sea water area every hour. At the same time, it is possible to save up to 20 liters of valuable fuel during the survey of such an area due to the reduction of movements of the trawler boat.

Key words: *search, anchor and bottom mines, mine clearance, trawler boat, boat, additional floating vehicle, block diagram, calculation, coordinates, kinematic design.*

Вступ

Постановка проблеми. Специфічною особливістю розвитку науки та техніки впродовж перших десятиліть XXI століття є практично миттєве впровадження новітніх результатів досліджень у космічну та військову галузі. Як наслідок – розвиток цих галузей набув нечуваних результатів та можливостей.

Не оминуло впровадження наукових досягнень і таку специфічну галузь військового озброєння як міни морського застосування. Сучасні вибухові матеріали, що значно перевищують за руйнівною здатністю традиційні динаміт та нітротолуол, спроможність реагувати на акустичні, електронні та вібраційні збурення поверхні моря, здатність з виявлення цілі вивільнятись від утримуючих тросів чи випливати з морського дна на поверхню – усе це перетворює сучасні міни з пасивних вибухових зарядів на активних розшукувачів цілей та ефективних засобів їх знищення. Поряд із покращенням та вдосконаленням руйнівної спроможності морських мін вдосконалюються і засоби їх маскування та запобігання розмінуванню. Наприклад,

виготовлення мін із малочутливих до пошукових акустичних чи електромагнітних хвиль матеріалів, оснащення потужних мін захисними вибуховими пастками тощо.

Тому закономірно, що однією із найважливіших методик знешкодження мін при розмінуванні морських акваторій у сьогоденні постає дистанційне їх підривання або глибинними бомбами або підводними дистанційно керованими роботизованими апаратами-підривниками.

Сучасні інженерна думка та фантазія перетворили здавалось би простий і невибагливий смертоносний виріб, яким є традиційна морська міна, на витвір мистецтва. Теперішні різновиди морських мін, наприклад, самотранспортована донна міна-торпеда Mk.67 SLMM **(**виробництво США), можуть самотужки допливати до наперед заданих їм координатами місць мінування. Або будучи скинутими із літаків пролітати до 100 кілометрів і м'яко приводнитися та залягти на дно в очікуванні своєї жертви (модель Quickstrike-ER**)** [1]**.** Чи перебуваючи на морському дні в режимі тривалого очікування у потрібний момент зреагувати, наприклад, на характерний шумовий фон корабля чи підводного човна, миттєво стартувати і торпедувати цей плавучий засіб (модель Mark 60 Captor виробництва США або модель протичовнової міни-торпеди ПМК-2 виробництва Росії**).** Міни-пастки, здатність до цифрової обробки складних сигналів детонаторами мін, нечутливі до електромагнітних випромінювань пластикові корпуси та надпотужні сучасні вибухові речовини, маскування під морські валуни та донне каміння – це прояви інженерного мистецтва оснащення та оздоблення сучасних морських мін. Усе це притаманні сучасним мінам тонкощі інженерної думки їх творців, спрямовані на маскування мін від несвоєчасного їх виявлення та на невідворотність їх смертоносного вибуху в наперед обумовлених ситуації чи часі.

Тому сучасні засоби розміновування зорієнтовані на зведення до мінімуму можливості контакту з мінами людей. Розміновування, переважно, зводиться до дистанціного знешкодження мін за допомогою катерів-тральників та дистанційно керованих підводних торпед чи спеціальних роботів-ліквідаторів мін їх самопідриванням.

Морські міни, за рахунок автоматизації їх спроможності до обробки сигналів на спрацювання та новітніх методів доставки у точки закладання, перетворились із пасивної очікувальної зброї у зброю наступальну. Тому тепер для унеможливлення судноплавства та зриву розгортання ворожого флоту достатньо без заходу в зону дії протиповітряної оборони противника чи поза своїми територіальними водами виставити міни за допомогою плануючих бомб або підводних безпілотників.

Найефективнішими для розміновування значних площ морської акваторії на даний час являються морські самохідні трали. Це, переважно, катери, які спеціально адаптовані до того, щоб витримувати навантаження від вибухів мін. Найчастіше на такий катер встановлюють різноманітні імітатори шумів, вібрацій та магнітних полів, що роблять його схожим для мін на типовий корабель. В сучасному світі це розбірний понтонний катер зі швидкістю руху 6–10 вузлів, який можна швидко перетранспортовувати літаком в потрібну точку світу. Прикладом сучасних катерів-тральників являються шведський SAM-3 і американський SAM-05.

Отже, мимоволі напрошується висновок – головне вчасно виявити міну, а сучасних засобів для її знешкодження, у тому числі і дистанційного, достатньо [2].

Тому не втрачають своєї актуальності наукові дослідження в руслі вдосконалення існуючих та створення новітніх більш прогресивних методів пошуку мін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Специфічною особливістю вдосконалення сучасних методів пошуку морських мін є те, що переважно вони ґрунтуються не тільки на можливостях вдосконалення пошукових засобів, наприклад, використання БПЛА [3–5] чи плавучих безпілотних апаратів, а і базуються на застосуванні математичного апарату та практично невичерпних спроможностей сучасної обчислювальної техніки [3–5].

Певні перспективи у цьому контексті спостерігаються в спроможності долучити до пошукових методів визначення координат морських мін методик сучасної нарисної геометрії, а саме її складової, що відома під назвою «кінематичне проєктування» [6, 7]. Під «кінематичним проєктуванням (відображенням)» розуміють проєктування, при якому всі його складові елементи, а саме центр проєктування, фокальні фігури проєктуючих комплексів та конгруенцій, об'єкти проєктування (прообрази) та носій проекцій («картинна площина») можуть здійснювати взаємонезалежні просторові переміщення у просторі і часі [8, 9].

Вагомий внесок у становлення та розвиток кінематичного проктування привнесено науковцями НУ «Львівська політехніка» В. М. Глаговським та І. Г. Пулькевич. У їх роботах [10] вперше було запропоновано використання розроблених ними лінійних операторів для грамографічних, ротографічних та спінографічних відображень рухомих об'єктів простору.

Поряд із створенням алгоритмів рішень прямої задачі кінематичного проєктування для пошуку проекцій траєкторій просторових переміщень об'єктів авторами було розроблено і грунтовно досліджено також і алгоритми рішень оберненої задачі. Обернена задача передбачає пошук за відомою траєкторією руху координат просторового розташування об'єкта. Опирались ці дослідження на досвід працівників Національного університету «Львівська політехніка» (Україна) в галузі аерофотогеодезії у застосуванні безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для визначення координат місцевості при складанні топографічних карт [11, 12].

Стосовно використовуваного нами методу кінематичного проєктування відзначимо, що цей метод проєктування дозволяє визначати миттєві координати та траєкторії просторових переміщень рухомих

об'єктів. При цьому при наявності руху всіх без винятку засобів і складових проєктування, а саме об'єктів проєктування, «спостерігачів» та координатної площини із проєктуючими променями. При цьому усі ці об'єкти проєктування або частина з них можуть знаходитися у прискореному або рівномірному русі, а рух кожного із складових проєктування не залежний від руху інших його складових [10].

Практичне застосування теоретичних основ кінематичного проєктування відкриває нові можливості у відображенні рухомих об'єктів простору, в питаннях пошуку миттєвих координат їх розташування, а за потреби і у визначенні характеристик та складових руху.

Найбільш яскравим прикладом успішного використання кінематичного проєктування для відслідковування траєкторій та координат просторових переміщень рухомих об'єктів є успішні дослідження геометрів НУ «Львівська політехніка» по визначенню координат безпілотних літальних апаратів [6, 7]. У результаті цих досліджень створена теоретична база математичного апарату розрахунку засобами кінематичного проєктування координат та траєкторій просторових переміщень ворожих диверсійно-розвідувальних БПЛА. Експериментальна перевірка підтвердила високу ефективність та точність визначення просторових координат рухомих об'єктів засобами кінематичного проєктування.

Саме це, а також усвідомлення актуальності та доцільності залучення до пошуків мін у морських глибинах сучасного математичного апарату та останніх досягнень нарисної геометрії, і було покладено в основу даного дослідження.

Метою даного дослідження, у його загальному трактуванні та сприйнятті, є підвищення обороноздатності та безпеки судноплавства морських територій та прісноводних водойм України шляхом ліквідації мінних полів із якірними та донними мінами. Конкретизована мета даної роботи – розробка принципових схем оптимізації просторових переміщень пошукових розміновувальних суден та створення алгоритмів уточнених розрахунків координат якірних та донних мін засобами кінематичного проєктування.

Виклад основного матеріалу

Специфічні особливості застосування засобів кінематичного проєктування для підвищення ефективності пошуків мін у морських глибинах та принципову пошукову схему, що відображає суть застосування засобів кінематичного проєктування, відображено на рис. 1–4.

На рис. 1 та рис. 2 схематично відображено пошук морських мін із використанням засобів кінематичного проєктування. Для реалізації цієї схеми пошуку використовують два незалежні плавучі засоби, наприклад, безпосередньо катер-тралівник та допоміжний плавучий засіб (ДПЗ). Кожен із цих плавучих засобів оснащений пошуковою гідролокаційною апаратурою та мережею надійного взаємозв'язку. Окрім традиційного спорядження для підрізання якірних мін катер-тралівник повинен бути оснащеним сучасними підводними безпілотними роботизованими пристроями для дистанційного підривання донних та глибинних мін. Командний пункт катера-тралівника, для можливості застосування кінематичного проєктування як засобу визначення координат морських мін, необхідно оснастити швидкодіючою обчислювальною технікою та належним її програмним забезпеченням, а також радіолокаційною станцією (РЛС) для відслідковування та визначення віддалі до допоміжного плавучого засобу. Ці вимоги міг би задовольняти, наприклад, катер-тралівник моделі ARCIS Atlas Electronik [1, 2].

У якості допоміжного пошукового плавучого засобу тут може використовуватися, наприклад, потужний моторизований човен чи катер, що спроможний протистояти вітровому навантаженню та обумовленому ним хвильовому збуренню морської поверхні. Сприйнятим є і варіант, у якому в якості ДПЗ використовуватимуть ще один катер-тралівник.

Тому, організовуючи пошукові роботи із розмінування певних акваторій моря, доречно таким чином організовувати ці роботи, щоб максимально широко охопити площі пошукових ділянок, а також забезпечити знешкодження виявлених боєзарядів. Тому тут важливе значення мають, поряд із потужністю пошукової апаратури, і траєкторії пошукових переміщень використовуваних для пошуків технічних засобів. Часто при цьому збільшують кількість одночасно використовуваних технічних пошукових засобів, узгоджуючи поміж ними режими пошукової роботи та траєкторій їх просторових переміщень [6, 7, 10].

Певним чином пошуки плавучих мін значною мірою схожі на переміщення риболовецьких суден при пошуках ними косяків риби, придатних для морського промислу [16].

Розмінування морської акваторії від плавучих, якірних та донних мін із використанням допоміжного плавучого засобу (ДПЗ) та кінематичного проєктування здійснюють у наступній послідовності. Катер-тралівник із завантаженими на нього допоміжною пошуковою апаратурою та засобами підривання виявлених мін заходить в центральну частину виділеної йому для пошуків мін ділянки акваторій моря. Тут він відшвартовує оснащений пошуковою апаратурою допоміжний плавучий засіб, наприклад, моторний човен, який відходить від катера-тралівника на віддаль

$$a = R + r,$$

де R – радіус півсфери ефективної пошукової дії гідроакустичної апаратури катера-тралівника;

r – радіус півсфери ефективного пошуку гідроакустичної апаратури ДПЗ.

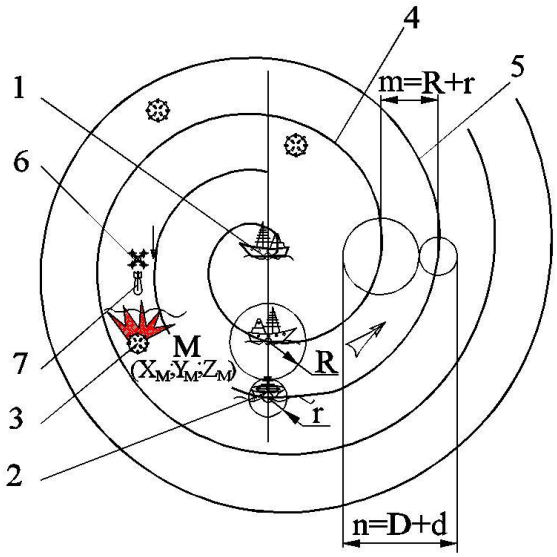


Рис. 1. Траєкторія просторових переміщень по спіралі Архімеда катера-тралівника та допоміжного плавучого засобу в пошуках мін
Джерело: розроблено авторами

Вилаштуваним у одну лінію катеру-тралівнику та допоміжному плавучому засобу в процесі пошуку мін надають переміщення по спіралі Архімеда, крок якої рівний

$$n = D + d,$$

де D та d – відповідно діаметри півсфер ефективного пошуку гідролокаційної апаратури катера-тралівника та допоміжного плавучого засобу.

Центр спіралі Архімеда, по якій переміщаються пошукові судна, умовно облаштований в центрі пошукової ділянки акваторії моря.

При вище вказаних параметрах пошукової апаратури як оптимальні можна було б рекомендувати наступні параметри траєкторії пошукових переміщень суден:

- $a = 150$ м – віддаль між допоміжним плавучим засобом та катером-тралівником;
- $n = 300$ м – крок спіралі Архімеда просторового переміщення пошукових суден;
- $r = 50$ м – радіус півсфери ефективного пошуку гідролокаційної апаратури допоміжного плавучого засобу;
- $R = 100$ м – радіус півсфери ефективної пошукової дії гідроакустичної апаратури катера-тралівника;
- $n = D + d = 200 + 100 = 300$ м – ширина смуги ділянки пошуку, охопленої двома пошуковим суднми.

Траєкторія руху обох пошукових суден по спіралі Архімеда обрано із двох міркувань:

- дана траєкторія не допускає наявності необстежених ділянок акваторії моря;
- ця плавна траєкторія, на відміну від інших можливих, не передбачає зворотних рухів та стрімких поворотів, що не є бажаним для відповідального процесу пошуку мін.

Якщо прийняти за середню допустиму швидкість пошукових перемішень катера-тралівника та допоміжного плавучого засобу швидкість 9,5–11 вузлів, тобто 18 – 20 км/год, то за годину часу цими двома пошуковими суднами при просторових їх переміщеннях по спіралі Архімеда буде обстежено приблизно шість квадратних кілометрів акваторії моря.

У випадку виявлення будь-яким із пошукових суден плаваючої, якірної чи донної міни обхід ними території по спіралі Архімеда призупиняють. По відповідній команді із командного пункту катер-тралівник та допоміжний плавучий засіб розташовуються рівновіддалено по два боки від виявленої міни.

Після цього вмикають одночасно на обох суднах спостережну ідентифікаційну апаратуру для ідентифікації виявленого у морі предмету. Саме спостереження та фотографії плаваючого, заякореного чи лежачого на дні моря предмету з двох зміщених на 180° одна від одної точок (суден) надають можливість побудови на екрані монітора комп'ютера командного пункту твердотільної моделі даного виявленого об'єкта.

Якщо виявлений на поверхні чи у глибині моря предмет все ж таки виявиться міною, приступають до її знешкодження. Для цього, перш за все, використовуючи відповідну програму, уточнюють координати розташування даної міни. Спеціальною обчислювальною програмою вмикають алгоритм послідовності уточнення координат міни засобами кінематичного проєктування. Класичний термін «кінематичне проєктування» передбачає можливість проєктування, у якому всі або окремі його складові, а саме центр проєктування, об'єкти проєктування та носії проекцій («картинна» площина) можуть здійснювати взаємонезалежні просторові переміщення у просторі та часі.

При пошуках мін із використанням кінематичного проєктування розрахунковою програмою передбачено виконання наступних етапів. На першому етапі у точці *A*, що символізує закінчення гідроакустичної пошукової випромінюючої антени катера-тралівника 1, умовно облаштовують тривимірну ортогональну систему координат (рис. 2). Вісь *x* цієї системи координат має початок у точці *A* і спрямована в напрямку точки *B*, що символізує місце та координати облаштування другої гідроакустичної випромінюючої антени допоміжного плавучого засобу 2. Вісь *«z»* бере початок в точці *A*, перпендикулярна осі *x* і спрямована вниз у морські глибини. Вісь *«y»* теж започатковується в точці *A* і перпендикулярна осям *«x»* та *«z»*. Спрямовані по поверхні водойми осі *«x»* та *«y»*, як дві взаємно перпендикулярні прямі, утворюють так звану «базову» площину *α*. На віддалі *a* від точок *A* та *B* у площині *α(x;y)* задають допоміжну точку із координатами *C(a*/2;0,87*a;*0*)*. Задавши глибину *H*, що перевищує в 1,2-1,5 рази орієнтовну глибину залягання міни, на перпендикулярах до базової площини *α* в точках *A*, *B* та *C* в напрямку морських глибин встановлюють точки *M, N* та *P*. Ці три точки *M, N* та *P* задають у морських глибинах чи просторі дна «картинну» площину *β(N;M;P)*, яка паралельна базовій площині *α(A;B;C)* і віддалена від неї на віддаль *H*, тобто *H=AM=CN=BP; α(ABC)//β(MNP)* (рис. 2). Розташування «картинної» площини *β* є уявним і необхідним лише для розрахунків координат. Тому ця «картинна» площина може бути заданою як у товщі води, так і навіть в глибинах морського дна чи дна водойми. Це усуває небезпеку впливу на точність розрахунків координат при кінематичному проєктуванні відбитих від дна водойми хибних сигналів ехолокаторів. І це є суттєвою перевагою застосування для пошуку мін засобів кінематичного проєктування.

На другому етапі, увімкнувши одночасно гідроакустичні пошукові системи катера-травлівника 1 та допоміжного плавучого засобу 2, спрямовують в очікуваному напрямку розташування виявленої міни пошукові хвилі (рис. 2). На моніторах пошукових систем фіксують напрям (азимут) проєктуючих променів, що проходять від кожної гідроакустичної пошукової системи через точку просторового розташування знайденої міни, та кути їх нахилу до базової площини *α*, тобто $\gamma = p_1 \hat{} \alpha$ та $\sigma = p_2 \hat{} \alpha$. Крім того для повноцінної координатної прив'язки проєктуючих променів до запровадженої системи координат для кожного із проєктуючих променів p_1 та p_2 визначають і кут його нахилу до лінії *a*, що з'єднує між собою катер-тралівник 1 та ДПЗ. Тобто $\delta = p_1 \hat{} AB$, $\varphi = p_2 \hat{} AB$ (рис. 2).

За координатами точок розташування пошукових антен та кутами γ, σ, δ та φ нахилу проєктуючих променів до базової площини *α* та лінії α, що з'єднує обидві пошукові системи, на комп'ютері командного пункту відображають обидва проєктуючі промені p_1 та p_2. Програмним забезпеченням зводять проєктуючі промені до взаємного їх перетину в центральній частині виявленої міни (точка *M* на рис. 2). Зведені до перетину між собою проєктуючі промені p_1 та p_2 формують площину $\gamma\ (p_1\ ;\ p_2)$, яка перетинає базову α та «картинну» β площини по двох паралельних між собою лініях *a* та *b*.

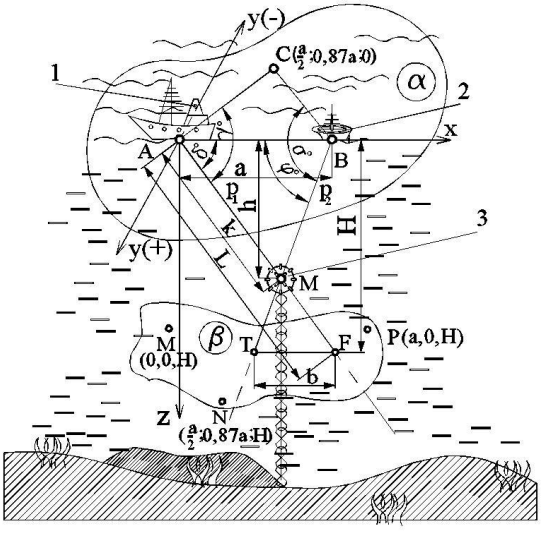


Рис. 2. Принципова схема використання кінематичного проєктування для пошуку та визначення координат морських якірних мін
Джерело: розроблено авторами

На третьому етапі комп'ютерна програма прораховує координати точок $F = p_2 \cap \beta$ та $T = p_1 \cap \beta$ перетину проєктуючих променів p_1 і p_2 із картинною площиною β. А також визначає віддаль *b* між точками перетину проєктуючих променів із «картинною» площиною β, тобто $b = |FT|$.

Точку перетину проєктуючого променя із «картинною» площиною β шукають аналітичним методом. При аналітичному методі пошуку точки перетину задають аналітичне рівняння проєктуючого променя як рівняння прямої лінії, що проходить через відому точку (*A* або *B*) із заданими координатами під відомим кутом нахилу до «базової» площини *α*. Також задають аналітичне рівняння «картинної» площини *β*, що проходить через три точки *M,N* та *P* із відомими координатами. Точкою перетину прямої із площиною у цьому випадку буде шукана точка, координати якої одночасно задовольняють і рівняння прямої, і рівняння площини.

На четвертому етапі із двох подібних трикутників Δ*ABM* та Δ*FTM*, утворених пересічними променями, вираховують координати їх спільної вершини точки *M*. Це точка *M*, у якій на даний момент часу розміщена шукана міна (рис. 2). Із розв'язків вказаних трикутників визначають два вагомі для успішного пошуку міни параметри, а саме глибину розміщення міни *h* та віддаленість *k* цієї міни від катера-тралівника. Для цього використовують математичні залежності

$$k = h\sqrt{1 + \left(Ctg\ \varphi\right)^2}; \quad h = H\left(1 - \frac{b}{a+b}\right), \tag{1}$$

де k – віддаль від катера-тралівника до виявленої міни;

h – глибина розташування міни відносно поверхні водного плеса водойми чи моря;

H – задана віддаль від поверхні моря до «картинної» площини;

a – віддаль між катером-тралівником та ДПЗ;

b – віддаль між точками перетину проєктуючих променів (азимутів) гідроакустичних пристроїв із «картинною» площиною;

φ – кут нахилу проєктуючого променя (азимуту) гідроакустичного пристрою до лінії a.

Для перевірки правильності здійснених розрахунків, володіючи координатами точок А та В, а також точок $F = p_2 \cap \beta$ та $T = p_1 \cap \beta$ перетину проєктуючих променів p_1 і p_2 із картинною площиною β, тобто координатами точок на кінцях відрізка проєктуючого променя, записують рівняння прямої лінії, що проходить через дві точки із відомими координатами. Тобто $A \in p_1$; $A(x_A, y_A, z_A)$; $T \in p_1$; $T(x_T, y_T, z_T)$; $p_1 \subset l_1$.

Тоді рівняння прямої l_1 матиме вигляд

$$\frac{x - x_A}{x_T - x_A} = \frac{y - y_A}{y_T - y_A} = \frac{z - z_A}{z_T - z_A}. \tag{2}$$

Аналогічно для проєктуючого променя p_2, що проведений через допоміжний пошуковий засіб (точка В) та виявлену міну (точка М) і точку F з відомими координатами $F(x_F, y_F, z_F)$, рівняння прямої l_2, що проведена через проєктуючий промінь p_2, матиме вигляд

$$\frac{x - x_B}{x_F - x_B} = \frac{y - y_B}{y_F - y_B} = \frac{z - z_B}{z_F - z_B}. \tag{3}$$

Формують систему рівнянь із двох рівнянь проєктуючих променів і спільним їх рішенням шукають координати точки М, у якій розміщена виявлена міна. Якщо виявлені координати точки перетину між собою обох проєктуючих променів співпадають у вище відзначених кроках перевірок, то роблять висновок про відповідність розрахованих координат розміщення міни їх реальному значенню.

Командний пункт по можливості, черговий раз уточнює тип міни, кінцево проаналізовує безпеку вибуху міни для довкілля, для людей та використовуваної пошукової техніки і дає команду на ліквідацію міни. Тоді катерові-тральнику доведеться протралити зону моря, де розміщена міна, і знешкодити її. Або ж використати інші більш потужні сучасні засоби ліквідації мін. Наприклад, плавучі безпілотні апарати, оснащені керованими торпедами-ліквідаторами чи, так звані, роботи-камікадзе. Їх самопідрив на виявленій міні руйнує її оболонку і міна або вибухає, або руйнується, перестаючи бути загрозою для людей та плавзасобів.

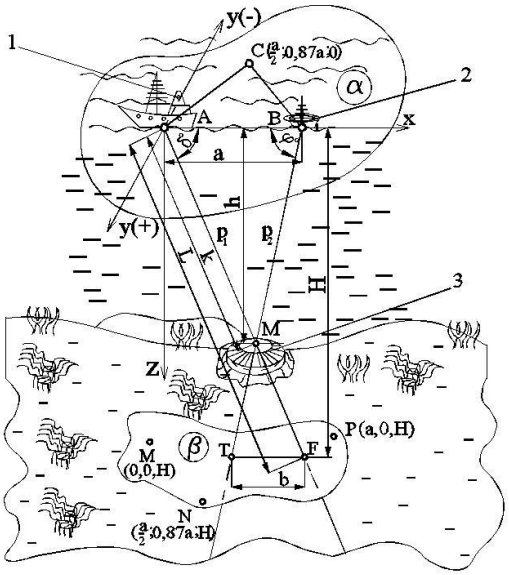


Рис. 3. Принципова схема використання кінематичного проєктування для пошуку та визначення координат донних мін
Джерело: розроблено авторами

Таким чином, при використанні даного методу пошуку та ліквідації мін практично немає потреби у безпосередньому контакті людей командного пункту катера-тралівника із небезпечною для їх життя міною.

На рис. 3 відображена принципова схема використання кінематичного проєктування для пошуку та визначення координат донних мін. Тут збережено усі буквенні позначення окремих елементів пошукової схеми, що і на рис. 2. Усі етапи визначення та розрахунку координат донних мін із застосуванням специфічних особливостей кінематичного проєктування тут співпадають із вище описаними етапами пошуку якірних мін. Відмінність полягає лише у тому, що при пошуку якірних мін «картинна» площина β умовно призначається у товщі води, а при пошуку донних мін вона умовно розташовується у товщі морського дна.

На рис. 4 відображена блок-схема послідовності розрахунків та побудови комп'ютерної програми для визначення координат виявленої пошуковими плавучими засобами міни. Розрахункова блок-схема передбачає введення табличних вхідних даних (таблиця 1), до яких належать модель та кількість пошукових суден, характеристика їх просторового розташування та переміщень, ширина пошукової смуги під час пошуків мін.

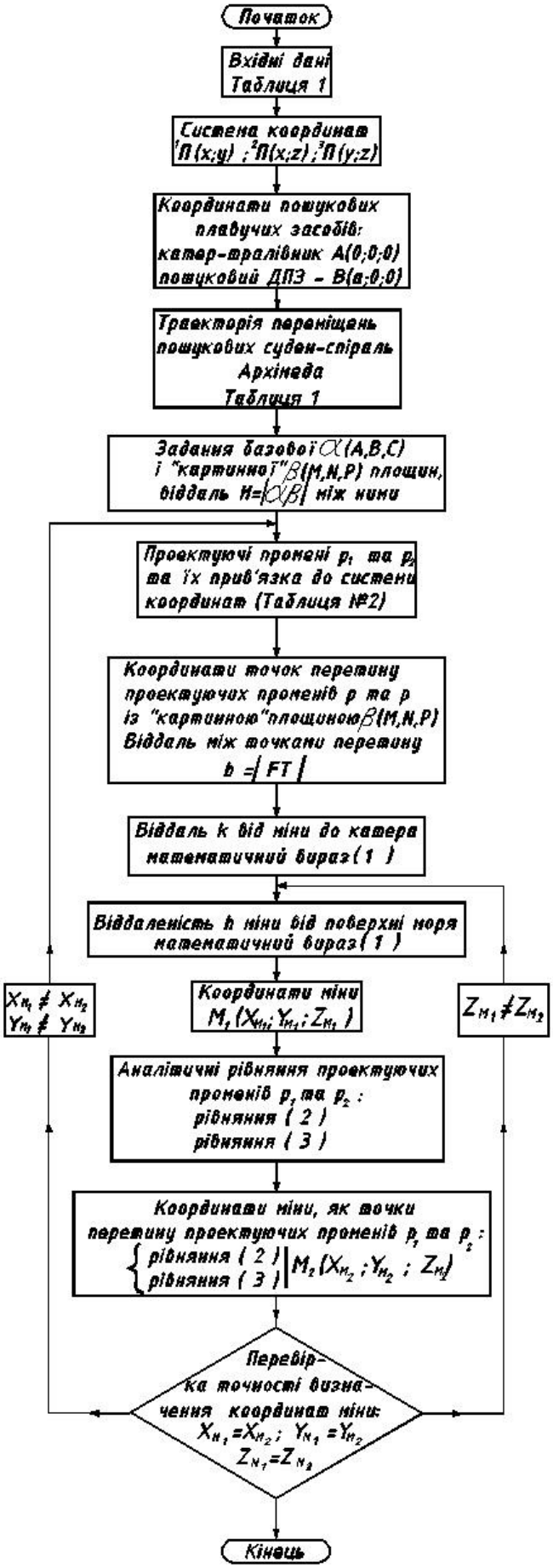


Рис. 4. Блок-схема розрахунків координат виявлених якірних або донних мін. Джерело: розроблено авторами

Безпосередньо розрахунок передбачає декілька етапів. Зокрема, визначення віддалі від базового катера-тралівника до допоміжного плавучого засобу, розрахунок координат проекцій проєктуючих променів

пошукової апаратури суден, визначення довжини генерованих проєктуючих променів, спрямованих на виявлену міну тощо (таблиця 2).

Таблиця 1

Табличні вхідні дані блок-схеми розрахунку координат виявлених мін

№ з/п	Назва заданого параметра	Позначення і числове значення заданого параметра
1.	Кількість пошукових плавучих засобів	Модель катера-тралівника – SAM-05; Кількість допоміжних плав. засобів – один
2	Траєкторія пошукових переміщень плавучих засобів	Спіраль Архімеда Міжвиткова віддаль або крок спіралі $n = 300$ м, – віддаль між суднами $a = 150$ м
3	Ширина смуги пошукової ділянки	$n = 300$ м
4	Радіус півсфери ефективної пошукової дії гідроакустичної апаратури катера-тралівника	$R = 100$ м
5	Радіус півсфери ефективного пошуку гідроакустичної апаратури допоміжного плавучого засобу	$r = 50$ м

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 2

Параметри проєктуючих променів в обраній системі координат (рис. 2, рис. 3)

№ з/п	Проєктуючі промені гідроакустичної пошукової апаратури катера-тралівника та допоміжного плавучого засобу (ДПЗ)		
	Елементи просторового розташування проєктуючих променів та їх проекцій	Катер-тралівник	ДПЗ – допоміжний пошуковий плавучий засіб
1	Довжина l_i проєктуючого променя	$p_1 = l_1 = TA$	$p_2 = l_2 = FB$
2	Кути нахилу проєктуючих променів p_i до осі x	$\delta^\circ = p_1 \hat{} x$	$\varphi^\circ = p_2 \hat{} x$
3	Кути нахилу проєктуючих променів до поверхні моря (горизонтальної площини проекцій ^{1}П);	$\gamma^\circ = p_1 \hat{} {}^1\Pi$	$\sigma^\circ = p_2 \hat{} {}^1\Pi$

Джерело: розроблено авторами.

На підставі цих даних розраховують координати міни і перевіряють їх точність. У випадку розбіжностей прорахованих по кожному із пошукових суден даних уточнюють кути нахилу та довжини проєктуючих променів радіолокаційної станції катера-тралівника та аналогічні дані допоміжного пошукового судна (рис. 4).

Обговорення результатів дослідження

Звичайно, як і більшість інженерних рішень, дана пропозиція щодо вдосконалення методів розмінування акваторії моря та річок має як свої переваги, так і свої вагомі недоліки. Незаперечно найвагомішим із недоліків є те, що він придатний лише для мін, корпуси яких спроможні відбивати сигнали пошукової апаратури. Навіть звичайні донні міни, що тривалий час пролежали на морському чи річковому дні і вкрились товстим шаром нанесеного течіями намулу чи піску, можуть стати «невидимими» для пошукової апаратури суден. Не меншу проблему становлять і металеві уламки конструкцій ушкоджених та затонулих кораблів, які доволі густо вкривають морське дно, особливо на традиційних шляхопроводах та рейдах. Тут зворотня ситуація – ці уламки доволі легко прийняти за металеві корпуси мін та згаяти час і технічні засоби на намагання їх «розмінувати».

Іншим відчутним недоліком описаного методу розмінування є його критична залежність від погодних умов. Вітер із швидкістю понад 7-8 м/с, збурення хвиль висотою понад 1,5 метри, надмірна задимленість повітря, інтенсивні дощові чи снігові опади – усе це унеможливлює використання «легких» моторизованих човнів, що пропонуються для застосування у якості допоміжних пошукових плавучих засобів.

Певним недоліком є і те, що виявлені даним методом плавучі міни не можливо позбавити плавучості чи зафіксувати на місці їх виявлення. Тому ці виявлені плавучі міни необхідно відразу ж по виявленню ліквідувати. Інакше вони можуть бути віднесені вітрами чи течіями в інші ділянки і їх пошуки доведеться розпочинати заново.

Та є дві незаперечні переваги, які властиві методиці застосування кінематичного проєктування для пошуку мін. Перш за все, це повне усунення людей як від пошукових переміщень, так і від знешкодження

мін. Це дуже важливо, так як процес розмінування не тільки довготривалий, а і вкрай небезпечний для команди катерів-тралівників та водолазів.

Іншою вагомою перевагою даного методу розмінування є відносно висока продуктивність та швидкість його пошукових робіт [10]. Широка смуга охоплення двома суднами пошукової території, їх узгоджені переміщення по спіралі Архімеда – усе це сприяє ефективним пошуковим роботам. До того ж це усуває наявність не обстежених ділянок, що доволі часто трапляється при зворотно-поступальних переміщеннях пошукових суден.

Ну і як позитивний аспект можна відзначити зменшені як мінімум у півтора рази пошукові переміщення катера-тралівника, а відповідно, і пропорційно зменшені витрати палива для роботи його привідних двигунів. Його переміщення дублюються допоміжним пошуковим судном, яке суттєво менше споживає палива. Незаперечно це компенсує витрати на придбання та оснащення пошуковою апаратурою допоміжного пошукового судна, на створення необхідного програмного забезпечення для керування пошуковими переміщеннями суден тощо. Адже для самостійного протралювання аналогічної за площею в 6 км^2 ділянки моря катерові-тралівнику довелося б за годину проплисти біля 10 додаткових кілометрів, витративши на це приблизно 20 літрів палива вартістю приблизно 1000 гривень. А таких ділянок впродовж одного робочого дня буде не менше 5-6, тобто це щоденна економія 5-6 тисяч гривень.

На жаль, враховуючи воєнні події на території України, авторам статті не вдалося здійснити натурні випробування запропонованої схеми розміновування. Автори сподіваються здійснити це у майбутньому і запрошують до співпраці усіх зацікавлених у результатах даного дослідження осіб та організацій.

Висновки

1. Стрімкий розвиток науки та техніки на межі тисячоліть суттєво вдосконалив військове озброєння загалом і засоби мінування як на суші, так і на водних просторах, зокрема. Новітні можливості та технології виготовлення вибухових речовин, застосовувані для виготовлення мін сучасні матеріали, високоякісна електроніка керування моментом вибуху та інші досягнення перетворили сучасні міни із «пасивного очікувача» в потужних гіперактивних автономних руйнівників надводних та підводних плавучих засобів.

2. Серед різновидів сучасного мінного озброєння, яке використовують на акваторіях річок та морів, якірні та донні міни найпотужніші. До того ж вони найпідступніші через складність їх своєчасного виявлення та знешкодження.

3. Суть запропонованого методу полягає у застосуванні для пошуку якірних та донних мін катером-тралівником додаткового плавучого пошукового засобу. Наприклад, моторизованого човна, оснащеного відповідною пошуковою апаратурою. Результати пошуків цими суднами мін зведуться до розрахунків координат виявлених мін засобами кінематичного проєктування. Використання малогабаритних економних додаткових пошукових суден вдвічі зменшує потребу в пошукових переміщеннях катерів-тралівників. Це відчутно здешевлює пошукові роботи, підвищує їх безпеку для командного складу катерів-тралівників.

4. Серед когорти можливих траєкторій переміщень додаткового пошукового судна та катера-тралівника при пошуках морських мін рекомендовано як оптимальну траєкторію пошукових переміщень групою, наприклад, із двох вилаштуваних в ряд суден по спіралі Архімеда із міжвитковим кроком, пропорційним кількості пошукових суден та радіусу ефективної дії їх пошукової апаратури.

5. Не зважаючи на недоліки методу пошуку якірних та донних мін із застосуванням засобів кінематичного проєктування, що полягають у його підвищеній чутливості до метерологічних погодніх умов, а особливо, до вітрового навантаження на легкі пошукові судна, все ж даний метод має перспективу широкого практичного застосування. Обумовлюється це тим, що перш за все, при його використанні усувається небезпека контакту людей із вибухонебезпечною міною, а по-друге, застосування даного методу суттєво зменшує потребу в пошукових переходах катера-тралівника, забезпечуючи тим самим відчутну економію палива.

Література

1. Антонов Р. БПЛА допоможуть виявити нездетонувавші боєприпаси. Мілітарний : портал. URL: https://mil.in.ua/uk/news/bpla-dopomozhut-vyyavlyaty-nezdetonuvavshi-boyeprypasy/.
2. Апальков Ю. В. ВМФ СССР и России. Корабли противоминной обороны. Часть 2. СПб : Морское наследие, 2019. 224 с.
3. Лаврівський М. З., Тур Н. Є. Використання безпілотних літальних апаратів в моніторингу надзвичайних ситуацій у лісовій місцевості. Науковий вісник НЛТУ України. 2015. Вип. 258. С. 353–359.
4. Кучеренко Ю. Ф., Науменко М. В., Кузнєцова М. Ю. Аналіз досвіду застосування безпілотних літальних апаратів та визначення напрямку їх подальшого розвитку при веденні мережецентричних операцій. Системи озброєння і військова техніка. 2018. № 1. С. 25–30. doi:10.30748/ soivt.2018.53.03.
5. Мосов С. Беспилотная разведывательная авиация стран мира: история создания, опыт боевого применения, современное состояние, перспективы развития : [монография]. Киев : РУМБ, 2008. 160 с.
6. Svidrak I. G., Aftanaziv I. S., Shevchuk L. I., Strogan O. I. Determination of coordinates of unmanned aircrafts by means of kinematic projection. Mathematical Modeling and Computing. 2022. Vol. 9, № 2. P. 459–469. doi: https://doi.org/10.23939/mmc2022.02.459

7. Афтаназів І. С., Шевчук Л. І., Стоцько Р. З., Свідрак І. Г., Строган О. І., Струтинська Л. Р. Пошук безпілотними літальними апаратами плаваючих мін методами кінематичного проєктування. Розвиток транспорту. 2022. Вип. 3 (14). С. 143–165.
8. Свідрак І. Г., Баранецька О. Р., Топчій В. І., Шевчук А. О., Галкіна Н. С. Визначення просторових координат точок панорамного знімання : збірник наукових праць МДПУ ім. Б. Хмельницького. Мелітополь, 2014. Вип. 2. С. 136–140.
9. Шульц Р. В., Войтенко С. П., Крельштейн П. Д., Маліна І. А. До питання розрахунку точності визначення координат точок під час аерофотознімання з безпілотних літальних апаратів. Інженерна геодезія. 2015. Вип. 62. С. 124–136.
10. Калиновская О. П., Глоговский В. В., Пулькевич И. Г. К проблеме единой теории проекционных отображений. Прикладная геометрия и инженерная графика. 1994. Вып. 57. С. 45–50.
11. Янчук Р. М., Трохимець С. М. Створення картографічної основи для розробки генеральних планів населених пунктів за матеріалами аерознімання з непрофесійних БПЛА. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Технічні науки. 2017. Вип. 1. С. 32–39.
12. Глотов В., Фис М., Пащетник О. Розробка методики підвищення точності визначення просторових координат точок об'єктів при аерозніманні з БПЛА Геодезія, картографія і аерофотознімання. Львів, 2020. Вип. 92. С. 45–54. doi: https://doi.org/10.23939/istcgcap2020.92.045.

References

1. Antonov R. BPLA dopomozhut vyiavyty nezdetonuvavshi boieprypasy. Militarnyi : portal. URL: https://mil.in.ua/uk/news/bpla-dopomozhut-vyyavlyaty-nezdetonuvavshi-boyeprypasy/.
2. Apalkov Yu. V. VMF SSSR i Rossii. Korabli protivominnoj oborony. Chast 2. SPb : Morskoe nasledie, 2019. 224 s.
3. Lavrivskyi M. Z., Tur N. Ye. Vykorystannia bezpilotnykh litalnykh aparativ v monitorynhu nadzvychainykh sytuatsii u lisovii mistsevosti. Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy. 2015. Vyp. 258. S. 353–359.
4. Kucherenko Yu. F., Naumenko M. V., Kuznietsova M. Yu. Analiz dosvidu zastosuvannia bezpilotnykh litalnykh aparativ ta vyznachennia napriamku yikh podalshoho rozvytku pry vedenni merezhetsentrychnykh operatsii. Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika. 2018. № 1. S. 25–30. doi:10.30748/ soivt.2018.53.03.
5. Mosov S. Bespilotnaya razvedyvatelnaya aviaciya stran mira: istoriya sozdaniya, opyt boevogo primeneniya, sovremennoe sostoyanie, perspektivy razvitiya : [monografiya]. Kiev : RUMB, 2008. 160 s.
6. Svidrak I. G., Aftanaziv I. S., Shevchuk L. I., Strogan O. I. Determination of coordinates of unmanned aircrafts by means of kinematic projection. Mathematical Modeling and Computing. 2022. Vol. 9, № 2. P. 459–469. doi: https://doi.org/10.23939/mmc2022.02.459
7. Aftanaziv I. S., Shevchuk L. I., Stotsko R. Z., Svidrak I. H., Strohan O. I., Strutynska L. R. Poshuk bezpilotnymy litalnymy aparatamy plavaiuchykh min metodamy kinematychnoho proiektuvannia. Rozvytok transportu. 2022. Vyp. 3 (14). S. 143–165.
8. Svidrak I. H., Baranetska O. R., Topchii V. I., Shevchuk A. O., Halkina N. S. Vyznachennia prostorovykh koordynat tochok panoramnoho znimannia : zbirnyk naukovykh prats MDPU im. B. Khmelnytskoho. Melitopol, 2014. Vyp. 2. S. 136–140.
9. Shults R. V., Voitenko S. P., Krelshtein P. D., Malina I. A. Do pytannia rozrakhunku tochnosti vyznachennia koordynat tochok pid chas aerofotoznimannia z bezpilotnykh litalnykh aparativ. Inzhenerna heodeziia. 2015. Vyp. 62. S. 124–136.
10. Kalinovskaya O. P., Glogovskij V. V., Pulkevich I. G. K probleme edinoj teorii proekcionnyh otobrazhenij. Prikladnaya geometriya i inzhenernaya grafika. 1994. Vyp. 57. S. 45–50.
11. Ianchuk R. M., Trokhymets S. M. Stvorennia kartohrafichnoi osnovy dlia rozrobky heneralnykh planiv naselenykh punktiv za materialamy aeroznimannia z neprofesiinykh BPLA. Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. Tekhnichni nauky. 2017. Vyp. 1. S. 32–39.
12. Hlotov V., Fys M., Pashchetnyk O. Rozrobka metodyky pidvyshchennia tochnosti vyznachennia prostorovykh koordynat tochok obiektiv pry aeroznimanni z BPLA Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznimannia. Lviv, 2020. Vyp. 92. S. 45–54. doi: https://doi.org/10.23939/istcgcap2020.92.045.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-26-29
УДК 35.52:66.045

БАБИН ІГОР
Вінницький національний аграрний університет
https://orcid.org/0000-0002-7070-4957
e-mail: ihorbabyn@gmail.com
БУРЛАКА СЕРГІЙ
Вінницький національний аграрний університет
https://orcid.org/0000-0002-4079-4867
e-mail: ipserhiy@gmail.com
ХОЛОДЮК ОЛЕКСАНДР
Вінницький національний аграрний університет
https://orcid.org/0000-0002-4161-6712
e-mail: holodyk@vsau.vin.ua

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ СТРІЧКОВОЇ СУШАРКИ

В роботі досліджено ефективність використання стрічкової сушарки для процесу сушіння різних матеріалів. Стрічкові сушарки є поширеним технологічним обладнанням, що використовується у промислових процесах сушіння через їхню високу продуктивність та надійність.

Ключові слова: стрічкова сушарка, сушіння матеріалів, продуктивність, якість продукту, витрати енергії, вартість експлуатації, промислові процеси.

BABYN IHOR, BURLAKA SERHIY, KHOLODYUK OLEKSANDR
Vinnytsia National Agrarian University

EFFICIENCY OF A CONVEYOR DRYER

On a large scale in Ukraine, a technical re-engineering is being carried out, technological installations of high single pressure are being introduced, which allow to reduce the total cost of capital investments, operating costs and product compatibility with a significant p movement of work productivity. Drying processes have become widely stagnant in all the galleys of the industry and the strong state, up to 15% of the entire vigorous fire is stained on them.

Fruits, vegetables, dried brushes and other food products, which are colloidal-capillary-porous materials with water content of 35% to 95%, are not stable when harvested. The distance of water from them by way of drying up to a moisture content lower than 8-14% allows you to save their natural camp for a three-year period. Under the hour of drying, the product significantly changes, which reduces transport costs, costs for packaging and changes the need for warehouses.

The article presents the results of experimental investigations, tabulation of indicators of the productivity of a conveyor dryer with other types of dryers. Such parameters were evaluated as the dryness of drying, the quality of the product, the amount of energy and the quality of operation. On the basis of the analysis of data, it was established that conveyor dryers may have few advantages over other types of dryers. The stench is safe for fast and equal drying of materials, reduces the cost of the product and ensures a decrease in energy consumption. In addition, stinks are designated by the old term of service and a changed service obligation. The results of the study confirm that conveyor dryers can be a viable choice for industries that require an efficient drying process. It is especially important to become the optimal option for large-scale tasks, where it is necessary to process large volumes of materials.

Key words: conveyor dryer, drying materials, productivity, product quality, energy consumption, operating quality, industrial processes.

Постановка проблеми

У сучасному промисловому виробництві процес сушіння є важливою складовою для багатьох галузей, таких як харчова промисловість, сільське господарство, хімічна промисловість та інші. Ефективне сушіння матеріалів забезпечує підвищення якості продукту, збереження його корисних властивостей та зниження енергетичних витрат.

Однак, вибір оптимального типу сушарки стає важливим завданням для компаній із-за широкого спектра наявних технологій сушіння. Один із популярних типів сушарок – стрічкова сушарка – відрізняється високою продуктивністю та ефективністю, але до цього часу було проведено обмежену кількість досліджень, які визначають її переваги і недоліки порівняно з іншими типами сушарок.

Таким чином, виникає потреба у більш докладному дослідженні ефективності використання стрічкової сушарки. Важливо проаналізувати її характеристики, здібності до роботи з різними типами матеріалів, а також порівняти її продуктивність та якість сушіння з іншими типами сушарок. Такий аналіз дозволить визначити оптимальні умови використання стрічкової сушарки та вплив її впровадження на підвищення продуктивності та зниження витрат у виробничих процесах.

Аналіз останніх джерел

Дослідження вітчизняних вчених показали, що стрічкові сушарки забезпечують швидке та рівномірне сушіння сільськогосподарських культур, таких як зерно пшениці та кукурудзи. Це дозволяє зберігати якість та харчову цінність зернових продуктів, знижуючи ризик втрати урожаю через неправильне сушіння. Аналіз досліджень показав, що стрічкові сушарки можуть бути більш ефективними у порівнянні з іншими типами сушарок. Наприклад, в порівнянні з барабанними сушарками, стрічкові сушарки забезпечують більш рівномірне сушіння та вимагають меншої кількості енергії (на 20% у порівнянні з фенно-барабанними сушарками).

Метою роботи є дослідження та оцінка ефективності використання проектованої стрічкової

сушарки у процесі сушіння горіхів.

Виклад основного матеріалу

Стрічкові сушарки отримали широке застосування в овочесушильній промисловості. Аналогічного типу сушарки застосовуються для сушіння фруктів, хліба, крохмалю, дрібно-штучних макаронних виробів. Стрічкові сушарки працюють безперервно з рециркуляцією газу та без неї; в деяких конструкціях передбачено внутрішній багаторазовий підігрів газоподібного теплоносія, як який використовують топкові гази, повітря, а іноді перегріта пара. На малюнку 1 зображено стрічкову сушарку.

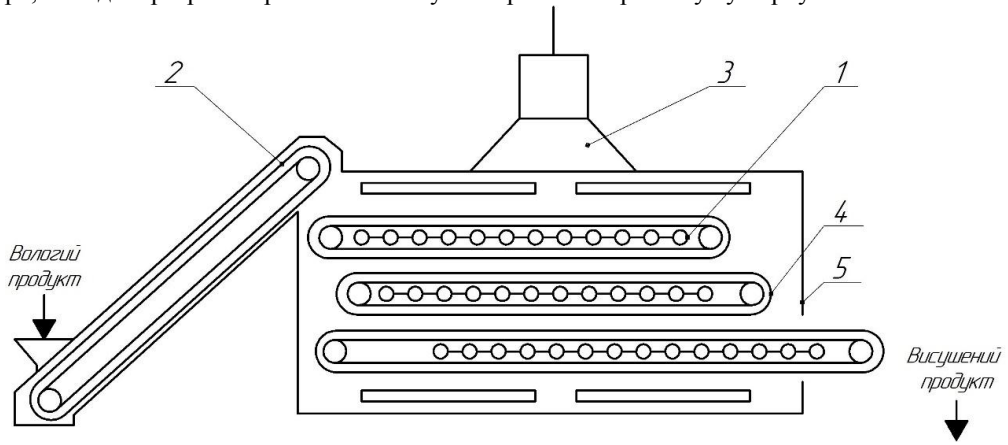


Рис. 1. Проектована стрічкова сушарка: 1 – калорифер, 2 – конвейєр, 3 – витяжний пристрій, 4 – транспортер, 5 – станина

Сушарка призначена для сушіння горіха. Сушила є камерою, закритою металевими щитами і дверима. У сушарці один витяжний пристрій. Опорною частиною сушарки є станина 5, усередині якої розташовано п'ять пар барабанів діаметром 246 мм. Кожна пара несе на собі нескінченну сітчасту дротяну стрічку із нержавіючої сталі. Один із барабанів у кожній парі є провідним, інший – натяжним. Діаметри зірочок провідних барабанів різні, отже, неоднакові швидкості руху стрічок і тривалість знаходження продукту окремих зонах.

Для очищення барабанів від продукту, що налип, служать скребки, встановлені на барабанах.

Похилий конвеєр 2, встановлений під кутом 40° до горизонтів, служить для подачі продукту в сушарку. Секції парових калориферів розташовані у просторі між гілками кожного конвеєра. У калорифери подається пара тиском 0,4 МПа.

Витяжний пристрій включає дві камери та два вентилятори. Продуктивність вентиляторів регулюють клапаном, встановленим у головці витяжної камери. Повітря забирається із приміщення через рухомі штори частини сушарок.

Очищений і нарізаний продукт, пройшовши бланшувач, промивається холодною водою і похилим конвеєром подається на верхню робочу стрічку сушарки, потім на другу, третю і т. д., проходячи послідовно п'ять стрічок. Нагріте в калориферах повітря, проходячи шар продукту, поглинає вологу та виводиться із сушарки. Наприкінці четвертої стрічки у сушарці передбачений лоток для вивантаження.

Для визначення ефективності проектованої сушарки припустимо, що під час сушіння матеріалу змінюється лише його вологість, а маса залишається постійною. Тоді маса початкового матеріалу m_{in} буде дорівнювати масі матеріалу після сушіння m_{out}:

$$m_{in}=m_{out}m_{in}=m_{out} \quad (1)$$

Маса матеріалу може бути виражена через його об'єм V та густину матеріалу ρ:

$$m=V\cdot\rho_m=V\cdot\rho \quad (2)$$

Таким чином, ми можемо записати рівняння для маси матеріалу до та після сушіння:

$$m_{in}=V_{in}\cdot\rho_{min}=V_{in}\cdot\rho\ m_{out}=V_{out}\cdot\rho m_{out}=V_{out}\cdot\rho \quad (3)$$

Оскільки об’єм матеріалу залишається постійним, ми можемо записати:

$$V_{in}=V_{out}=VV_{in}=V_{out}=V \quad (4)$$

Тепер давайте розглянемо зміну вологості матеріалу під час сушіння. Початкова вологість W_{in} виражена у відсотках, але її також можна представити у вигляді десяткового дробу (наприклад, 35% = 0.35) для зручності розрахунків.

Після сушіння вологість матеріалу зменшується до W_{out}, також вираженої у десятковому дробі (наприклад, 8% = 0.08).

Вологість матеріалу можна розрахувати як відношення маси вологи до загальної маси матеріалу:

$$W=m_{water}m_{total}W=m_{total}m_{water} \quad (5)$$

Для початкової вологості W_{in} та кінцевої вологості W_{out} ми можемо записати:

$$W_{in}=m_{water,in}minW_{in}=minm_{water,in}\ W_{out}=m_{water,out}m_{out}W_{out}=m_{out}m_{water,out} \quad (6)$$

Знаючи, що маса матеріалу до сушіння m_{in} дорівнює масі матеріалу після сушіння m_{out}, ми можемо виразити маси вологи під час сушіння так:

$$M_{water,in}=W_{in\cdot min}m_{water,in}=W_{in\cdot min}\ m_{water,out}=W_{out}\cdot m_{outmwater,out}=W_{out}\cdot m_{out} \quad (7)$$

Тепер можемо записати модель для ефективності використання стрічкових сушарок:

$$Efficiency=W_{in}−W_{out}W_{in}\cdot100Efficiency=W_{in}/W_{in}−W_{out}\cdot100 \quad (8)$$

Ця формула визначає ефективність сушіння як відношення зниження вологості до початкової вологості матеріалу, вираженого у відсотках. Чим більше відсоток ефективності, тим більш успішною є сушарка в зниженні вологості продукту.

Ефективність сушіння різної продукції наведена в таблиці 1.

Таблиця 1

Структурно-механічні властивості м'ясної сировини

Вид продукту	Температура (°C)	Час сушіння (години)	Ефективність сушіння (%)
Фрукти	50	6	85
Овочі	60	8	78
М'ясо	70	10	72
Риба	40	4	88
Зерно	80	12	70

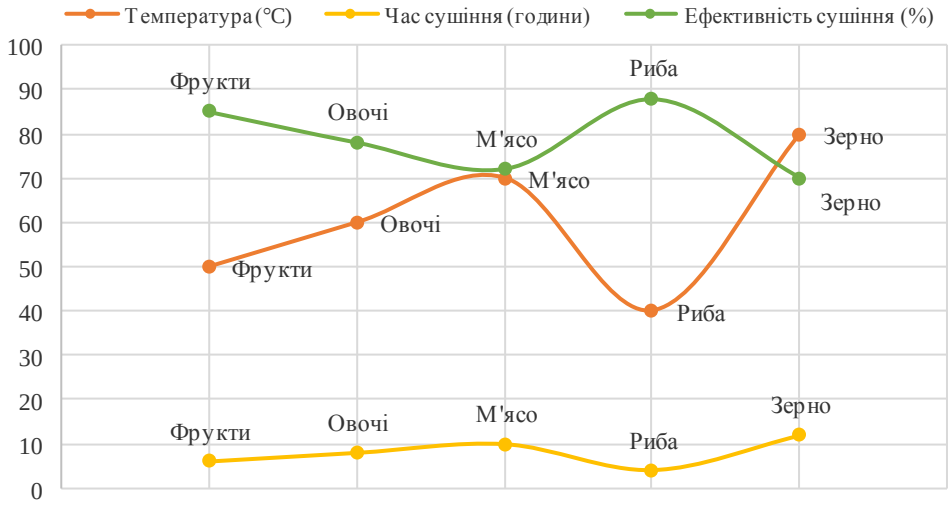


Рис. 2. Ефективність сушіння різної продукції при заданих параметрах

Для оптимізації швидкості руху стрічки і забезпечення оптимального розподілу вологи та ефективного використання тепла можна використовувати математичні моделі, які засновані на фізичних принципах теплопередачі та масообміну.

Припустимо, що процес сушіння в стрічковій сушарці можна описати за допомогою рівняння теплопередачі та масообміну. При цьому можна використовувати наступні змінні:

- v – швидкість руху стрічки (у м/с).
- T – температура повітря у сушарці (у °C).
- W – вологість матеріалу на стрічці (відсотки або десятковий дріб).
- W_{eq} – еквівалентна вологість матеріалу при даній температурі, яка відповідає максимальній насиченій вологості повітря при цій температурі.

Зазвичай, вологість матеріалу у сушарці змінюється з часом за допомогою диференційного рівняння, яке може мати такий вигляд:

$$dWdt=k\cdot(W_{eq}−W)dtdW=k\cdot(W_{eq}−W), \quad (9)$$

де k – коефіцієнт, який залежить від температури та інших параметрів сушарки.

Тепер, щоб забезпечити оптимальний розподіл вологи та ефективне використання тепла, можна знайти оптимальну швидкість руху стрічки v, яка мінімізує час сушіння та споживання енергії.

Один із підходів до знаходження оптимальної швидкості полягає в розв'язанні оптимізаційної задачі. Наприклад, можна сформулювати цю задачу як мінімізацію часу сушіння при обмеженнях на ефективність сушіння та обсяг спожитої енергії.

Таким чином, шляхом розв'язання оптимізаційної задачі можна знайти оптимальну швидкість руху стрічки, яка мінімізує час сушіння та споживання енергії при заданих обмеженнях на ефективність сушіння.

Варто зазначити, що реалізація такої математичної моделі може бути досить складною і вимагатиме детального дослідження та експериментів для визначення параметрів та функцій, які входять у задачу оптимізації.

Висновки

З урахуванням зіставлення з іншими типами сушарок та аналізу досліджень, отриманих результатів,

можна зробити декілька ключових висновків:

Стрічкові сушарки відзначаються високим рівнем продуктивності, що дозволяє ефективно опрацьовувати великі обсяги матеріалів за короткий період часу. Це робить їх привабливим варіантом для великопромислових задач та підприємств, що потребують швидкого сушіння.

Також аналіз показав, що стрічкові сушарки забезпечують рівномірне та ефективне сушіння матеріалів. Це дозволяє зберігати якість та корисні властивості сушених матеріалів, що має важливе значення для харчової промисловості та інших галузей.

Дана сушарка може бути успішно використана для сушіння різних типів матеріалів, таких як зерно, фрукти, деревина та інші. Ця універсальність робить її привабливим варіантом для різних галузей промисловості.

Застосування проектованої стрічкової сушарки може допомогти оптимізувати процеси сушіння та знизити час сушіння для різних типів матеріалів. Це може призвести до підвищення продуктивності та зниження витрат виробництва.

Література

1. Назаренко В. О., Юдічева О. П., Жук В. А. Формування якості товарів. К. : ЦУЛ, 2012. 386 с.

2. Бондар О. Сушильне та очисне обладнання для зерна. Agroexpert практичний посібник аграрія. 2009. № 11(16). С.102–105.

3. Погожих М.І., Пак. А.О. Енергоефективні способи переробки харчової сировини: сушіння плодово-ягідної сировини : навч. Посібник. Х. : ХДУХТ, 2015. 159 с.

4. Снєжкін Ю.Ф., Шапар Р.О., Снєжкін Є.Ю. Зниження енерговитрат при переробці фруктово-овочевої сировини. Наук. праці ОНАХТ. Одеса, 2006. Вип. 28. Т. 2. С. 71–73.

5. Снєжкін Ю. Ф., Пазюк В. М., Петрова Ж. О., Чалаєв Д. М. Теплонасосна зерносушарка для насіннєвого зерна : монографія. Київ : Видавництво ТОВ «Поліграф-Сервіс», 2012. 154 с.

6. Подпрятов Г. І., Скалецька Л. Ф., Сеньков А. М., Хилевич В. С. Зберігання і переробка продукції рослинництва : навч. посібник. К. : Мета, 2002. 495 с.

7. Бурлака С. А., Кравець С. М. Diagnosis of fuel equipment of diesel engine by removing vybro indicators of fuel supply. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2021. № 3 (114). С. 114–123.

8. Бурлака С. А. Алгоритм функціонування машинно-тракторного агрегату з використанням системи живлення зі змішувачем палив. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. 2022. С. 140–145.

References

1. Nazarenko V. O., Yudicheva O. P., Zhuk V. A. Formuvannia yakosti tovariv. K. : TsUL, 2012. 386 s.

2. Bondar O. Sushylne ta ochysne obladnannia dlia zerna. Agroexpert praktychnyi posibnyk ahrariia. 2009. № 11(16). S.102–105.

3. Pohozhykh M.I., Pak. A.O. Enerhoefektyvni sposoby pererobky kharchovoi syrovyny: sushinnia plodovo-yahidnoi syrovyny : navch. Posibnyk. Kh. : KhDUKhT, 2015. 159 s.

4. Sniezhkin Yu.F., Shapar R.O., Sniezhkin Ye.Iu. Znyzhennia enerhovytrat pry pererobtsi fruktovo-ovochevoi syrovyny. Nauk. pratsi ONAKhT. Odesa, 2006. Vyp. 28. T. 2. S. 71–73.

5. Sniezhkin Yu. F., Paziuk V. M., Petrova Zh. O., Chalaiev D. M. Teplonasosna zernosusharka dlia nasinnievoho zerna : monohrafiia. Kyiv : Vydavnytstvo TOV «Polihraf-Servis», 2012. 154 s.

6. Podpriatov H. I., Skaletska L. F., Senkov A. M., Khylevych V. S. Zberihannia i pererobka produktsii roslynnytstva : navch. posibnyk. K. : Meta, 2002. 495 s.

7. Burlaka S. A., Kravets S. M. Diagnosis of fuel equipment of diesel engine by removing vybro indicators of fuel supply. Tekhnika, enerhetyka, transport APK. 2021. № 3 (114). S. 114–123.

8. Burlaka S. A. Alhorytm funktsionuvannia mashynno-traktornoho ahrehatu z vykorystanniam systemy zhyvlennia zi zmishuvachem palyv. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriia: Tekhnichni nauky. 2022. S. 140–145.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-30-34
УДК 637.5.02

БЕРДНИК ДАНИЛО
Національний університет "Львівська політехніка"
https://orcid.org/0000-0002-8092-9228
e-mail: danylo.berdnyk.mknssh.2022@lpnu.ua
ПЕЛЕШКО ДМИТРО
Національний університет "Львівська політехніка"
https://orcid.org/0000-0003-4881-6933
e-mail: Dmytro.d.peleshko@lpnu.ua

ВІДНОВЛЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ ГЕНЕРАТИВНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

В цьому дослідженні проводиться аналіз використання породжувальних нейронних мереж для реконструкції пошкоджених зображень. Для цього було використано систему з архітектурою контекстного кодувальника, який використовує змагальний процес навчання. Вид пошкодження зображень, який досліджувався у цій роботі – пропуски у зображеннях. Заповнення пропусків здійснюється на двох різних наборах даних за областями, а саме відновлення обличчя людей та відбитків пальців. Результати відновлення, які було отримано на тестувальних наборах даних було оцінено за допомогою таких метрик, як піксельні втрати Pixel Loss, пікове співвідношення сигналу до шуму PSNR та структурну подібність SSIM. Після проведення аналізу отриманих результатів, в межах дослідження, було запропоновано модифікації оригінальної архітектури генеративної мережі і використання втрати сприйняття під час тренування мережі, а також модифіковану, меншу за розмірами, архітектуру мережі, яка здатна досягати подібних результатів з меншим обсягом обчислень.

Ключові слова: породжувальні нейронні мережі, реконструкція зображень, контекстний кодувальник, змагальний процес навчання, пропуски у зображеннях, відновлення обличчя, відбитки пальців, піксельні втрати, PSNR, SSIM, модифікована архітектура, втрата сприйняття.

BERDNYK DANYLO, PELESHKO DMYTRO
Lviv Polytechnic National University

IMAGE RECONSTRUCTION USING GENERATIVE NEURAL NETWORKS

Nowadays, image reconstruction occupies an important place in image processing, solving the problem of recovering images from incomplete, noisy, or damaged data. Its applications cover various fields, including computer vision, medical imaging, etc. It is used to improve image quality, fill in gaps, remove unwanted elements, create new visual effects, etc. One of the main challenges of image reconstruction is the high dimensionality and complexity of real-world images, which often require sophisticated models and algorithms to determine their underlying structure and patterns. In addition, different types of image reconstruction tasks may have different constraints and objectives, such as preserving the original content or maintaining realism. There are many image reconstruction methods and techniques that can be divided into two categories: traditional methods and deep learning methods. Traditional methods rely on manually created features and mathematical models to formulate and solve the problem. Deep learning methods use neural networks to learn complex data structures and create realistic images.

This study provides analysis of the use of generative neural networks for the reconstruction of damaged images. For this purpose, we used a system with a contextual encoder architecture that uses an adversarial learning process. The type of image damage studied in this paper is inpainting. Inpainting is performed in two different domains, namely face and fingerprint recovery. The recovery results obtained on the test datasets were evaluated using such metrics as pixel loss, peak signal-to-noise ratio PSNR, and structural similarity SSIM. After analyzing the results, the study proposed modifications to the original architecture of the generative network. It was proposed to use the loss of perception during network training and a modified, smaller network architecture was proposed, which is able to achieve similar results with less computation.

Keywords: generative neural networks, image reconstruction, contextual encoder, adversarial learning process, inpainting, face reconstruction, fingerprints, pixel loss, PSNR, SSIM, modified architecture, perceptual loss

Постановка проблеми

У наш час реконструкція зображень займає важливе місце в обробці зображень, вирішуючи проблему відновлення зображень з неповних, зашумлених або пошкоджених даних. Її застосування охоплює різні сфери, включаючи комп'ютерний зір, медичну візуалізацію тощо. Вона використовується для покращення якості зображень, заповнення прогалин, видалення небажаних елементів, створення нових візуальних ефектів тощо. Однією з головних проблем реконструкції зображень є висока розмірність і складність зображень у реальному світі, які часто вимагають складних моделей і алгоритмів для визначення їхньої основної структури та патернів. Крім того, різні типи задач реконструкції зображень можуть мати різні обмеження та завдання, такі як збереження оригінального змісту або підтримання реалістичності. Існує багато методів і технік реконструкції зображень, які можна розділити на дві категорії: традиційні методи і методи глибокого навчання. Традиційні методи покладаються на створені вручну ознаки та математичні моделі для формулювання та вирішення проблеми. Методи глибокого навчання використовують нейронні мережі для вивчення складних структур даних і створення реалістичних зображень.

Одним з найпопулярніших методів реконструкції зображень є зафарбовування зображень, метою якого є заповнення відсутніх або пошкоджених областей на зображенні. Методи зафарбовування зображень зазвичай використовують інформацію з навколишніх пікселів або ділянок для інтерполяції або екстраполяції відсутніх значень. Деякі з традиційних методів зафарбовування зображень включають методи на основі

дифузії, методи на основі шаблонів та методи на основі розрідженого представлення. Однак ці методи мають певні обмеження, наприклад, вимагають ручного налаштування параметрів, чутливі до шуму та викидів, а також не здатні охопити високорівневу семантичну інформацію та загальну цілісність. Тому в останні роки методи глибокого навчання стали потужною альтернативою для розфарбовування зображень, особливо з розвитком генеративних нейронних мереж. Генеративні нейронні мережі – це клас нейронних мереж, які можуть навчитися генерувати реалістичні дані з деякого латентного представлення. Їх можна використовувати для розфарбовування зображень, вивчаючи відображення від пошкоджених або неповних даних до оригінальних або бажаних даних. Одним з найпопулярніших типів генеративних нейронних мереж для розфарбовування зображень є генеративні змагальні мережі (GAN).

Отже, обробка зображень залишається актуальною та важливою галуззю, адаптуючись до зростаючої складності та розмірності реальних зображень. Генеративні змагальні мережі та інші методи глибокого навчання оновлюють реконструкцію зображень, особливо в контексті зафарбовування, вирішуючи виклики з відновлення зображень з неповних, зашумлених або пошкоджених даних. Результати дослідження можуть бути корисними для розширення можливостей реконструкції зображень, зокрема у відновленні обличчя людей та відбитків пальців.

Аналіз останніх джерел

У роботі [1] запропоновано метод GANCS для реконструкції МРТ-зображень, оснований на генеративних змагальних нейронних мережах (GAN), що дозволяє ефективно відновлювати зображення при обмеженому обсязі даних. Дослідження [2] присвячено методу UnfairGAN, який використовує покращену генеративну змагальну мережу для ефективного видалення крапель дощу на зображеннях, використовуючи високорівневу інформацію.

Автори [3] досліджують глибоку мережу з залишковим шаром для відновлення зображень у мікроскопії високої роздільності та локалізації молекул високої щільності. У [4] запропоновано покращення відновлення медичних зображень за допомогою поєднання GAN і Task-GAN, що включає патологічну класифікацію для як реальних, так і синтетичних зображень.

Проте застосування глибинних генеративних нейронних мереж для відновлення зображень потребує подальшого дослідження.

Формулювання цілей

Метою даного дослідження полягає у розробці архітектури та методів реконструкції зображень, застосовуючи генеративну нейронну мережу, для задачі заповнення пропусків у зображеннях. Також до мети входить розробка модифікованої оптимізованої версії системи для відновлення зображень.

Система для заповнення пропусків у зображеннях

Система для дослідження складається з моделі Context Encoder, яка використовує навчання за допомогою GAN (генеративно-змагальної мережі). Генеративно-змагальна нейронна мережа складається з двох нейронних мереж: генератора (декодер в нашому випадку) та дискримінатора.

Перед роботою з мережею, потрібно створити зображення з пошкодженою ділянкою. Для цього використовується накладання маски на зображення. Для відомих областей значення пікселів на масці дорівнює одиниці інакше - нулю. Нехай Img є вхідним зображенням розміром (c, n, m), яке не має пропусків, а M є маскою однаковим розміром з вхідним зображенням, тобто (c, n, m). Маска M має значення 0 у тих позиціях, де потрібно створити пропуск, і значення 1 у тих позиціях, де потрібно залишити зображення без змін. Для того, щоб отримати відому область використовується операція поелементного множення на маску - $KnownArea = Img \odot M$ Відповідно, для отримання тої частини зображення, що була замаскована використовується обернені значення у масці M - $UnknownAre \quad a = Img \odot (1 - M)$.

Мережа кодера-декодера у системі, як видно з назви складається з кодувальника та декодувальника. Кодер приймає вхідне зображення I і зіставляє його з контекстним представленням C, яке фіксує важливу інформацію з відомих областей зображення - $C = E(I)$. Параметри кодера навчаються під час тренування, щоб мінімізувати різницю між передбачуваним контекстом та істинним контекстом, який отримується з маски (M). Декодер бере контекстне представлення C і генерує зафарбоване зображення I' з відсутніми або пошкодженими областями $I' = D(C)$.

Навчання моделі Context Encoder GAN проводилось з використанням таких функцій втрат: втрата при реконструкції, яка вимірює попіксельну різницю між згенерованим зафарбованим зображенням і еталонними (відомими) областями; змагальна втрата, яка вимірює, наскільки добре генератор може обдурити дискримінатор, щоб той класифікував його результати як справжні зображення; комбінація втрати при реконструкції та змагальної втрати.

Попіксельна втрата гарантує, що зафарбовані області відповідають оригінальному зображенню у відомих областях. Її часто визначають як іншу втрату MSE або L2, що кількісно визначає попіксельну різницю між зафарбованим зображенням і оригінальним зображенням, якщо обидва зображення доступні. Функція попіксельної втрати визначається за допомогою наступної формули:

$$L_{pix}(I', I) = \Sigma\left(\Sigma(I' - I)^2\right). \quad (1)$$

де I - частина оригінального зображення, а I` - відновлена частина зображення.

Враховуючи накладену маску на зображення попіксельну функцію запишемо наступним чином:

$$L_{pix}(I) = \|M \odot (I - CE((1 - M) \odot I))\| \quad (2)$$

де CE – Context Encoder.

Змагальна втрата використовується для навчання генератора, в нашому випадку він також є декодером, створювати зафарбовані зображення, які є візуально переконливими і не відрізняються від реальних зображень. Для цього використовується кросентропія втрат:

$$L_{adv}(G, D) = -[log(D(I_{real})) + log(1 - D(I_{fake}))] \quad (3)$$

де G - мережа-генератор, D - мережа-дискримінатор, I_{real} - реальне зображення, вибране з навчального набору даних. Завдання дискримінатора - класифікувати це зображення як справжнє, I_{fake} - зафарбоване зображення, згенероване генератором.

Враховуючи накладену маску на зображення змагальну функцію запишемо наступним чином:

$$L_{adv} = max_D = E_{I\chi}[log(D(I)) + log(1 - D(CE((1 - M) \odot I)))] \quad (4)$$

Перцептивна використовує особливості зображень, а не пікселі, для порівняння. Перцептивна втрата обчислює середньоквадратичну помилку між особливостями двох зображень на певному шарі попередньо навченої моделі, наприклад, у цьому дослідженні використовується архітектура VGG19. Перцептивна функція втрат визначається наступною формулою:

$$L_{perc}(I_1, I_2) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} (V(I_1)_i - V(I_2)_i)^2 \quad (5)$$

де I_1 та I_2 це два зображення, які потрібно порівняти, V - це попередньо навчена модель, яка приймає на вхід зображення і видає його особливості на певному шарі, V - значення особливостей для зображення I на позиції і N – це кількість особливостей на шарі моделі V.

В дослідженні використовувалось комбінація вищеописаних втрат:

$$L = \lambda_{pix} L_{pix} + \lambda_{adv} L_{adv} + \lambda_{perc} L_{perc} \quad (6)$$

Для оцінки отриманої мережі в результаті тренування, на тестувальній вибірці було використано такі метрики оцінок як PSNR та SSIM.

PSNR – це метрика, яка кількісно оцінює якість зображення, вимірюючи відношення максимально можливої потужності сигналу до потужності спотворюючого шуму.

$$PSNR = 10 * log_{10}\left(\frac{MAX^2}{MSE}\right) \quad (7)$$

де MAX – максимально можливе значення пікселя. MSE – це середньоквадратична похибка між відповідними пікселями оригінального та реконструйованого зображень.

SSIM – це метрика, яка оцінює схожість між двома зображеннями, беручи до уваги яскравість, контраст і структуру. Вона порівнює локальні патерни інтенсивності пікселів, а не лише окремі значення пікселів. SSIM базується на трьох компонентах: яскравість, контрастність та структура.

$$SSIM(I_{orig}, I_{reconstr}) = \frac{(2\mu_{Iorig}\mu_{Ireconstr} + c_1)(2\sigma_{IorigIreconstr} + c_2)}{(\mu^2_{Iorig} + \mu^2_{Ireconstr} + c_1)(\sigma^2_{Iorig} + \sigma^2_{Ireconstr} + c_2)} \quad (8)$$

де μ - середнє значення зображення, σ - стандартне відхилення зображення, $\sigma_{IorigIreconstr}$ - коваріація оригінального та відновленого зображень, c_1 та c_2 - константи для стабілізації ділення з маленьким знаменником..

Результати експериментів

Для експериментів аналізу було обрано два набори даних: CelebA та SOCOFing. CelebA – це великий набір даних, що охоплює понад 200 000 зображень розміром 128x128 пікселів та 3 канала для кольорів. SOCOFing – це біометричний набір даних, що охоплює 6 000 чорно білих зображень відбитків пальців різних розмірів, які були зведені до спільного розміру 128x128 пікселів. Для кожного з наборів даних було накладено маску для тренування контекстного кодувальника розміром 64 x 64 пікселів.

Для початку експерименти були проведені для різних комбінацій попередньо описаних наборів даних на оригінальній архітектурі CE без та з додаванням втрати сприйняття (рис. 1, таблиця 1).

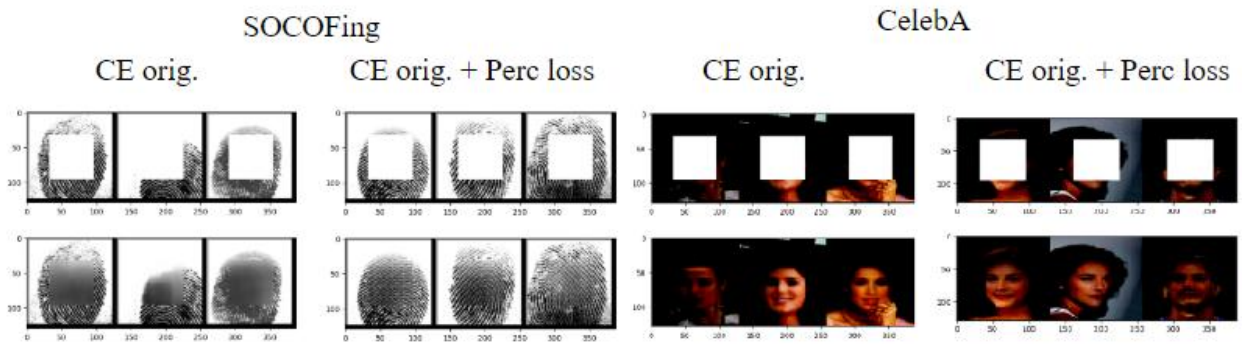


Рис. 1. Візуальні результати роботи оригінальної моделі CE з перцептивною втратою та без на обох наборах даних

Таблиця 1

Результати роботи оригінальної моделі CE з перцептивною втратою та без на обох наборах даних

Архітектура моделі	Набір даних	Pixel Loss	PSNR	SSIM
Context Encoder orig	CelebA	0.174	17.8	0.656
Context Encoder orig + Perc loss	CelebA	0.22	16.5	0.537
Context Encoder orig	SOCOFing	0.174	18.2	0.608
Context Encoder orig + Perc loss	SOCOFing	0.201	17.4	0.507

Далі, у рамках цього дослідження, оригінальну архітектуру контекстного кодувальника було модифіковано шляхом змінення саме архітектури частини генератора мережі. Така архітектура містить в 23.43 рази менше параметрів ніж оригінальна модель: 1723827, в той час, як оригінальна має 40401187 параметрів. Також така мережа генератора показує близько в 10 разів зменшення інференсу в часі на CPU: оригінальна модель - 1.01 сек.; модифікована - 0.1 сек.

Для модифікованої архітектури, за аналогією з оригінальним Context Encoder, було проведено експерименти з наборами даних CelebA та SOCOFing та з використанням втрати сприйняття (рис. 2, таблиця 2).

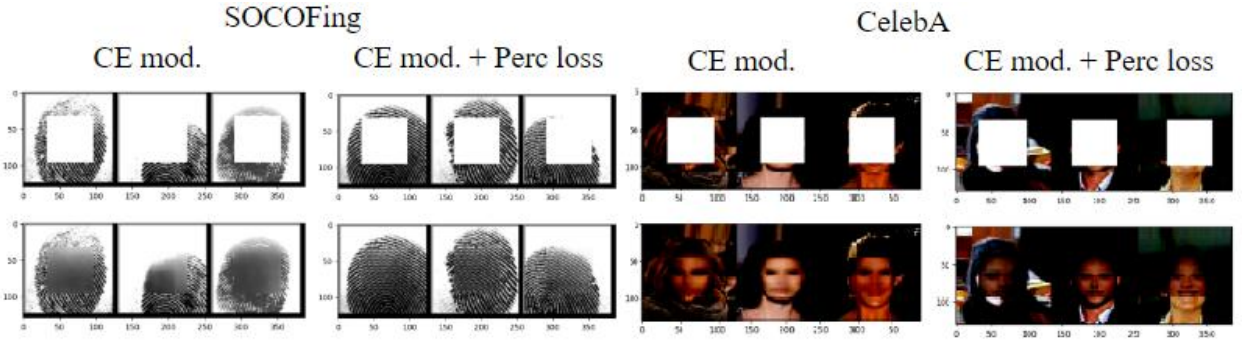


Рис. 2. Візуальні результати роботи модифікованої моделі CE з перцептивною втратою та без на обох наборах даних

Таблиця 2

Результати роботи модифікованої моделі CE з перцептивною втратою та без на обох наборах даних

Архітектура моделі	Набір даних	Pixel Loss	PSNR	SSIM
Context Encoder mod	CelebA	0.191	17.0	0.604
Context Encoder mod + Perc loss	CelebA	0.245	15.8	0.477
Context Encoder mod	SOCOFing	0.178	18.0	0.595
Context Encoder mod + Perc loss	SOCOFing	0.202	17.4	0.522

Висновки

У проведеній дослідницькій роботі було проведено детальний аналіз предметної області, описано процес діяльності та структуру даних, а також розглянуто існуючі аналоги з їхніми перевагами та недоліками. Вибір технологій та методів для дослідження був обґрунтований з урахуванням цього аналізу.

Також, за цим аналізом було сформульовано задачу роботи разом з підзадачами, які потрібно виконати для досягнення головної цілі дослідження. У другому розділі було розроблено систему дослідження та побудовано функціональну та математичну модель. В цій системі використовувалася Context Encoder модель разом із GAN. Ця модель включає кодер-декодер модель для врахування контексту зображення для аналізу зображень. Також система складається з даних облич людей та відбитків пальців, для яких, в межах системи накладається маска, яка симулює пошкодження зображень. Для кожного з елементів системи було описано математичні формулювання. У третьому розділі було описано програмне та технічне забезпечення, включаючи засоби розробки, програмну реалізацію для дослідження, а також результати експериментів. В цьому розділі було проведено експерименти для кожного з обраних наборів даних та різних модифікацій оригінальної мережі, таких, як застосування перцептивної втрати при тренування моделі і оптимізація оригінальної мережі шляхом зміни її структури. Показано, що використання перцептивної втрати в моделі Context Encoder покращує якість відтворення зображень, зокрема відбитків пальців. Також було продемонстровано, що модифікована архітектура мережі, яка має менше параметрів та швидший час інференсу, може досягати подібних результатів до оригінальної моделі для набору даних з відбитками пальців. Проте, для набору даних з обличчями результати зменшеної моделі є гіршими суттєво, але, використання перцептивної втрати, в свою чергу, покращує результати модифікованої моделі для цього набору даних. Отже, дослідження показало, що використання перцептивної втрати та модифікованих архітектур може покращити якість відтворення зображень у системі контекстного кодувальника, що має практичний потенціал у різних областях, включаючи обробку відбитків пальців.

References

1. Mardani M., Gong E., Cheng J. Y. Deep generative adversarial neural networks for compressive sensing mri. IEEE Transactions on Medical Imaging. 2019. Vol. 38, No. 1. P. 167–179.

2. Nguyen D. M., Le T. P., Vo D. M., Lee S.-W. UnfairGAN: an enhanced generative adversarial network for raindrop removal from a single image. Expert Systems with Applications. 2022. Vol. 210.

3. Image reconstruction with a deep convolutional neural network in high-density super-resolution microscopy.

4. Ouyang J., Wang G., Gong E. Task-gan: improving generative adversarial network for image reconstruction. Cham: Springer International Publishing, 2019.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-35-39
УДК 664.663

БЛАЖЕНКО МАРІЯ
Національний університет харчових технологій
https://orcid.org/0000-0002-0984-8660
e-mail: blagmary@ukr.net
ФАЛЕНДИШ НАТАЛІЯ
Національний університет харчових технологій
https://orcid.org/0000-0002-2571-3643
e-mail: falendysh96@gmail.com

ВИКОРИСТАННЯ ПРОДУКТІВ ПЕРЕРОБКИ НАСІННЯ КОНОПЕЛЬ У ВИРОБНИЦТВІ ХЛІБА

Споживання хліба та хлібобулочних виробів з пшеничного борошна є однією з невід'ємних частин харчового раціону як українців, так і інших народів світу через свою відносно невисоку вартість, але високу калорійність. Однак, на сьогоднішній день, в суспільстві є тенденція до розвитку та переходу до здорового та збалансованого харчування. Зміна філософії споживання харчових продуктів полягає не лише для вгамування голоду, але й для покращення здоров'я та закриття потреб в мікро- та макронутрієнтах для нормального функціонування організму людини. Виробники хлібопекарської галузі останні роки приділяють особливу увагу розширенню асортименту хлібобулочних виробів з підвищеною харчовою та біологічною цінністю за рахунок використання нетрадиційної сировини. Зокрема, витяжки рослинних лікарських трав, шроти з олійних культур, висівки злакових культур, борошно та протеїн з культур що мають в хімічному складі підвищений вміст мікро- та макроелементів є актуальною сировиною для збагачення хліба та хлібобулочних виробів. Продукти переробки насіння конопель є перспективною сировиною для розширення асортименту хліба та хлібобулочних виробів з підвищеною харчовою та біологічною цінністю за рахунок якісного і кількісного хімічного складу. Таким чином, проведено дослідження впливу використання конопляного протеїну та ядер на зміну властивостей тіста, перебігу технологічного процесу та якість готових виробів при виробництві хліба з пшеничного борошна першого сорту. Виконано порівняння показників якості контрольного та дослідних зразків з заміною пшеничного борошна на конопляний протеїн в кількості 10, 15 та 20% і додатковим внесенням ядер насіння конопель 10, 15 та 20%. Встановлено, що заміна у діапазоні від 10 до 20% пшеничного борошна першого сорту на конопляний протеїн та додавання аналогічної кількості конопляних ядер сприяє інтенсифікації процесу дозрівання тіста та скорочення тривалості технологічного процесу на 20—25 хв. Заміна пшеничного борошна на конопляний протеїн у кількості 10 та 15% дає змогу отримати хліб, що за органолептичними та фізико-хімічними показниками несуттєво поступається контрольному зразку.

Ключові слова: *хліб, хлібобулочних вироби, насіння конопель, конопляний протеїн.*

BLAZHENKO MARIIA
National University of Food Technology
FALENDYSH NATALIIA
National University of Food Technology

USE OF PRODUCTS OF HEMP SEED PROCESSING IN THE PRODUCTION OF BREAD

The consumption of bread and bakery products made from wheat flour is one of the integral parts of the diet of both Ukrainians and other peoples of the world, due to its relatively low cost, but high calorie content. However, today there is a trend in society towards development and transition to a healthy and balanced diet. Changing the philosophy of food consumption is not only to satisfy hunger, but also to improve health and close the need for micro- and macronutrients for the normal functioning of the human body. In recent years, manufacturers of the bakery industry have paid special attention to the expansion of the range of bread and bakery products with increased nutritional and biological value due to the use of non-traditional raw materials. In particular, extracts of plant medicinal herbs, meal from oil crops, bran of cereal crops, flour and protein from crops with an increased content of micro- and macroelements in their chemical composition are relevant raw materials for enriching bread and bakery products. Hemp seed processing products are promising raw materials for expanding the range of bread and bakery products with increased nutritional and biological value due to their qualitative and quantitative chemical composition. Thus, a study of the influence of the use of hemp protein and kernels on the change in the properties of the dough, the course of the technological process and the quality of finished products in the production of bread from wheat flour of the first grade was carried out. A comparison of the quality indicators of the control and experimental samples with the replacement of wheat flour with hemp protein 10, 15 and 20% and the additional introduction of hemp seed kernels 10, 15 and 20% was performed. It has been established that replacing 10 to 20% of first-grade wheat flour with hemp protein and adding a similar amount of hemp kernels contributes to the intensification of the dough ripening process and the reduction of the duration of the technological process by 8-20 minutes. Replacing wheat flour with hemp protein in the amount of 10 and 15% makes it possible to obtain bread that, according to organoleptic and physicochemical indicators, is not significantly inferior to the control sample.

Key words: *bread, bakery products, hemp seeds, hemp protein.*

Постановка задачі. Загальне погіршення екологічної ситуації у світі, нераціональне харчування має негативний вплив на здоров'я людини. Невід'ємною частиною харчового раціону людини є хлібобулочні вироби. Зокрема, хліб є одним із найважливіших продуктів щоденного споживання. На сьогоднішній день, незважаючи на значний асортимент хлібобулочної продукції, яка доступна для споживачів, більшість цього асортименту має низьку харчову та біологічну цінність. У свою чергу, низька харчова та біологічна цінність пояснюється невисоким вмістом вітамінів (С, D, Е, К, групи В), мінеральних речовин (залізо, магній, калій), незамінних амінокислот (глутамінова, аспаргінова, аргінін, лейцин тощо), а

також неоптимальним співвідношенням поліненасичених жирних кислот.

Варіантом вирішення вищезазначеної проблеми може бути збагачення традиційних хлібобулочних виробів з пшеничного борошна функціональними мікро- та макроелементами за допомогою використання нетрадиційних видів сировини.

Аналіз досліджень та публікацій. Відомо [1], що в хлібопеченні, у якості нетрадиційної сировини використовують зернові, бобові, насіння та продукти переробки олійних культур, плодів та овочів, лікарські рослини тощо.

У [2] зазначається також, що перспективною сировиною для виробництва хлібобулочних виробів може бути борошно коноплі, яке має багатий хімічний склад. У роботах [3; 4] вказано, що конопляне насіння та борошно містять значну кількість білків, а саме: 27% та 37%, відповідно. Едестин, що відноситься до групи глобулінів, є основою цих білків (65% від загальної кількості).

У [5] зазначається про можливість використання конопляного борошна у виробництві макаронних виробів. Однак, у даній роботі недостатньо розкрито позитивний результат ефекту заміни борошна з твердих сортів пшениці на конопляне борошно.

Відомі дослідження [6] щодо підвищення харчової цінності хліба шляхом внесення продуктів переробки конопляного насіння. Зокрема, визначено різницю хімічного складу хліба з заміною пшеничного борошна першого сорту на конопляне борошно.

Проведені дослідження у [7] щодо можливості використання конопляного протеїну для молочних продуктів підтверджують перспективність використання даної сировини також у хлібопекарській галузі.

Виділення невирішених частин. Однак, незважаючи на наявність вищевказаних проведених досліджень практично відсутня інформація щодо можливості використання конопляного протеїну у хлібопекарській галузі. Зокрема, навіть, у наявних дослідженнях перспективи використання продуктів переробки насіння конопель в інших галузях харчової промисловості розкрито у недостатній мірі.

Формулювання цілей. **Метою роботи є дослідження впливу використання конопляного протеїну та ядер на зміну властивостей тіста, перебігу технологічного процесу та якість готових виробів.**

Виклад основного матеріалу. Зважаючи на багатий хімічний склад, перспективною сировиною для виробництва хлібобулочних виробів є продукти переробки насіння конопель, зокрема, конопляний протеїн та ядра. З метою встановлення раціонального дозування конопляного протеїну та ядер, проводили заміну пшеничного борошна першого сорту на конопляний протеїн та внесення ядер насіння конопель, як додаткової сировини, було визначено їх вплив на перебіг технологічного процесу та якість хліба.

Відповідно до цілей та мети роботи, проводили пробне випікання хліба з пшеничного борошна першого сорту із заміною його на конопляний протеїн у кількості 10, 15 та 20 %, а також з додаванням 10, 15 та 20% ядер насіння конопель до загальної маси борошна та протеїну відповідно. У якості контрольного зразку використовували рецептуру без внесення конопляного протеїну та ядер.

При проведенні досліджень використовували конопляний протеїн та ядра фірми «Десналенд», Україна. Тісто готували безопарним способом, замішували із застосуванням двошвидкісної тістомісильної машини роторного типу. Формування виробів відбувалося вручну, вистоювання проводили у вистійній шафі при температурі 36±2°С та відносній вологості 78±2% до готовності. Хліб випікали в печі Ф3-ХПК при температурі 200….220°С. Газоутворення в напівфабрикатах оцінювали за кількістю CO_2, волюмометричним методом на приладі АГ-1М [8]. Готові вироби характеризували за органолептичними та фізико-хімічними показниками. Результати досліджень наведені в таблиці 1.

При аналізі результатів досліджень, які представлені у таблиці 1, було встановлено, що за умови заміни пшеничного борошна першого сорту на конопляний протеїн та додаванні конопляних ядер у кількості 10, 15 та 20%, початкова кислотність тіста підвищувалася на 0,5—1,1 град, при порівнянні з контрольним зразком. Що ймовірно обумовлено вищою кислотністю конопляного протеїну та ядер, ніж пшеничного борошна першого сорту, що обумовлена наявністю жирних кислот [9]. Аналогічно відбувалося підвищення і кінцевої кислотності тіста в діапазоні від 0,4 до 1,0 град.

Окрім того, встановлено, що за збільшення дозування конопляного протеїну та ядер в тісті, збільшується інтенсивність виділення вуглекислого газу. Було встановлено, що при заміні 10, 15 та 20% пшеничного борошна відбувається збільшення сумарної кількості виділеного вуглекислого газу на 6,7; 12,4 та 23,4% відповідно.

Таблиця 1

Показники	Контроль, без внесення конопляного протеїну та ядер	Внесено конопляного протеїну, % на заміну пшеничного борошна / додаткове внесення ядер насіння конопель, % до маси борошна, або суміші борошна та протеїну		
		10/10	15/15	20/20
Тісто				
Вологість тіста, %	44,5	44,2	43,5	43,0
Титрована кислотність,				

град початкова кінцева	 1,9 2,5	 2,4 2,9	 2,7 3,2	 3,0 3,5
Тривалість бродіння, хв	55	45	45	45
Тривалість вистоювання, хв	40	35	30	25
Питомий об'єм тіста, $см^3$	3,42	3, 38	3, 24	3, 20
Розпливання кульки тіста, мм	97	90	83	87
Газоутворення за час бродіння тіста та вистоювання тістових заготовок, см 3\100 г тіста	1096	1168	1232	1352
Хліб				
Питомий об'єм, $см^3/г$	2,65	2,62	2,55	2,46
Пористість, %	76	75	75	74
Кислотність, град	2,5	2,9	3,2	3,5
Стан поверхні	Гладка, без тріщин і підривів	Без тріщин і підривів, наявні ядра конопель на поверхні		
Колір скоринки	золотистий	світло коричневий	світло коричневий	коричневий
Колір м'якушки	світлий	світло сірий	Сірий з зеленим відтінком	Темно сірий з зеленим відтінком
Еластичність м'якушки	еластична	еластична	Еластична відчутні ядра	Менш еластична, відчутно наявність ядер
Смак та аромат	Властиві пшеничному хлібу	Властиві пшеничному хлібу з приємним присмаком горіха	З присмаком горіха	З присмаком горіха та кислуватим післясмаком

Спостерігалося скорочення тривалості вистоювання тістових заготовок із внесенням конопляного протеїну та ядер на 5, 10 та 15 хв.

Встановлено, що зразки тіста із заміною пшеничного борошна на конопляний протеїн та додавання ядер у кількості 10, 15 та 20% мають менший питомий об'єм на 1,2, 5,3 та 6,4% відповідно при порівнянні з контрольним зразком. У свою чергу, діаметр кульки тіста в процесі ферментації зменшувався зі збільшення відсотку внесення конопляного протеїну та ядер.

Ймовірно, це було обумовлено відсутністю клейковинних білків у конопляному протеїні та ядрах, але глобуліни та альбуміни утворювали в'язкий колоїдний розчин.

Відмічено, що заміна 10% пшеничного борошна першого сорту на конопляний протеїн та додавання ядер призводила до незначного зменшення, в межах похибки, питомого об'єму хліба – на 1,1%. При заміні 15 та 20% пшеничного борошна першого сорту питомий об'єм зменшувався на 2,3 та 5,8% відповідно.

Збільшення відсотка конопляного протеїну та ядер від 10 до 20% призводило до незначного зменшення пористості м'якушки на 1,3 та 2,6% відповідно, причиною цього було зменшення кількості клейковинних білків і підвищенням в'язкості тіста. На рис. 1 представлено фото контрольного та дослідних зразків у розрізі хлібу із заміною 10, 15 та 20% пшеничного борошна першого сорту на конопляний протеїн та додаванням аналогічного відсотку ядер представлено на рис. 1.

При збільшенні дозування конопляного протеїну та ядер, колір м'якушки та скоринки набував коричнево-зеленого забарвлення, що пояснюється процесом термічного розкладу хлорофілу, що входить до складу конопляного протеїну. Внаслідок теплової обробки хлорофіл із зеленого кольору перетворюється в бурий, що впливає на зміну кольору. Фото зовнішнього вигляду контрольного та дослідних зразків хлібу із заміною 10, 15 та 20% пшеничного борошна першого сорту на конопляний протеїн та додаванням аналогічного відсотку ядер представлено на рис. 2.

Рис. 1. Фото контрольного та дослідних зразків у розрізі хлібу із заміною 10, 15 та 20% пшеничного борошна першого сорту на конопляний протеїн та додаванням аналогічного відсотку ядер

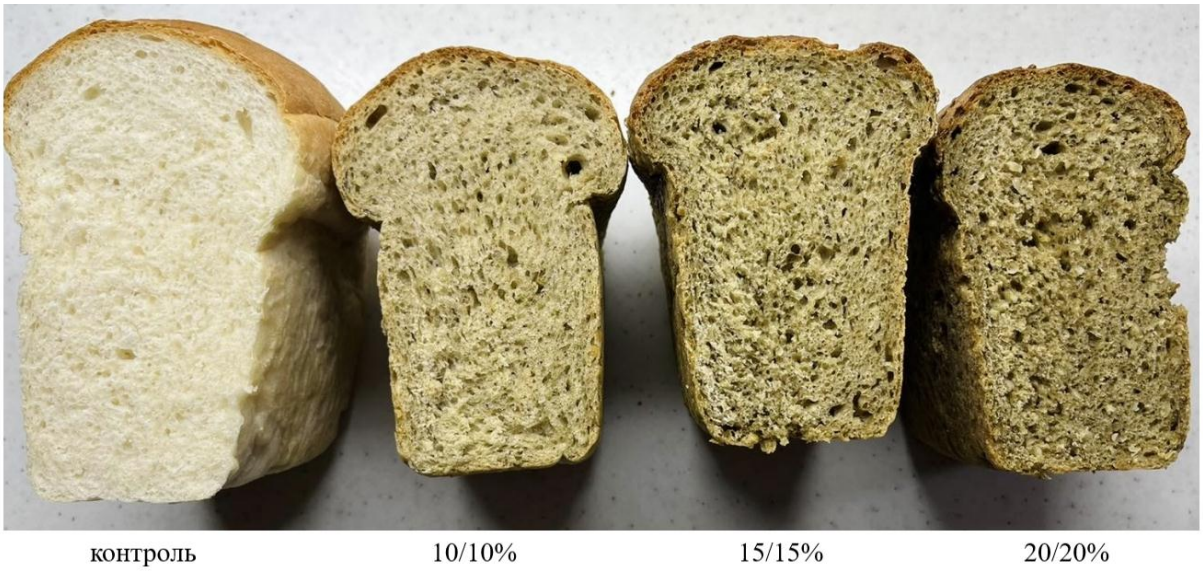


Рис. 2. Фото зовнішнього вигляду контрольного та дослідних зразків хлібу із заміною 10, 15 та 20% пшеничного борошна першого сорту на конопляний протеїн та додаванням аналогічного відсотку ядер

Згідно з результатами досліджень, представлених у таблиці 1, еластичність м'якушки хлібу, у порівнянні з контрольним зразком, майже не змінювалася, однак, при розжовуванні м'якушки дослідних зразків із додаванням конопляних ядер відчувалась їх наявність.

Висновки

Проведено дослідження впливу використання конопляного протеїну та ядер на зміну властивостей тіста, перебігу технологічного процесу та якість готових виробів при виробництві хліба з пшеничного борошна першого сорту.

На основі проведених досліджень підтверджено актуальність використання продуктів переробки насіння конопель при виробництві хлібу та хлібобулочних виробів.

Встановлено, що конопляний протеїн та ядра, котрі містять у своєму складі білки, збалансовані за амінокислотним складом, поліненасичені жирні кислоти, харчові волокна, а також вітаміни та мінеральні речовини, доцільно використовувати при виробництві хліба із пшеничного борошна першого сорту.

Встановлено, що заміна у діапазоні від 10 до 20% пшеничного борошна першого сорту на конопляний протеїн та додавання аналогічної кількості конопляних ядер сприяє інтенсифікації процесу дозрівання тіста та зменшенню тривалості технологічного процесу на 15—25 хв.

Заміна пшеничного борошна конопляним протеїном у кількості 10 та 15% дає змогу отримати хліб, що за органолептичними та фізико-хімічними показниками несуттєво поступається контрольному зразку. Досліджуваний зразок має меншу калорійність за рахунок низького вмісту крохмалю в конопляному протеїні та ядрах.

Література

1. Дробот В.І. Борошно стародавніх пшениць, продукти переробки круп'яних культур та шроти у технології хліба : моногр. / В.І. Дробот, Л.А. Михонік, А.Б. Семенова, Н.О. Фалендиш. – К. : ПрофКнига, 2018. – 188 с.

2. Сова Н.А. Характеристика сипких конопляних продуктів / Н. А. Сова, М. В. Луценко, В. Г. Єфімов, С. М. Кургалін // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2018. № 45 (1321). С. 207–213.

3. CANAHgreenliving. Hulledhempnuts. https://www.canah.com/en/products/hulled-hemp-nuts-detail/.

4. Matran I. M. The role of hemp seed derivatives bakery, related to the ratio of essential polyaunsaturated fatty acids omega 3 and omega 6, cold pressed hemp oil, complete protein and fibres. Rompan News. 2010. Vol 15. P. 263—270.

5. Мосійко Д. Використання конопляного борошна для збагачення макаронних виробів / Д. Мосійко, А. Чехранов, Н. Сова, М. Луценко // Матеріали 85 Ювілейної Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів "Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті", присвяченої 135-річчю Національного університету харчових технологій. – 2019. – Ч. 1. – С. 35.

6. Бадрук Ю. В. Підвищення харчової цінності хліба шляхом внесення продуктів переробки конопляного насіння / Ю. В. Бадрук, Н. О. Фалендиш // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті : матеріали 83 міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів, 5-6 квітня 2017 р. – К. : НУХТ, 2017. – Ч. 1. – С. 123.

7. Ющенко Н. М. Конопляний протеїн – перспективне джерело рослинних білків для молочних продуктів / Н .М. Ющенко, Т. О. Белемець, А. В. Лебедєва // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті : 82 Міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів, 2016 р. – К. : НУХТ, 2016. – С. 331.

8. Дробот В. І. Лабораторний практикум з технології хлібопекарського та макаронного виробництв : навчальний посібник / Дробот В. І. – К. : Центр навчальної літератури, 2006. – 341 с.

9. Зайцева Л. В. Роль различных жирных кислот в питании человека и при производстве пищевых продуктов / Л. В. Зайцева // Пищевая промышленость. – 2010. – № 10. – С. 49–54.

References

1. Drobot V.I. Boroshno starodavnikh pshenyts, produkty pererobky krupianykh kultur ta shroty u tekhnolohii khliba : monohr. / V.I. Drobot, L.A. Mykhonik, A.B. Semenova, N.O. Falendysh. – K. : ProfKnyha, 2018. – 188 s.

2. Sova N.A. Kharakterystyka sypkykh konoplianykh produktiv / N. A. Sova, M. V. Lutsenko, V. H. Yefimov, S. M. Kurhalin // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriia: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh. 2018. № 45 (1321). S. 207–213.

3. CANAHgreenliving. Hulledhempnuts. https://www.canah.com/en/products/hulled-hemp-nuts-detail/.

4. Matran I. M. The role of hemp seed derivatives bakery, related to the ratio of essential

5. polyaunsaturated fatty acids omega 3 and omega 6, cold pressed hemp oil, complete protein

6. and fibres. Rompan News. 2010. Vol 15. P. 263—270.

7. Mosiiko D. Vykorystannia konoplianoho boroshna dlia zbahachennia makaronnykh vyrobiv / D. Mosiiko, A. Chekhranov, N. Sova, M. Lutsenko // Materialy 85 Yuvileinoi Mizhnarodnoi naukovoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantiv i studentiv "Naukovi zdobutky molodi – vyrishenniu problem kharchuvannia liudstva u XXI stolitti", prysviachenoi 135-richchiu Natsionalnoho universytetu kharchovykh tekhnolohii. – 2019. – Ch. 1. – S. 35.

8. Badruk Yu. V. Pidvyshchennia kharchovoi tsinnosti khliba shliakhom vnesennia produktiv pererobky konoplianoho nasinnia / Yu. V. Badruk, N. O. Falendysh // Naukovi zdobutky molodi – vyrishenniu problem kharchuvannia liudstva u KhKhI stolitti : materialy 83 mizhnarodnoi naukovoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantiv i studentiv, 5-6 kvitnia 2017 r. – K. : NUKhT, 2017. – Ch. 1. – S. 123.

9. Yushchenko N. M. Konoplianyi protein – perspektyvne dzherelo roslynnykh bilkiv dlia molochnykh produktiv / N .M. Yushchenko, T. O. Belemets, A. V. Lebedieva // Naukovi zdobutky molodi – vyrishenniu problem kharchuvannia liudstva u XXI stolitti : 82 Mizhnarodna naukova konferentsiia molodykh uchenykh, aspirantiv i studentiv, 2016 r. – K. : NUKhT, 2016. – S. 331.

10. Drobot V. I. Laboratornyi praktykum z tekhnolohii khlibopekarskoho ta makaronnoho vyrobnytstv : navchalnyi posibnyk / Drobot V. I. – K. : Tsentr navchalnoi literatury, 2006. – 341 s.

11. Zajceva L. V. Rol razlichnyh zhirnyh kislot v pitanii cheloveka i pri proizvodstve pishevyh produktov / L. V. Zajceva // Pishevaya promyshlenost. – 2010. – № 10. – S. 49–54.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-40-46
УДК 621.396.969.1

БОЙКО ЮЛІЙ
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0003-0603-7827
e-mail: boiko_julius@ukr.net
КАРПОВА ЛЕСЯ
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0001-5015-2107
rtlesya@gmail.com
СЕМЕНЮК ВІТАЛІЙ
Хмельницький національний університет
vitakik06714@gmail.com

ВИСОКОРІВНЕВА ОДНОПЛОЩИННА АНТЕНА MIMO ДЛЯ ДЕВАЙСІВ 5G

В даній роботі представлено конструкцію одноплощинної антенної системи MIMO для смартфонів із підтримкою 5G на частоті нижче 6 ГГц. Розроблена антена MIMO складається з чотирьох випромінювачів у формі петлі, які розташовані у кожному куті плати мобільного телефону, що відповідає принципу рознесення діаграм спрямованості. Елемент з однією антеною резонує на частоті 3,5 ГГц, його смуга пропускання імпедансу становить 1,28 ГГц (3–4,28 ГГц) для S_{11} ≤ –6 дБ, і дорівнює 720 МГц (3,18–3,9 ГГц) для S_{11} ≤ –10дБ. Для одноантенного елемента спостерігається пікове підсилення 3,64 дБі з ефективністю антени понад 90%. Для конфігурації антени MIMO між її елементами досягається ізоляція понад 10 дБ. Крім того, розроблена антена MIMO забезпечує достатнє покриття випромінюванням для підтримки різних сторін плати мобільного телефону, що є важливою особливістю для усіх телефонів з підтримкою 5G.

Ключові слова: антена MIMO, діаграма спрямованості, смуга пропускання, петлеподібна конструкція, коефіцієнт активного відбиття, ефективність, коефіцієнт підсилення, 5G смартфони.

BOIKO JULIY, KARPOVA LESYA, SEMENYUK VITALIY
Khmelnytskyi National University

SINGLE PLANE MIMO ANTENNA FOR 5G DEVICES

This work presents the design of a single-plane multiple-input/multiple-output MIMO antenna system for smartphones with 5G support at a frequency below 6 GHz. The developed MIMO antenna consists of four loop-shaped emitters located at each corner of the mobile phone board, which conforms to the principle of pattern diversity. The single-antenna element resonates at 3.5 GHz, has an impedance bandwidth of 1.28 GHz (3-4.28 GHz) for S_{11} ≤ –6 dB, and is 720 MHz (3.18-3.9 GHz) for S_{11} ≤ –10dB. For a single-antenna element, a peak gain of 3.64 dBi is observed with an antenna efficiency of >90%. For the MIMO antenna configuration, isolation >10 dB is achieved between its elements. In addition, the designed MIMO antenna provides sufficient radiation coverage to support different sides of the mobile phone board, which is an important feature for all 5G-enabled phones. A planar multiple-input/multiple-output MIMO antenna design is presented for sub-6 GHz 5G-enabled mobile phone applications. Four loop-shaped radiators are designed at each corner of a smartphone board, and they all follow the design configuration of pattern diversity. Several MIMO antenna features are evaluated, such as S-parameters, gain patterns, radiation and total efficiency, envelope correlation coefficient, total active reflection coefficient, and diversity gain. From the reported results, it may be concluded that the presented MIMO antenna system successfully meets the criteria of 5G-enabled mobile phones. In addition, the impacts of human hands and heads on MIMO antenna performance are investigated, and acceptable performance in the data and conversation modes is observed.

Keywords: MIMO antenna, pattern, bandwidth, loop design, active reflection coefficient, efficiency, gain factor, 5G smartphone.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Для зв'язку п'ятого покоління (5G) більшість мобільних операторів зосереджуються на отриманні високої пропускної здатності та високої швидкості передачі даних при низькій вартості. Системи 5G мають швидкість передачі даних у 1000 разів більшу порівняно з системами зв'язку четвертого покоління (4G). Такої високої швидкості передачі даних можна досягти за допомогою технології використання кількох передавальних та кількох приймальних антен MIMO (Multiple Input Multiple Output). У антенах MIMO швидкість передачі даних можна покращити шляхом зменшення багатопроменевого затухання або використання кількох незалежних каналів. Одним із основних ключових моментів до підвищення пропускної здатності каналу є розробка кількох антен для кожного каналу. Антена MIMO повинна мати низький взаємозв'язок, що є необхідною умовою для системи мобільного зв'язку 5G. Крім того, антени MIMO можуть запропонувати краще рознесення та підсилення мультиплексування, що призводить до збільшення пропускної здатності каналу.

Аналіз досліджень та публікацій

В контексті даної тематики, були розглянуті кілька антен MIMO на частоті нижче 6 ГГц. Так, в роботі [1] була розроблена восьмиелементна структура антени MIMO для спектру частоти 3,5 ГГц. Розроблено симетричну щілинну антену з відкритою вилкою та L-подібну фідерну смугу. Ця конфігурація забезпечує ізоляцію >17,5 дБ між елементами антени, але конструкція страждає через низьку ефективність антени. Така ж конфігурація з прямокутним слотом була представлена в статті [2]. Решітки антени MIMO

складалися з двох видів антенних елементів для роботи на різних частотах. Два елементи однакової конфігурації були розміщені у верхньому та нижньому кутах друкованої плати для зв'язку 2G/3G/4G, тоді як вісім елементів, що призначені для роботи на частоті 3,5 ГГц, були розміщені зліва та справа від панелі друкованої плати. В статті [3] розробили восьмипортову широкосмугову антену MIMO на частоті нижче 6 ГГц. Єдина антена системи MIMO складалася з лінії живлення потужністю 50 Вт з розімкнутим контуром налаштування, слотом на металевій рамі та U-подібним слотом на площині заземлення. Антена MIMO може забезпечувати широкосмугову характеристику в діапазоні частот 3,3–6 ГГц. У роботі [4] була представлена монопольна щілинна антена MIMO для діапазонів частоти 2,6/3,5 ГГц. Чотири металеві каркасні антени, що живляться за допомогою L-подібної лінії живлення, були розташовані в середині друкованої плати, тоді як інші елементи були розміщені на верхній і нижній сторонах друкованої плати.

Антенна решітка MIMO у роботі [5] була розроблена для додатків смартфонів 5G на частоті 3,5 ГГц. Масив складався з двох різних варіантів: один був L-подібним масивом із спільним живленням, а інший являв собою U-подібний масив петлі, які були встановлені на металевій рамі смартфона. Для покращення ізоляції автори створили інвертований I-слот і лінію нейтралізації між компонентами антени, що призводить до ізоляції 15 дБ у робочій смузі частот. У роботі [6] розроблено восьмипортову антену MIMO на основі I-подібного елемента для технологій IoT та 5G. Щоб забезпечити простір для додаткових компонентів, металевий каркас телефону було сконструйовано для розміщення компонентів антени. Виявилося, що антена ефективно резонує в діапазоні частот 3,5 ГГц. Антена MIMO забезпечує 13 дБ ізоляції між елементами решітки, з коефіцієнтом підсилення 4 дБі та ефективністю антени понад 40%.

Інтегрована антенна система MIMO [7] розроблена для LTE (Long Term Evolution) та міліметрового діапазону частот. Розроблена структура антени складалася з двох елементів для зв'язку LTE і чотирьох елементів для зв'язку 5G на міліметровому діапазоні. Для обох частотних діапазонів використовувався модифікований прямокутний випромінювач. Крім того, дефекти в заземленій площині були введені за допомогою прямокутних і круглих форм. Розроблений антенний елемент забезпечує резонанс для діапазону частот 5,5 ГГц. Одноплощинна рамкова антенна решітка MIMO під частотою 6 ГГц була розроблена в [8]. Антени організовані таким чином, щоб вони могли запропонувати як поляризацію, так і рознесення діаграм спрямованості. Крім того, покращення ізоляції було досягнуто шляхом створення стрілоподібної смуги між елементами антени. У роботі [9] автори розробили антенну решітку MIMO з копланарним хвилеводом для додатків смартфона на частоті нижче 6 ГГц. Для конструкції були обрані Г-подібні та Т-подібні випромінювальні елементи. Використовуючи копланарну хвилеводну техніку, було досягнуто ізоляції >15 дБ у смузі, що нас цікавить.

Вищезазначені антени MIMO мають деякі обмеження з точки зору неплоских конфігурацій, великих розмірів і складних структур. Крім того, ці антени страждають через низьку ефективність випромінювання, що в результаті призводить до поганого підсилення антени. Щоб усунути недоліки раніше опублікованих робіт, це дослідження представляє чотириелементну одноплощинну антенну систему MIMO для смартфонів 5G. Для одиночної антени вибирається елемент у формі петлі. Елементи випромінювання розташовані в кожному куті друкованої плати, що відповідає принципу різноманітності структур і звільняє місце для інших компонентів смартфона. Результати показують, що розроблена антена MIMO забезпечує широкосмугову характеристику у діапазоні частот 3,5 ГГц.

Запланована топологія MIMO має низький взаємозв'язок між антенами, що призводить до низького коефіцієнта кореляції обвідної і високого коефіцієнта підсилення. Крім того, запропонована антена MIMO забезпечує ефективність понад 90%.

Виклад основного матеріалу

Запропонована конструкція MIMO-антени на частоті нижче 6 ГГц наведена на рис. 1. Для конструкції антени MIMO використовується недорога підкладка FR-4. Товщина підкладки 1,6 мм і має відносну діелектричну проникність $\varepsilon = 4{,}4$. Для економії місця на друкованій платі для конструкції антени була використана петлеподібна конструкція [10]. На частоті 3,5 ГГц електрична довжина випромінювача приблизно дорівнює 1λ, де λ – довжина хвилі. Таким чином, оптимізована електрична довжина елемента антени становить ≈ 45,5 мм, а ширина лінії дорівнює 1 мм. Варто відзначити, що один елемент антени може займати максимальну площу 14,5 х 12 мм^2.

Антена MIMO, наведена на рис. 1, складається з чотирьох випромінювачів у формі петлі, розташованих у кожному куті друкованої плати мобільного телефону. Поверхня заземлення розміщена на одній площині з елементами випромінювання. Параметри конструкції запропонованої антени MIMO наведена на рис. 1, а оптимізовані значення наведено у таблиці 1.

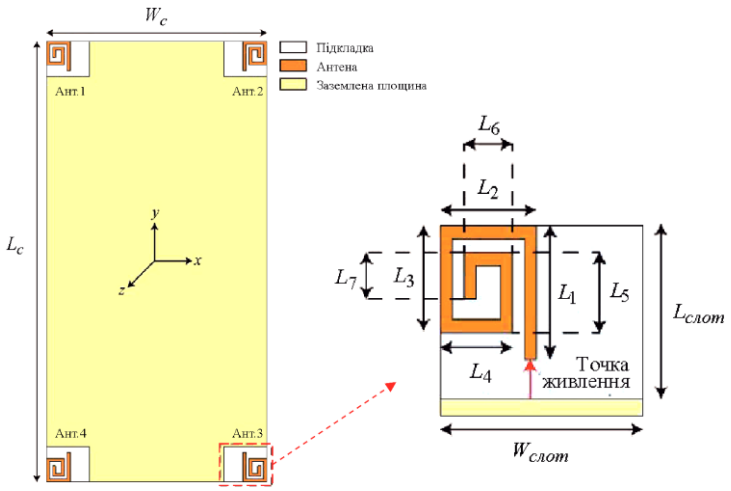


Рис. 1. Конструкція запропонованої антени MIMO на частоті нижче 6 ГГц

Таблиця 1

Оптимізовані параметри антени MIMO на частоті до 6 ГГц (у мм)

L	W	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	$L_{слот}$	$W_{слот}$
150	75	10	8	8	6	6	4	3.5	12	14.5

Для живлення антенного елемента використовується дискретний порт 50 Вт. На рис. 2 наведено змодельований коефіцієнт відбиття (S_{11}) одного елемента антени. Помічено, що елемент антени добре резонує в діапазоні частот 3,5 ГГц і забезпечує широкосмугову характеристику. Відзначено, що ширина смуги імпедансу –6 дБ і –10 дБ становить 1,28 ГГц (3–4,28 ГГц) і 720 МГц (3,18–3,9 ГГц) відповідно.

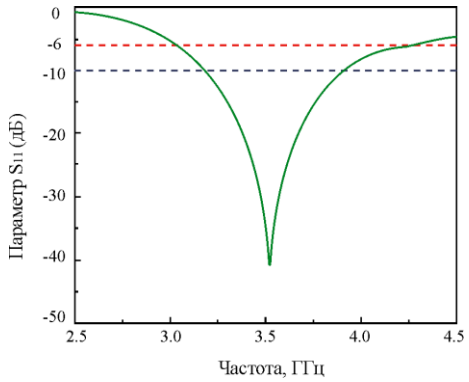
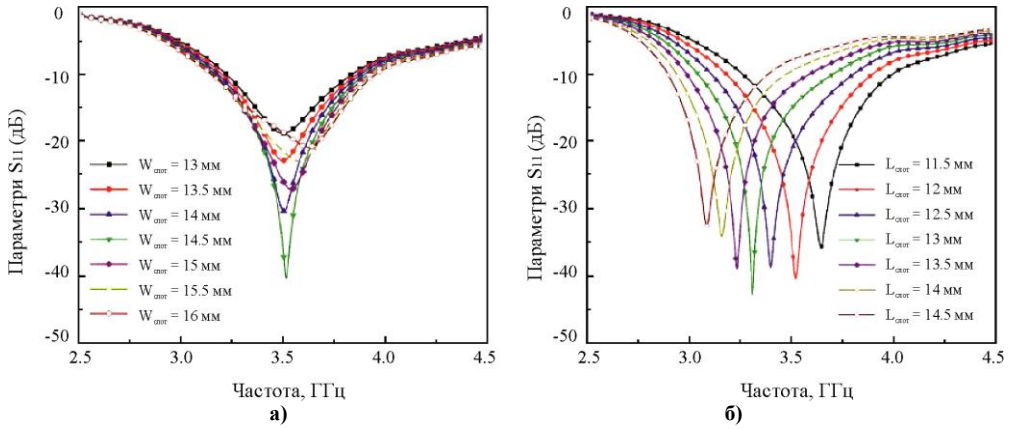


Рис. 2. Змодельовані характеристики S_{11} одноантенного елемента

Коефіцієнт відбиття S_{11} запропонованої антени можна регулювати, змінюючи деякі параметри антени. Для певної конструкції параметри $W_{слот}$ і $L_{слот}$ мають великий вплив на продуктивність.

Параметр $W_{слот}$ відіграє важливу роль у досягненні узгодження імпедансу в діапазоні заданої частоти, тоді як параметр $L_{слот}$ можна налаштувати для отримання резонансу для потрібного діапазону частот. Цей ефект чітко спостерігається в результатах на рис. 3, де наведено характеристики S_{11} розробленої антени для змінних $W_{слот}$ і $L_{слот}$.



а) **б)**

Рис. 3. Змодельовані характеристики S_{11} для різних значень: а) $W_{слот}$ і (б) $L_{слот}$

На рис. 3а наведено характеристики S_{11} запропонованої антени для змінних значень параметра $W_{слот}$. З рисунку видно, що параметр $W_{слот}$ має значний вплив на узгодження імпедансу. Максимальне узгодження імпедансу спостерігається для $W_{слот}$ = 14,5 мм, як показано на рис. 3а. З іншого боку, при зміні значення параметра $L_{слот}$ в діапазоні від 11,5 мм до 14,5 мм, спостерігається зсув резонансної частоти, як показано на рис. 3б. Важливо зазначити, що ці значення мають незначний вплив на характеристики ізоляції антен MIMO.

Змодельовані *S*-параметри запропонованої антени MIMO наведено на рис. 4, де видно, що розроблена антена MIMO добре резонує для діапазону частот 3,5 ГГц. Крім того, відзначається, що мінімальна ізоляція між прилеглими елементами антени становить понад 10 дБ.

У коефіцієнті відбиття S_{11} спостерігаються зміни, які в основному відбуваються через точки живлення та різне розташування елементів антени на друкованій платі смартфона, як показано на рис. 1. Крім того, материнська плата [11] має прямокутну форму, що може спричинити певні розбіжності в частотній характеристиці та зв'язках, переважно між парними та непарними номерами портів. Однак можна налаштувати потрібний діапазон частот, змінюючи параметри конструкції, як це показано на рис. 3.

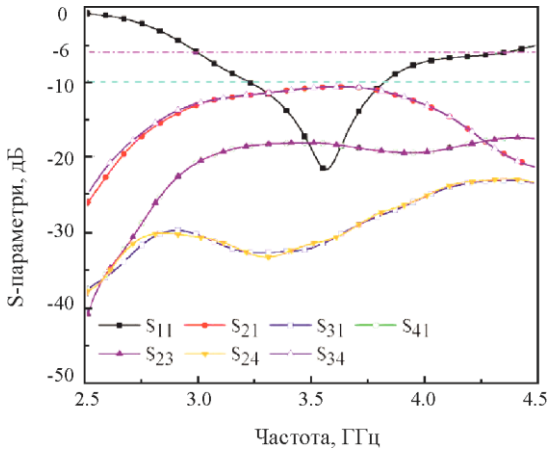


Рис. 4. Змодельовані S-параметри запропонованої антени MIMO на частоті нижче 6 ГГц

Змодельовані тривимірні (3D) діаграми підсилення розробленої антени наведені на рис. 5. Антена генерує різні вертикальні та горизонтальні поляризовані діаграми для вибраного діапазону частот, як показано на діаграмі. Крім того, як показано на рис. 5, коефіцієнт підсилення антени становить ~3,6 дБі. Отримані діаграми ще більше підтверджують, що антена MIMO підтримує рознесеність діаграм, що є бажаною функцією для додатків смартфона.

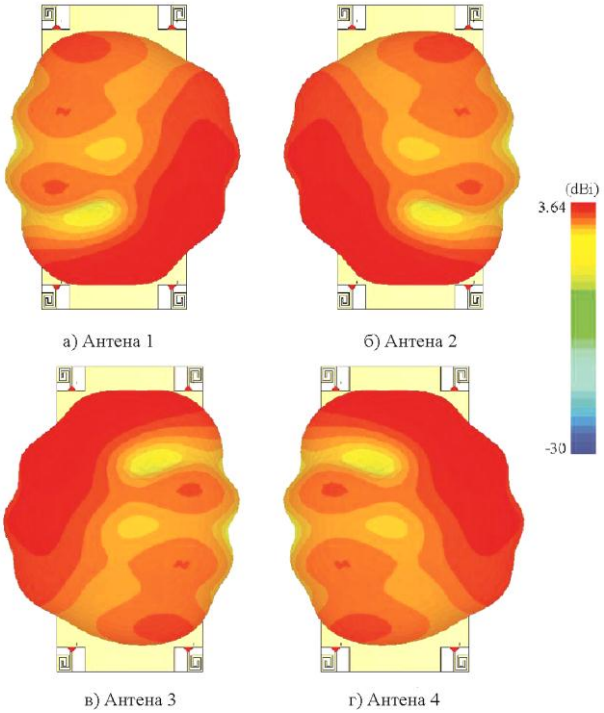


Рис. 5. Тривимірні діаграми підсилення запропонованої антени MIMO на частоті нижче 6 ГГц

Одним із найважливіших аспектів у визначенні ефективності антен MIMO є коефіцієнт кореляції обвідної. Для практичних застосувань коефіцієнт кореляції обвідної має бути понад 0,5, а в ідеалі він приблизно дорівнює нулю. Коефіцієнт кореляції обвідної (*ECC*) можна визначити, використовуючи S-параметри системи MIMO [12–14]:

$$ECC = \frac{\left| S_{jj}^{*} S_{ij} + S_{ij}^{*} S_{ii} \right|^2}{(1 - \left| S_{jj} \right|^2 - \left| S_{ji} \right|^2)(1 - \left| S_{ij} \right|^2 - \left| S_{ii} \right|^2)}, \quad (1)$$

де S_{ii} та S_{jj} – коефіцієнти відбиття, а S_{ji} та S_{ij} – коефіцієнти передачі антени MIMO.

Як показано на рис. 6а, значення коефіцієнта кореляції обвідної для передбачуваного діапазону частот (3,5 ГГц) становить менше 0,01. Результати також демонструють високу ізоляцію між елементами антени, що є вирішальним фактором для одночасного функціонування. Підсилення від рознесеності (*DG*) запропонованої антени MIMO, з іншого боку, можна розрахувати наступним чином [14]:

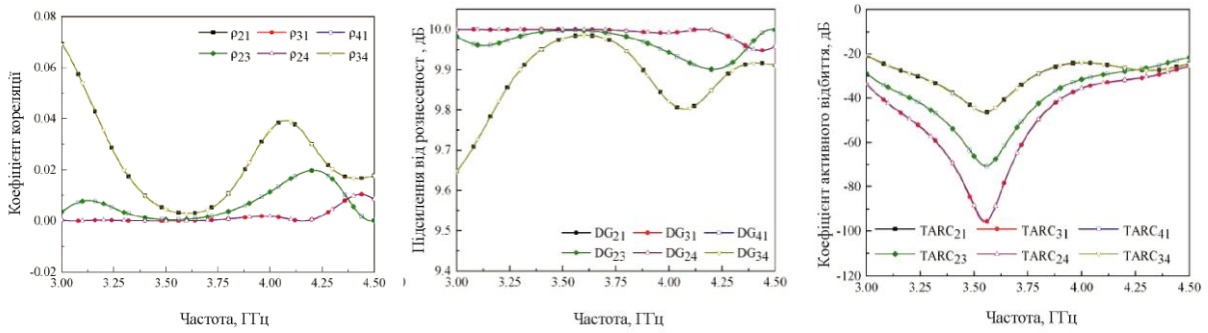
$$DG = 10\left(\sqrt{1 - ECC^2}\right). \quad (2)$$

Для представленої антени MIMO значення K_p становить понад 9,9 дБ, як показано на рис. 6*б*.

Загальний коефіцієнт активного відбиття (*TARC*) є ще одним важливим показником, який слід враховувати при оцінці роботи антени MIMO, і його можна визначити наступним чином [15–18]:

$$TARC = \sqrt{\frac{(S_{mm} + S_{mn})^2 (S_{nm} + S_{nn})^2}{2}}. \quad (3)$$

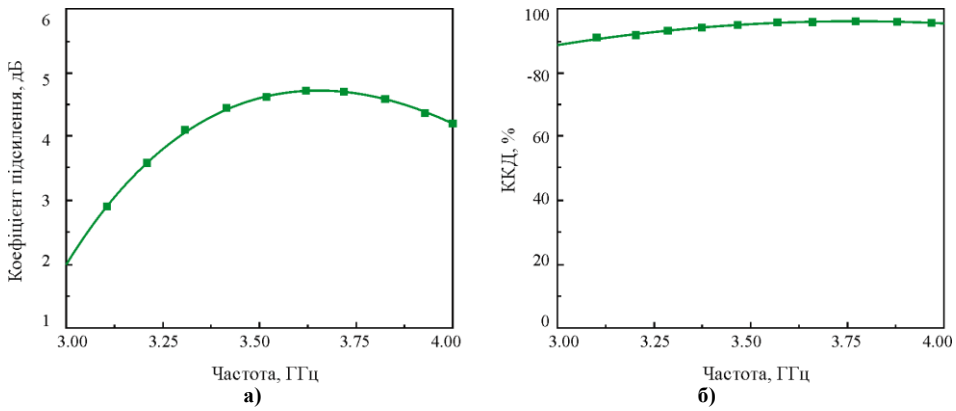
Результати демонструють, що запропонована антена MIMO забезпечує *TARC* понад 20 дБ для заданого діапазону, як показано на рис. 6в.



а) б) в)

Рис. 6. Змодельовані результати для запропонованої антени MIMO на частоті нижче 6 ГГц: а) коефіцієнт кореляції обвідної, б) підсилення від рознесення в) загальний коефіцієнт активного відбиття

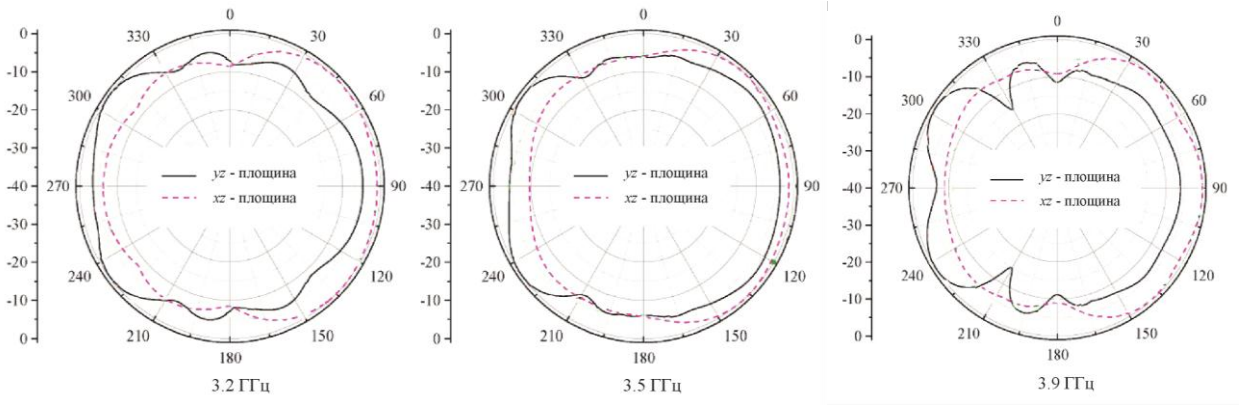
Змодельоване підсилення для порту-1 наведено на рис. 7а. Коефіцієнт підсилення вимірюється живленням порту-1, тоді як порт-2 за допомогою узгодженого навантаження 50 Вт. Середнє змодельоване підсилення на порту 1 становить 4 дБі (рис. 7а). Змодельоване підсилення коливається в діапазоні від 2 до 4,75 дБі. Результати випромінювання та загальної ефективності для порту-1 наведено на рис. 7б. Помічено, що розроблена антена має ефективність випромінювання понад 90%, при цьому загальний ККД коливається в межах 70–95%. На рис. 7б слід звернути увагу на те, що розроблена антена забезпечує постійну ефективність випромінювання в обраному діапазоні частот.



а) б)

Рис. 7. Змодельовані: а) коефіцієнт підсилення, і б) загальна ефективність запропонованої антени MIMO на частоті нижче 6 ГГц, коли порт-1 активний

Змодельовані характеристики випромінювання порту-1 для частот 3,2 ГГц, 3,5 ГГц і 3,9 ГГц наведено на рис. 8. Розроблена антена MIMO забезпечує квазівсеспрямовані характеристики випромінювання як для площини *yz*, так і для площини *xz* на заданих частотах. Крім того, антена MIMO забезпечує рознесення діаграм спрямованості в площині *xz*, як показано на рис. 8.



а) **б)** **в)**

Рис. 8. Характеристики випромінювання запропонованої антени MIMO на частоті нижче 6 ГГц, коли порт 1 активний

Для антен, що використовуються в смартфонах, одне з найважливіших питань є питомий коефіцієнт поглинання (SAR). Питомий коефіцієнт поглинання – це параметр, який вимірює кількість електромагнітних хвиль, які поглинає людський організм..

Характеристики питомого коефіцієнта поглинання для моделі голови користувача досліджено та наведено на рис. 9. Мінімальний SAR становить 0,94 Вт/кг для Антени 2, тоді як максимальне значення SAR становить 2 Вт/кг для Антени 3. Відповідно, що чим ближче елементи до моделі голови, тим вище значення SAR, і навпаки.

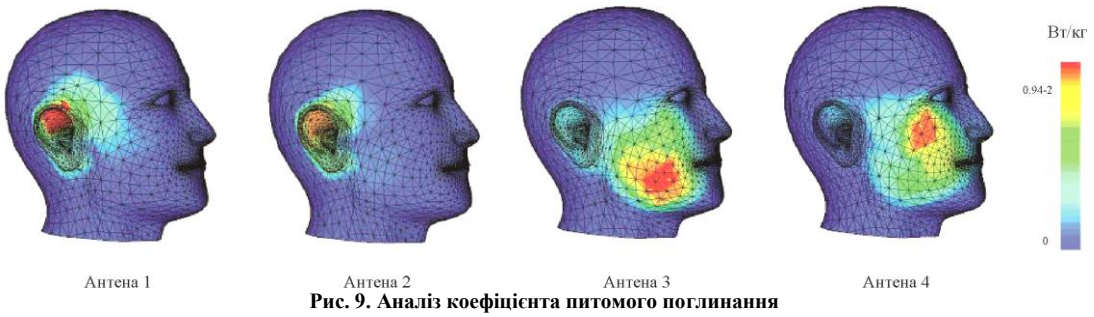


Рис. 9. Аналіз коефіцієнта питомого поглинання під час використання антени MIMO у режимі розмови

Висновки

Представлено одноплощинну конструкцію антени MIMO для мобільних телефонів із підтримкою 5G з частотою нижче 6 ГГц. Чотири випромінювачі у формі петлі розроблені в кожному куті плати смартфона, і всі вони відповідають конструкції налаштування різноманітності шаблонів. Оцінюються деякі функції антени MIMO, такі як *S*-параметри, діаграми підсилення, випромінювання та загальна ефективність, коефіцієнт кореляції обвідної, загальний коефіцієнт активного відбиття та посилення рознесення. З отриманих результатів можна зробити висновок, що представлена антенна система MIMO успішно відповідає критеріям мобільних телефонів з підтримкою 5G.

References

1. Li, Y., Luo, Y., Yang, G. High-isolation 3.5 GHz eight-antenna MIMO array using balanced open-slot antenna element for 5G smartphones. IEEE Trans. Antennas Propag. 2019, 67, 3820–3830.

2. Ullah, R., Ullah, S., Ullah, R., Faisal, F., Mabrouk, I.B., Al Hasan, M.J. A 10-Ports MIMO Antenna System for 5G Smart-Phone Applications. IEEE Access 2020, 8, 218477–218488.

3. Zhang, X., Li, Y., Wang, W., Shen, W. Ultra-wideband 8-port MIMO antenna array for 5G metal-frame smartphones. IEEE Access 2019, 7, 72273–72282.

4. Abdullah, M., Kiani, S.H., Iqbal, A. Eight element MIMO antenna for 5G mobile applications. IEEE Access 2019, 7, 134488–134495.

5. Jiang,W., Liu, B., Cui, Y., Hu,W. High-isolation eight-element MIMO array for 5G smartphone applications. IEEE Access 2019, 7, 34104–34112.

6. Kiani, S.H., Altaf, A., Abdullah, M., Muhammad, F., Shoaib, N., Anjum, M.R. Damaševi˘cius, R.

Blažauskas, T. Eight element side edged framed MIMO antenna array for future 5G smart phones. Micromachines 2020, 11, 956.

7. Iffat Naqvi, S. Hussain, N. Iqbal, A. Rahman, M. Forsat, M. Mirjavadi, S.S. Amin, Y. Integrated LTE and Millimeter-Wave 5G MIMO Antenna System for 4G/5G Wireless Terminals. Sensors 2020, 20, 3926.

8. Parchin, N.O., Basherlou, H.J., Al-Yasir, Y.I., Abd-Alhameed, R.A. A broadband multiple-input multiple-output loop antenna array for 5G cellular communications. AEU-Int. J. Electron. Commun. 2020, 127, 153476.

9. Parchin, N.O., Al-Yasir, Y.I., Abdulkhaleq, A.M., Basherlou, H.J., Ullah, A., Abd-Alhameed, R.A. A New broadband MIMO antenna system for sub 6 GHz 5G cellular Communications. In Proceedings of the 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Copenhagen, Denmark, 15–20 March 2020, pp. 1–4.

10. Ahmad, U., Ullah, S., Rafique, U., Choi, D.Y., Ullah, R., Kamal, B., Ahmad, A. MIMO Antenna System With Pattern Diversity for Sub-6 GHz Mobile Phone Applications. IEEE Access, 2021, 9, 149240–149249.

11. Kovtun I., Boiko J., Petrashchuk S. Nondestructive strength diagnostics of solder joints on printed circuit boards. In 2017 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), Odessa, Ukraine, 2017, pp. 1-4.

12. Boiko J., Polıkarovskykh O., Tkachuk V., Yehoshyna H., Karpova L., Tkachuk. V. Design Concepts for Mobile Computing Direction Finding Systems. Mobile Computing and Sustainable Informatics: Proceedings of ICMCSI 2023, vol. 166. Springer, Singapore. 2023, pp. 89-107.

13. Boiko J., Polikarovskykh O. Tkachuk V. Development and modeling of the antenna system the direction finder unmanned aerial vehicle. Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska, vol. 13, no. 1, pp. 26-32, March 2023.

14. Mazloum, J., Ghorashi, S.A., Ojaroudi, M., Ojaroudi, N. Compact Triple-Band S-Shaped Monopole Diversity Antenna for MIMO Applications. Appl. Comput. Electromagn. Soc. J. 2015, 30, 975–980.

15. Kumar, A., Ansari, A.Q., Kanaujia, B.K., Kishor, J. High isolation compact four-port MIMO antenna loaded with CSRR for multiband applications. Frequenz 2018, 72, 415–427.

16. Sharawi, M.S. Printed multi-band MIMO antenna systems and their performance metrics [wireless corner]. IEEE Antennas Propag. Mag. 2013, 55, 218–232.

17. Parhomey I. R., Boiko J. M., Eromenko O. I. Features of digital signal processing in the information control systems of multipositional radar. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, vol. 77, no. 2, pp. 75-84, Aug. 2016.

18. Boiko, J., Karpova, L. Increasing Efficiency in the Correlation Processing of Information Signals for Radar. Proceedings of Fourth International Conference on Communication, Computing and Electronics Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 977. Springer, Singapore. 2023.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-47-52
УДК 004.67: 338.47

БУРЕНКО ВОЛОДИМИР
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
https://orcid.org/0000-0002-0862-5879
e-mail: volodymyr.burenko22@gmail.com

АНАЛІЗ НАПОВНЕНОСТІ ЗУПИНОК ПАСАЖИРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ ЗА ДОПОМОГОЮ АЛГОРИТМІВ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ З IP-КАМЕР «РОЗУМНОГО МІСТА»

В роботі розглянуто методи реєстрації кількості людей на зупинці пасажирського транспорту. Проведений аналіз використання глобальних (порогових) та локальних (адаптивних) методів бінаризації зображень, отриманих з IP-камер, які є хостами інформаційно-вимірювальної мережі Smart City. Доведено доцільність використання алгоритму Оцу для знаходження оптимального порогу при бінаризації зображень у процесі планування пасажироперевезень. Наведено приклад роботи розробленого застосунку на мові JavaScript при розрахунку загальної кількості пікселів із фото людей на зупинці.

Ключові слова: *інформаційно-вимірювальна мережа, відеоспостереження, розумне місто, пасажироперевезення, обробка зображень, методи бінаризації, діаграма яскравості, кросплатформний застосунок.*

BURENKO VOLODYMYR O.
Admiral Makarov National University of Shipbuilding

ANALYSIS OF FILLING OF PASSENGER TRANSPORT STOPS USING ALGORITHMS OF IMAGE PROCESSING FROM SMART CITY IP CAMERAS

Counting the number of people at a passenger transport stop is necessary to ensure the timely delivery of vehicles of the required capacity to existing stops. In addition, it is necessary to provide for the construction of new public transport stops on the main routes of large cities in case of overloading of the existing ones. Computer systems of the "smart city" make it possible counting the number of people at the stops due to innovative technologies. For example, it is possible to use sensors that react to the presence of people, and turn on the sidewalk lights. The increasing spread of video surveillance systems within the Smart City makes it expedient to use video streams or photos from IP cameras, which are the end hosts of the information-measurement network. The analysis of the use of global (threshold) and local (adaptive) methods of binarization of images obtained from IP cameras was carried out. As a result, it is indicated that adaptive binarization can be recommended if it is necessary to process low-quality halftone images. However, in the presence of inhomogeneities of the background with low contrast, in this case the appearance of false objects is possible. At the same time, the loss of small details when using the methods of global image binarization does not affect the estimation of filling of passenger transport stops. The expediency of using Otsu's algorithm for finding the optimal threshold for image binarization in the process of passenger transportation planning is proven. The developed JavaScript application provides for the conversion of color photos from IP cameras into Grayscale images. An example of the work of the developed application when calculating the total number of pixels from photos of people at city transport stops is given.

Keywords: *information and measurement network, video surveillance, Smart City, passenger transportation, image processing, binarization methods, brightness diagram, cross-platform application.*

Постановка проблеми

В умовах зміни ціннісних імперативів на ринку обслуговування соціально-економічних потреб населення, об'єктивного існування ризиків та пов'язаних з ними витратами, існує нагальна необхідність в ціннісно-орієнтованому управлінні бізнес-процесами, пов'язаними з впровадженням інноваційних IT-технологій [1]. Однією з таких проблем є організація пасажирських перевезень міським автомобільним транспортом [2]. В такому разі необхідне комплексне розв'язання задач своєчасної подачі громадського транспорту за існуючими маршрутними системами залежно від наповнення зупинок громадського транспорту пасажирами, що очікують. Тому актуальним є розробка та вдосконалення методів збору і обробки інформації про пасажиропотоки, моделювання системи пасажирського транспорту міст, а також математичних моделей і програмного забезпечення (ПЗ) маршрутизації перевезень пасажирів на основі інформаційно-вимірювальних мереж (ІВМ), інтегрованих в комп'ютерні системи «розумного міста» (Smart City).

Аналіз останніх джерел

В роботі [3] наведено дослідження щодо визначення підходів до мінімізації витрат проєкту з використанням подвійних задач. Практична реалізація викладеного методу можлива при виведенні на обстежені маршрути пасажироперевезень транспорту, місткість якого відповідає заповненості зупинок людьми.

В міській інфраструктурі все ширше використовуються кіберфізичні або «розумні» системи. Відповідно до запропонованої в [4] інформаційно-технологічної архітектури мережевої платформи моніторингу кіберфізичних об'єктів «розумних міст», яка базується на трьох рівнях інфраструктури (кіберфізичний, мережевий та хмарний), найбільш обширним є мережевий рівень. Однією з найбільш розгалужених комп'ютерних систем цього рівня є інформаційно-вимірювальна мережа, кінцевими хостами якої виступають IP-камери, що здійснюють відеоспостереження на зупинках міського транспорту. Однак, у [4] також зазначено, що на даний час широкомасштабне запровадження кіберфізичних систем

супроводжується обширним переліком невирішених задач, до яких зокрема відноситься експоненційне зростання обсягів даних та відсутність загальноприйнятих підходів до формування засобів їх зберігання та аналітичного опрацювання. За такими умовами необхідно розробити методи та алгоритми формування та передачі на сервери обробки даних зображень з системи відеоспостереження, зроблених згідно з дискретними відкликами у часі.

У науковій літературі також наведені результати досліджень впровадження додаткових зупинок міського пасажирського транспорту в залежності від просторової самоорганізації населення [5]. У наведених моделях передбачена розбудова додаткових зупинок, спричинених перенавантаженням існуючих зупинок, спричинених соціологічними умовами життєдіяльності суспільства. У роботі визначено, що своєчасність подачі пасажирського транспорту має забезпечувати добові витрати часу на переміщення, які для міст не повинні перевищувати меж у 50–90 хв. Для забезпечення таких умов нові розроблювані алгоритми обробки зображень в інформаційно-вимірювальній мережі моніторингу наповненості зупинок пасажирського транспорту мають також діагностувати перенавантаженість існуючих зупинок та визначати верхню межу їх наповненості. До того ж, для ефективної роботи моделі обробки інформації в зазначеній комп'ютерних системах необхідно зонування зупинок при одночасному обслуговуванні кількома видами транспорту.

Для вирішення проблеми часових затримок під час планування інтенсивності транспортного потоку у роботі [6] розроблено моделі організації та регулювання дорожнього руху наповненості магістральних вулиць та доріг великих і найбільших міст. Зменшенню часових затримок у пасажироперевезеннях присвячені дослідження у роботі [7]. Розроблені підходи потребують у подальшому експериментальної перевірки шляхом проведення імітаційного та/або натурного експерименту на вибраних об’єктах з визначенням межі навантаженості кожної зупинки.

Метою роботи є дослідження методів визначення кількості пасажирів, які очікують транспорт на зупинках, на основі бінаризації зображень із IP-камер системи відеоспостереження у складі Smart City.

Виклад основного матеріалу

В архітектурі комп’ютерних мереж для Smart City зростає кількість IP-камер, які найбільшою часткою встановлюються на зупинках пасажирського транспорту та можуть бути використані для задач інформаційно-вимірювальній мережі моніторингу наповненості таких зупинок з наступним плануванням вчасної подачі транспорту необхідної місткості. Моніторинг наповненості зупинок пасажирського транспорту – це процес визначення рівня зайнятості зупинок та контролю за кількістю пасажирів, які користуються транспортом на конкретній зупинці. Це важлива інформація для операторів транспорту, яка дозволяє їм ефективно планувати рух транспорту, забезпечувати комфортні умови для пасажирів і покращувати якість обслуговування.

Для моніторингу наповненості зупинок пасажирського транспорту можуть використовуватися різні технології. Одна з них – використання сенсорів, які реєструють рух людей на зупинці. Наприклад, можна на тротуарі встановлювати сенсори, які реагують на присутність людей та фіксують їх рух (рис. 1). Такі датчики повинні мати ступінь захисту не нижче IP65, при спрацьовуванні передавати живлення на джерело світла (нп., LED-світильник Horoz Electric AWAX-1). Таким чином, для обліку може використовуватись потужність датчика, яка дорівнює сумарній потужності світильників, що включилися. Ця інформація може передаватися операторам транспорту для подальшого аналізу.

Рис. 1. Тротуарні LED-світильники: а – лінійні; б – точкові; в – вбудований датчик руху e100101

Важливим етапом в обробці зображень, отриманих з IP-камер IBM Smart City, є сегментація зображень, яка допомагає вирішувати складні завдання комп'ютерного зору.

Одним з основних методів сегментації зображень є використання глибоких згорткових нейронних мереж (англ. Deep Convolutional Neural Networks – CNN). Ці мережі можуть навчитися автоматично визначати границі об'єктів та розподіляти пікселі зображення до відповідних сегментів [8]. Використання глибокого навчання (англ. Deep Learning – DL or ML) дозволяє досягти високої точності та швидкості обробки зображень. Сегментація зображення базується на принципах розривності та подібності.

Принцип розривності передбачає, що сусідні сегменти зображення повинні бути різними об'єктами або різними частинами одного об'єкта. Це означає, що границі між сегментами повинні бути чіткими і не перетинатися.

Принцип подібності передбачає, що пікселі в межах одного сегмента повинні мати подібні характеристики, такі як колір, текстура або яскравість. Це означає, що об'єкти з однаковими характеристиками будуть належати до одного сегмента.

Існуючі різні методи бінаризації зображень можна умовно поділити на глобальні (порогові) та локальні (адаптивні).

У загальному сенсі завдання виявлення об'єктів полягає у встановленні наявності на зображенні об'єкта, що має деякі певні характеристики. Такою характеристикою може бути, наприклад, яскравість зображення.

Локальні (адаптивні) методи бінаризації розбивають зображення на декілька областей, для кожної з яких необхідно обчислити поріг, ґрунтуючись на інформації про інтенсивність пікселів. Алгоритми даного класу передбачають розбиття зображення на блоки певного розміру, при цьому розмір блоку має бути мінімальним, але достатнім для збереження вихідних особливостей та деталей зображення. Однак при цьому блоки мають бути настільки більшими, щоб шуми впливали на результат мінімально. Найбільш популярними адаптивними методами бінаризації зображень є метод Ніблека, метод Бернсена, метод Ейквеля, метод Саувола та метод Крістіана [9]. Адаптивну бінаризацію можна рекомендувати у разі, якщо необхідно обробити напівтонові зображення невисокої якості. Однак, у разі неоднорідностей фону з низькою контрастністю можлива поява хибних об'єктів. Адаптивні способи та пристрої, що їх реалізують, добре підходять для застосувань з обмеженими обчислювальними можливостями та/або обмеженими доступними ресурсами, що використовуються для виконання обробки зображень [10].

Згідно з глобальними (пороговими) методами одним з способів виявлення об'єктів є вибір порога за яскравістю, або гранична класифікація (thresholding). Сенс такого порогу полягає в тому, щоб розділити зображення на світлий об'єкт (foreground) та темне тло (background). Тобто об'єкт – це сукупність тих пікселів, яскравість яких перевищує поріг (I > T), а тло — сукупність інших пікселів, яскравість яких нижче за поріг (I < T). Питання постає у тому, як обрати ключовий параметр – поріг T.

Одним з найбільш популярних методів глобальної бінаризації зображень є метод Оцу [11], запропонований японським вченим Нобуюкі Оцу в 1979 р.

Алгоритм Оцу складається з таких основних кроків:

1. Розрахуйте гістограму інтенсивності зображення.
2. Розрахуйте загальну кількість пікселів у зображенні.
3. Для кожного значення порогу (від 0 до максимальної інтенсивності пікселів) розрахуйте вагу кожної частини зображення (до та після порогу), а також середні значення інтенсивності для кожної частини.
4. Для кожного значення порогу розрахуйте дисперсії кожної частини (відносно середнього значення інтенсивності кожної частини) та загальну внутрішньокласову дисперсію, використовуючи вагу кожної частини.
5. Знайдіть поріг, для якого міжкласова дисперсія максимальна.
6. Застосуйте отриманий поріг до зображення.

Недоліком методу Оцу можливість втрати дрібних деталей, але для обліку кількості людей на зупинках дрібні деталі не є важливими, тому для планування пасажироперевезень алгоритм Оцу дозволяє знайти оптимальний поріг для бінаризації зображення. У цьому випадку він забезпечує точну та надійну бінаризацію зображення, що допомагає покращити якість подальшої обробки зображення.

До того ж, у глобальних (порогових) методах бінаризації визначені порогові значення застосовуються до піксельних значень градації сірого (gray scale), щоб отримати набір двійкових піксельних значень [12]. Але сучасні системи відеоспостереження базуються на IP-камерах, які формують відеострім та/або зображення у кольоровому форматі. Тому при розроблення спеціалізованого ПЗ необхідно передбачити при обробленні кольорових зображень, отриманих з IP-камер систем Smart City, попередню конвертацію таких зображень у відтінки сірого. Слід зауважити, що в залежності від погодних умов якість отриманих знімків може дуже відрізнятись один від одного. В такому разі перед формуванням діаграми яскравості необхідно застосувати до зображення один з алгоритмів покращення. До варіантів такого покращення входять покрокове лінійне розтягування, лінійне вирівнювання, глобальне вирівнювання гістограми, модифікація роздільної здатності тощо [13].

Для генерування гістограми яскравості та розрахунку загальної кількості пікселів у зображенні був розроблений програмний застосунок у середовищі розробки Webstorm, для чого було встановлено кросплатформне середовище Node.js 18.18.2 LTS для виконання JavaScript з відкритим вихідним кодом [14] та менеджер пакетів JavaScript – Node Package Manager (npm), – що керує залежностями в проєктах, написаних на Node.js, та дозволяє завантажувати пакети у застосунок з хмарного сервера ***npm*** [15; 16].

Послідовність кроків, шо виконується програмою, яка буде приймати кольорове зображення наповненості зупинки громадського транспорту людьми та генерувати гістограму яскравості цього зображення:

Крок 1. Прийняти вхідний параметр, який є шляхом до зображення.

Крок 2. Завантажити зображення за заданим шляхом.

Крок 3. Використовуючи пакет ***sharp,*** перетворити зображення на градації сірого.

Крок 4. Отримати масив значень яскравості пікселів зображення.

Крок 5. Створити гістограму на основі отриманих значень яскравості, використовуючи пакет ***D3.js.***

Крок 6. Зображення гістограми зберегти у файл.

Застосунок складається з двох модулів – ***get-brightness.js*** та ***index.js***.

Перший модуль містить в собі всю основну логіку застосунку, а саме: приймає зображення, обробляє його за допомогою бібліотеки ***sharp***, генерує гістограму яскравості за допомогою бібліотеки ***d3-node*** та зберігає її в форматі *png*.

Другий модуль слугує коренем застосунку, він імпортує в себе перший модуль. Спочатку, за допомогою бібліотеки ***readline*** зчитується з консолі шлях до зображення, з якого необхідно отримати гістограму. Після цього, запускаємо функцію ***get-brightness*** (перший модуль), в який в якості аргументу передається шлях до файлу.

Діаграма компонентів програми наведена на рис. 2.

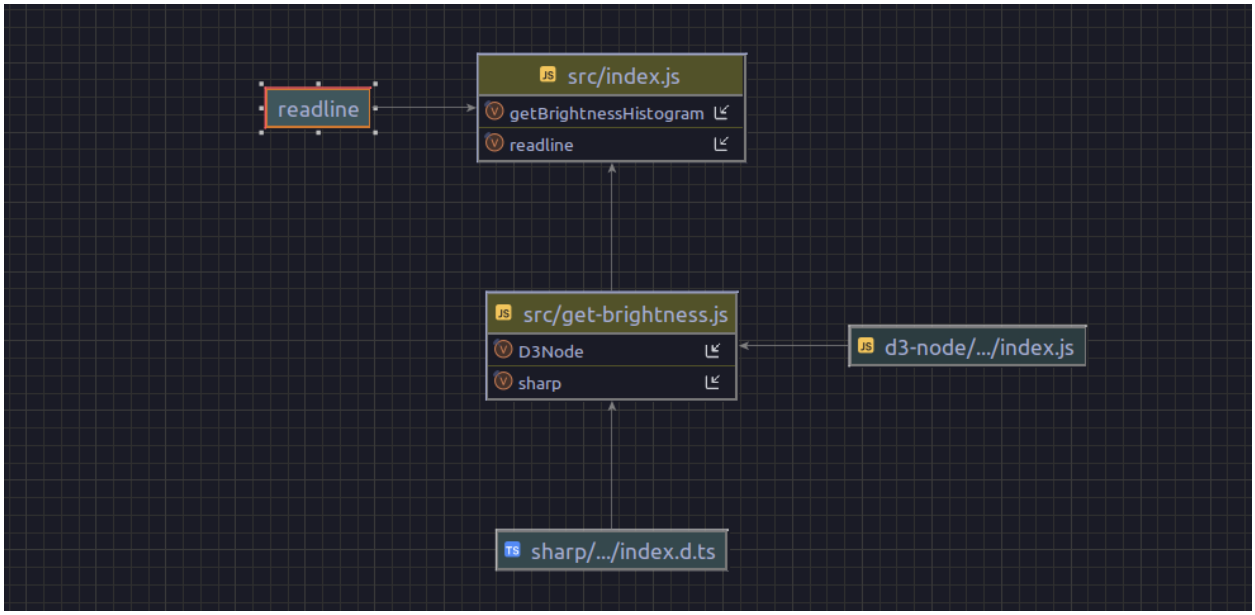


Рис. 2. Діаграма компонентів програми

Для запуску програми потрібно виконати наступні команди:

1) використовуючи термінал, перейти в кореневу директорію застосунку;
2) виконати команду ***npm i*** (для встановлення залежностей);
3) виконати команду ***npm run start***;
4) слідувати вказівкам на екрані;
5) після успішного виконання програми результат буде збережений в корені застосунку у директорії ***output***.

Процес запуску розробленого застосунку наведено га рис. 3.

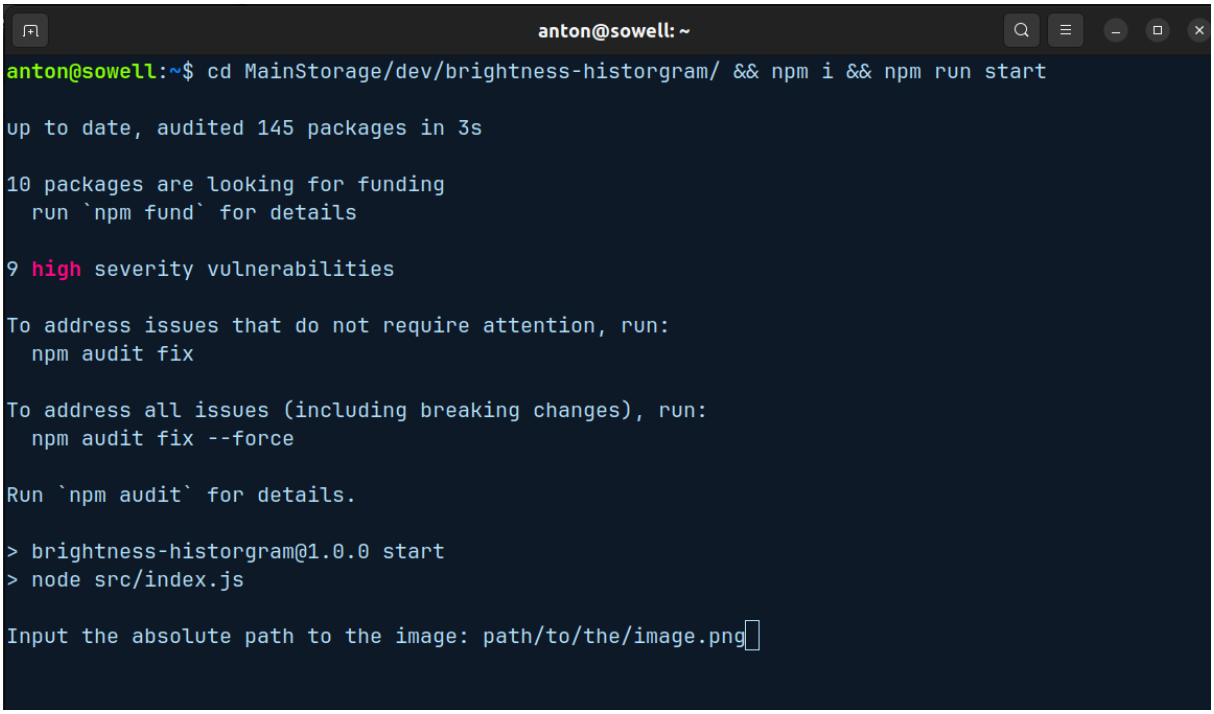


Рис. 3. Приклад запуску застосунку

Приклад розрахунку загальної кількості пікселів із фото людей на зупинці наведено на рис. 4–5.

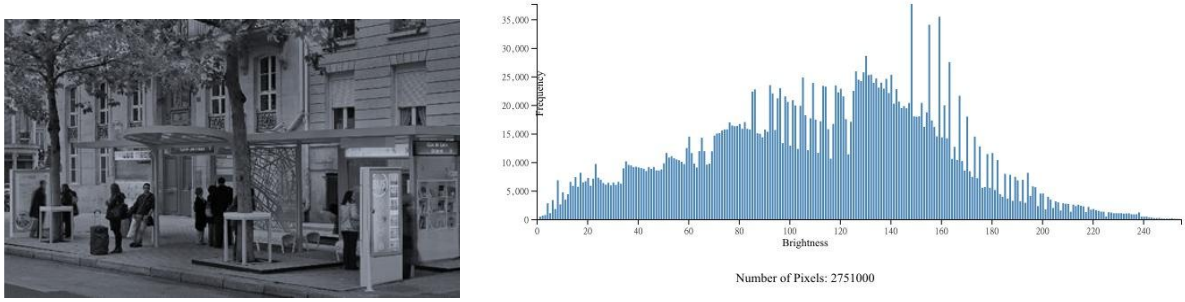


Рис. 4. Розрахунок загальної кількості пікселів з gray-scale фото людей на зупинці транспорту

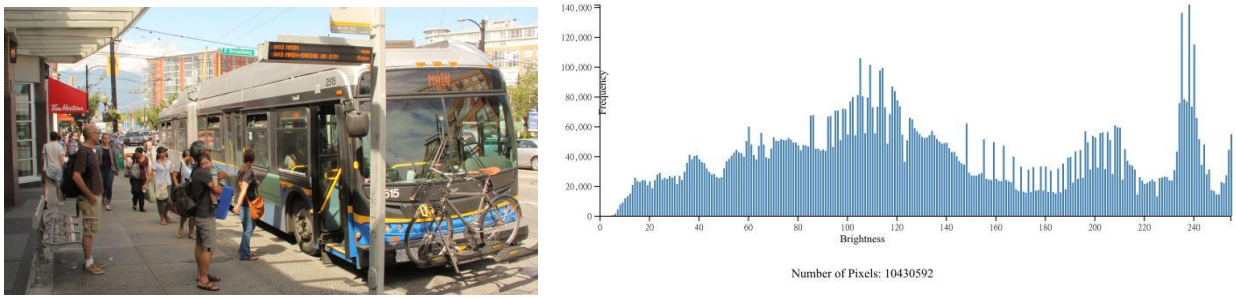


Рис. 5. Розрахунок загальної кількості пікселів з кольорового фото людей на зупинці транспорту

На графічному представленні гістограми яскравості зображень (рис. 4–5) вісь *x* представляє значення яскравості (від 0 до 255), а вісь *y* представляє кількість пікселів у зображенні, які мають це значення яскравості.

Висновки

Моніторинг наповненості зупинок пасажирського транспорту дозволяє операторам ефективно планувати рух транспорту, уникати переповнених автобусів чи трамваїв, а також забезпечити комфортні умови для пасажирів. Крім того, ця інформація може бути використана для аналізу популярності різних зупинок та визначення потреб у розвитку громадського транспорту. Все більше поширення інноваційних технологій у рамках комп'ютерних систем «розумного міста» дозволяє реалізувати облік наповненості людьми зазначених зупинок за допомогою IP-камер системи відеоспостереження Smart City. Проведений аналіз використання глобальних (порогових) та локальних (адаптивних) методів бінаризації зображень, отриманих з IP-камер, показав, що адаптивну бінаризацію можна рекомендувати у разі, якщо необхідно обробити напівтонові зображення невисокої якості. Однак, при наявності неоднорідностей фону з низькою контрастністю можлива поява хибних об'єктів. Втрата дрібних деталей при застосуванні методів глобальної бінаризації зображень не впливає на оцінку завантаженості зупинок транспорту. Доведено доцільність використання алгоритму Оцу для знаходження оптимального порогу при бінаризації зображень у процесі планування пасажироперевезень. Зважаючи на те, що для отримання набору двійкових піксельних значень при застосуванні глобальних (порогових) методів бінаризації виконується аналізування зображень у градаціях сірого (gray scale), у розробленому застосунку на мові JavaScript передбачено конвертацію кольорових фото з IP-камер у Grayscale-зображення. Наведено приклад роботи розробленого застосунку при розрахунку загальної кількості пікселів із фото людей на зупинках міського транспорту.

Література

1. Чернов С. К., Савіна О. Ю. Метод формування ціннісно-орієнтованого портфеля проектів наукомісткого підприємства. Управління розвитком складних систем. 2018. № 34. С. 78–84. URL: https://repositary.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/6a9b1321-4dcf-4f00-975c-95167bc0bfad/content.

2. Доля О., Доля К. Методи рішення задач з організації пасажирських перевезень автомобільним транспортом. International Science Journal of Engineering & Agriculture. 2023. Vol. 2, no. 3. P. 101–119. DOI: 10.46299/j.isjea.20230203.10.

3. Chernov S., Titov S., Chernova L., Kunanets N., Chernova L. Determination of approaches for project costs minimization with use of dual problems. Econtechmod : an international quarterly journal. Polish Academy of Sciences. 2019. Vol. 08, No. 2. P. 61–68.

4. Дуда О., Станько А. Архітектура мережевої платформи моніторингу об'єктів у кіберфізичних системах «розумних міст». Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2023. Т. 323, № 4. С. 123–130. DOI: 10.31891/2307-5732-2023-323-4-123-130.

5. Войтович О. А., Ткач В. О., Луб'яний П. В. Модель впровадження додаткових зупинок міського пасажирського транспорту. Вісник Херсонського національного технічного університету. Інженерні науки.

2020. Т. 4, № 75. С. 20–27. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2020.4.2.

6. Bieletska O., Liubyi Y., Ocheretenko S., Muzylyov D., Ivanov V., Pavlenko I. Approach to determine transport delays at unsignalized intersections. Communications – Scientific Letters of the University of Zilina. 2023. Vol. 25, no. 3. P. A124–A136. DOI: 10.26552/com.C.2023.052.

7. Royko Yu., Yevchuk Yu., Bura R., Velhan A. Minimization of public transport delays at arterial streets with coordinated motion. Transport Technologies. 2022. Vol. 3, no. 1. P. 14–29. DOI: 10.23939/tt2022.01.014.

8. Yang C., Guo H. A Lightweight semantic segmentation algorithm based on deep convolutional neural networks. Computational Intelligence and Neuroscience. 2022. Vol. 2022. Article ID 5339664. 9 pages. DOI: 10.1155/2022/5339664.

9. Eyupoglu C. Implementation of Bernsen's locally adaptive binarization method for gray scale images. The Online Journal of Science and Technology. April 2017. Vol. 7, Is. 2. P. 68–72.

10. Patent № US8,351,699 B2 USA. Int. CI (2006.01) G06K 9/00. Methods and apparatus for adaptive auto image binarization. D. Li, J. Elton, S. Steger; Assignee: Accusoft Co., Tampa, FL (US). Appl. No. 12/642,643; Filed: Dec. 18, 2009; Date of Pat.: Jan. 8, 2013. 17 p.

11. Shaikh A., Botcha S., Krishna M., Kumar S. Otsu based differential evolution method for image segmentation : preprint, 19 pages, October 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/364422460_Otsu_based_Differential_Evolution_Method_for_Image_Segmentation

12. Patent № US9,025,897 B1 USA. Int. CI (2006.01) G06K 9/00. Methods and apparatus for adaptive auto image binarization. J. H. Elton, S. A. Martucci; Assignee: Accusoft Co., Tampa, FL (US). Appl. No. 13/867,605; Filed: Apr. 5, 2013; Date of Pat.: May. 5, 2015. 16 p.

13. Pradeep, Namratha M., Manu G. V. Global and localized histogram equalization of an image. International Journal of Computational Engineering Research. Oct. 2012. Vol. 2, Is. 6. P. 238–252.

14. Node.js® is an open-source, cross-platform JavaScript runtime environment. URL: https://nodejs.org/en.

15. NPM: Public collection of packages of open-source code for Node.js. URL: https://www.npmjs.com/.

16. NPM Docs: Downloading and installing Node.js and npm. URL: https://docs.npmjs.com/downloading-and-installing-node-js-and-npm#using-a-node-version-manager-to-install-nodejs-and-npm.

References

1. Chernov S., Savina O. A method of formation of value-oriented project portfolio for a science-based enterprise. Management of the development of complex systems. 2018. Issue 34. P. 78–84. URL: https://repositary.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/6a9b1321-4dcf-4f00-975c-95167bc0bfad/content.

2. Doliia O., Doliia K. Methods of solving problems related to the organization of passenger transportation by road transport. International Science Journal of Engineering & Agriculture. 2023. Vol. 2, no. 3. P. 101–119. DOI: 10.46299/j.isjea.20230203.10.

3. Chernov S., Titov S., Chernova L., Kunanets N., Chernova L. Determination of approaches for project costs minimization with use of dual problems. Econtechmod : an international quarterly journal. Polish Academy of Sciences. 2019. Vol. 08, No. 2. P. 61–68.

4. Duda O., Stanko A. The network platform architecture for monitoring objects in cyberphysical systems of smart cities. Herald of Khmelnytskyi national university. Technical sciences. 2023. Vol. 323, Is. 4. P. 123–130. DOI: 10.31891/2307-5732-2023-323-4-123-130.

5. Voytovich O. A., Tkach V. O., Lubyany P. V. Model of implementation of additional stoppings city passenger transport. Herald of Khersonskyi national technical university. Engineering sciences. 2020. Vol. 4, Is. 75. P. 20–27. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2020.4.2.

6. Bieletska O., Liubyi Y., Ocheretenko S., Muzylyov D., Ivanov V., Pavlenko I. Approach to determine transport delays at unsignalized intersections. Communications – Scientific Letters of the University of Zilina. 2023. Vol. 25, no. 3. P. A124–A136. DOI: 10.26552/com.C.2023.052.

7. Royko Yu., Yevchuk Yu., Bura R., Velhan A. Minimization of public transport delays at arterial streets with coordinated motion. Transport Technologies. 2022. Vol. 3, no. 1. P. 14–29. DOI: 10.23939/tt2022.01.014.

8. Yang C., Guo H. A Lightweight semantic segmentation algorithm based on deep convolutional neural networks. Computational Intelligence and Neuroscience. 2022. Vol. 2022. Article ID 5339664. 9 pages. DOI: 10.1155/2022/5339664.

9. Eyupoglu C. Implementation of Bernsen's locally adaptive binarization method for gray scale images. The Online Journal of Science and Technology. April 2017. Vol. 7, Is. 2. P. 68–72.

10. Patent № US8,351,699 B2 USA. Int. CI (2006.01) G06K 9/00. Methods and apparatus for adaptive auto image binarization. D. Li, J. Elton, S. Steger; Assignee: Accusoft Co., Tampa, FL (US). Appl. No. 12/642,643; Filed: Dec. 18, 2009; Date of Pat.: Jan. 8, 2013. 17 p.

11. Shaikh A., Botcha S., Krishna M., Kumar S. Otsu based differential evolution method for image segmentation : preprint, 19 pages, October 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/364422460_Otsu_based_Differential_Evolution_Method_for_Image_Segmentation

12. Patent № US9,025,897 B1 USA. Int. CI (2006.01) G06K 9/00. Methods and apparatus for adaptive auto image binarization. J. H. Elton, S. A. Martucci; Assignee: Accusoft Co., Tampa, FL (US). Appl. No. 13/867,605; Filed: Apr. 5, 2013; Date of Pat.: May. 5, 2015. 16 p.

13. Pradeep, Namratha M., Manu G. V. Global and localized histogram equalization of an image. International Journal of Computational Engineering Research. Oct. 2012. Vol. 2, Is. 6. P. 238–252.

14. Node.js® is an open-source, cross-platform JavaScript runtime environment. URL: https://nodejs.org/en.

15. NPM: Public collection of packages of open-source code for Node.js. URL: https://www.npmjs.com/.

16. NPM Docs: Downloading and installing Node.js and npm. URL: https://docs.npmjs.com/downloading-and-installing-node-js-and-npm#using-a-node-version-manager-to-install-nodejs-and-npm.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-53-59
УДК 612.349.8.616.379-008.64]:606:628

ГУРКОВСЬКА ОЛЕНА
Київський національний університет технологій та дизайну
e-mail: 13lena14@ukr.net
АНДРЕЄВА ОЛЬГА
Київський національний університет технологій та дизайну
https://orcid.org/0000-0001-8374-2306
e-mail: wayfarer14@ukr.net

ПОРІВНЯЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ СИСТЕМ ЕКСПРЕСІЇ У ВИРОБНИЦТВІ РЕКОМБІНАНТНОГО ІНСУЛІНУ

Після серцево-судинної та онкологічної патології одним із найбільш поширених неінфекційних захворювань людини сьогодення є цукровий діабет, який призводить до інвалідності, а іноді і до летальних наслідків. Лікування інсуліном переслідує завдання максимально можливої компенсації вуглеводного обміну, запобігання гіпо- і гіперглікемії та профілактики ускладнень цього захворювання. Ефективність дії інсуліну значною мірою залежить від того, у який спосіб його виготовили. На підставі аналізу літератури встановлено, що одним із основних напрямів удосконалення технології виробництва інсуліну є використання високопродуктивних штамів рекомбінантних мікроорганізмів. В результаті порівняльного оцінювання різних продуцентів препарату рекомбінатного інсуліну людини встановлено, що найбільш перспективним з них є штам бактеріальної культури E. coli JM109.

Ключові слова: цукровий діабет, біотехнологія, рекомбінантний інсулін, системи експресії, продуцент.

HURKOVSKA OLENA, ANDREYEVA OLGA
Kyiv National University of Technologies and Design

COMPARATIVE ASSESSMENT OF EXPRESSION SYSTEMS IN THE PRODUCTION OF RECOMBINANT INSULIN

Lack of insulin in the body due to acquired or inherited factors leads to diabetes. The main objectives in the treatment of this pathology are maintaining a normal level of glycemia, preventing the occurrence and development of late complications, as well as preventing hypoglycemia. For many years, the lives of millions of people with diabetes have been saved by insulin, a vital medicine that the World Health Organization recommends that countries with a population exceeding 50 million people produce independently. From 1923 to the 80s of the last century, insulin was produced exclusively from animal raw materials - the pancreas of pigs and cattle, and only in 1982 was it possible for the first time to produce human insulin using the method of genetic modification of microorganisms. Currently, the share of genetically engineered human insulin throughout the world is steadily growing and in 2004 it accounted for more than 70% of the total production of the hormone. The features of the biotechnological method, which uses genetic engineering technology, are that the gene responsible for the synthesis of insulin is inserted into the DNA of the producer and the resulting genetically modified microorganisms synthesize proinsulin (inactive form), which, after enzymatic cleavage of the C-peptide, is converted into active (recombinant) insulin. The advantage of the method is the ease of scaling the process. Taking into account the importance of choosing an expression system already at the beginning of obtaining a recombinant protein, a comparative assessment of possible producers of a human recombinant insulin preparation was carried out, providing characteristics of the most promising of them as a biological agent. The selection of the expression medium was made based on an assessment of the efficiency, productivity and acceptability of the system for the synthesis of the target protein. The advantages of Escherichia coli (E. coli) as a producer have been established: high productivity and high level of expression, low cost, simplicity of cultivation conditions, rapid growth, the ability to change many parameters to optimize expression, absence of endotoxins. The research of the genetic apparatus and the high productivity of the E. coli bacterium make it economically feasible and realistically possible to genetically engineer strains that would engage in insulin biosynthesis. This will help improve yield and purity of the final product, reduce cycle times and enable scalable solutions based on existing equipment. Consequently, it will have a positive impact on improving the production technology of this drug and more fully providing it to diabetic patients.

Keywords: diabetes, biotechnology, recombinant insulin, expression systems, producer.

Постановка проблеми

У наш час цукровий діабет розглядають як протеїн-залежне захворювання людини, яке пов’язане з порушенням синтезу білка. Протягом багатьох років життя мільйонам людей із цукровим діабетом рятує інсулін.

Інсулін – біологічно активна сполука, поліпептидний гормон, що виробляється β-клітинами острівців Лангерганса підшлункової залози і виконує в організмі важливі функції контролю метаболізму та гомеостазу глюкози. Молекула інсуліну побудована з двох поліпептидних ланцюгів: ланцюг А містить 21 амінокислотний залишок, ланцюг В – 30 залишків, які з’єднані між собою двома дисульфідними містками. В амінокислотному складі ланцюга А виявляється видова специфічність будови інсуліну [1].

Нестача інсуліну в організмі внаслідок придбаних або успадкованих факторів призводить до захворювання на цукровий діабет. Основні завдання в лікуванні даної патології – підтримання нормального рівня глікемії, запобігання виникненню та розвитку пізніх ускладнень, а також попередження гіпоглікемії. Створення та впровадження нових форм інсуліну, що володіють поліпшеними фармакокінетичними і фармакодинамічними властивостями, являє собою один із шляхів досягнення кращого контролю глікемії та попередження розвитку гіпоглікемічних станів [2].

Аналіз останніх джерел

Сучасне лікування цукрового діабету спрямовано на усунення симптомів захворювання і залежить

від його тяжкості. Легка форма хвороби (перший ступінь) нерідко вимагає лише чіткого дотримання дієти без прийому будь-яких медикаментів. Середня тяжкість (другий ступінь) зумовлює, крім дієти, введення інсуліну або ж прийом інших препаратів, які знижують рівень цукру [3, 4].

Інсулін відноситься до життєво важливих лікарських засобів, які Всесвітня організація охорони здоров'я рекомендує самостійно виробляти тим країнам, чиє населення перевищує 50 млн чоловік. З 1923 р. до 80-х років минулого століття інсулін вироблявся винятково із тваринної сировини, а саме із підшлункової залози свиней і великої рогатої худоби, і лише у 1982 р. вперше була створена можливість виробництва інсуліну людини методом генетичної зміни мікроорганізмів. У наш час частка генно-інженерного інсуліну людини в усьому світі неухильно зростає і у 2004 р. склала понад 70 % від загального обсягу виробництва гормону [1].

Інсулін людини (Insulin Human) являє собою дрібнокристалічний порошок білого або майже білого кольору, з формулою $C_{257}H_{383}N_{65}O_{77}S_6$. Під час його виробництва розрізняють стадії виробничого біосинтезу, дезінтеграції біомаси, відмивання тілець включення, рефолдингу (відновлення нативної структури білка), катіоно- та аніонообмінного хроматографічного очищення, гідролізу, іонообмінного хроматографічного очищення «сирого» інсуліну з наступною кристалізацією, фільтрацією та висушуванням одержаних кристалів, в результаті чого і отримують інсулін людини у вигляді нестерильної порошкоподібної субстанції [5].

У роботі [6] проаналізовано особливості біотехнологічного методу, у якому використовується генно-інженерна технологія: ген, відповідальний за синтез інсуліну, вбудовується в ДНК продуцента, отримані генно-модифіковані мікроорганізми синтезують проінсулін (неактивна форма), який після ферментативного відщеплення С-пептиду перетворюється на активний (рекомбінантний) інсулін. Перевага методу полягає у простоті масштабування процесу.

Використання рекомбінантних білків дає змогу ліквідувати дефіцит протеїнів і досягти рівня звичайних функціональних концентрацій за відсутності відповідних процедур генної терапії [7, 8]. Їх застосовують з метою заміни або поповнення природного пулу білків в організмі людини за умови, що рівень певного білка знижений або наявне захворювання, яке характеризується відсутністю продукції білка. Рекомбінантні білки, які є різновидами власних білків організму людини або мають аналогічний вплив на організм, представляють особливий інтерес для проведення наукових досліджень та практичних розробок.

На основі рекомбінантних білків виготовлено та затверджено в якості біофармацевтичних препаратів понад 400 продуктів. На фармацевтичному ринку представлені лікарські засоби на основі рекомбінантних білків, які призначені для лікування порушень обміну речовин (діабет типу 1 і типу 2, ожиріння або гіпоглікемія), гематологічних розладів (ниркові анемії, гемофілія А), онкологічних захворювань (меланома, рак молочної залози, рак товстої кишки) [8].

В процесі одержання рекомбінантного білка умовно виділяють наступні три стадії [7]:

− вибір системи експресії та введення чужорідного гену до носія за допомогою вектора експресії;

− апстрім процеси – вирощування культури клітин, накопичення цільового білка;

− даунстрім процеси − виділення та очищення цільового білка.

З урахуванням непересічної ролі вибору системи експресії вже на початку одержання рекомбінантного білка сформульовано *мету роботи* − порівняльне оцінювання можливих продуцентів препарату рекомбінатного інсуліну людини з наданням характеристики найбільш перспективного з них як біологічного агента. За *об'єкт дослідження* обрано системи експресії рекомбінантних білків у виробництві інсуліну. Під час проведення дослідження застосовано загальнонаукові *методи* пізнання у вигляді аналізу, синтезу, порівняння, збору та оброблення інформації.

Виклад основного матеріалу

Замісна інсулінотерапія є стандартом лікування хворих на цукровий діабет першого та другого типу. За тривалістю ефекту і часом його настання препарати інсуліну ділять на три основні групи: швидкодіючі (короткої дії), середньої тривалості дії і довготривалої дії. З розвитком технології рекомбінантної ДНК став доступним рекомбінантний (біосинтетичний) людський інсулін [9], чистота та фармацевтична якість якого перевершують тваринний і напівсинтетичний інсулін [10].

Рекомбінантними називаються білки, одержані за допомогою генної інженерії: в результаті впровадження гену (фрагменту ДНК, що несе інформацію про будову одного білка) людини, тварини або рослини в генетичний матеріал бактерій, ссавців чи дріжджових клітин; ці мікроорганізми можуть бути використані у якості продуцентів протеїнів у промислових масштабах для терапевтичних, наукових та дослідницьких цілей [7].

Виробництво рекомбінантних білків вимагає оптимального вибору відповідного «господаря» з ефективним механізмом біосинтезу, здійснення посттрансляційних модифікацій та рефолдингу цільового білка. Відповідно до традиційної стратегії в експресії рекомбінантного білка ген, що кодує білок, вводять в ДНК-вектор, який вноситься до клітини обраного продуценту, з подальшим культивуванням в умовах, прийнятних для трансляції протеїну [11]. При внутрішньоклітинній експресії клітини піддаються лізису, після чого цільовий білок екстрагують і піддають подальшому очищенню.

У промислових умовах рекомбінантний інсулін людини отримують за допомогою транспептидації. У якості систем експресії широко застосовують прокаріотичні (рекомбінантний штам *Escherichia coli, Bacillus subtilis*) та еукаріотичні клітини (дріжджі *Pichia pastoris, Saccharomyces cerevisiae*) [8, 12, 13]; продуцентами можуть також виступати трансгенні клітини тварин і рослин, клітини комах [13, 14]. Вибір системи експресії

залежить від типу та структури білка. Необхідно також врахувати вимоги до функціональної активності і бажаного виходу цільового продукту [7].

Значне поширення на практиці одержали бактеріальні системи експресії рекомбінантних білків на основі грам-негативної **бактерії *Escherichia coli*** (*E. Coli*, кишкова паличка), в геном яких включена послідовність ДНК інсуліну людини [15, 16]. Це пов'язано з детальним вивченням даного мікроорганізму на молекулярному рівні, повним розшифруванням його генетичного коду, дешевизною культивування у промислових масштабах, швидким ростом культури та відносно легкою можливістю зміни параметрів культивування для оптимізації експресії білка [12, 14]. Даний продуцент має ряд переваг: високий вихід цільового продукту, потенційно високий рівень експресії, низьку вартість ростового середовища ферментації, простоту умов культивування, швидкий ріст, простоту маніпуляцій з геномом порівняно з іншими мікроорганізмами, відсутність ендотоксинів [16].

Необхідно зауважити, що кишкова паличка є прокаріотичним мікроорганізмом, тому складні еукаріотичні білки не завжди синтезуються функціонально придатними через відсутність посттрансляційних модифікацій або молекулярний фолдинг у клітині *E. coli*. Внаслідок надекспресії білки агрегуються в тільця включення, які у подальшому підлягають відновленню багатоетапними процесами денатурації, рефолдингу та очищення з метою отримання високоефективного чистого білка. Завдяки дослідженням з оптимізації ДНК-вектору штамів *E. coli*, покращенню умов культивування за рахунок зміни фізичних параметрів і додавання певних речовин до поживного середовища досягнуто значне підвищення рівня експресії протеїнів у розчиненому вигляді у необхідній конформації [14].

E. coli стала улюбленим об'єктом біотехнологічних досліджень завдяки своїй здатності розмножуватися простим поділом на середовищах, що містять лише іони, мікроелементи та джерело вуглецю, наприклад, глюкозу. При культивуванні на збагачених рідких середовищах тривалість генерації (час між утворенням та поділом бактерії) у логарифмічній фазі росту за стандартних умов становить 22 хв. На даний час *E.coli* є економічно ефективною і найбільш поширеною серед бактеріальних систем експресії при виробництві препаратів рекомбінантних інсулінів [14, 17]. Недоліком даного продуценту є те, що у більшості випадків цільовий білок напрацьовується у вигляді тілець включень у хаотично розгорнутій формі, що потребує додаткових технологічних етапів.

Синтезований бактеріальною клітиною еукаріотичний білок часто доводиться піддавати ферментативній модифікації, приєднуючи до білкової молекули низькомолекулярні сполуки, що у багатьох випадках є обов'язковим для правильного функціонування білка. *E. coli* та інші прокаріоти не здатні здійснювати ці модифікації, тому для отримання повноцінних еукаріотичних білків використовують **дріжджові культури**. Для них характерна простота вирощування та здатність виконувати багато посттрансляційних модифікацій (протеолітичний процесінг, фолдинг, утворення дисульфідних містків та глікозилювання) [13]. У якості систем експресії застосовують культури *S. cerevisiae* та *P. pastoris*. Рекомбінантні білки в дріжджах синтезуються у розчинній функціонально активній формі. Виробництво з використанням даної системи експресії економічно ефективне, піддається масштабуванню з використанням великих біореакторів.

Дріжджі *S. cerevisiae* характеризуються відносно швидким темпом росту культури (3-5 діб від початку засіву до закінчення індукції), високим виходом цільового продукту (до 40 г/л), надзвичайно низькою ціною ростового середовища та ферментації, можливістю експресії великих поліпептидів та глікозилювання. Добра вивченість та продуктивність цього біологічного агенту роблять можливим його використання у якості продуцента інсуліну [6,18]. До недоліків культури *S. cerevisiae* належать схильність до гіперглікозилювання білка, підвищення імуногенності внаслідок глікозилювання високоманнозного типу та неможливість високощільного культивування. При застосуванні метилотрофних **дріжджів *P. pastoris*** вказані недоліки долаються, культура досягає високої щільності клітин за допомогою індукції метанолом. Основна перевага *P. pastoris* порівняно із *S. cerevisiae* полягає у відсутності гіперглікозилювання білків та більшій адаптованості секретованих глікопротеїнів до застосування людиною [6].

При застосуванні систем експресії на основі **клітин ссавців** одержують білок у нативній конформації за рахунок правильного фолдингу та посттрансляційних модифікацій. Недоліком є висока вартість клітин ссавців і довготривале культивування. В якості основних продуцентів біофармацевтичних білкових продуктів використовують різні культури клітин ссавців: **лінії клітин NSO** (клітини мієломи миші), **BNK** (клітини нирок дитинчат хом'яка), **CHO** (клітини яєчників китайського хом'яка), **HEK-293** (ембріональні клітини нирок людини). Такі системи експресії забезпечують високий рівень продукції функціональних рекомбінантних білків з коректним N-глікозилюванням та іншими посттрансляційними модифікаціями [19, 20, 21].

Ще одними відомими системами експресії є **клітини комах, інфіковані бакуловірусами**. Бакуловіруси – група вірусів, що вражають лише членистоногих та перебудовують експресію генів клітини-господаря таким чином, що вона починає синтезувати білок вірусної оболонки – поліедрін. Промотор гена поліедріну дуже сильний, заміна цього гена на ген чужорідного білка з наступною інокуляцією отриманого рекомбінантного бакуловірусу культури клітин комах приводить до біосинтезу великої кількості гетерологічного білка, який завдяки подібності систем внесення посттрансляційних модифікацій у комах і ссавців буде близький до нативної форми цільового рекомбінантного білка. На основі бакуловірусів сконструйовані вектори для експресії генів, які кодують білки ссавців і вірусів тварин [11]. Зазначеним системам притаманні високі рівні експресії білка з посттрансляційними модифікаціями, наближеними до

клітин ссавців, легкість масштабування і спрощене зростання клітин, які адаптовані до високої щільності суспензії культури для великомасштабного вираження.

Використання **клітин рослин** у якості систем експресії для отримання рекомбінантних фармацевтичних білків обумовлено тим, що у рослинних тканин відсутній ризик забруднення рекомбінантного білка патогенами тваринного походження (вірусами та пріонами). Трансгенні клітини рослин використовуються для отримання рекомбінантних білків у зв'язку з такими їх перевагами, як економічна ефективність, висока якість процесингу білків, простота виробництва, наявність еукаріотичного механізму посттрансляційних модифікацій [18]. Рекомбінантний людський попередник інсуліну продукується та накопичується у насінні трансгенних рослин і потім ферментативно обробляється *in vitro*. З трансгенної рослини тютюну вперше був екстрагований гормон росту людини як рекомбінантний білковий продукт. Але трансгенні клітини рослин є небезпечним контамінантом навколишнього середовища.

Вибір експресивного середовища у промислових масштабах здійснювали на основі оцінювання показників економічності, продуктивності та прийнятності системи для синтезу цільового білка. Для кожного конкретного протеїну параметри культивування та індукції експресії є індивідуальними і вимагають детального розроблення процесу у лабораторних умовах з його подальшим масштабуванням у біореакторах. На підставі порівняльного аналізу систем експресії (Табл. 1) можна зробити висновок про те, що, незважаючи на всі свої недоліки, *E. Coli* в цілому є одним з найкращих продуцентів для виробництва рекомбінантного інсуліну.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз основних систем експресії рекомбінантних білків

Системи експресії	Переваги	Недоліки
1	*2*	*3*
Бактеріальна культура *E. coli*	✓ Високий вихід цільового продукту; ✓ висока продуктивність; ✓ низька вартість ростового середовища ферментації; ✓ швидкий ріст культури; ✓ простота умов культивування; ✓ відсутність ендотоксинів; ✓ можливість зміни параметрів з метою оптимізації експресії	✓ Складність біосинтезу поліпептидів великого розміру (понад 50 кДа); ✓ відсутність системи глікозилювання; ✓ неефективне формування дисульфідних зв'язків; ✓ можливість порушення формування білків у цитоплазмі, включаючи порушення конформації; ✓ мінімальні посттрансляційні модифікації; ✓ неефективність рефолдингу *in vitro;* ✓ надекспресія, утворення нерозчинних тілець включення
Культура дріжджів *S. cerevisiae*	✓ Швидкий темп росту культури; ✓ високий рівень експресії; ✓ високий вихід цільового продукту; ✓ низька ціна ростового середовища та ферментації, економічна доступність; ✓ простота умов культивування; ✓ здійснення багатьох посттрансляційних модифікацій; ✓ ефективний фолдинг білка; ✓ відсутність ендотоксинів; ✓ можливість експресії великих ✓ поліпептидів та глікозилювання	✓ Схильність до гіперглікозилювання білка; ✓ підвищення імуногенності внаслідок глікозилювання високоманнозного типу; ✓ неможливість високощільного культивування
Культура дріжджів *P. pastoris*	✓ Відсутність гіперглікозилювання білків; ✓ більша адаптованість секретованих глікопротеїнів до застосування людиною; ✓ високий рівень експресії; ✓ економічна доступність; ✓ простота умов культивування; ✓ швидкий ріст, висока щільність ✓ культивування; ✓ ефективна секреція білка; ✓ ефективний фолдинг білка; ✓ здійснення багатьох посттрансляційних модифікацій; ✓ відсутність ендотоксинів	✓ Використання метанолу для індукції експресії; ✓ потреба у чіткому контролі параметрів культивування; ✓ термолабільність
Клітини ссавців *CHO, NSO, BNK, HEK-293*	✓ Високий рівень експресії; ✓ ефективний фолдинг білка; ✓ посттрансляційні модифікації з одержанням нативного білка; ✓ відсутність ендотоксинів	✓ Складні вимоги вирощування культури; ✓ висока вартість культурального середовища; ✓ ризик вірусної та онкогенної контамінації; ✓ висока вартість цільового продукту; ✓ довготривалість культивування

Продовження Таблиці 1

1	*2*	*3*
	✓	✓
Клітини комах, інфіковані бакуловірусом	✓ Високий рівень експресії; ✓ швидкий ріст; ✓ здійснення багатьох посттрансляційних модифікацій; ✓ відсутність ендотоксинів	✓ Висока вартість культурального середовища та кінцевого продукту; ✓ лізис клітин внаслідок вірусної інфекції, ✓ можливе погіршення властивостей експресивних білків
Рослинні культури	✓ Великомасштабне культивування; ✓ відносна дешевизна; ✓ низький рівень контамінації патогенами тваринного походження; ✓ ефективний фолдинг білка	✓ Можливість контамінації мікотоксинами, пестицидами та ендотоксинами; ✓ алергічні реакції на рослинний протеїн глікан; ✓ можливість контамінації навколишнього середовища трансгенними клітинами рослин

Нижче наведено більш докладну характеристику мікроорганізму-продуценту *E. Coli.*

Систематичне положення: царство: *Bacteria;* тип: *Proteobacteria;* клас: *Gammaproteobacteria;* порядок: *Enterobacteriales;* родина: *Enterobacteriaceae;* рід: *Escherichia;* вид: *Escherichia coli.* За визначником Берджі *E. coli* відноситься до п'ятої групи (факультативно анаеробні грамнегативні палички), підгрупа 1 (родина: *Enterobactericeae*); рід: *Escherichia*; вид *Escherichia coli* [22, 23, 24].

Морфолого-цитологічні ознаки. E. coli JM109 – це грамнегативні прямі короткі палички із заокругленими кінцями, розміром 1×3,50 мкм. Одиночні або розташовуються в парах. Рухливі (перитрихи), не утворюють капсул, спор та цист. Мають чітко помітні тільця включення після індукції синтезу гібридного білка [22, 25, 26]. При висиханні бактерій на твердій основі помітно сплощення. Піднесення бактерій над пласкою поверхнею підкладки становить 0,2-0,4 мкм. Результати атомно-силової мікроскопії вказують на однотипну морфологію поверхні бактеріальних клітин, які мають характерні відростки (пілі) довжиною 1-2 мкм.

Культуральні ознаки. E. coli є факультативним анаеробом. На агаризованих середовищах вона утворює непрозорі опуклі тонкі S-колонії з дещо хвилястими, а іноді рівними краями, довжиною приблизно 3-5 мм. У рідких середовищах викликає утворення осаду та помутніння середовища, зрідка формуючи поверхневу плівку, що свідчить про дифузний характер росту [23]. На диференційно-діагностичних середовищах (Ендо, ЕМС) ці бактерії накопичують молочну кислоту, розщеплюючи лактозу, що призводить до зниження показника pH, тому при додаванні індикаторів колонії мають яскраве забарвлення: на середовищі Ендо – малинове з металевим блиском або без нього; на середовищі ЕМС – темно-фіолетове. Колонії *E. coli JM109* при рості на агаризованому середовищі LB мають круглу форму, гладкі, напівпрозорі, блискуче-сірі. Діаметр колоній 1-3 мм, краї росту рівні, консистенція м'яка. Ріст у рідких середовищах характеризується рівним помутнінням.

Фізіолого-біохімічні ознаки. Клітини *E. coli JM109* ростуть при температурі 4-42 °С, оптимум температури 37 °С, оптимум pH 6,8-7,6. У якості джерела азоту використовують мінеральні солі амонію та органічні сполуки: амінокислоти, пептон, триптон, дріжджовий екстракт. У якості джерела вуглецю у бідних середовищах використовують за наявності амінокислоти, вуглеводи, інколи навіть гліцерин. Проводять розщеплення глюкози та інших моноцукрів з утворенням відповідної кислоти. Реакції на оксидазу та ліпазу не дають, але є каталазопозитивними та цитратнегативними. Фарбуються метиленовим червоним, реакція Фогеса-Проскауера негативна. Не гідролізують сечовину, відновлюють нітрати до нітритів. Зброджують L-арабінозу, D-ксилолу, мальтозу, D-манітол, D-маннозу, L-рамнозу і трегалозу. Утворюють індол, не утворюють сірководень, не розріджують желатин [27]. Клітини штаму продуцента виявляють стійкість до ампіциліну (до 500 мкг/мл), обумовлену наявністю у плазміді гена β-лактамази (bla) [23, 27]. При витримуванні клітин протягом декількох місяців на агаризованому середовищі LB, що містить ампіцилін, не спостерігається втрати чи перебудови плазміди *pHINS11*, що відповідає за експресію гібридного білка.

Біосинтез цільового білка в *E. coli* відбувається за стандартним механізмом синтезу білка у клітинах бактерій. Культивування проводять у дві фази у ферментері при оптимальній температурі росту продуцента цільового білка, інтенсивному перемішуванні та аерації. У першій фазі відбувається накопичення біомаси, у другій – індукція та синтез рекомбінантного білка. Для запуску механізму біосинтезу цільового рекомбінантного білка у середовище додають індуктор.

Висновки. У наш час одним із поширених неінфекційних захворювань людини є цукровий діабет, який призводить до інвалідності, а іноді і до летальних наслідків. Лікування інсуліном переслідує завдання максимально можливої компенсації вуглеводного обміну, запобігання гіпо- і гіперглікемії та профілактики ускладнень цього захворювання. Ефективність дії інсуліну значною мірою залежить, від того, у який спосіб його виготовили. Першим лікарським засобом був інсулін тваринного походження, який і досі іноді використовується для лікування діабету. Наступним кроком був синтез людського інсуліну, який став справжнім рятівником багатьох людей з діабетом. Нині потужними супротивниками діабету все частіше

стають аналогові препарати – ліки на базі генетично модифікованого людського інсуліну, які діють більш швидко та природно порівняно зі своїми попередниками.

Виробництво рекомбінантного інсуліну людини вимагає оптимального вибору відповідного «господаря» з ефективним механізмом біосинтезу, здійснення посттрансляційних модифікацій та рефолдингу цільового білка. З урахуванням цього проаналізовано низку основних систем експресії рекомбінантних білків у виробництві інсуліну. Вибір експресивного середовища здійснено шляхом оцінювання показників економічності, продуктивності та прийнятності системи для синтезу цільового білка. Встановлено переваги *E. coli* як продуценту: висока продуктивність і високий рівень експресії, низька вартість, простота умов культивування, швидкий ріст, можливість зміни багатьох параметрів з метою оптимізації експресії, відсутність ендотоксинів. Дослідженість генетичного апарату і висока продуктивність бактерії *E. Coli* роблять економічно обґрунтованим та реально можливим генно-інженерне конструювання штамів, які б займались біосинтезом інсуліну. Це сприятиме підвищенню виходу і чистоти кінцевого продукту, скороченню тривалості технологічного циклу і прийняттю масштабованих рішень на основі існуючого обладнання. Отже, позитивно позначиться на удосконаленні технології виробництва цього лікарського засобу та більш повному забезпеченні ним хворих на діабет.

Література

1. Інсулін людини: структура, одержання та сучасне виробництво [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://osvita.ua/vnz/reports/biolog/23236/.

2. Welsh M., Scherberg N., Gilmore R., Steiner D. Translational control of insulin biosynthesis. Evidence for regulation of elongation, initiation and signal-recognition-particle-mediated translational arrest by glucose. Biochem J. 1986. Vol. 235 (2). P. 459–467.

3. Каджарян В. Г. Внутрішня медицина. Ендокринологія. Хвороби ендокринної системи: визначення, класифікації, діагностичні критерії : навч. посіб. / В. Г. Каджарян, О. О. Солов'юк, Н. І. Капшитар. – Запоріжжя : ЗДМУ, 2020. – С. 13–27.

4. Ендокринологія : [підручник / Боднар П. М., Михальчишин Ю. І., Комісаренко Ю. І. та ін.]. – Вид. 3, переробл. та допов. – Вінниця : Нова книга, 2013. – С. 205–232.

5. Еквівалентні препарати рекомбінантного людського інсуліну та їх місце в терапії [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5819055/

6. Коровка К. Аналіз технологій виробництва інсуліну людини / К. Коровка // Матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Тенденції та перспективи розвитку науки і освіти в умовах глобалізації» : зб. наук. праць. – Переяслав, 2021. – № 76. – С. 322–325.

7. Нєчаєва Я. О. Рекомбінантні білки терапевтичного призначення: особливості отримання, вивчення безпечності та ефективності / Я. О. Нєчаєва, С. М. Грабчук, Ю. В. Горшунов // Вісник Запорізького національного університету. – 2017. – № 2. – С. 85–93.

8. Akash M. S., Rehman K., Tariq M., Chen S. Development of therapeutic proteins: advances and challenges. Turkish J. Biol. 2015. № 39. P. 1–16.

9. Andersen D., Krummen L. Recombinant protein expression for therapeutic applications. Cur. Op. Biotechnol. 2002. Vol. 13. P. 117–123.

10. Посилкіна О. В. Перспективи розробки і клінічного використання біосимілярів в Україні / О. В. Посилкіна, О. В. Літвінова // Клінічна фармація. – 2014. – Т. 18, № 1. – С. 11–14.

11. Компанець Т. А. Віруси як векторні системи : курс лекцій / Т. А. Компанець. – Київ : Київський національний університет ім. Т. Шевченка. Видавництво Українського фітосоціологічного центру, 2007. – С. 56–62.

12. Chen J. Q., Zhang H. T., Hu M. H., Tang J. G. Production of human insulin in an E. Coli system with met-lys-human proinsulin as the expressed precursor. Applied Biochemistry and Biotechnology. 2015. № 55. P. 5–15.

13. Cousens L. S., Shuster J. R., Gallegos C. High level expression of proinsulin in the yeast, Saccharomyces cerevisiae. Gene. 1987. Vol. 61, Issue 3. P. 265–275.

14. Коровка К. Характеристика рекомбінантного штаму Escherichia coli як продуцента інсуліну людини / К. Коровка // Матеріали XLI Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки в країнах Європи та Азії» : зб. наук. праць. – Переяслав, 2021. – С. 6–8.

15. Rosano G. L. Експресія рекомбінантного білка в Escherichia coli: досягнення та проблеми / G. L. Rosano, E. A. Ceccarelli // Front Microbiol. – 2014. – Vol. 5. – С. 172.

16. Vincentelli R., Romier C. Expression in Escherichia coli: becoming faster and more complex. Current Opinion in Structural Biology. 2013. Vol. 23, Issue 3. P. 326–334.

17. Protein fusion tags for efficient expression and purification of recombinant proteins in the periplasmic space of E. Coli. Review. Article Open Access Published: 04 February 2016. № 6. Article number: 44.

18. Клітинні фабрики для виробництва інсуліну [Електронний ресурс] / [Набіх А. Бешен, Мохаммед Н. Байшен, Абдулла Шейх та ін.]. – Режим доступу : https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4203937/.

19. Chu L., Robinson D. Industrial choices for protein production by large-scale cell culture. Current Opinion in Structural Biology. 2001. № 12. P. 180–187.

20. Makrides S. C. Components of Vectors for Gene Transfer and Expression in Mammalian Cells. Protein

Express Purif. 1999. № 17. Vol. 17, Issue 2. P. 183–202.

21. Colosimo A., Goncz K. K., Holmes A. R. Transfer and expression of foreign genes in mammalian cells. Bio Techniques. 2000. Vol. 20. P. 314–331.

22. Родина кишкових бактерій : метод. вказівки з дисципліни «Мікробіологія, вірусологія та імунологія з мікробіологічною діагностикою» до практичних занять / упор. В. В. Мінухін, Н. І. Коваленко, Т. М. Замазій. – Харків : ХНМУ, 2014. – С. 4–5.

23. Кишкова паличка (Escherichia coli). Огляд [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://microbenotes.com/escherichia-coli-e-coli/.

24. Bergey's Manual of Systematic Bacteriology / Brenner D. J., Krieg N. R., Staley, J. T., Garrity G. M. New-York: Springer-Verlag, 2005. Vol. 20.

25. Thomas M. Schmidt. Encyclopedia of Microbiology. Oxford: Academic Press, 2019. 3199 p.

26. Краснопольський Ю. М. Фармацевтична біотехнологія / Ю. М. Краснопольський, А. С. Дудніченко, В. І. Швець. – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – 228 с.

27. Мікробіологія : підручник / [Л. І. Дикий, І. Ю. Холупяк, Н. Ю. Шевельова та ін.]. – Харків : Професіонал, 2006. – 433 с.

References

1. Insulin liudyny: struktura, oderzhannia ta suchasne vyrobnytstvo [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : https://osvita.ua/vnz/reports/biolog/23236/.

2. Welsh M., Scherberg N., Gilmore R., Steiner D. Translational control of insulin biosynthesis. Evidence for regulation of elongation, initiation and signal-recognition-particle-mediated translational arrest by glucose. Biochem J. 1986. Vol. 235 (2). R. 459–467.

3. Kadzharian V. H. Vnutrishnia medytsyna. Endokrynolohiia. Khvoroby endokrynnoi systemy: vyznachennia, klasyfikatsii, diahnostychni kryterii : navch. posib. / V. H. Kadzharian, O. O. Soloviuk, N. I. Kapshytar. – Zaporizhzhia : ZDMU, 2020. – S. 13–27.

4. Endokrynolohiia : [pidruchnyk / Bodnar P. M., Mykhalchyshyn Yu. I., Komisarenko Yu. I. ta in.]. – Vyd. 3, pererobl. ta dopov. – Vinnytsia : Nova knyha, 2013. – S. 205–232.

5. Ekvivalentni preparaty rekombinantnoho liudskoho insulinu ta yikh mistse v terapii [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5819055/

6. Korovka K. Analiz tekhnolohii vyrobnytstva insulinu liudyny / K. Korovka // Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii «Tendentsii ta perspektyvy rozvytku nauky i osvity v umovakh hlobalizatsii» : z6. nauk. prats. – Pereiaslav, 2021. – № 76. – S. 322–325.

7. Niechaieva Ya. O. Rekombinantni bilky terapevtychnoho pryznachennia: osoblyvosti otrymannia, vyvchennia bezpechnosti ta efektyvnosti / Ya. O. Niechaieva, S. M. Hrabchuk, Yu. V. Horshunov // Visnyk Zaporizkoho natsionalnoho universytetu. – 2017. – № 2. – S. 85–93.

8. Akash M. S., Rehman K., Tariq M., Chen S. Development of therapeutic proteins: advances and challenges. Turkish J. Biol. 2015. № 39. R. 1–16.

9. Andersen D., Krummen L. Recombinant protein expression for therapeutic applications. Cur. Op. Biotechnol. 2002. Vol. 13. R. 117–123.

10. Posylkina O. V. Perspektyvy rozrobky i klinichnoho vykorystannia biosymiliariv v Ukraini / O. V. Posylkina, O. V. Litvinova // Klinichna farmatsiia. – 2014. – T. 18, № 1. – S. 11–14.

11. Kompanets T. A. Virusy yak vektorni systemy : kurs lektsii / T. A. Kompanets. – Kyiv : Kyivskyi natsionalnyi universytet im. T. Shevchenka. Vydavnytstvo Ukrainskoho fitosotsiolohichnoho tsentru, 2007. – S. 56–62.

12. Chen J. Q., Zhang H. T., Hu M. H., Tang J. G. Production of human insulin in an E. Coli system with met-lys-human proinsulin as the expressed precursor. Applied Biochemistry and Biotechnology. 2015. № 55. R. 5–15.

13. Cousens L. S., Shuster J. R., Gallegos C. High level expression of proinsulin in the yeast, Saccharomyces cerevisiae. Gene. 1987. Vol. 61, Issue 3. R. 265–275.

14. Korovka K. Kharakterystyka rekombinantnoho shtamu Escherichia coli yak produtsenta insulinu liudyny / K. Korovka // Materialy XLI Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii «Problemy ta perspektyvy rozvytku suchasnoi nauky v krainakh Yevropy ta Azii» : zb. nauk. prats. – Pereiaslav, 2021. – S. 6–8.

15. Rosano G. L. Ekspresiia rekombinantnoho bilka v Escherichia coli: dosiahnennia ta problemy / G. L. Rosano, E. A. Ceccarelli // Front Microbiol. – 2014. – Vol. 5. – S. 172.

16. Vincentelli R., Romier C. Expression in Escherichia coli: becoming faster and more complex. Current Opinion in Structural Biology. 2013. Vol. 23, Issue 3. R. 326–334.

17. Protein fusion tags for efficient expression and purification of recombinant proteins in the periplasmic space of E. Coli. Review. Article Open Access Published: 04 February 2016. № 6. Article number: 44.

18. Klitynni fabryky dlia vyrobnytstva insulinu [Elektronnyi resurs] / [Nabikh A. Beshen, Mokhammed N. Baishen, Abdulla Sheikh ta in.]. – Rezhym dostupu : https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4203937/.

19. Chu L., Robinson D. Industrial choices for protein production by large-scale cell culture. Current Opinion in Structural Biology. 2001. № 12. R. 180–187.

20. Makrides S. C. Components of Vectors for Gene Transfer and Expression in Mammalian Cells. Protein Express Purif. 1999. № 17. Vol. 17, Issue 2. R. 183–202.

21. Colosimo A., Goncz K. K., Holmes A. R. Transfer and expression of foreign genes in mammalian cells. Bio Techniques. 2000. Vol. 20. P. 314–331.

22. Rodyna kyshkovykh bakterii : metod. vkazivky z dystsypliny «Mikrobiolohiia, virusolohiia ta imunolohiia z mikrobiolohichnoiu diahnostykoiu» do praktychnykh zaniat / upor. V. V. Minukhin, N. I. Kovalenko, T. M. Zamazii. – Kharkiv : KhNMU, 2014. – S. 4–5.

23. Kyshkova palychka (Escherichia coli). Ohliad [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : https://microbenotes.com/escherichia-coli-e-coli/.

24. Bergeys Manual of Systematic Bacteriology / Brenner D. J., Krieg N. R., Staley, J. T., Garrity G. M. New-York: Springer-Verlag, 2005. Vol. 20.

25. Thomas M. Schmidt. Encyclopedia of Microbiology. Oxford: Academic Press, 2019. 3199 r.

26. Krasnopolskyi Yu. M. Farmatsevtychna biotekhnolohiia / Yu. M. Krasnopolskyi, A. S. Dudnichenko, V. I. Shvets. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2011. – 228 s.

27. Mikrobiolohiia : pidruchnyk / [L. I. Dykyi, I. Yu. Kholupiak, N. Yu. Shevelova ta in.]. – Kharkiv : Profesional, 2006. – 433 s.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-60-66
УДК 004.4+004.9

ДОРОГИЙ ЯРОСЛАВ
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
https://orcid.org/0000-0003-3848-9852
e-mail: argusyk@gmail.com
КОЛІСНІЧЕНКО ВАДИМ
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
https://orcid.org/0009-0009-6472-2807
e-mail: vadym.kolisnichenko@gmail.com

ЗАСТОСУВАННЯ ЛОГУВАННЯ РІЗНИМИ УЧАСНИКАМИ БЛОКЧЕЙН-МЕРЕЖ ДЛЯ ДЕАНОНІМІЗАЦІЇ КІНЦЕВОГО КОРИСТУВАЧА

Блокчейн-технології радикально переосмислили спосіб виконання фінансових транзакцій. Замість того, щоб покладатися на традиційні централізовані інституції, такі як банки або платіжні системи, транзакції тепер обробляються в децентралізованій мережі, де незалежні рівноправні вузли діють як гаранти правильності та легітимності кожної операції. Кожен вузол не тільки перевіряє легітимність блоків та транзакцій, але й додає їх до своєї власної копії ланцюга блоків – блокчейну. Ця взаємодія і взаємозалежність вузлів сприяє створенню системи, в якій обмін даними відбувається із високим рівнем довіри до їхньої автентичності та безпеки.

Однак, поряд із численними позитивними сторонами такої системи, існують і певні виклики, особливо щодо конфіденційності кінцевого користувача. Незважаючи на поширену думку, що блокчейн-мережі надають абсолютну анонімність користувачам, на практиці є численні нюанси, які дозволяють ідентифікувати кінцевого користувача, що взаємодіє з блокчейн-мережею. Тому важливо розуміти реальний рівень конфіденційності, який забезпечує блокчейн, а також знати можливі ризики деанонімізації.

Ця стаття заглиблюється у деталі блокчейн-технологій, спрямовуючи основну увагу на те, як різноманітні учасники блокчейн-мереж можуть використовувати логування для збору та аналізу даних, а саме, систематично реєструвати активності та взаємодії користувача з мережею. На перший погляд, це може здатися невинним або технічним аспектом, проте в реальності такий підхід може стати інструментом для виявлення конфіденційної інформації користувачів, та врешті-решт його деанонімізації. Тому, у світлі зростання популярності блокчейн-технологій та криптовалют, важливо зрозуміти, які можливості і ризики існують у контексті конфіденційності та анонімності.

Ключові слова: блокчейн аналіз, конфіденційність у блокчейні, деанонімізація, логування, блокчейн-вузли.

DOROGIY YAROSLAV
National technical university of ukraine "ihor sikorsky kyiv polytechnic institute".
KOLISNICHENKO VADIM
National technical university of ukraine "ihor sikorsky kyiv polytechnic institute".

APPLICATION OF LOGGING IN VARIOUS PARTICIPANTS OF BLOCKCHAIN NETWORKS FOR DE-ANONYMIZATION OF THE END USER

Blockchain technologies have radically rethought the way financial transactions are performed. Instead of relying on traditional centralized institutions such as banks or payment systems, transactions are now processed in a decentralized network where independent peer nodes act as guarantors of the correctness and legitimacy of each transaction. Each node not only verifies the legitimacy of blocks and transactions, but also adds them to its own copy of the block chain, the blockchain. This interaction and interdependence of nodes contributes to the creation of a system in which data exchange takes place with a high level of confidence in their authenticity and security.

However, along with the many positive aspects of such a system, there are also certain challenges, especially regarding the confidentiality of the end user. Despite the popular opinion that blockchain networks provide absolute anonymity to users, in practice there are numerous nuances that allow the identification of the end user interacting with the blockchain network. Therefore, it is important to understand the real level of confidentiality that blockchain provides, as well as to know the possible risks of de-anonymization.

This article delves into the details of blockchain technology, focusing on how various participants in blockchain networks can use logging to collect and analyze data, namely, to systematically record a user's activities and interactions with the network. At first glance, this may seem like an innocent or technical aspect, but in reality, such an approach can become a tool for discovering sensitive user information, and eventually de-anonymizing the end user. Therefore, considering the growing popularity of blockchain technologies and cryptocurrencies, it is important to understand what opportunities and risks exist in the context of confidentiality and anonymity.

Keywords: blockchain analysis, blockchain confidentiality, deanonymization, logging, blockchain nodes.

Вступ

Блокчейн – це децентралізована технологія цифрового реєстру, що змінила підхід до зберігання та обміну даними. У блокчейні, транзакції групуються у блоки, які поступово додаються до ланцюга в хронологічному порядку. Кожен блок містить в собі не лише інформацію про транзакції, але й хеш попереднього блока. Це створює послідовний ланцюг, в якому кожен блок підтверджує попередній та забезпечує надійність даних. Кожна окрема транзакція верифікується всіма вузлами мережі. Цей підхід дозволяє уникнути централізованих посередників та забезпечити високий рівень довіри до даних.

Важливим аспектом блокчейн-мережі є її децентралізованість, яка досягається мережею рівноправних блокчейн-вузлів. Транзакції не підлягають централізованому контролю, а замість цього, вони верифікуються

відповідно до правил блокчейн-мережі – консенсусу [1]. Кожен вузол перевіряє легітимність блоку та транзакцій, та додає їх до персональної копії ланцюга, що дозволяє забезпечити обмін даними без посередників та з високим рівнем впевненості у їхній легітимності.

Для забезпечення конфіденційності та анонімності в блокчейн-технологіях застосовуються різноманітні криптографічні методи та протоколи [2]. Асиметрична криптографія дозволяє використовувати пару ключів, яка включає в себе приватний та публічний ключ. На основі публічного ключа формується адреса акаунту, тоді як приватний ключ використовується для підпису транзакцій. Цей підхід дозволяє створювати безліч акаунтів навіть не комунікуючи з блокчейн-мережею.

Хоча блокчейн-мережі надають певний рівень конфіденційності, їх не можна вважати повністю анонімними, і у даній роботі аналізується вплив застосування логування на конфіденційність кінцевого користувача. Спершу розглядаються теоретичні аспекти, які коротко пояснюють мережеві протоколи та їх роль у блокчейн-мережах. Далі у роботі, формулюється завдання дослідження. Після цього аналізується застосування логування у різних учасниках блокчейн-мереж, а також умови та обмеження логування для деанонімізації кінцевого користувача.

Результати таких досліджень потрібні практиці, тому що вони дають розуміння конфіденційності у блокчейн-мережах, що сприяє більшої відкритості і, як наслідок, ширшому використанні та скорішому впровадженню блокчейн-технологій. Для користувачів це корисне, адже дає зрозуміти як їх взаємодія з різними учасниками мережі впливає на їх конфіденційність. Для криміналістів, що розслідують злочини пов'язані з крипто-діяльністю, результати таких досліджень важливі, адже надають додаткові інструменти для визначення кінцевого користувача у блокчейн-мережах [3].

Теоретичні аспекти

Зазвичай, будь-яка блокчейн-мережа використовує три типи мережевих протоколів для реалізації основного функціоналу [4, 5]: Node Discovery, Wire та JSON-RPC. Ці протоколи спільно керують складною мережевою взаємодією та комунікацій всередині блокчейн-екосистемах. Перший протокол, Node Discovery, сприяє ідентифікації та встановленню з’єднань між вузлами в мережі. Протокол Wire, другий у цій трійці, керує низькорівневою комунікацією між вузлами, визначаючи формат та структуру обмінюваних пакетів даних. А також третій, JSON-RPC протокол, який надає можливість виклику віддалених процедур по HTTP протоколу, дозволяючи користувачам та стороннім застосункам отримувати інформацію з блокчейн-мережі та надсилати інформацію до неї. Ця тріада протоколів спільно лежить в основі операційного фундаменту блокчейн-систем, організовуючи мережеву взаємодію.

Node Discovery – це зазвичай UDP протокол, що використовується в peer-to-peer мережах, таких як блокчейн-мережі, для автоматичного пошуку та з'єднання з іншими учасниками мережі. Основна мета протоколу Node Discovery полягає в тому, щоб забезпечити зручний та ефективний спосіб знаходження нових учасників і збереження списку вже відомих. У блокчейн-мережах зазвичай реалізується за допомогою алгоритму Kademlia [6]. Kademlia – це таблиця, в якій ключ являє собою логічну відстань між двома вузлами, а значення – набір вузлів, які знаходяться на даній відстані. Відстань є логічною, адже формується на основі ідентифікатора (публічного ключа) вузлів, а не мережевої адреси чи фізичного місця розташування.

Wire протокол – це TCP протокол, який використовується для обміну блокчейн-інформації, а саме, для синхронізації між вузлами, ретрансляції транзакцій і блоків та обміну іншими даними [7]. В Ethereum-подібних мережах побудований на RLPx-протоколі та забезпечує наскрізне шифрування між вузлами для конфіденційної передачі повідомлень.

JSON-RPC – високорівневий протокол побудований на HTTP. Протокол орієнтований не на взаємодію між вузлами, а на взаємодію між вузлом та клієнтом (користувачем або іншими застосунками). Для користувача є вхідною точною для взаємодії з блокчейн-мережею. JSON-RPC інтерфейс передбачає низку процедур, які дозволяють отримувати інформацію з мережі про транзакції, блоки, акаунти та надають можливість відправки інформації до блокчейну – підписаних транзакцій. Також може надавати процедури для управління вузлом.

Постановка завдання

Метою даного дослідження є визначення впливу процесу логування у різних типах учасників блокчейн-екосистеми на конфіденційність кінцевого користувача, а саме, на можливість його деанонімізації. Під деанонімізацією користувача розуміється отримання IP-адреси пристрою з якого було здійснено взаємодію з блокчейном. Хоча блокчейн-мережі вважаються конфіденційними, у даній роботі показано як логування, застосоване різними учасниками мережі впливає на конфіденційність відправника транзакції.

На практиці це дозволить встановити: для користувачів – на скільки взаємодія з учасниками мережі впливає на їх конфіденційність; для аналітиків – як логування може бути використане для деанонімізації кінцевого користувача.

Деанонімізація кінцевого користувача за допомогою логування

Хоча в блокчейн-мережах зазвичай усі вузли вважаються рівноправними, на практиці це не зовсім так. В залежності від типу учасника мережі логування може виконуватись на різних рівнях та мати різну ефективність. У даному розділі розглядається процес логування застосоване у різних типів учасників мережі та впливу на конфіденційність кінцевого користувача.

Логування на звичайних вузлах. Звичайні блокчейн-вузли є кістяком блокчейн-мереж (рис. 1). Вузли виконують завдання верифікації, яке полягає у впевненості в тому, що надіслані транзакції та блоки є правомірними та дотримуються встановлених протоколом правил. Після верифікації вузли ретранслюють транзакції та блоки до інших вузлів, а також додають ці блоки до локальної копії ланцюга блоків (повного або частково в залежності від типу вузла [8]). Це сприяє глобальному розповсюдженню та однорідності інформації, що забезпечує безпеку блокчейн-мереж.

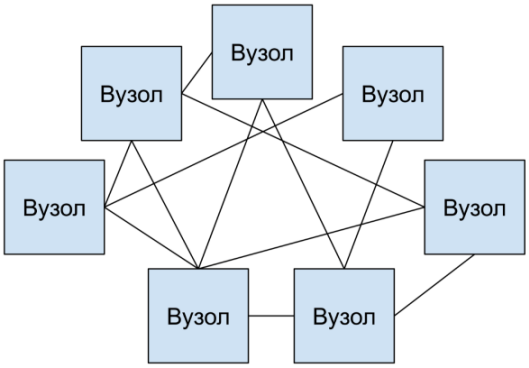


Рис. 1. Блокчейн-вузли формують мережу

Більшість вузлів працюють лише на низькорівневих протоколах Node Discovery і Wire, та не надають публічний JSON-RPC інтерфейс. При використанні низькорівневих протоколів, під час підключення іншого вузла до поточного або під час трансляції транзакції або блока з іншого вузла до поточного може здійснюватися логування, яке дозволить асоціювати IP-адресу вузла з трансльованою блокчейн-інформацією.

Обмеженням логування на персональному звичайному вузлі на рівні Wire протоколу є неможливість визначити чи вузол, який надіслав транзакцію, створив її сам або лише ретранслював транзакцію створену іншим вузлом. З іншого боку, якщо задача стоїть отримати всі транзакції ретрансльовані з вузла з певною IP-адресою, то підключившись до цього вузла ми почнемо отримувати транзакції та логувати їх.

Логування на публічних вузлах. Ще одним учасником мережі, якого можна виділити, є публічні вузли, які надаються зацікавленими сторонами для публічного використання. Треті особи, такі як розробники електронних гаманців, бірж та інших децентралізованих застосунків, розгортають і пропонують свої публічні сервери для користувачів. Якщо в документації блокчейн-мережі вказаний певний публічний вузол для загального використання, то зазвичай фактичним власником даного вузла є саме розробник даної мережі.

Публічні вузли надають JSON-RPC інтерфейс для Web-, мобільних застосунків та для розширень браузера для комунікації з мережею (рис. 2).

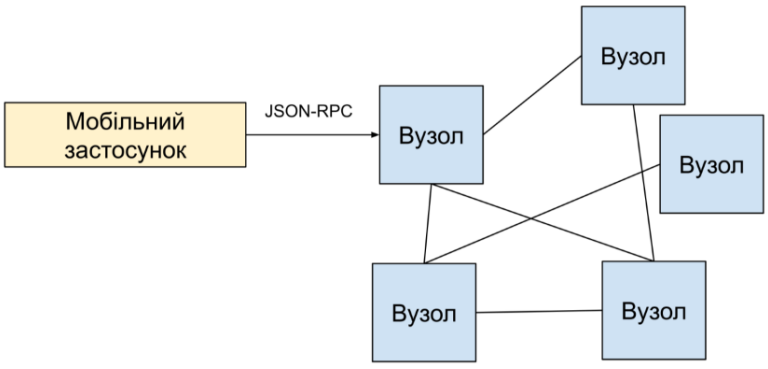


Рис. 2. Мобільний застосунок використовує JSON-RPC інтерфейс для комунікації з мережею

Застосунки у своїх налаштуваннях зазвичай за замовчуванням використовують певний публічний вузол. На рис. 3 показаний приклад налаштування електронного гаманця Metamask за замовчуванням.

Так як користувач напряму під'єднується до вузла через JSON-RPC протокол, то логування, застосоване на рівні даного протоколу дозволяє у більшості випадків ідентифікувати цього користувача. Наприклад, асоціювати виклик процедури відправки транзакції з IP-адресою пристрою, з якого було здійснене підключення до сервера.

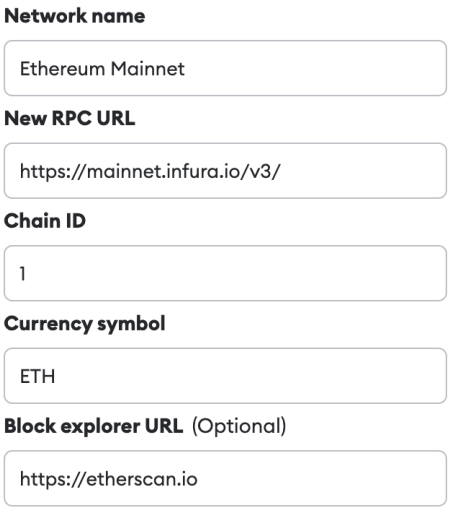


Рис. 3. Налаштування за замовчуванням для Ethereum мережі у електронному гаманці Metamask

Обмеженням даного методу є те, що застосунки за замовчуванням вказують публічний сервер, який має певну репутацію та довіру. Тому навіть, якщо розгорнути власний публічний сервер (або надати лише JSON-RPC інтерфейс), то навряд чи він буде застосований будь-яким децентралізованим додатком.

Логування на завантажувальних вузлах. Іншим особливим типом вузла є вузли завантаження (bootstrap/bootstrapping nodes). Вузол завантаження надає інформацію про конфігурацію мережі, в тому числі надає список вузлів до яких можливо здійснити підключення. Адреси вузлів завантажень прописані розробниками у налаштуваннях програмного забезпечення вузла, тому кожен новий клієнт мережі (вузол) спочатку підключається до вказаних вузлів завантаження, а вже потім до звичайних блокчейн-вузлів. В основному, вузли завантаження не реалізують основної логіки мережі, а слугують лише для надання списку вузлів, які несуть основну логіку. При підключенні до будь-якого вузла (в тому числі вузла завантаження), вузол який підключається, отримує список інших вузлів та додається до списку доступних. На рис. 4 блокчейн-вузол А здійснює підключення до завантажувальних вузлів для отримання списку інших вузлів мережі.

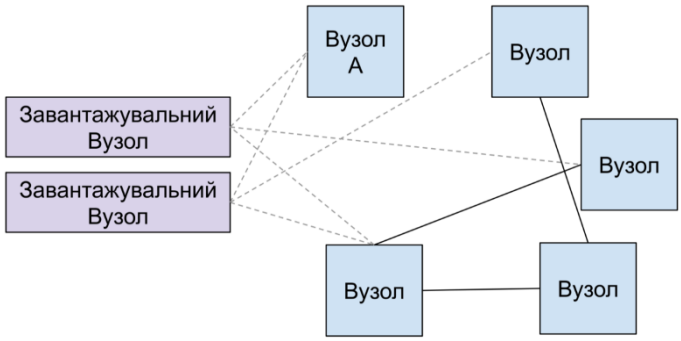


Рис. 4. Блокчейн-вузол А здійснює підключення до завантажувальних вузлів

Після отримання списку інших вузлів мережі, вузол А здійснює до них підключення (рис. 5).

Логування на завантажувальних серверах дозволяє отримати список усіх IP-адрес вузлів, що підключаються до мережі. Крім того, Node Discovery протокол передбачає використання ідентифікатора вузла (згенерований на основі його публічного ключа), який може бути асоційованим з IP-адресою вузла користувача.

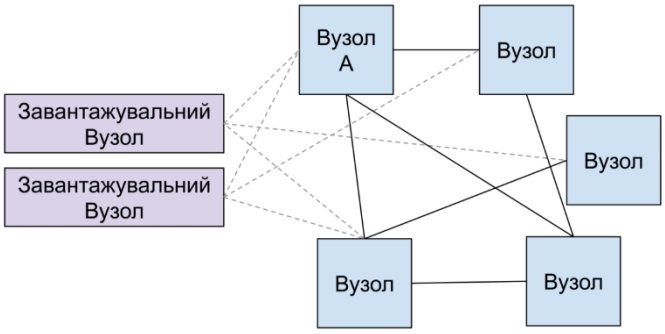


Рис. 5. Блокчейн-вузол А здійснює підключення до вузлів мережі

Завантажувальні вузли можуть бути розгорнуті будь-ким, але для того, щоб вони почали використовуватись як початкові вузли, вони повинні бути прописані у конфігураціях програмного забезпечення вузла. Для прикладу, у програмному забезпеченні вузлів Geth [9] за замовчуванням задані завантажувальні вузли [10], власниками яких є організація Ethereum Foundation [11].

Основним обмеженням застосування логування на завантажувальних серверах є те, що завантажувальні сервери суворо визначені у конфігураціях програмного забезпечення вузла, тому застосовувати даний метод можуть лише власники цих вузлів.

Ще одним обмеженням є те, що вузли завантаження не несуть основної логіки мережі і не обробляють транзакції. Тому не можна визначити з якого вузла, що підключався була відправлена транзакція, лише, що вузол з даною IP-адреса здійснив підключення до мережі і коли. Хоча це не може бути прямим методом ідентифікації кінцевого користувача, інформація про підключення до мережі і час підключення все ще може бути корисною в процесі аналізу. З іншого боку, якщо блокчейн-мережа досить мала, цієї інформації може бути достатньо для визначення IP-адреси користувача, який надіслав певну транзакцію.

Іншим недоліком даного методу є те, що він не гарантує, що вузол підключився до вузлів завантаження, які були вказані розробниками за замовчуванням. Користувач може самостійно вказати інші вузли для початкового підключення, тому до стандартних він може так і не підключитись.

Логування на майнінг-вузлах. Одним із особливих типів вузлів в Proof of Work (PoW) блокчейн-системах є майнінг-вузли (mining nodes). Ці вузли (рис. 6) не лише беруть на себе завдання приймати, верифікувати та ретранслювати транзакції, але й здійснюють процес генерації нових блоків за допомогою майнінг-процесу. Майнінг-вузли реалізують складний обчислювальний процес, який полягає у розв'язанні обчислювально-витратних криптографічних завдань, підтверджуючи легітимність транзакцій і формуючи новий блок, який включає в себе затверджені транзакції [12]. Після успішного процесу майнінгу блока, блок ретранслюється до інших блокчейн-вузлів, а майнінг-вузол отримує певну кількість криптовалюти, як винагороду за успішне виконання майнінг-процесу.

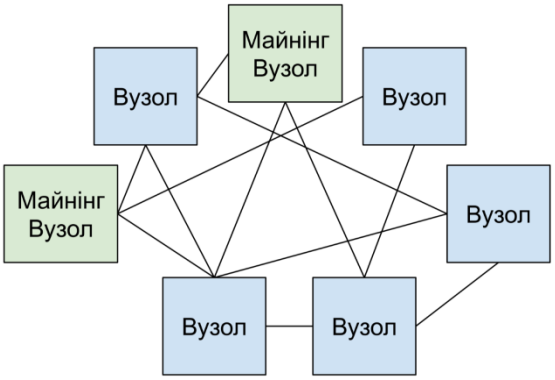


Рис. 6. Звичайні блокчейн-вузли та майнінг-вузли

Ці вузли використовують Node Discovery та Wire протоколи для комунікації з іншими вузлами. Також можуть мати активний JSON-RPC інтерфейс з додатковим функціоналом для управління процесом майнінгу [13].

Коли кінцевий користувач транслює створену транзакцію, вона ретранслюється іншими вузлами доки не досягне майнінг-вузлів. Але, кінцевий користувач може уникати проміжних вузлів та надсилати транзакцію напряму майнінг-вузлам, за умови, що він знає їхні адреси та не має обмежень на боці майнінг-вузлів. Це дозволяє уникнути аналізу та збору інформації про транзакцію користувача проміжними вузлами [14]. Таким чином, у разі прямого з'єднання, майнінг-вузол має можливість зв'язати транзакцію користувача з його IP-адресою.

Власниками майнінг вузлів можуть бути як приватні особи, так і великі корпорації. Немає обмежень на розгортання майнінг-вузлів і будь-хто може розгорнути майнінг вузол з невеликими ресурсами задля потенційного логування користувачів.

Основним обмеженням застосування логування на майнінг-вузлах задля ідентифікації кінцевого користувача є те, що клієнт повинен відправити транзакцію напряму до майнінг-вузла. В іншому випадку, логування на майнінг-вузлі невиправдане, адже транзакцію буде ретрансльовано проміжним вузлом і виникає така ж проблема як і при логування на звичайних вузлах.

Логування у блокчейн експлорерах. Іншим учасником блокчейн екосистем є блокчейн експлорери (blockchain explorers), які надаються більшістю блокчейн-мереж для своїх користувачів. Хоча блокчейн експлорери не є напряму елементами саме блокчейн-мереж, вони є важливим інструментом для її дослідження. Блокчейн експлорер – це інструмент, зазвичай реалізований у вигляді веб-застосунку, який дозволяє користувачам проводити аналіз та дослідження даних у блокчейн-мережі, зокрема транзакцій, гаманців, блоків тощо. Він надає можливість детального вивчення та візуалізації даних, наприклад, для перевірки чи успішно була виконана транзакція користувача. На рис. 7 зображена головна сторінка блокчейн експлорера Etherscan для мережі Ethereum. Користувач зазвичай використовує блокчейн експлорер

для перевірки балансу його аккаунту, або для пошуку відправленої транзакції та перевірки чи була вона включена у блокчейн.

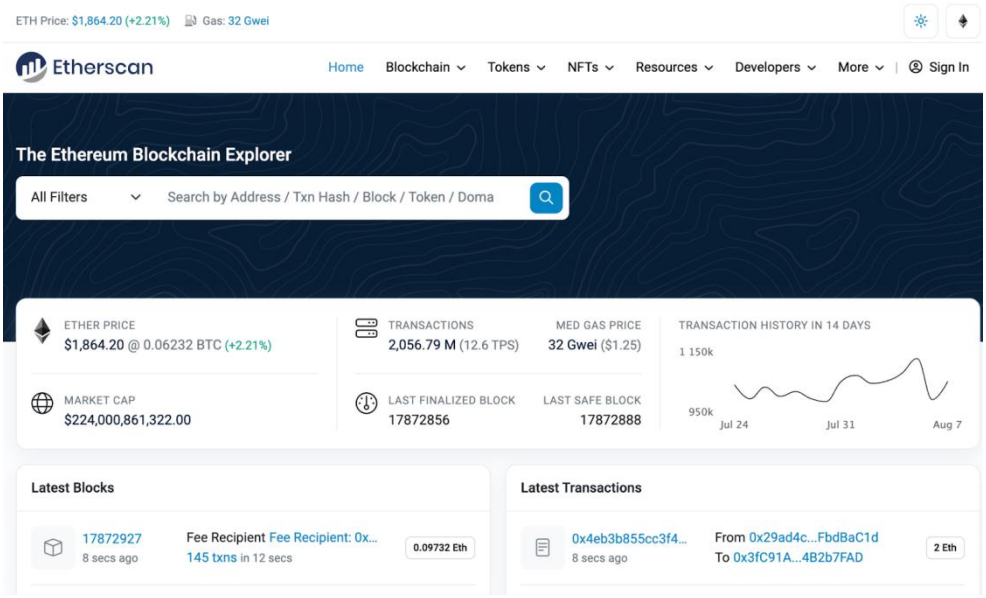


Рис. 7. Головна сторінка Etherscan

Логування взаємодії користувача з блокчейн експлорером на рівні HTTP протоколу дозволяє достатньо точно встановити зв'язок IP-адреси користувача з інформацією, яку він запитував. Наприклад, якщо користувач запитує певну транзакцію, то це дозволяє асоціювати його IP-адресу з цією транзакцією, з відправником транзакції або отримувачем транзакції. Крім того, використання браузера для доступу до блокчейн експлорера збільшує ризики деанонімізації користувача навіть у випадках використання VPN чи TOR [15] [16] [17].

Власниками блокчейн експлорерів зазвичай є розробники блокчейн-мережі, приватні компанії та приватні особи [18]. Немає обмежень на розгортання власного блокчейн експлорера, але для того, щоб їм почали активно користуватись і можливо було отримувати результати з ідентифікації користувачів, потрібні зусилля з його популяризації. Це і є основним обмеженням.

Іншим обмеженням є те, що зв'язок IP-адреси з певною транзакцією чи аккаунтом не гарантує, що саме цей користувач є його власником або відправником транзакції. Хоча це може спонукати на подальший аналіз цього зв'язка, наприклад визначити, чому даний користувач здійснив пошук у блокчейн експлорері саме цієї транзакції.

Висновки

У даній роботі проаналізовані різні учасники блокчейн-екосистем, та як ці учасники можуть використовувати процес логування для деанонімізації кінцевого користувача. Серед учасників мережі було виокремлено завантажувальні вузли, публічні вузли, звичайні вузли, майнінг-вузли та блокчейн експлорери.

Проведений аналіз дозволяє стверджувати, що логування може бути ефективним способом для деанонімізації кінцевого користувача та є серйозним викликом для його конфіденційності.

Також, проаналізовано, що логування має певні обмеження. Загальним і основним обмеженням є те, що кінцевий користувач повинен напряму здійснити підключення до учасника мережі, який намагається асоціювати IP-адресу пристрою користувача з даними, які він надсилає.

Подальшим етапом наукового дослідження може стати осмислення перспектив та формулювання стратегій, спрямованих на подолання обмежень, що описані у даній роботі. Найбільш практичним напрямком може бути спонукання кінцевого користувач здійснити підключення до учасника мережі, що намагається його ідентифікувати, а саме асоціювати IP-адресу з даними, які надсилаються або отримуються з блокчейн-мережі.

References

1. Cachin, C., & Vukolić, M. (2017). Blockchain Consensus Protocols in the Wild (Version 2). arXiv. https://doi.org/10.48550/ARXIV.1707.01873

2. Zhang, R., Xue, R., & Liu, L. (2019). Security and Privacy on Blockchain (Version 2). arXiv. https://doi.org/10.48550/ARXIV.1903.07602

3. Dorogyy, Y., Kolisnichenko, V. (in press). Blockchain Transaction Analysis: A Comprehensive Review of Applications, Tasks and Methods. System research and information technologies.

4. Dotan, M., Pignolet, Y.-A., Schmid, S., Tochner, S., & Zohar, A. (2020). Survey on Cryptocurrency Networking: Context, State-of-the-Art, Challenges (Version 1). arXiv. https://doi.org/10.48550/ARXIV.2008.08412

5. Luo, Z., Murukutla, R., & Kate, A. (2022). Last Mile of Blockchains: RPC and Node-as-a-service (Version 1). arXiv. https://doi.org/10.48550/ARXIV.2212.03383

6. Hassanzadeh-Nazarabadi, Y., Taheri-Boshrooyeh, S., Otoum, S., Ucar, S., & Özkasap, Ö. (2021). DHT-based Communications Survey: Architectures and Use Cases (Version 1). arXiv. https://doi.org/10.48550/ARXIV.2109.10787

7. Wang, T., Zhao, C., Yang, Q., Zhang, S., & Liew, S. C. (2020). Ethna: Analyzing the Underlying Peer-to-Peer Network of the Ethereum Blockchain (Version 2). arXiv. https://doi.org/10.48550/ARXIV.2010.01373

8. Sync modes. (n.d.). Retrieved August 15, 2023. https://geth.ethereum.org/docs/fundamentals/sync-modes

9. go-ethereum. (n.d.). Retrieved August 15, 2023. https://geth.ethereum.org

10. go-ethereum/params/bootnodes.go. (n.d.). Retrieved August 15, 2023. https://github.com/ethereum/go-ethereum/blob/67979022aa8ea6a96b618c086f60b49af7d2a568/params/bootnodes.go#L23

11. Ethereum Foundation. (n.d.). Retrieved August 15, 2023. https://ethereum.org/en/foundation/

12. Grunspan, C., & Pérez-Marco, R. (2020). The mathematics of Bitcoin. arXiv. https://doi.org/10.48550/ARXIV.2003.00001

13. Miner namespace. (n.d.). Retrieved August 15, 2023. https://geth.ethereum.org/docs/interacting-with-geth/rpc/ns-miner

14. How to send private transactions on ethereum. (n.d.). Retrieved August 15, 2023. https://www.alchemy.com/overviews/ethereum-private-transactions

15. Al-Fannah, N. M. (2017). One leak will sink a ship: WebRTC IP address leaks. In 2017 International Carnahan Conference on Security Technology (ICCST). 2017 International Carnahan Conference on Security Technology (ICCST). IEEE. https://doi.org/10.1109/ccst.2017.8167801

16. Lu, Y., & Tsudik, G. (2010). Towards Plugging Privacy Leaks in the Domain Name System. In 2010 IEEE Tenth International Conference on Peer-to-Peer Computing (P2P). 2010 IEEE Tenth International Conference on Peer-to-Peer Computing (P2P). IEEE. https://doi.org/10.1109/p2p.2010.5569976

17. Browserleaks - Check your browser for privacy leaks. (n.d.). Retrieved August 15, 2023. https://browserleaks.com/

18. Etherscan - Crunchbase Company Profile. (n.d.). Retrieved August 15, 2023. https://www.crunchbase.com/organization/etherscan

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-67-73
УДК 004.89

ЗАЛУЦЬКА ОЛЬГА
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0003-1242-3548
e-mail: zalutska.olha@gmail.com
МОЛЧАНОВА МАРИНА
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0001-9810-936X
e-mail: m.o.molchanova@gmail.com
МАЗУРЕЦЬ ОЛЕКСАНДР
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0002-8900-0650
e-mail: exe.chong@gmail.com
МЕЛЬНИК ОЛЕГ
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0009-0001-6367-8922
e-mail: melnik77oleg@gmail.com
СКРИПНИК ТЕТЯНА
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0002-8531-5348
e-mail: tkskripnik1970@gmail.com

МЕТОД ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ЕМОЦІЙНОЇ ТОНАЛЬНОСТІ ТЕКСТОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОВЕДІНКОВИХ НАМІРІВ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИМИ ЗАСОБАМИ

У роботі за результатом аналізу сучасного стану проблеми інтелектуального аналізу емоційної тональності текстової інформації визначено, що є актуальним застосування нейронних мереж для аналізу емоційної тональності текстів, оскільки це забезпечує вищу точність класифікації, ніж альтернативні підходи. Було запропоновано для інтелектуального аналізу емоційної тональності текстової інформації використати нейромережу архітектури BERT як одну із найбільш точних, в той час як для аналізу коротких документів запропоновано використовувати її модифікацію, RoBERTa.

ZALUTSKA OLHA, MOLCHANOVA MARYNA,
MAZURETS OLEKSANDR, MELNYK OLEH, SKRYPNYK TETIANA
Khmelnytskyi National University

METHOD FOR INTELLECTUAL ANALYSIS OF TEXTUAL INFORMATION EMOTIONAL TONALITY FOR DETERMINE THE BEHAVIORAL INTENTIONS BY NEURAL NETWORKS MEANS

In this paper, based on analysis results of current state of problem of intellectual analysis of the information texts emotional tonality, was determined that the use of neural networks for the analysis of texts emotional tonality is relevant, as it provides higher classification accuracy than alternative approaches. It was proposed to use the neural network of BERT architecture as one of the most accurate for the intellectual analysis of emotional tonality of texts, while it was proposed to use its modification RoBERTa for analysis of short documents.

The paper proposes the method for intellectual analysis of textual information emotional tonality for determine the behavioral intentions of users of socially oriented services and electronic commerce tools by neural networks means. The method uses neural network of the RoBERTa architecture. Conducted studies of the effectiveness of the method established that for combined multilingual texts it was possible to obtain an accuracy of 0.92, while the loss function had value of 0.29. This method should be used to determine the emotional tonality of short texts up to 500 words long, presented in Ukrainian language. At the same time, texts may contain surzhik and foreign words. The obtained results confirm the possibility and effectiveness of using method for intellectual analysis of textual information emotional tonality by neural networks means for determine the behavioral intentions of users, in particular, in socially oriented services and electronic commerce tools.

Keywords: BERT, RoBERTa, emotional tonality analysis, behavioral intentions, sentiment classification, sentiment analysis, emotion detection, neural networks.

Аналіз предметної області

Емоційна тональність тексту вказує на емоційний характер або емоційний забарвлення текстового висловлення. Ця характеристика визначає, які емоції чи почуття виражені в тексті, і чи є вони позитивними, негативними або нейтральними. Емоційна тональність тексту важлива для розуміння того, як текст сприймається читачами або як він може впливати на їхні емоції та настрій.

На сучасному етапі аналіз емоційної тональності текстових повідомлень, що входить до задач обробки природної мови привертає значну увагу науковців. Це пов’язано із зростанням сфер можливого застосування, до яких зокрема належать:

– Аналіз соціальних медіа. У соціальних медіа та онлайн-форумах публікується величезна кількість текстової інформації, яка може містити вказівки на наміри та емоційний стан користувачів. Інтелектуальний аналіз тональності дозволяє розуміти, які теми актуальні та які дії користувачів можна очікувати.

– Бізнес та маркетинг. Визначення тональності текстової інформації, пов'язаної з продуктами,

послугами та брендами, допомагає компаніям розуміти відгуки та думки клієнтів. Це може впливати на прийняття бізнес-рішень, покращення продуктів та створення маркетингових стратегій.

– Фінанси та інвестиції. Аналіз тональності новин та повідомлень у фінансових та інвестиційних спільнотах може допомогти інвесторам та трейдерам передбачити зміни на ринку й приймати обґрунтовані рішення.

– Безпека та контроль. Інтелектуальний аналіз тональності може використовуватись у сфері безпеки та правопорядку для моніторингу соціальних мереж та пошуку індикаторів загроз чи намірів.

– Політика та громадська думка. Оцінка тональності політичних дебатів та громадської думки може допомогти передбачити вибори, визначити настрої у суспільстві та розробити політичні стратегії.

– Охорона здоров'я. Аналіз тональності текстових відгуків про медичні послуги та ліки може допомогти покращити якість медичного обслуговування та управління охороною здоров'я.

– Освіта та психологія. В освітніх та психологічних дослідженнях аналіз тональності текстів може використовуватися для вивчення поведінки та психологічних характеристик людей.

– Клієнтський сервіс та підтримка. Аналіз тональності текстових звернень клієнтів може допомогти організаціям надавати більш ефективне обслуговування та реагувати на проблеми та запити клієнтів.

– Правоохоронні органи. Будь-які натяки на злочинні наміри чи погрози, виражені у текстовій формі, потребують уваги правоохоронних органів, та інтелектуальний аналіз тональності може допомогти виявити такі натяки.

– Інтернет-безпека. Моніторинг та аналіз тональності текстової інформації також є важливими інструментами для боротьби з фейками, кібербулінгом та негативним контентом в інтернеті.

Отож, у сучасному інформаційному суспільстві вміння розуміти емоційний стан та наміри людей на основі тексту має стратегічне значення для багатьох сфер діяльності. Емоційна тональність тексту може бути важливою для багатьох застосувань, таких як аналіз відгуків користувачів, визначення настроїв ринку, виявлення відгуків у соціальних мережах, фільтрація інформації тощо. Також вона може бути корисною для покращення якості комунікації та взаємодії з користувачами в різних додатках і системах.

Останні публікації

Оцінка емоційної тональності тексту зазвичай виконується з використанням засобів обробки природної мови (Natural Language Processing, NLP). Деякі методи і техніки NLP дозволяють автоматично визначати емоційну оцінку тексту на основі слів, фраз, контексту та інших ознак [1, 2].

Так, у статті [3] запропоновано фреймворк «двонаправлений емоційний рекурентний блок» що використовується для аналізу розмовних настроїв. У запропонованій системі узагальнений нейронний тензорний блок, за яким слідує двоканальний класифікатор, призначений для виконання контекстної композиції та класифікації настроїв відповідно.

Дослідниками [4] запропоновано метод аналізу настроїв у Twitter, заснований на словнику, який дав відповідні результати щодо настроїв щодо вакцин проти COVID-19 AstraZeneca/Oxford, Moderna та Pfizer/BioNTech за 4 місяці. Натомість, у [5] запропоновано використовувати для оцінки настрою TextBlob із векторизацією TF-IDF і моделлю класифікації LinearSVC, що дало змогу отримати точність 0.96752 для англомовних твітів.

У роботі [6] показано, що сучасні маркетингові дослідження переважно покладалися на словникові інструменти для вилучення настроїв із текстових даних, які мають явну перевагу з точки зору інтерпретації, проте явно втрачають в точності. Також авторами надано досить всебічну оцінку доступних методів аналізу настроїв, та показано, що методи на основі машинного навчання мають вищу точність класифікації, проте мають нижчий рівень інтерпретації.

У роботі [2] досліджується використання розширених моделей BERT для розпізнавання настроїв твітів. Для успішного оцінювання за допомогою Enhanced BERT розглядається набір даних Kaggle SMILE, який перевіряється на такі емоції, як «щастя», «смуток» тощо, і класифікується відповідно до таких категорій. Експерименти показують, що ця версія моделі досягає точності 0,96.

Таким чином, напрямок автоматичного інтелектуального аналізу емоційної тональності текстової інформації для визначення поведінкових намірів є актуальним напрямом, проте для української мови таких досліджень значно менше, ніж для легко формалізованих мов типу англійської. Це пов’язано з недостатньою кількістю датасетів та з досить важкою формалізацією мови, адже розмовна українська мова характеризується значною кількістю запозичень, та окрім них ще й містить фрагменти, які запозичені з інших мов [1, 7].

Метою роботи є розробка методу інтелектуального аналізу емоційної тональності текстової інформації для визначення поведінкових намірів користувачів соціально-орієнтованих сервісів та засобів електронної комерції.

Основна частина

Задача автоматичного інтелектуального аналізу емоційної тональності текстів для визначення поведінкових намірів їх авторів зводиться до задачі класифікації:

Позитивна тональність – вказує на наявність позитивних емоцій у тексті. Це можуть бути радість, задоволення, захоплення тощо. Наприклад: «Я дуже задоволений цим результатом».

Негативна тональність – вказує на наявність негативних емоцій у тексті. Це можуть бути обурення, розчарування, гнів тощо. Наприклад: «Я розчарований такою поведінкою».

В межах даного дослідження, оцінка емоційної тональності текстів виконувалась відносно відгуків у засобах електронної комерції [8]. У свою чергу, відгуки електронної комерції мають наступні особливості:

– обмежений обсяг контенту (до 500 слів);

– малий обсяг контенту (1-3 слова);

– використання суржику, слів-покручів, професіоналізмів, жаргонів та інтегрованого мультимовного контенту.

Щодо обмеженого обсягу контенту, переважна більшість відгуків не перевищує 100 слів, а більш довгими, як правило, є негативні відгуки.

Тому і якості набору експериментальних даних було використано набір даних відгуків з платформи «Hotline». Такий вибір експериментальних даних обумовлено тим, що цікавить саме розмовний україномовний контент, який до того ж повинен бути розміченим. Оцінками слугуватимуть оцінки клієнтів, які залишають відгуки, де оцінка «Не рекомендую» – негативні відгуки, а «Рекомендую» – позитивні. Для видобутку відгуків було створене відповідне програмне забезпечення на базі бібліотеки Crawlee [9], та оброблені в подальшому засобами мови C#, розподілені на 2 каталоги – «позитив» та «негатив». Загалом датасет складається із 7656 документів, де в навчальній вибірці знаходиться 6655 документів, і з них 1331 документ використано для валідації (що складає 20% навчальної вибірки). Розподіл відгуків в датасеті проілюстровано на рис. 1, 2.

Рис. 1. Кількісний розподіл позитивних відгуків

Рис. 2. Кількісний розподіл негативних відгуків

Вибір нейронної мережі

Для бінарної класифікація настроїв україномовних відгуків електронної комерції розглядалися як нейромережеві варіанти, так і інші варіанти розв'язку поставленої задачі. Однак, виходячи з проведеного аналізу публікацій, в якому показано, що дослідження які переважно покладалися на словникові інструменти для вилучення настроїв із текстових даних мають явну перевагу з точки зору інтерпретації, але явно втрачають в точності. Серед розглянутих вище нейромережевих засобів на сьогоднішній день BERT-подібні мережі вважаються найкращими.

BERT було розроблено, щоб допомогти комп'ютерам зрозуміти значення неоднозначної мови в тексті, використовуючи навколишній текст, щоб зрозуміти контекст, у якому цей текст міг бути написаний [10]. Проте, як вже було досліджено авторами [11], ukr-RoBERTa, ukr-ELECTRA та XLM-R large мають тенденцію демонструвати найвищу продуктивність, хоча XLM-R large та ukr-ELECTRA мають тенденцію працювати краще на довших текстах, тоді як ukr-RoBERTa значно перевершує інші моделі на коротших послідовностях. Оскільки дослідження проводиться на текстах відгуків інтернет-платформи «Hotline» [12], які, як правило, є короткими текстовими повідомленнями та опираючись на проведені дослідження, було прийнято рішення використовувати нейромережу RoBERTa.

Підбір семантичної моделі мови

Варіація нейронної мережі RoBERTa (скорочення від «Надійно оптимізований підхід BERT») є варіантом моделі BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers), яку розробили дослідники Facebook AI [13]. Як і BERT, RoBERTa є мовною моделлю на основі трансформера, яка використовує самоувагу для обробки вхідних послідовностей і створення контекстуалізованих представлень слів у реченні.

Однією з ключових відмінностей між RoBERTa та BERT є те, що RoBERTa навчався на значно більшому наборі даних і з використанням ефективнішої процедури навчання. Під час навчання RoBERTa використовує техніку динамічного маскування, що допомагає моделі вивчати більш надійні та узагальнені представлення слів.

Так як семантичний аналіз на основі нейромережевого підходу є сьогодні актуальним напрямом наукових досліджень, для української мови на сьогодні також є деякі напрацювання. Одними з яких є попередньо навчена мультимовна модель препроцесингу, що працює також і з українською мовою та ще з

понад 50 іншими мовами [14] та ембендингу [15] автора Ukjae Jeong, та входить до складу моделей бібліотеки Tensorflow_hub мови Python. На базі цих моделей пропонується створити модель, що буде донавчено на вищеописаній вибірці експериментальних даних. Вибір мультимовних моделей обумовлено тим, що як вже було вище наведено, відгуки можуть містити текст не тільки літературною українською мовою.

Конфігурація нейронної мережі для інтелектуального аналізу емоційної тональності текстової інформації на базі обраного датасету та типу нейромережі має структуру, показану на рис. 3.

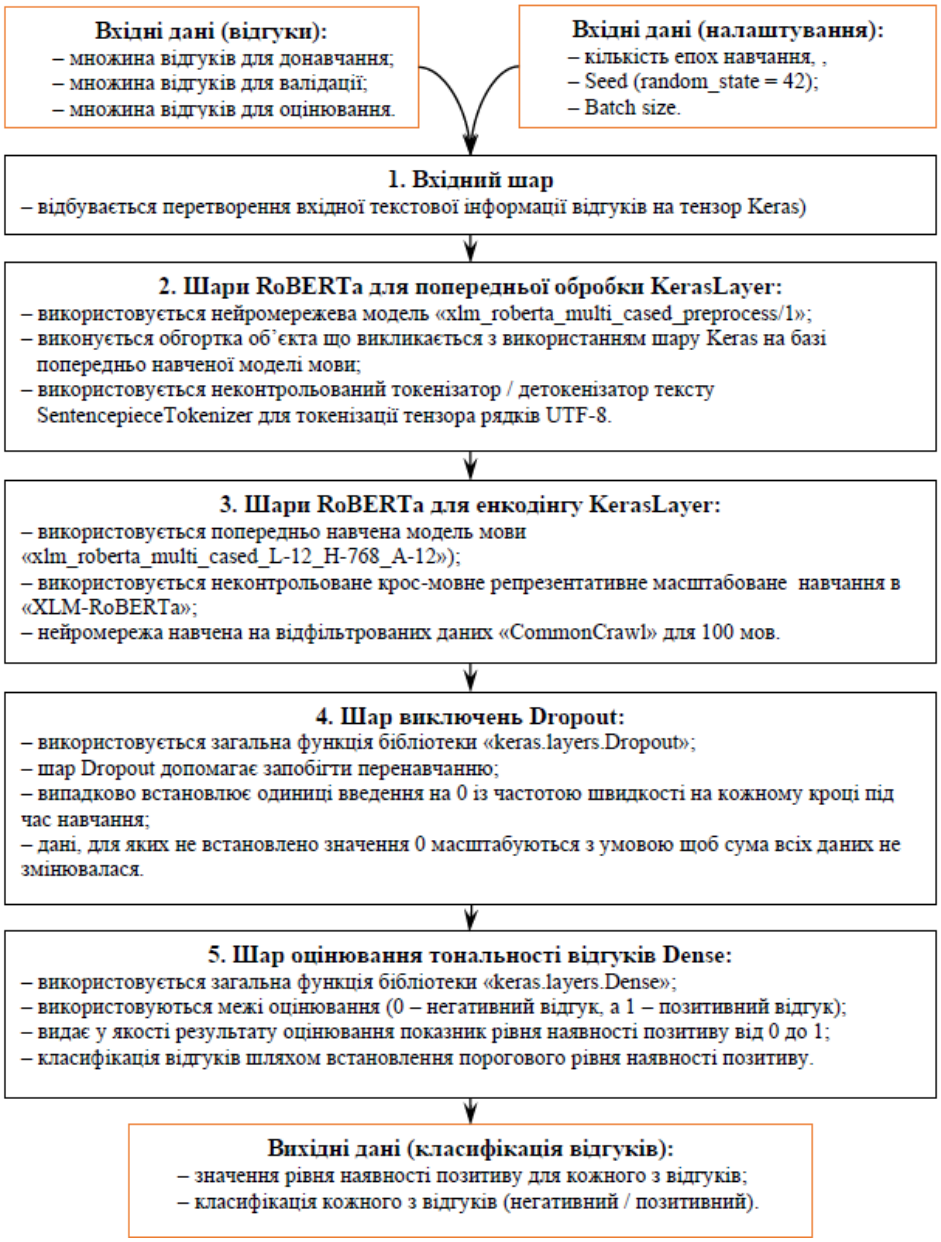


Рис. 3. Схема роботи класифікатора на основі RoBERTa для інтелектуального аналізу емоційної тональності текстової інформації

На вхідному шарі відбувається перетворення вхідної текстової інформації на тензор Keras, тобто символічний тензороподібний об'єкт, який доповнюється атрибутами, які дозволяють побудувати модель Keras за вхідним та вихідними даними моделі. Надалі тензор подається на вхід шару попередньої обробки, яка включає в себе обгортку об'єкта, що викликається, для використання як шару Keras на базі попередньо навченої моделі попередньої обробки тексту [14]. Дана модель використовує SentencepieceTokenizer [15], що токенізує тензор рядків UTF-8 та є неконтрольованим токенізатором і детокенізатором тексту.

Наступним шаром є RoBERTa енкодер. Цей шар працює на основі попередньо навченої моделі «xlm_roberta_multi_cased_L-12_H-768_A-12» [16], що є результатом неконтрольованого крос-мовного репрезентативного навчання в масштабі (XLM-RoBERTa) [16], та попередньо навчена на 2,5 ТБ відфільтрованих даних CommonCrawl, що містять 100 мов [17].

Наступним шаром є шар dropout, що випадково встановлює одиниці введення на 0 із частотою швидкості на кожному кроці під час навчання, що допомагає запобігти перенавчанню. Вхідні дані, для яких

не встановлено значення 0 масштабуються таким чином, щоб сума всіх вхідних даних не змінювалася.

Останнім кроком в моделі є безпосередньо класифікація, що здійснюється з використанням функції Dense та видає результат від 0 до 1, що є мірою позитиву в україномовних відгуках електронної комерції. Де 0 – негативний відгук, а 1 – позитивний відгук.

Далі запропонована модель проходить донавчання під вищеописану вибірку. Донавчання проводилось із різною комбінацією кількісних показників параметрів, таких як: кількість епох навчання, Seed, Batch size [18].

Кількість епох навчання показує, скільки разів модель підлягає навчанню. Параметр Seed буде взято 42, з огляду на те, що якщо не встановити для random_state значення 42, щоразу, коли знову буде запускатись програмний код, він створюватиме інший тестовий набір. Batch size – кількість навчальних прикладів, що використовуються в межах однієї ітерації. Дуже важко відразу визначити, який ідеальний розмір партії для потреб конкретної задачі, тому даний параметр буде підібрано експериментальним шляхом.

Відповідно до обраних параметрів визначались показники оцінки функціональності моделі, такі як: час навчання в секундах, точність та втрати. У якості функції втрат використовувалась бінарна крос-ентропічна функція, що виражається формулою [19]:

$$Loss = -\frac{1}{N}\left[\sum_{j=1}^{N}\left[t_j \log\left(p_j + (1 - t_j)\log\left(1 - p_j\right)\right)\right]\right],$$

де N – кількість зразків даних, t_j є істинним значенням, яке приймає значення 0 або 1, p_j імовірність Softmax для i-ї точки даних.

Точність для проведеного дослідження визначається як ділення кількості правильних відповідей на загальну кількість відповідей.

Одержані показники оцінки функціональності (час навчання, точність та втрати) за обраних параметрів моделей налаштування (кількість епох навчання, seed, batch size) нейромережевого класифікатора наведено у табл. 1. Дослідження проводилось на базі процесора Intel Core I7 8th gen, ОЗУ 16 ГБ, NVIDIA GeForce MX150.

Таблиця 1

Параметри донавчання класифікатора

Параметри	Значення
Кількість епох навчання	5
Seed	42
Batch size	32
Час навчання (сек.)	15894
Точність	0.91
Loss	0.32

Графік ілюстрації проходження процесу донавчання по епохам показано на рис. 4, 5. Оскільки досліджувана версія RoBERTa є мультимовним трансформером, донавченим на білінгвістичних даних, в цілому нейромережа не має проблем з аналізом емоційної тональності текстової інформації.

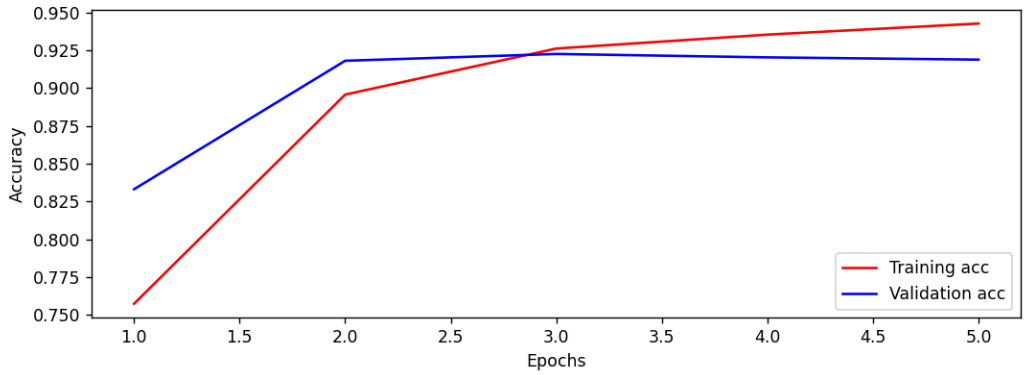


Рис. 4. Ілюстрація процесу навчання за епохами за показником точності

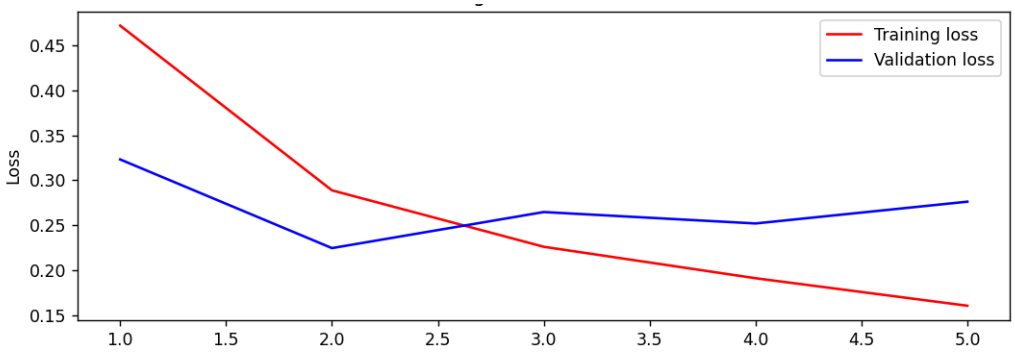


Рис. 5. Ілюстрація процесу навчання за епохами за показником функції втрат

При дослідженні відгуків, яких немає в навчальній та тестовій вибірках показано високу ефективність пропонованої архітектури. Отримані результати свідчать, що при використанні вибірки для валідації точність класифікації не росте. А функція втрат після 3ї ітерації для вибірки для валідації мала тенденцію до незначного зростання.

Висновки

У роботі було розглянуто сучасний стан напряму семантичної обробки тексту, а саме інтелектуального аналізу емоційної тональності текстової інформації. Проведений аналіз показав, що даний напрямок є актуальним, зокрема, застосування нейронних мереж для аналізу емоційної тональності текстової інформації, що дає вищу точність класифікації, ніж альтернативні підходи. Однією із найбільш точних нейромереж визначили архітектуру BERT, в той час як для аналізу коротких документів краще себе показала її модифікація – RoBERTa.

При розробці методу досліджувались: формування розміченого датасету для навчання нейромережі, підбор та налаштування нейромережевого класифікатора, побудову семантичної моделі мови. Оскільки метою дослідження було саме аналіз емоційної тональності текстової інформації на прикладі україномовних відгуків електронної комерції, а такі відгуки мають певні характеристики, було створено власний датасет, що налічує 7656 відгуків для донавчання обраної нейронної мережі RoBERTa. Зібрані відгуки були розподілені на 2 вибірки – навчальну та тестову, кожна з яких мала негативні коментарі та позитивні коментарі. Для оцінки роботи запропонованої архітектури було використано точність та функцію втрат. Для комбінованих мультимовних відгуків вдалося отримати точність 0.92, в той час як функція втрат мала значення 0.29.

Запропонований підхід має певні обмеження. Доцільно його застосовувати до визначення емоційної тональності коротких текстових відгуків (довжиною до 500 слів), представлених на українській мові та можуть містити суржик та іншомовні вкладення слів. Зміна вмісту навчальної вибірки впливає на результат навчання нейронної мережі, і відповідно впливає на ефективність аналізу емоційної тональності текстів. З часом в побутовій мові можуть відбуватися зміни, які також впливають на хід та результати аналізу емоційної тональності текстової інформації.

Література

1. Slobodzian V., Kovalchuk O., Molchanova M., Sobko O., Mazurets O., Barmak O., Krak I. Text Data Vectorization Model of Ukrainian-Language Internet Communication Content. CEUR Workshop Proceedings, 2022, vol. 3171, pp. 561–571. https://ceur-ws.org/Vol-3171/paper45.pdf

2. Mann S., Arora J., Bhatia M., Sharma R., Taragi R. Twitter Sentiment Analysis Using Enhanced BERT, in: Kulkarni, A.J., Mirjalili, S., Udgata, S.K. Intelligent Systems and Applications. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 959. Springer, Singapore, 2023, pp. 263-271. DOI:10.1007/978-981-19-6581-4_21.

3. Wei Li, Wei Shao, Shaoxiong Ji, Erik Cambria. BiERU: Bidirectional emotional recurrent unit for conversational sentiment analysis. Neurocomputing (2022): 73-82. DOI: 10.1016/j.neucom.2021.09.057.

4. Robert Marcec, Robert Likic. Using Twitter for sentiment analysis towards AstraZeneca/Oxford, Pfizer/BioNTech and Moderna COVID-19 vaccines. Postgraduate Medical Journal, Volume 98, Issue 1161, (2022): 544–550. DOI: 10.1136/postgradmedj-2021-140685

5. Miftahul Qorib, Timothy Oladunni, Max Denis, Esther Ososanya, Paul Cotae. Covid-19 vaccine hesitancy: Text mining, sentiment analysis and machine learning on COVID-19 vaccination Twitter dataset. Expert Systems with Applications (2023). DOI: 10.1016/j.eswa.2022.118715.

6. Jochen Hartmann, Mark Heitmann, Christian Siebert, Christina Schamp. More than a Feeling: Accuracy and Application of Sentiment Analysis. International Journal of Research in Marketing (2022). DOI: 10.1016/j.ijresmar.2022.05.005.

7. Лазоренко Я., Сініцин І., Шевченко В. Ідентифікація переважної мови спілкування людини. Проблеми програмування. 2022. № 3-4. Спеціальний випуск, с. 271-280. DOI: 10.15407/pp2022.03-04.271

8. Ковальчук О.В., Слободзян В.О., Мазурець О.В., Бармак О.В. Метод формування бінарного класифікатору україномовного інтернет-контенту. Збірник наукових праць за матеріалами XIV

Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2022». Хмельницький, 2022.

9. Crawlee.Dev. A web scraping and browser automation library. 2023. https://crawlee.dev.

10. Sentiment Analysis of Movie Reviews with Google's BERT. 2023. https://medium.com/mlearning-ai/sentiment-analysis-of-movie-reviews-with-googles-bert-c2b97f4217f

11. Panchenko D., Maksymenko D., Turuta O., Yerokhin A., Daniiel Y., Turuta O. Evaluation and Analysis of the NLP Model Zoo for Ukrainian Text Classification, in: Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications. ICTERI 2021, Communications in Computer and Information Science, vol. 1698. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-20834-8_6

12. Hotline.Ua. Reviews of the store Rozetka. 2023. https://hotline.ua/ua/yp/2476/reviews

13. Ai.Facebook.Com., RoBERTa: An optimized method for pretraining self-supervised NLP systems. 2022. https://ai.facebook.com/blog/roberta-an-optimized-method-for-pretraining-self-supervised-nlp-systems.

14. Tfhub.Dev., Text preprocessing model xlm_roberta_multi_cased_preprocess. 2022. https://tfhub.dev/jeongukjae/xlm_roberta_multi_cased_preprocess/1.

15. Tensorflow.Org., Text.SentencepieceTokenizer. 2023. https://www.tensorflow.org/text/api_docs/python/text/SentencepieceTokenizer.

16. Tfhub.Dev., Unsupervised Cross-lingual Representation Learning at Scale. xlm_roberta_multi_cased_L-12_H-768_A-12. 2023. https://tfhub.dev/jeongukjae/xlm_roberta_multi_cased_L-12_H-768_A-12/1.

17. Huggindface.Co. XLM-RoBERTa (base-sized model). URL: https://huggingface.co/xlm-roberta-base.

18. Zalutska O., Molchanova M., Sobko O., Mazurets O., Pasichnyk O., Barmak O., Krak I. Method for Sentiment Analysis of Ukrainian-Language Reviews in E-Commerce Using RoBERTa Neural Network. CEUR Workshop Proceedings, 2023, vol. 3387, pp. 561–571. 2023. https://ceur-ws.org/Vol-3387/paper26.pdf

19. Kiprono Elijah Koech, Cross-Entropy Loss Function. 2023. https://towardsdatascience.com/cross-entropy-loss-function-f38c4ec8643e.

References

1. Slobodzian V., Kovalchuk O., Molchanova M., Sobko O., Mazurets O., Barmak O., Krak I. Text Data Vectorization Model of Ukrainian-Language Internet Communication Content. CEUR Workshop Proceedings, 2022, vol. 3171, pp. 561–571. https://ceur-ws.org/Vol-3171/paper45.pdf

2. Mann S., Arora J., Bhatia M., Sharma R., Taragi R. Twitter Sentiment Analysis Using Enhanced BERT, in: Kulkarni, A.J., Mirjalili, S., Udgata, S.K. Intelligent Systems and Applications. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 959. Springer, Singapore, 2023, pp. 263-271. DOI:10.1007/978-981-19-6581-4_21.

3. Wei Li, Wei Shao, Shaoxiong Ji, Erik Cambria. BiERU: Bidirectional emotional recurrent unit for conversational sentiment analysis. Neurocomputing (2022): 73-82. DOI: 10.1016/j.neucom.2021.09.057.

4. Robert Marcec, Robert Likic. Using Twitter for sentiment analysis towards AstraZeneca/Oxford, Pfizer/BioNTech and Moderna COVID-19 vaccines. Postgraduate Medical Journal, Volume 98, Issue 1161, (2022): 544–550. DOI: 10.1136/postgradmedj-2021-140685

5. Miftahul Qorib, Timothy Oladunni, Max Denis, Esther Ososanya, Paul Cotae. Covid-19 vaccine hesitancy: Text mining, sentiment analysis and machine learning on COVID-19 vaccination Twitter dataset. Expert Systems with Applications (2023). DOI: 10.1016/j.eswa.2022.118715.

6. Jochen Hartmann, Mark Heitmann, Christian Siebert, Christina Schamp. More than a Feeling: Accuracy and Application of Sentiment Analysis. International Journal of Research in Marketing (2022). DOI: 10.1016/j.ijresmar.2022.05.005.

7. Lazorenko Ya., Sinitsyn I., Shevchenko V. Identyfikatsiia perevazhnoi movy cpilkuvannia liudyny. Problemy prohramuvannia. 2022. № 3-4. Spetsialnyi vypusk, c. 271-280. DOI: 10.15407/pp2022.03-04.271

8. Kovalchuk O.V., Slobodzian V.O., Mazurets O.V., Barmak O.V. Metod formuvannia binarnoho klasyfikatoru ukrainomovnoho internet-kontentu. Zbirnyk naukovykh prats za materialamy XIV Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Aktualni problemy kompiuternykh nauk APKN-2022». Khmelnytskyi, 2022.

9. Crawlee.Dev. A web scraping and browser automation library. 2023. https://crawlee.dev.

10. Sentiment Analysis of Movie Reviews with Googles BERT. 2023. https://medium.com/mlearning-ai/sentiment-analysis-of-movie-reviews-with-googles-bert-c2b97f4217f

11. Panchenko D., Maksymenko D., Turuta O., Yerokhin A., Daniiel Y., Turuta O. Evaluation and Analysis of the NLP Model Zoo for Ukrainian Text Classification, in: Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications. ICTERI 2021, Communications in Computer and Information Science, vol. 1698. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-20834-8_6

12. Hotline.Ua. Reviews of the store Rozetka. 2023. https://hotline.ua/ua/yp/2476/reviews

13. Ai.Facebook.Com., RoBERTa: An optimized method for pretraining self-supervised NLP systems. 2022. https://ai.facebook.com/blog/roberta-an-optimized-method-for-pretraining-self-supervised-nlp-systems.

14. Tfhub.Dev., Text preprocessing model xlm_roberta_multi_cased_preprocess. 2022. https://tfhub.dev/jeongukjae/xlm_roberta_multi_cased_preprocess/1.

15. Tensorflow.Org., Text.SentencepieceTokenizer. 2023. https://www.tensorflow.org/text/api_docs/python/text/SentencepieceTokenizer.

16. Tfhub.Dev., Unsupervised Cross-lingual Representation Learning at Scale. xlm_roberta_multi_cased_L-12_H-768_A-12. 2023. https://tfhub.dev/jeongukjae/xlm_roberta_multi_cased_L-12_H-768_A-12/1.

17. Huggindface.Co. XLM-RoBERTa (base-sized model). URL: https://huggingface.co/xlm-roberta-base.

18. Zalutska O., Molchanova M., Sobko O., Mazurets O., Pasichnyk O., Barmak O., Krak I. Method for Sentiment Analysis of Ukrainian-Language Reviews in E-Commerce Using RoBERTa Neural Network. CEUR Workshop Proceedings, 2023, vol. 3387, pp. 561–571. 2023. https://ceur-ws.org/Vol-3387/paper26.pdf

19. Kiprono Elijah Koech, Cross-Entropy Loss Function. 2023. https://towardsdatascience.com/cross-entropy-loss-function-f38c4ec8643e.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-74-80
УДК 621.924.7

ЗАЛЮБОВСЬКИЙ МАРК
Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»
https://orcid.org/0000-0002-9183-2771
e-mail: markzalubovskiy@gmail.com
ПАНАСЮК ІГОР
Київський національний університет технологій та дизайну
https://orcid.org/0000-0001-6671-4266
e-mail: panasjuk1961@gmail.com
КОШЕЛЬ ОЛЕКСАНДР
Київський національний університет технологій та дизайну
e-mail: a_koshel@ukr.net

ВИЗНАЧЕННЯ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ ЗНАЧЕНЬ РЕАКЦІЙ У КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАХ ГАЛТУВАЛЬНОЇ МАШИНИ, У ЯКІЙ ЄМНІСТЬ ЗДІЙСНЮЄ СКЛАДНИЙ ПРОСТОРОВИЙ РУХ

Технологічні операції галтування можна виконувати із застосуванням різного обладнання. Найбільш інтенсивно технологічний процес реалізується із використанням галтувальних машин, у яких робочі ємності виконують складне просторове переміщення. На сьогоднішній день розроблені різні типи таких машин з індивідуальними конструктивними та технологічними особливостями, які, з високою продуктивністю забезпечують виконання різних галтувальних технологічних операцій, зокрема шліфування, полірування чи глянцювання, зміцнення поверхневого шару деталей, відокремлення від ливників чи змішування речовин. Зі структурної точки зору, машини зі складним просторовим рухом ємності являють собою складні просторові механізми, у переважній більшості, з обертальними кінематичними парами. Важливим аспектом довговічної та безвідмовної роботи таких машин є належне проектування кінематичних пар з урахуванням реактивних навантажень, які виникають під час експлуатації машин. Таким чином, використовуючи САПР «SolidWorks» здійснено 3D моделювання галтувальної конструкції машини з додатковою рухомою ланкою шатуном з двома обертальними кінематичними парами, у якій ємність виконує складне просторове переміщення, з подальшим визначенням реакції в усіх обертальних кінематичних парах в залежності від зміни міжосьової відстані робочої ємності. В результаті проведених досліджень встановлено взаємозв'язок між зміною міжосьової відстані ємності та екстремальними значеннями реакцій, які будуть виникати в обертальних кінематичних парах. Отримані результати аналітичних досліджень можуть стати у нагоді на стадії проєктування аналогічного галтувального обладнання.

Ключові слова: кінематичні пари, реакції, ємність, просторовий рух.

ZALYUBOVSKYI MARK
Open International University of Human Development "Ukraine"
PANASYUK IGOR, KOSHEL OLEXANDR
Kyiv National University of Technology and Design

DETERMINATION OF EXTREME VALUES OF REACTIONS IN KINEMATIC COUPLES OF A TURNING MACHINE IN WHICH THE CAPACITY PERFORMS COMPLEX SPATIAL MOVEMENT

Technological operations of felting can be performed using various equipment. The most intensive technological process is implemented with the use of rolling machines, in which working containers perform complex spatial movement. To date, various types of such machines with individual structural and technological features have been developed, which, with high productivity, ensure the performance of various felting technological operations, in particular - grinding, polishing or glossing, strengthening of the surface layer of parts, separation from sprues or mixing of substances. From a structural point of view, machines with complex spatial movement of the container are complex spatial mechanisms, in the vast majority, with rotational kinematic pairs. An important aspect of the long-lasting and trouble-free operation of such machines is the proper design of kinematic pairs, taking into account the reactive loads that arise during the operation of the machines. Thus, using CAD "SolidWorks", 3D modeling of the rolling structure of the machine with an additional moving link connecting rod with two rotational kinematic pairs, in which the capacity performs complex spatial movement, with subsequent determination of the reaction in all rotational kinematic pairs depending on the change in the interaxial distance of the working capacity, was carried out. As a result of the conducted research, the relationship between the change in the interaxial distance of the container and the extreme values of the reactions that will occur in the rotational kinematic pairs has been established. The obtained results of analytical studies can be useful at the stage of designing similar felting equipment.

Key words: *kinematic pairs, reactions, capacity, spatial motion.*

Постановка задачі. У машинобудуванні, легкій та інших галузях промисловості широко застосовуються галтувальні технологічні операції [1]. До таких операцій відносять покращення якості поверхні виробів [2, 3], зміцнення поверхневого шару деталей [4], що виникає за рахунок пластичної деформації співударом незакріплених виробів зі стінками ємності та робочими тілами наповнювача, відділення деталей від ливників [5, 6] тощо. Таким способом обробляються такі деталі легкої промисловості, як підбори взуття [7], фурнітурні полімерні вироби, деталі замка «блискавка» [8] з цинкових сплавів, гудзики [9] та інші деталі та вироби, до яких можна застосувати перевірку якості органолептичним методом.

Доведено [10], що реалізувати дану технологічну операцію, із досягненням найбільшої продуктивності, можна із використанням галтувальних машин, у яких робоча ємність здійснює складний

просторовий рух, зокрема, – одночасно переміщається у трьох взаємоперпендикулярних площинах та виконує обертання навколо власної осі.

У свою чергу, машини зі складним просторовим переміщенням робочих ємностей характеризуються складністю своєї будови, яка може мати негативний вплив на експлуатаційні властивості. Одним із проявів такого впливу може бути виникнення реакцій у кінематичних парах галтувальної конструкції машини, які здатні вплинути на зниження надійності та погіршення експлуатаційних властивостей.

Відомі [10] різні конструкції галтувальних машин зі складним просторовим переміщенням робочих ємностей з індивідуальними конструктивними особливостями. Наявність відмінних конструктивних особливостей зумовлюють виникнення різних за значенням навантажень у кінематичних парах, які будуть виникати під час експлуатації відповідної машини. Важливою задачею є порівняльне визначення значень цих реакцій у кінематичних парах машини при відповідних експлуатаційних умовах.

Аналіз досліджень та публікацій. У роботах [11, 12] представлено силове дослідження «базової» конструкції машини типу «Turbula» при роботі на холостому та робочому ході. Результати даних досліджень стали основою для проведення подальших порівняльних силових досліджень інших розроблених галтувальних конструкцій машин зі складним просторовим переміщенням робочих ємностей. Також, у [10] зазначається, що кожну розроблену конструкцію галтувальної машини раціонально використовувати у тому випадку, якщо середнє арифметичне максимальних значень реакцій (осьових та радіальних) в шести обертальних кінематичних парах розробленої конструкції машини не перевищувало більш ніж в 1,5 разів середнє арифметичне максимальних значень реакцій в усіх відповідних обертальних кінематичних парах «базової» конструкції машини:

$$1{,}5\sum_{i=1}^{6} R_{x(об.КП)i}^{БКМ} \geq \sum_{i=1}^{6} R_{x(об.КП)i}^{РКМ}, \quad (1)$$

де $R_{x(об.КП)i}^{БКМ}$ – максимальне значення реакції у обертальній кінематичній парі «базової» конструкції машини, $R_{x(об.КП)i}^{РКМ}$ – максимальне значення реакції у відповідній обертальній кінематичній парі розробленої конструкції галтувальної машини, а також окремо взяте, максимальне значення реакції у будь-якій обертальній кінематичній парі розробленої конструкції галтувальної машини не перевищувало більш ніж у 2 рази відповідне максимальне значення реакції у тій само кінематичні парі «базової» конструкції машини:

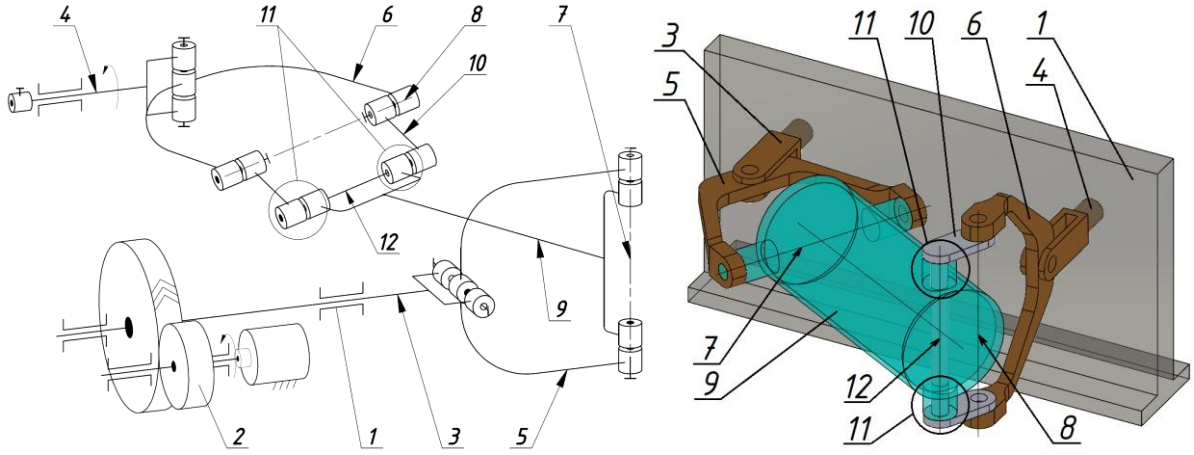
$$2\,R_{x(об.КП)i}^{БКМ} \geq R_{x(об.КП)i}^{РКМ}. \quad (2)$$

Окрім того, у [13] представлені силові дослідження галтувальної машини, що містить додаткову рухому ланку коромисло з вертикальною віссю обертання, у [14] – галтувальної машини, що містить додаткову рухому ланку коромисло з горизонтальною віссю обертання, у [15] – галтувальної машини, що оснащена додатковою рухомою ланкою повзуном, у [16] – галтувальної машини із застосуванням вищої кінематичної пари четвертого класу, у [17] – галтувальної машини з двома ємностями, котрі рухомо з'єднані між собою поступальною кінематичною парою.

Виділення невирішених частин. У той само час, не зважаючи на проведені силові дослідження зазначених вище конструкцій галтувальних машин зі складним просторовим переміщенням ємностей, на сьогоднішній день відсутня інформація щодо аналогічного силового дослідження, з точки зору визначення екстремальних значень реакцій у кінематичних парах, галтувальної машини [14], що містить додаткову рухому ланку шатун з двома обертальними кінематичними парами. Відповідно, не досліджено вплив міжосьової відстані робочої ємності, на зміну екстремальних значень реакцій в кінематичних парах машини.

Формулювання цілей. Метою роботи є визначення екстремальних значень реакцій у кінематичних парах галтувальної машини з додатковою рухомою ланкою шатуном з двома обертальними кінематичними парами, у якій робоча ємність здійснює складне просторове переміщення із застосуванням САПР SolidWorks, а також дослідження впливу зміни міжосьової відстані ємності, на екстремальні значення реакцій в кінематичних парах.

Виклад основного матеріалу. Було розроблено конструкцію галтувальної машини з додатковою рухомою ланкою шатуном з двома обертальними кінематичними парами, яка містить станину 1, розміщений в ній привід 2, ведучий 3 та ведений 4 вали, що встановлені в станині паралельно в одній площині. Вали 3 та 4 шарнірно з'єднані другими кінцями з ведучою 5 та веденою 6 вилками відповідно, діаметрально взаємно перпендикулярні геометричні осі яких 7 і 8 є осями кріплення ємності 9 та шатуна 10, вісь 12 якої проходить в середині ємності, відповідно. Ємність 9 та шатун 10 рухомо з'єднані між собою за допомогою обертальної кінематичної пари 11. Вісь обертання 12 кінематичної пари 11 паралельна до вісі кріплення 8. Кінематична схема просторового механізму машини представлена на рис. 1.а, модель машини – на рис. 1.б.



а *б*

Рис. 1. Галтувальна машина з додатковою рухомою ланкою шатуном з двома обертальними кінематичними парами: а – кінематична схема, б – модель машини

При моделюванні даної конструкції машини у САПР SolidWorks її геометричні параметри приймали максимально наближеними до геометричних параметрів промислового змішувача «Turbula T10B», дані геометричні параметри представлені у таблиці 1.

Таблиця 1

Геометричний параметр машини	Значення коефіцієнту δ		
	1,2	1,4	1,6
Діаметр робочої ємності $d_{РЄ}$	0,32 м	0,32 м	0,32 м
Довжина (між торцями) робочої ємкості $l_Ц$	0,43 м	0,48 м	0,54 м
Міжосьова відстань вилки l_B	0,27 м	0,27 м	0,27 м
Міжосьова відстань робочої ємкості $l_{РЄ}$	0,33 м	0,38 м	0,44 м
Об'єм робочої ємкості $V_{РЄ}$	0,032 м^3	0,036 м^3	0,041 м^3
Маса усіх рухомих деталей машини m_D	50 кг	52 кг	53,2 кг
Кутова швидкість ведучого валу машини $\omega_{веду.}$	3,3 с$^{-1}$ (32 об/хв)	3,3 с$^{-1}$ (32 об/хв)	3,3 с$^{-1}$ (32 об/хв)

У даній конструкції машини, після додавання в кінематичний ланцюг додаткової рухомої ланки – шатуна з двома обертальними кінематичними парами було виключено пасивний зв'язок [18], цим самим покращено експлуатаційні властивості. Внаслідок таких конструктивних змін з'являється можливість змінювати міжосьову відстань робочої ємкості $l_{РЄ}$.

Виходячи з вищесказаного, важливим аспектом силового дослідження є визначення впливу зміни міжосьової відстані робочої ємкості $l_{РЄ}$ на значення реакцій в кінематичних парах машини. Силове дослідження виконували за допомогою САПР SolidWorks. Таким чином, збільшували міжосьову відстань робочої ємкості $l_{РЄ}$ та паралельно визначали зміну реакцій в усіх обертальних кінематичних парах галтувальної машини. Окрім того, для кожної реакції визначали її екстремальні значення. При цьому, зміна міжосьової відстані робочої ємкості $l_{РЄ}$ виражалася коефіцієнтом δ, який був раніше запропонований у роботах [13–17]. Коефіцієнт δ для даної конструкції машини розраховувався наступним чином:

$$\lambda = l_{РЄ+ДРЛ} / l_B. \quad (3)$$

де $l_{РЄ+ДРЛ}$ – сумарна міжосьова довжина робочої ємності та шатуна, l_B – міжосьова довжина ведучої або веденої вилок. Дослідження виконувалися для таких значень коефіцієнту δ: 1,2; 1,4; 1,6.

Також в межах порівняння з силовим дослідженням «базової» конструкції машини, яке представлено у роботах [11, 12], визначали «граничну» міжосьову відстань робочої ємкості, подальше збільшення якої буде призводити до значного зросту максимальних значень реакцій у відповідних кінематичних парах. Розрахункова схема для визначення реакцій у кінематичних парах просторового механізму машини з додатковою рухомою ланкою шатуном з двома обертальними кінематичними парами представлено на рис. 2.

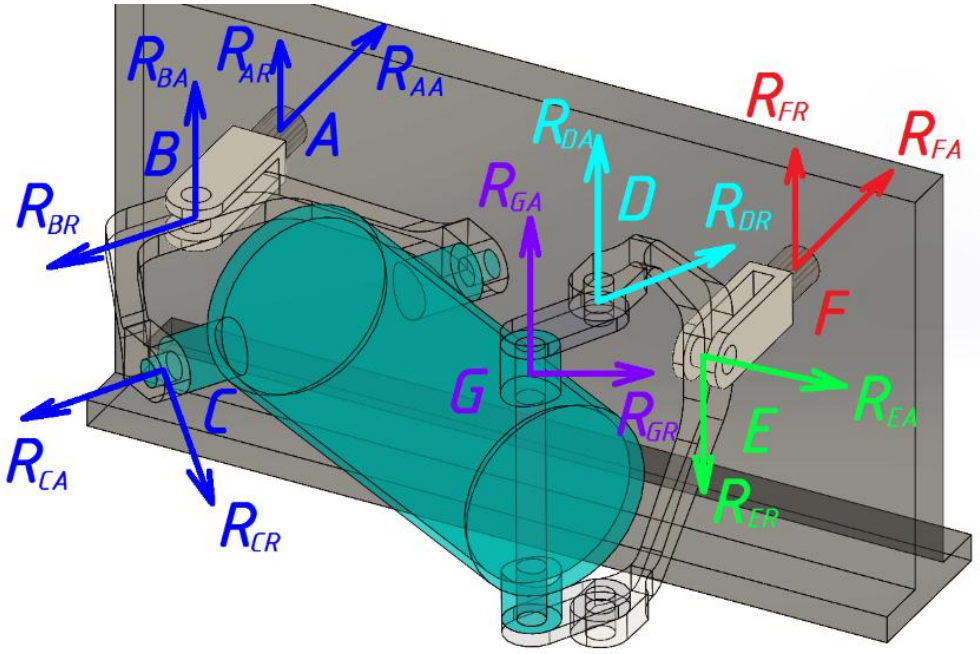


Рис. 2. Розрахункова схема для визначення реакцій в кінематичних парах просторового механізму галтувальної машини з додатковою рухомою ланкою шатуном з двома обертальними кінематичними парами

Визначали максимальні значення осьових та радіальних складових повних реакцій R в семи обертальних кінематичних парах п'ятого класу A, B, C, D, E, F, G: R_{AA} – осьова складова реакції в кінематичній парі «станина – ведучий вал»; R_{AR} – радіальна складова реакції в кінематичній парі «станина – ведучий вал»; R_{BA} – осьова складова реакції в кінематичній парі «ведучий вал – ведуча вилка»; R_{BR} – радіальна складова реакції в кінематичній парі «ведучий вал – ведуча вилка»; R_{CA} – осьова складова реакції в кінематичній парі «ведуча вилка – робоча ємність»; R_{CR} – радіальна складова реакції в кінематичній парі «ведуча вилка – робоча ємність»; R_{DA} – осьова складова реакції в кінематичній парі «ведена вилка – шатун»; R_{DR} – радіальна складова реакції в кінематичній парі «ведена вилка – шатун»; R_{EA} – осьова складова реакції в кінематичній парі «ведена вилка – ведений вал»; R_{ER} – радіальна складова реакції в кінематичній парі «ведена вилка – ведений вал»; R_{FA} – осьова складова реакції в кінематичній парі «ведений вал – станина»; R_{FR} – радіальна складова реакції в кінематичній парі «ведений вал – станина»; R_{GA}, R_{GR} – осьова та радіальна складові реакцій у кінематичній парі «робоча ємність – шатун».

У таблиці 2 представлено (у порівнянні з екстремальними значеннями реакцій у кінематичних парах «базової» конструкції машини, що виникають при коефіцієнту δ=1) визначені за допомогою САПР SolidWorks екстремальні значення реакцій в усіх обертальних кінематичних парах досліджуваної конструкції машини в залежності від зміни коефіцієнту δ.

Таблиця 2

		Коефіцієнт δ, що характеризує відношення $l_{РЄ+ДРЛ} / l_B$			
		1,0 «базова» конструкція	1,2	1,4	1,6
Значення реакцій в кінематичних парах машини, при її роботі на холостому ході	R_{AA}, [Н]	88	315	619	640
	R_{FA}, [Н]	68	231	580	611
	R_{AR}, [Н]	405	1282	1688	2100
	R_{FR}, [Н]	608	1275	1800	2002
	R_{BA}, [Н]	198	510	490	899
	R_{EA}, [Н]	124	538	508	901
	R_{BR}, [Н]	294	909	1222	1245
	R_{ER}, [Н]	545	776	925	766
	R_{CA}, [Н]	95	431	537	615
	R_{DA}, [Н]	194	430	536	619
	R_{CR}, [Н]	325	948	1200	1444
	R_{DR}, [Н]	342	1020	1325	1735
	R_{GA}, [Н]	-----	500	500	570
	R_{GR}, [Н]	-----	542	560	680

На основі представлених у таблиці 2 максимальних значень реакцій у кінематичних парах були побудовані відповідні графічні залежності, які показані на рис. 3 (радіальні складові реакцій) та рис. 4

(осьові складові реакцій).

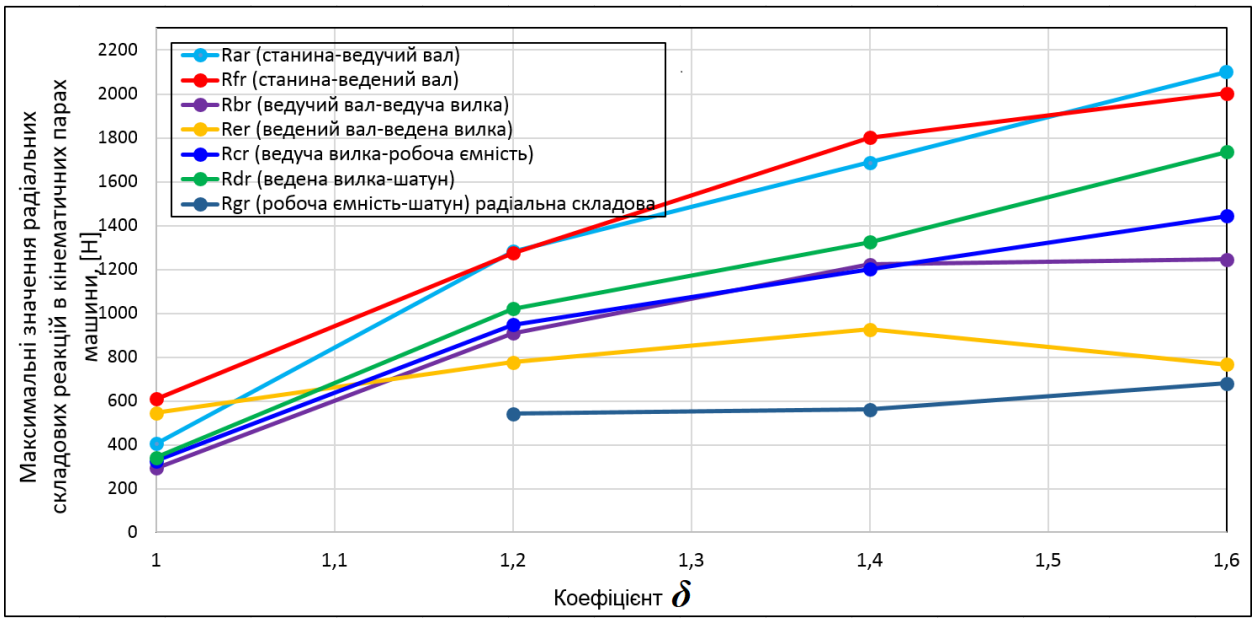


Рис. 3. Залежність екстремальних значень радіальних складових реакцій в кінематичних парах просторового механізму машини з додатковою рухомою ланкою шатуном з двома обертальними кінематичними парами від зміни коефіцієнту δ

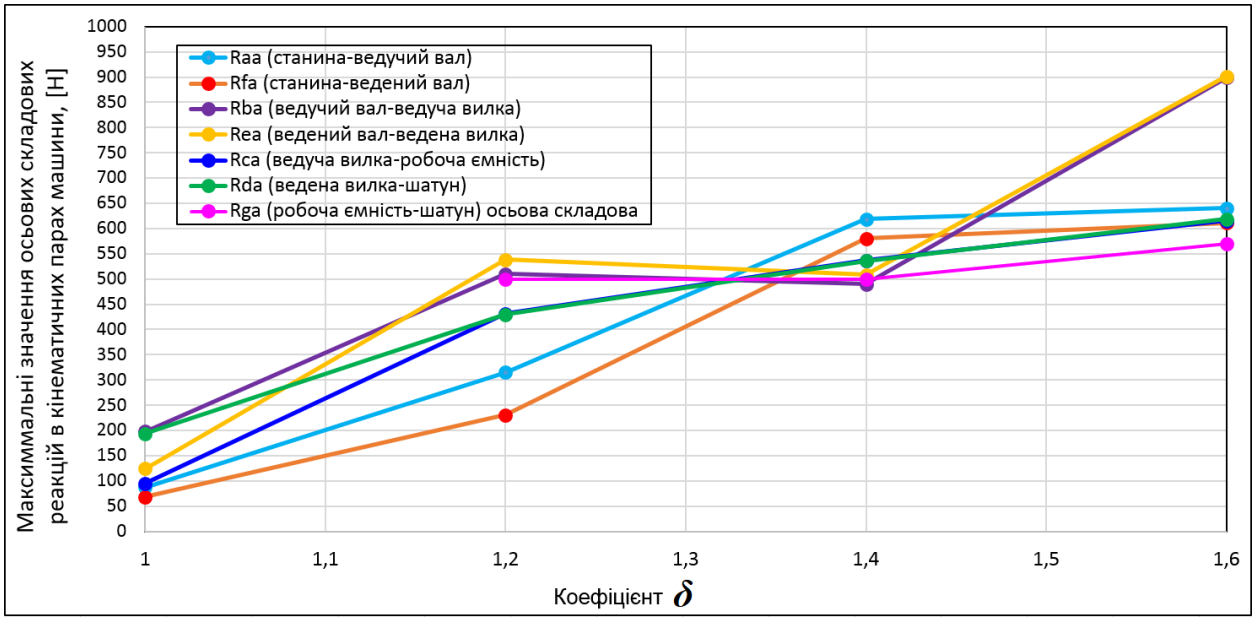


Рис. 4. Залежність екстремальних значень осьових складових реакцій в кінематичних парах просторового механізму машини з додатковою рухомою ланкою шатуном з двома обертальними кінематичними парами від зміни коефіцієнту δ

Результати силового дослідження даної конструкції машини показали наступні результати: при досягненні коефіцієнту $\delta=1,2$ екстремальні значення реакцій в усіх, без виключення, кінематичних парах розробленої конструкції машини перевищили екстремальні значення реакцій у «базовій» конструкції машини. Середньоарифметичне значення екстремумів реакцій по відношенню до середньоарифметичного значення екстремумів реакцій у «базовій» конструкції машини збільшилося у 2,6 разів, реакція R_{AA} по відношенню до реакції у «базовій» конструкції машини збільшилася у 3,6 разів.

Досить стрімке збільшення максимальних значень реакцій у даній конструкції машини зумовлює значну увагу щодо проєктування рухомих вузлів з точки зору їх надійності та довговічності.

На основі аналізу отриманих даних, з урахуванням нерівностей (1) та (2), а також лінійної інтерполяції екстремальних значень реакцій, був зроблений висновок, що конструкцію машини з додатковою рухомою ланкою шатуном, який містить дві обертальні кінематичні пари, найбільш раціонально використовувати лише в межах зміни коефіцієнту δ=[1,0 – 1,2].

Висновки

1. Здійснено силове дослідження екстремальних значень реакцій в усіх обертальних кінематичних парах галтувальної машини із використанням додаткової рухомої ланки шатуна з обертальними

кінематичними парами із застосуванням САПР SolidWorks.

2. Досліджено вплив зміни міжосьової відстані робочої ємності на максимальні значення реакцій в обертальних кінематичних парах машини.

3. Встановлено, що при досягненні коефіцієнту δ=1,2 екстремальні значення реакцій в усіх обертальних кінематичних парах розробленої конструкції машини перевищили екстремальні значення реакцій у «базовій» конструкції машини. Досліджувану конструкцію машини раціонально використовувати в діапазоні зміни коефіцієнту δ=[1,0 – 1,1].

Література

1. Бурмістенков О. П. Основі теорії та практична реалізація пристроїв для зачищувальної обробки формових деталей із полімерних матеріалів / О. П. Бурмістенков, І. В. Панасюк. − К. : НМК ВО, 1993. − 64 с.
2. Залюбовський М.Г. Техніко-економічне обґрунтування використання галтувальної машин типу «Turbula» при виконанні полірування поверхні дрібних полімерних виробів / М.Г. Залюбовський // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки – 2022. – № 4 (311). – С. 94–99.
3. Першин В.Ф. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа : монография / Першин В.Ф., Однолько В.Г., Першина С.В. – М. : Машиностроение, 2009. – 220 с.
4. Шварц А.И. Механизация и автоматизация производства формовых резино-технических изделий : Учебное пособие для рабочего образования / Шварц А.И. – М. : Химия, 1987. – 176 с.
5. Залюбовський М.Г. Експериментальне визначення енергії необхідної для відділення металевих деталей від ливників / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк, В.В. Малишев // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну – 2019. – № 5 (138). – С. 17–26.
6. Залюбовський М.Г. Аналітичне визначення часу виконання технологічної операції відділення металевих деталей замка «блискавка» від ливників / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк, В.В. Малишев // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну – 2019. – № 6 (140). – С. 9–18.
7. 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. – Хмельницький, 2007. – 255 с.
8. Залюбовський М.Г. Експериментальне дослідження впливу геометрії металевих відливок деталей замка «блискавка» на особливості їх обробки в галтувальній машині / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну – 2020. – № 2 (144). – С. 24–32.
9. Zalyubovskyi M.G., Panasyuk I.V., Smirnov Y.I., Klaptsov Y.V., Malyshev V.V. Experimental investigation of the handling process of polymeric units in a machine with a compacted space movement of working capacity. Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design. 2019. Vol. 2 (132). P. 24–32.
10. 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.
11. Залюбовський М.Г. Силове дослідження просторового шестиланкового механізму машини для обробки деталей (частина 1: дослідження при роботі машини на холостому ході) / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк, В.В. Малишев // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки – 2020. – № 5, том 31 (70). – С. 13–18.
12. Залюбовський М.Г. Силове дослідження просторового шестиланкового механізму машини для обробки деталей (частина 2: дослідження при роботі машини на робочому ході) / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки – 2020. – № 6, том 31 (70), частина 2. – С. 1–6.
13. Залюбовський М.Г. Силове дослідження просторового семиланкового механізму машини для обробки деталей / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки – 2020. – № 4 (287). – С. 127–133.
14. Залюбовський М.Г. Кінетостатичне дослідження шарнірних просторових механізмів галтувальних машин (частина 1: дослідження механізму з додатковою рухомою ланкою – коромислом) / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк, В.В. Малишев, В.В. Скідан // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну – 2021. – № 1 (154). – С. 9–18.
15. Залюбовський М.Г. Дослідження реакцій у кінематичних парах статично визначеного просторового механізму машини для обробки деталей / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк, В.В. Малишев // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки – 2021. – № 1, том 32 (71). – С. 1–6.
16. Залюбовський М.Г. Машина для обробки деталей з кінематичною парою четвертого класу – кінетостатичне дослідження / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк, В.В. Малишев // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки – 2021. – № 2, том 32 (71). – С. 6–11.
17. Залюбовський М.Г. Кінетостатичне дослідження шарнірних просторових механізмів галтувальних машин (частина 2: дослідження механізму машини з двома робочими ємкостями, що з'єднані поступальною кінематичною парою) / М.Г. Залюбовський, В.В. Скідан // Технології та інжиніринг – 2021. –

№ 2. – С. 20–28.

18. Серикбай К. Параметрический синтез пространственных рычажных механизмов : монография / К. Серикбай, Ж. Алгазы. – Алматы : КазНТУ им. К.И. Сатпаева, 2008. – 233 с.

References

1. Burmistenkov O. P. Osnovi teorii ta praktychna realizatsiia prystroiv dlia zachyshchuvalnoi obrobky formovykh detalei iz polimernykh materialiv / O. P. Burmistenkov, I. V. Panasiuk. − K. : NMK VO, 1993. − 64 s.

2. Zaliubovskyi M.H. Tekhniko-ekonomichne obgruntuvannia vykorystannia haltuvalnoi mashyn typu «Turbula» pry vykonanni poliruvannia poverkhni dribnykh polimernykh vyrobiv / M.H. Zaliubovskyi // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky – 2022. – № 4 (311). – S. 94–99.

3. Pershin V.F. Pererabotka sypuchih materialov v mashinah barabannogo tipa : monografiya / Pershin V.F., Odnolko V.G., Pershina S.V. – M. : Mashinostroenie, 2009. – 220 c.

4. Shvarc A.I. Mehanizaciya i avtomatizaciya proizvodstva formovyh rezino-tehnicheskih izdelij : Uchebnoe posobie dlya rabochego obrazovaniya / Shvarc A.I. – M. : Himiya, 1987. – 176 s.

5. Zaliubovskyi M.H. Eksperymentalne vyznachennia enerhii neobkhidnoi dlia viddilennia metalevykh detalei vid lyvnykiv / M.H. Zaliubovskyi, I.V. Panasiuk, V.V. Malyshev // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu – 2019. – № 5 (138). – S. 17–26.

6. Zaliubovskyi M.H. Analitychne vyznachennia chasu vykonannia tekhnolohichnoi operatsii viddilennia metalevykh detalei zamka «blyskavka» vid lyvnykiv / M.H. Zaliubovskyi, I.V. Panasiuk, V.V. Malyshev // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu – 2019. – № 6 (140). – S. 9–18.

7. Burmistenkov O.P. Vyrobnytstvo lytykh detalei ta vyrobiv z polimernykh materialiv u vzuttievii ta shkirhalantereinii promyslovosti : monohrafiia / O. P. Burmistenkov, B. M. Zlotenko, V. P. Konoval, I. V. Panasiuk, M. Ye. Skyba, O. M. Syniuk. – Khmelnytskyi, 2007. – 255 c.

8. Zaliubovskyi M.H. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu heometrii metalevykh vidlyvok detalei zamka «blyskavka» na osoblyvosti yikh obrobky v haltuvalnii mashyni / M.H. Zaliubovskyi, I.V. Panasiuk // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu – 2020. – № 2 (144). – S. 24–32.

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

10. Zaliubovskyi M.H. Mashyny zi skladnym rukhom robochykh yemkostei dlia obrobky polimernykh detalei : monohrafiia / M.H. Zaliubovskyi, I.V. Panasiuk, V.V. Malyshev. – K. : Universytet «Ukraina», 2018. – 228 s.

11. Zaliubovskyi M.H. Sylove doslidzhennia prostorovoho shestylankovoho mekhanizmu mashyny dlia obrobky detalei (chastyna 1: doslidzhennia pry roboti mashyny na kholostomu khodi) / M.H. Zaliubovskyi, I.V. Panasiuk, V.V. Malyshev // Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Seriia: tekhnichni nauky – 2020. – № 5, tom 31 (70). – S. 13–18.

12. Zaliubovskyi M.H. Sylove doslidzhennia prostorovoho shestylankovoho mekhanizmu mashyny dlia obrobky detalei (chastyna 2: doslidzhennia pry roboti mashyny na robochomu khodi) / M.H. Zaliubovskyi, I.V. Panasiuk // Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Seriia: tekhnichni nauky – 2020. – № 6, tom 31 (70), chastyna 2. – S. 1–6.

13. Zaliubovskyi M.H. Sylove doslidzhennia prostorovoho semylankovoho mekhanizmu mashyny dlia obrobky detalei / M.H. Zaliubovskyi, I.V. Panasiuk // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky – 2020. – № 4 (287). – S. 127–133.

14. Zaliubovskyi M.H. Kinetostatychne doslidzhennia sharnirnykh prostorovykh mekhanizmiv haltuvalnykh mashyn (chastyna 1: doslidzhennia mekhanizmu z dodatkovoiu rukhomoiu lankoiu – koromyslom) / M.H. Zaliubovskyi, I.V. Panasiuk, V.V. Malyshev, V.V. Skidan // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu – 2021. – № 1 (154). – S. 9–18.

15. Zaliubovskyi M.H. Doslidzhennia reaktsii u kinematychnykh parakh statychno vyznachenoho prostorovoho mekhanizmu mashyny dlia obrobky detalei / M.H. Zaliubovskyi, I.V. Panasiuk, V.V. Malyshev // Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Seriia: tekhnichni nauky – 2021. – № 1, tom 32 (71). – S. 1–6.

16. Zaliubovskyi M.H. Mashyna dlia obrobky detalei z kinematychnoiu paroiu chetvertoho klasu – kinetostatychne doslidzhennia / M.H. Zaliubovskyi, I.V. Panasiuk, V.V. Malyshev // Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Seriia: tekhnichni nauky – 2021. – № 2, tom 32 (71). – S. 6–11.

17. Zaliubovskyi M.H. Kinetostatychne doslidzhennia sharnirnykh prostorovykh mekhanizmiv haltuvalnykh mashyn (chastyna 2: doslidzhennia mekhanizmu mashyny z dvoma robochymy yemkostiamy, shcho ziednani postupalnoiu kinematychnoiu paroiu) / M.H. Zaliubovskyi, V.V. Skidan // Tekhnolohii ta inzhynirynh – 2021. – № 2. – S. 20–28.

18. Serikbaj K. Parametricheskij sintez prostranstvennyh rychazhnyh mehanizmov : mongrafiya / K. Serikbaj, Zh. Algazy. – Almaty : KazNTU im. K.I. Satpaeva, 2008. – 233 s.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-81-88
УДК 004.42:658.3

ЗОЛОТУХА РОМАН
Національний університет біоресурсів та природокористування України
https://orcid.org/0000-0003-3099-722X
e-mail: remko740@gmail.com
ГЛАЗУНОВА ОЛЕНА
Національний університет біоресурсів та природокористування України
https://orcid.org/0000-0002-0136-4936
e-mail: o-glazunova@nubip.edu.ua

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ АЛГОРИТМУ ДЛЯ ПІДБОРУ КОМАНДИ В IT ПРОЄКТАХ

У статті представлено дослідження розробки математичного алгоритму для підбору оптимальної команди в IT проєктах. Актуальність дослідження полягає у тому, що підбір оптимальної команди є критичним фактором успіху в IT проєктах. Для цього автори використали методи багатокритеріальної оптимізації, а також алгоритми машинного навчання для визначення зважених коефіцієнтів. В статті представлені результати дослідження та описана ефективність алгоритму багатокритеріальної оптимізації зі зваженими коефіцієнтами. Цільова функція – максимізація ефективності команди за допомогою балів отриманих після додавання вагових коефіцієнтів для кожного з кандидатів. Результатом роботи математичного алгоритму є формування команди, яка може бути рекомендована до роботи над IT проєктом.

Ключові слова: математична модель, підбір команди, IT проєкти, зважені коефіцієнти, hard skills, soft skills, експертні оцінки.

ZOLOTUKHA ROMAN
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
GLAZUNOVA OLENA
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

CREATING A MATHEMATICAL ALGORITHM FOR TEAM SELECTION IN IT PROJECTS

The article presents a study on the development of a mathematical algorithm for selecting an optimal team in IT projects. The relevance of the research lies in the fact that selecting the optimal team is a critical success factor in IT projects. The main objective of the study is to explore modern approaches to team formation and to define an optimal framework for team selection that contributes to successful project execution and efficient resource utilization. The article sets forth the following tasks: to analyze the theoretical and methodological foundations of economic-mathematical modeling for candidate selection in teams; to develop a model for forming collectives in IT projects. The model examined in this research is a multi-criteria optimization model with weighted coefficients. It enables the consideration of various criteria for team selection, such as profession, qualification, hard and soft skills of candidates, English language proficiency, personality type, and salary expectations. To achieve this, the authors utilized multi-criteria optimization methods as well as machine learning algorithms to determine weighted coefficients. The article presents the research results and describes the effectiveness of the multi-criteria optimization algorithm with weighted coefficients. Additionally, recommendations are provided in the article regarding the practical utilization of the model in team selection within the IT sector. The objective function is the maximization of team efficiency through scores obtained after adding weighted coefficients for each candidate. The outcome of the mathematical algorithm's work is the formation of a team that can be recommended for working on an IT project.

Keywords: mathematical model, team selection, IT projects, weighted coefficients, hard skills, soft skills, expert evaluations.

Постановка проблеми

Задача підбору оптимальної команди для реалізації IT проєктів є ключовим етапом у досягненні успіху та ефективності проєкту. Для IT-компанії процес підбору кваліфікованих IT-фахівців – це завдання вибору найбільш підходящих за заданими критеріями кандидатів для вакансій. Вимоги та умови повинні відповідати профілю кандидата. Оптимальна команда забезпечує високу продуктивність, швидке виконання завдань та досягнення поставлених цілей. Крім того, оптимально зібрана команда може економити час та ресурси, знижуючи витрати на проєкт. Проте, створення такої команди вимагає значних ресурсів, включаючи час, кошти та зусилля від керівників проєкту та рекрутерів. Один із суттєвих шляхів поліпшення роботи в даному напрямку – науковий підхід до вирішення управлінських завдань з використанням економіко-математичного моделювання. Вирішення проблеми підбору збалансованої команди є актуальним і важливим завданням для підвищення ефективності IT проєктів. Відбір кандидатів для різних ролей у команді вимагає врахування різноманітних характеристик, таких як зарплатні очікування, спеціальність, рівень спеціаліста, володіння англійською мовою, тип особистості та володіння іншими інструментами, які є важливими для виконання задач. Крім того, необхідно забезпечити баланс команди та забезпечити ефективну співпрацю між її членами. Для вирішення цієї проблеми пропонуються математичні моделі, які дозволяють знаходити оптимальну комбінацію кандидатів, яка задовольняє вимоги проєкту та забезпечує баланс та ефективну співпрацю команди.

Аналіз останніх джерел та публікацій

Проблемі формування команд для реалізації проєктів, а також управлінню персоналом присвячено багато вітчизняних та іноземних праць. Зокрема у роботі [1] розглянуто існуючі в науковій літературі методи

розробки стратегій управління персоналом, а також запропоновано методичні положення розробки загальної стратегії управління персоналом.

У статті [2] авторами досліджено та запропоновано прототип математичної моделі управління кадрами з урахуванням специфіки діяльності ІТ-компаній з цільовою функцією моделі спрямованою на оптимізацію часу, який витрачають HR-менеджери на роботу з підбору кадрів в ІТ-команди. Вирішення проблеми планування, управління та оптимального використання наявних людських ресурсів у виробничому процесі за допомогою математичного моделювання досліджували автори статті [3]. Важливо зазначити, що дана стаття враховує фактор пандемії COVID 19 та проблема скорочення кількості працівників, що зараз так само актуально і для ІТ ринку України в умовах повномасштабної агресії російської федерації та стагнації ІТ-ринку в Україні. Застосування, запропонованої авторами, моделі було досліджено на практиці, та доведено ефективність математичного моделювання та управління людськими ресурсами.

У сучасній науковій літературі [3–6] часто зустрічається комбінування математичних моделей та інтуїції для пошуку оптимального балансу в управлінні колективами.

Метою роботи є розробка математичного алгоритму формування команди в ІТ проєктах, яка буде враховувати специфіку ІТ-ринку. Модель буде враховувати різні критерії, такі як професія, кваліфікація, hard skills та soft skills кандидатів, знання англійської мови, тип особистості та зарплатні очікування, що допоможе забезпечити оптимальний склад команди для успішного виконання проєктів.

Для досягнення мети дослідження поставлено наступні завдання: дослідження особливостей та підходів до підбору команди в ІТ проєктах для визначення основних критеріїв та методів оцінки кандидатів; розробка математичного алгоритму багатокритеріальної оптимізації зі зваженими коефіцієнтами для підбору команди. Визначення критеріїв та їх вагових коефіцієнтів для оцінки кандидатів; використання побудованої моделі для підбору команди в ІТ проєктах на основі змодельованих даних; оцінка ефективності розробленого алгоритму; висновки та рекомендації щодо використання розробленої моделі у практиці підбору команди в ІТ сфері.

Виклад основного матеріалу

ІТ компанії можуть бути різних типів в залежності від їхньої спеціалізації, розміру та організаційної структури. Зокрема можна виділити наступні типи:

- Аутстафінгові компанії:
  - Основна мета цих компаній – забезпечити клієнтів тимчасовим персоналом для виконання специфічних проєктів або завдань.
  - Процес формування команди може бути гнучким та швидким, оскільки часто необхідно забезпечити команду на короткий термін.
  - Оцінка кандидатів може здійснюватися швидко, іноді більше з фокусом на технічні навички та досвід, аніж на соціальні або комунікативні навички.
- Аутсорсингові компанії:
  - Компанії працюють над зовнішніми проєктами для клієнтів, тому можуть бути необхідні різні команди з різними спеціалізаціями та знаннями.
  - Підбір команди може займати тривалий час, оскільки необхідно враховувати вимоги та очікування замовників.
  - Кандидатів можуть оцінювати не тільки за їхніми технічними навичками, але й за комунікативними здібностями, здатністю працювати у команді та замовниками.
- Продуктові компанії:
  - Компанії спеціалізуються на розробці та підтримці власних продуктів, тому можуть шукати довгострокових співробітників, які будуть працювати над продуктами на постійній основі.
  - Формування команди може бути орієнтоване на довгострокову співпрацю, тому може бути більший акцент на культурну відповідність та підбір команди з схожими цінностями.
  - Оцінка кандидатів може включати додаткові етапи, такі як технічні та адаптаційні завдання, для забезпечення відповідності потребам продукту.

Підбір кандидатів в команди під ІТ проєкти зазвичай здійснюється проєктними менеджерами, рекрутерами або відділом кадрового адміністрування в ІТ компаніях. Проєктний менеджер це фахівець, який відповідає за планування, організацію та контроль проєктів. Він керує командою розробників, дизайнерів та інших спеціалістів, забезпечує виконання завдань в рамках термінів і бюджету, вирішує проблеми, що виникають під час реалізації проєктів та спілкується зі замовниками. Рекрутер в ІТ компанії – це спеціаліст, який займається підбором та наймом нових співробітників для компанії, допомагає формувати колективи. Він проводить пошук кандидатів, проводить співбесіди, оцінює їхні навички та досвід, а також забезпечує взаємодію з потенційними претендентами на вакансії. Також, іноді, він відповідає і за звільнення працівників та заміну їх на більш підходящих кандидатів. Відділ кадрового адміністрування в ІТ компанії – це відділ, який забезпечує організаційні процеси, пов'язані з управлінням персоналом компанії. Він відповідає за адміністрування персональних даних співробітників, зарплатні розрахунки, управління кар'єрними напрямими співробітників та інші аспекти, пов’язані з управлінням персоналом.

Ці спеціалісти займаються пошуком, відбором та оцінкою потенційних кандидатів для вакансій, які виникають у процесі розробки програмного забезпечення або інших ІТ проєктів. Вони використовують різні методи та інструменти, включаючи співбесіди, технічні завдання та тестування, щоб визначити, які

кандидати найкраще підходять для ролей у команді. Також рекрутери можуть працювати у співпраці з менеджерами проєктів чи, наприклад, командними лідерами для забезпечення відповідності кандидатів вимогам та потребам проєктів.

Особливістю підбору кандидатів на ІТ проєкт є різносторонність навичок, які необхідно мати для його успішного виконання. Таким чином, головною умовою для успішного прийняття заявки кандидата на вакантну посаду є максимальна відповідність його пропозиції до вимог проєкту. В нашому дослідженні для розробки математичного алгоритму підбору кандидатів на ІТ проєкт ми будемо враховувати наступні фактори: напрям діяльності кандидата, рівень володіння кандидата основними (hard) скілами, тип особистості кандидата, винагороду кандидата, рівень володіння англійською мовою, а також тип особистості. Метою такого рішення буде пришвидшення пошуку потенційних кандидатів та спрощення процесу формування колективів, які будуть готові до виконання задач на проєкті. Також ми допускаємо, що дане рішення призведе і до оптимізації бюджетів на проєкті, що в свою чергу, впливатиме і на дохідність для ІТ-компанії. Розроблена модель надасть менеджеру проєкту рекомендації стосовно підбору найбільш ефективних кандидатів у команди, які відповідають заявленим потребам проєкту.

Для вирішення поставленого завдання побудови математичного алгоритму підбору кандидатів в команди для ІТ проєктів нам необхідно розділити цей процес на дві ітерації:

- Відбір кандидатів з загальної бази кандидатів, за відповідністю до вимог, що надані проєктним менеджером.
- Формування з відібраних кандидатів оптимальних команд, які зможуть ефективно виконати поставлену задачу.

Візьмемо тестовий проєкт, з заданими вимогами. Для успішної реалізації проєкту необхідно 2 Front-End розробники та 1 дизайнер. Розробники повинні володіти інструментами: Git, Jira, Figma. Дизайнер: Jira, Figma, Miro. Рівень сформованості фахових компетентностей не нижче middle. Володіння іноземною мовою для розробників допускається на рівні B1 для читання документації, дизайнер повинен володіти англійською мовою не нижче рівня C1 для взаємодії з замовником проєкту. Зарплатні очікування для кандидатів: розробники верхня межа 3000$ та 2500$, для дизайнера 1800$. Рівень сформованості софт скілів має бути не нижчим за 75 балів. Представимо дані вимоги у вигляді таблиці:

Таблиця 1

Вимоги майбутнього ІТ-проєкту

ID проєкту	Професійний напрям	Рівень сформованості фахових компетентностей	Рівень володіння англійською мовою	Зарплатні очікування	Володіння інструментами та технологіями	Рівень сформованості софт скілів
112	Front-End	middle	B1	2500	Git, Jira, Figma	75
112	Front-End	middle	B1	3000	Git, Jira, Figma	75
112	Designer	middle	C1	1800	Jira, Figma, Miro	75

Тепер сформулюємо тестову базу наявних кандидатів, до яких можна буде застосувати алгоритм автоматичного підбору команди:

Таблиця 2

Кандидати в команду ІТ-проєкту

ID Кандидата	Професійний напрям	Рівень сформованості фахових компетентностей	Рівень володіння англійською мовою	Зарплатні очікування	Володіння інструментами та технологіями	Рівень сформованості софт скілів
1	2	3	4	5	6	7
23456	Front-End	middle	B1	1700	Git, Jira, Figma	80
23457	Designer	middle	C1	1300	Figma, Jira, Miro	75
23458	Designer	middle	B2	1700	Jira, Adobe Photoshop	90
23459	Designer	junior	B1	800	Figma	60
23460	Designer	senior	C2	2200	Figma, Jira, Miro	85
23461	Front-End	senior	C1	3400	Figma, Jira, Miro, Git	40
23462	Front-End	senior	C1	4000	Figma, Jira, Miro, Git	75
23463	Front-End	trainee	B2	300	Figma, Jira, Git	55

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
23464	Front-End	senior	B1	3000	Git, Jira, Figma	25
23465	Front-End	middle	B2	2300	Git, Jira	45
23466	Front-End	middle	C1	1800	Git, Jira, Figma, Miro	80
23467	Designer	trainee	C1	250		80
23468	Designer	junior	A2	600	Figma	90
23469	Designer	middle	C2	1000	Jira, Figma, Miro	80
23470	Designer	senior	C1	1500	Figma, Jira	75
23471	Front-End	middle	C1	1500	Git, Jira, Figma	80
23472	Front-End	middle	C1	2000	Git, Jira, Figma	90
23473	Designer	senior	B2	2200	Jira, Figma, Miro	50
23474	Designer	trainee	B1	0	Jira, Miro	70
23475	Front-End	trainee	B1	300	Git, Jira, Figma	80
23476	Front-End	trainee	A1	500	Git, Jira	90
23477	Front-End	junior	B2	1000	Git, Jira, Figma	95
23478	Front-End	senior	B2	2800	Git, Jira, Figma, Miro	80
23479	Front-End	senior	A1	3000	Git, Jira, Figma	75

Даний набір якісних характеристик кандидатів та вимог до проєкту легко читається, проте не підходить для математичних розрахунків. Позначимо ці фактори якісної оцінки компетенцій кандидата, як *Xn*. Тоді кожен фактор отримує власний номер:

- *X1* - рівень сформованості фахових компетентностей;
- *X2* - володіння англійською мовою;
- *X3* - зарплатні очікування;
- *X4* - володіння інструментами та технологіями (наприклад Git, Jira, Figma і тд.)
- *X5* - рівень сформованості софт скілів (професійний ріст та потенціал розвитку, креативність та інноваційність, організаційні здібності та уміння планувати роботу, пристосованість до змін та швидкість вирішення проблем).

Для вирішення поставленого завдання варто перевести всі показники у рейтингову систему, де максимальне значення становитиме 100. Далі розглянемо кожен фактор окремо:

- *X1* має рівні trainee, junior, middle та senior.
  Trainee = 25 балів, junior = 50 балів, middle = 75 балів, senior = 100 балів.
- *X2* може мати наступні варіанти:
  Рівень A1: базове володіння мовою для спростування основних потреб у повсякденних ситуаціях = 15 балів. Рівень A2: здатність розуміти і використовувати просту мову для основних комунікативних завдань і виразів = 30 балів. Рівень B1: володіння мовою, яке дозволяє розуміти основні ідеї зі звичайних ситуацій, виразити прості думки і здійснювати комунікацію на звичайні теми = 50 балів. Рівень B2: здатність розуміти складнішу мову і комунікувати ефективно на різноманітні теми, а також вести обговорення з використанням аргументів = 70 балів. Рівень C1 (високий): здатність зрозуміти велику кількість текстів різної тематики, висловлювати думки високого рівня складності і вести дискусії = 85 балів. Рівень C2: практичне володіння мовою на високому рівні, здатність розуміти та використовувати мову на професійному рівні = 100 балів.
- *X3* - зарплатні очікування це фактор, який треба розглядати в оберненому вигляді з точки зору проєктного менеджера для мінімізації витрати на проєкт та максимізації прибутку:
  0-1000 - 100 балів; 1000-1500 - 90 балів; 1500-2000 - 80 балів; 2000-2500 - 70 балів; 2500-3000 - 60 балів; 3000-3500 - 50 балів; 3500-4000 - 35 балів; 4000-5000 - 20 балів; 5000$ і більше - 5 балів.
- *X4* - треба розглядати окремо для кожного фахового напряму та відповідно до кількості інструментів та технологій, якими необхідно володіти для кожного проєкту:
  4 інструменти = 100 балів; 3 інструменти = 75 балів; 2 інструменти = 50 балів; 1 інструмент = 25 балів.
- *X5* - має фактичні результати оцінки кандидатів, які ми можемо використати для розрахунків.

Використавши запропоновану логіку відображення даних наші вимоги до проєкту будуть виглядати наступним чином:

Таблиця 3

Вимоги проєкту переведі у запропоновану рейтингову систему

ID	Професій ний напрям	Рівень володіння фаховою спеціальні стю	Рівень володіння англійсь кою мовою	Зарплатні очікування	Знання інструмент тів та технологій	Результат тесту на софт скіли	Сума балів
112	Front-End	75	50	70	75	75	345
112	Front-End	75	50	60	75	75	335
112	Designer	75	85	80	75	75	390

Також переведемо і вибірку кандидатів у числовий вимір, врахувавши рейтингову систему:

Таблиця 4

Дані про кандидатів переведені у запропоновану рейтингову систему

ID	Професійн ий напрям	Рівень володіння фаховою спеціальні стю	Рівень володіння англійсько ю мовою	Зарплатні очікування	Знання інструмент ів та технологій	Результат тесту на софт скіли	Сума балів
23456	Front-End	75	50	80	75	80	360
23457	Designer	75	85	90	75	75	400
23458	Designer	75	70	80	75	90	390
23459	Designer	50	50	100	25	60	285
23460	Designer	100	100	70	75	85	430
23461	Front-End	100	85	50	100	40	375
23462	Front-End	100	85	35	100	75	395
23463	Front-End	25	70	100	75	55	325
23464	Front-End	100	50	60	75	25	310
23465	Front-End	75	70	70	50	45	310
23466	Front-End	75	85	80	100	80	420
23467	Designer	25	85	100	25	80	315
23468	Designer	50	30	100	25	90	295
23469	Designer	75	100	100	75	80	430
23470	Designer	100	85	90	50	75	400
23471	Front-End	75	85	90	75	80	405
23472	Front-End	75	85	80	75	90	405
23473	Designer	100	70	70	75	50	365
23474	Designer	25	50	100	50	70	295
23475	Front-End	25	50	100	75	80	330
23476	Front-End	25	15	100	50	90	280
23477	Front-End	50	70	100	75	95	390
23478	Front-End	100	70	60	100	80	410
23479	Front-End	100	15	60	75	75	325

Для кожного кандидата буде створено таблицю з набором характеристик, які буде задано за допомогою рейтингової оцінки, запропонованої раніше.

Далі, по кожному показнику нам необхідно відібрати кандидатів, які підходять до вимог проєкту.

Сукупність характеристик кандидата можна представити наступним чином:

$$SCC = \Sigma(X_1, \ldots, X_5) \quad (1)$$

де *SCC* – загальна сукупність характеристик кандидата

Також представимо вимоги до проєкту, як *Yn*:

$$SPC = \Sigma(Y_1, \ldots, Y_1) \quad (2)$$

де *SPC* – загальна сукупність вимог проєкту.

Вимоги до проєкту якими оперує менеджер – це базова межа, яку має задовольнити сукупність характеристик кандидата. Виходячи з цього ми матимемо три варіанти результатів порівняння.

$$SCC / SPC < 1 \quad (3)$$

де характеристики кандидата нижчі за характеристики вказані у вимогах проєкту.

$$SCC / SPC = 1 \quad (4)$$

де характеристики кандидата відповідають визначеним характеристикам проєкту.

$$SCC / SPC > 1 \quad (5)$$

де характеристики кандидата вищі за зазначені характеристики проєкту.

Для нас задовільним сценарієм є 2 та 3, так як кандидат задовольняє вимоги, які надаються проєктним менеджером. В сценарії 1 кандидат відсіюється по одному з *Xn* факторів, тому не матиме опції перейти до другого етапу формування команди.

Для того, аби коректно відібрати кандидатів, нам треба розбити їх за фахом. В нашому випадку це Front-End розробник та дизайнер. Нехай фах буде позначатись як *j*.

Тепер необхідно відібрати кандидатів, які підходять до умов проєкту за кожним фактором:

$$CCR_j = \frac{X_n}{Y_n} \quad (6)$$

де X_n – оцінка фактора кандидата в балах;

Y_n – оцінка мінімального порогу надана проєктним менеджером.

Використавши запропоновану формулу отримаємо наступний список кандидатів:

Таблиця 5

Список відібраних кандидатів після перевірки на відповідність вимогам

ID	j	x1	x2	x3	x4	x5	Сума балів
23456	Front-End	75	50	80	75	80	360
23457	Designer	75	85	90	75	75	400
23466	Front-End	75	85	80	100	80	420
23470	Designer	100	85	90	100	75	400
23471	Front-End	75	85	90	75	80	405
23472	Front-End	75	85	80	75	90	405

Маємо 2 кандидати на позицію дизайнера та 4 кандидати на позицію розробників. Беремо до уваги умову проєкту, що нам потрібен 1 дизайнер та 2 розробники. Для цього, на основі експертної оцінки, вводимо вагові коефіцієнти, що б визначити найефективніших кандидатів, позначимо їх як *k*:

- X1 - рівень сформованості фахових компетентностей: *k* = 0.35
- X2 - володіння англійською мовою: *k* = 0.15
- X3 - зарплатні очікування: *k* = 0.1
- X4 - знання інструментів та технологій: *k* =0.2
- X5 - рівень сформованості софт скілів: *k* =0.2

Враховуючи визначені базові коефіцієнти розрахуємо вимоги до кандидатів надані проєктним менеджером, за наступною формулою:

$$IPR = \Sigma(Y_1 \times k, \ldots, Y_5 \times k) \quad (7)$$

де Y_n - оцінка базового фактору з вимог проєкту;

k - ваговий коефіцієнт фактора.

Отримуємо наступні результати:

Таблиця 6

Вимоги проєкту з урахуванням вагових коефіцієнтів

ID	j	x1	x2	x3	x4	x5	Сума балів
112	Front-End	26,25	7,5	7	15	15	70,75
112	Front-End	26,25	7,5	6	15	15	69,75
112	Designer	26,25	12,75	8	15	15	77

Для кожного кандидата розраховуємо рівень відповідності вимогам за наступною формулою:

$$ICR = \Sigma(X_1 \times k, \ldots, X_5 \times k) \quad (8)$$

де X_n - оцінка факторів кандидати;

Розрахувавши значення факторів за запропонованою формулою отримаємо наступні результати по кандидатам:

Таблиця 7

Оцінки кандидатів з урахуванням вагових коефіцієнтів

ID	j	x1	x2	x3	x4	x5	Сума балів
23456	Front-End	26,25	7,5	8	15	16	72,75
23457	Designer	26,25	12,75	9	15	15	78
23466	Front-End	26,25	12,75	8	20	16	83
23470	Designer	35	12,75	9	20	15	91,75
23471	Front-End	26,25	12,75	9	15	16	79
23472	Front-End	26,25	12,75	8	15	18	80

Тепер треба перейдемо до комплектування складу команди, і тут скористаємось принципом максимізації ефективності команди за допомогою балів отриманих після додавання вагових коефіцієнтів для кожного з кандидатів. Цільовою функцією тут виступатиме максимізація сумарно отриманих балів кандидатів в розрізі кожного напряму:

$$R_j = \frac{ICR}{IPR} \rightarrow max \quad (9)$$

де R_j - максимальна оцінка в розрізі фахового напряму діяльності;

ICR - сума балів кандидата;
IPR - сума балів мінімальних вимог проєктної документації.

Розрахуємо та виведемо найоптимальніший склад команди для роботи над ІТ-проєктом:

Таблиця 8

Найефективніший склад команди з вибірки кандидатів

ID	j	x1	x2	x3	x4	x5	Сума балів
23466	Front-End	26,25	12,75	8	20	16	83
23472	Front-End	26,25	12,75	8	15	18	80
23470	Designer	35	12,75	9	20	15	91,75

Порівняємо це з базовими вимогами на проєкті:

Таблиця 9

Порівняння відібраної команди з базовими показникам вимог проєкту

ID	j	x1	x2	x3	x4	x5	Сума балів
23466	Front-End	0	5,25	1	5	1	12,25
23472	Front-End	0	5,25	2	0	3	10,25
23470	Designer	8,75	0	1	5	0	14,75
Total		8,75	10,5	4	10	4	37,25

Таким чином, нам вдалось знайти кандидатів, які за заданими факторами є найкращим вибором для роботи над ІТ-проєктом з заданими параметрами. Загальна сукупність балів перевищила базову на 37,25, а кожен з відібраних кандидатів мінімум по 4 з 5 факторів перевершує очікування проєктного менеджера.

Висновки

У даному дослідженні було розроблено математичний алгоритм формування команд для ІТ-проєктів. Саме особливості ІТ ринку зумовили пошук інноваційних підходів до вирішення цього питання. Даний апарат базуючись на зважених критеріях може бути швидко модифікований під нові реалії часу, що робить його гнучким та незалежним від зовнішніх обставин. Авторами розроблений алгоритм, який базується на основних критеріях, які використовують HR-менеджери, проєктні менеджери та кадрові установи під час відбору кандидатів:

- рівень сформованості фахових компетентностей;

- володіння англійською мовою;
- зарплатні очікування;
- володіння інструментами та технологіями (наприклад Git, Jira, Figma і т. д.)
- рівень сформованості софт скілів.

Проте і ці характеристики кандидата можуть змінюватись в залежності від умов на ринку праці та інших зовнішніх факторів.

Складові алгоритму:

- Етап отримання базової інформації від проєктного менеджера, який далі буде вважатись мінімально допустимим для відбору кандидатів з бази даних кандидатів.
- Для перетворення інформації про кандидатів та базових вимог проєкту в числовий вимір для кожного характеристики була запропонована рейтингова система.
- Алгоритм перевіряє відповідність кандидатів до базових вимог за кожною характеристикою в розрізі фахових спеціальностей та відбирає тих кандидатів, які пройшли цю перевірку.
- На цьому етапі авторами пропонується додати до кожного фактора вагові коефіцієнти, розроблені на основі експертних оцінок.
- За допомогою вагових коефіцієнтів алгоритм перераховує оцінки кандидатів та базових оцінок IT-проєкту та виводить результати.
- Цільовою функцією виступає максимізація зваженої загальної командної оцінки, тому на цьому етапі алгоритм підбирає таку комбінацію кандидатів, яка максимізує цю цільову функцію і пропонує найефективнішу команду.

Запропонований алгоритм в результаті надає список кандидатів в команду, який максимізує вимоги задані проєктним менеджером. Подальшим розвитком даного алгоритму є додавання можливості формувати команди з урахуванням можливості відмови кандидата до співпраці. Також розширення факторів, які можуть впливати на кінцевий результат алгоритму та тестування алгоритму на більших об'ємах даних.

Література

1. Криворучко О. М. Розробка стратегій управління персоналом методом концептуального абстрагування / О. М. Криворучко, Т. О. Водолажська // Економіка транспортного комплексу. – 2016. – Вип. 28. – С. 69–83. – http://nbuv.gov.ua/UJRN/ektk_2016_28_8.

2. Івченко І.Ю. Моделювання управління кадрами на IT-ринку праці / І.Ю. Івченко, Л.М. Лінгур, Т.В. Філатова // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Економічна». 2021. № 101. С. 101–112.

3. Костич А. Математична модель для планування людських ресурсів у виробничому процесі / А. Костич, Б. Маріч, М. Кустура, В. Тімотіч // Міжнародний симпозіум DAAAM. – 2021. – Вип. 32. С. 4–9.

4. Кабаченко Д.В. Выбор и реализация стратегии управления персоналом предприятия / Д.В. Кабаченко, А.В. Луценко // Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія «Економічні науки». – Херсон : Видавничий дім «Гельветика». – 2015. – Вип. 15 (Ч.1). – С. 58–62. – http://ej.kherson.ua/journal/economic_15/1/16.pdf

5. Балабанов Л. В. Управління персоналом : підручник / Л. В. Балабанов, О. В. Сардак. – Київ : Центр учбової літератури, 2011. – 468 с.

6. Никифоренко В. Г. Стратегічне управління людськими ресурсами: Навчально-методичний посібник для самостійного вивчення дисципліни / В. Г. Никифоренко. – Одеса : Атлант, 2014. – 209 с.

7. Вітлінський В. В. Аналіз, моделювання та управління економічним ризиком: навчально-методичний посібник для самостійного вивчення дисципліни / В. В. Вітлінський, П. І. Верченко. – Київ : КНЕУ, 2011. – 292 с.

8. Масуд Б. Комплексна модель цільового програмування 0-1 вибору проекту / Б. Масуд, Б. Дональд, Д. Дона // Міжнародний журнал управління проектами. – 2001. – № 19. – С. 243–252.

References

1. Kryvoruchko O. M., Vodolajska T. O. Development of personnel management strategies by the method of conceptual abstraction. Economics of the transport complex. 2016. Issue 28. P. 69-83. http://nbuv.gov.ua/UJRN/ektk_2016_28_8.

2. Ivchenko I.Yu., Lingur L.M., Filatova T.V. Modeling of personnel management on the IT labor market. Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University, "Economic" series. 2021. No. 101. P. 101-112.

3. Kostych A., Marich B., Kustura M., Tymotych V. Mathematical model for planning human resources in the production process. DAAAM International Symposium. 2021. Issue 32. P. 4-9.

4. Kabachenko D.V., Lutsenko A.V. Selection and implementation of enterprise personnel management strategies. Scientific Bulletin of Kherson State University. Series "Economic Sciences". Kherson: "Helvetika" publishing house. 2015. Issue 15 (Part 1). p. 58–62. http://ej.kherson.ua/journal/economic_15/1/16.pdf

5. Balabanov L.V., Sardak O.V. Personnel management: textbook. Kyiv: Center for Educational Literature, 2011. 468 p.

6. Nikyforenko V. G. Strategic management of human resources: Educational and methodological guide for independent study of the discipline. Odesa: Atlant, 2014. 209 p.

7. Vitlinskyi V. V., Verchenko P. I. Analysis, modeling and management of economic risk: educational and methodological guide for independent study of the discipline. Kyiv: KNEU, 2011. 292 p.

8. Masud B., Donald B., Dona D. Complex model of target programming 0-1 project selection. International Journal of Project Management. 2001. No. 19. p. 243–252.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-89-97
УДК 678.5/678.6

ІВАНІШЕНА ТЕТЯНА
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0002-3206-9307
e-mail: ivanishenat@khmnu.edu.ua
МАНДЗЮК ІГОР
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0002-1899-9778
e-mail: mandziukih@khmnu.edu.ua
ТРУХІНА ОКСАНА
Хмельницький національний університет
oksana.ivanishena2014@gmail.com
ПЕКАРСЬКА ВАЛЕРІЯ
Хмельницький національний університет
lera20001706@gmail.com

ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ МАТЕРІАЛІВ ЯК ІНСТРУМЕНТ УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ПРИНЦИПІВ КРУГОВОЇ ЕКОНОМІКИ ВИРОБНИЦТВ

В роботі проаналізовано спектр матеріалів, які використовують для виготовлення виробів легкої промисловості. Для покращення екологічних характеристик матеріалів та удосконалення виробничих процесів легкої промисловості проведено оцінку життєвого циклу виробів легкої промисловості, виготовлених на основі первинної та вторинної сировини. Встановлено інвентаризаційні потоки при виготовленні матеріалів, визначено вплив процесів виробництва на екологічні класи, запропоновані основні механізми для менеджменту таких процесів.

Ключові слова: оцінка життєвого циклу, вироби легкої промисловості, переробка відходів, менеджмент відходів.

IVANISHENA TETIANA, MANDZYUK IGOR, TRUKNINA OKSANA, PEKARSKA VALERIY
Khmelnytskyi National University

ASSESSMENT OF THE LIFE CYCLE OF MATERIALS AS A TOOL FOR THE IMPROVEMENT OF LIGHT INDUSTRY PROCESSES AND THE IMPLEMENTATION OF THE PRINCIPLES OF THE CIRCULAR ECONOMY OF MANUFACTURING

The article analyzes the range of materials that are used for the manufacture of light industry products. In order to improve the environmental characteristics of materials and improve production processes of light industry, a life cycle assessment (LCF) of light industry products made on the basis of primary and secondary raw materials was carried out. Inventory flows during the production of materials were established, the impact of production processes on environmental classes was determined, and the main mechanisms for the management of such processes were proposed.

As a result of the analysis of the contributions (LCA) of light industry products based on primary and secondary raw materials, the most influential stages of the processing process were determined. The study included primary data from various processes in the life cycle, including mechanical processing, textile collection, and manual and automated sorting. Based on studies involving mechanical processing and a high percentage of recycled raw materials, the recycled yarn had the potential to reduce impacts including acidification, eutrophication and water consumption. In both cases, the impact of climate change was about a third smaller.

According to the analysis, primary fiber content, electricity production, textile collection process, textile waste management and dyeing were found to be the most affected. A small contribution was made by the processing process itself, manual and automatic sorting. In the analysis of textile collection, more efficient route planning can help reduce carbon emissions and reduce costs for companies.

Keywords: life cycle assessment, light industry products, waste processing, waste management.

Постановка проблеми

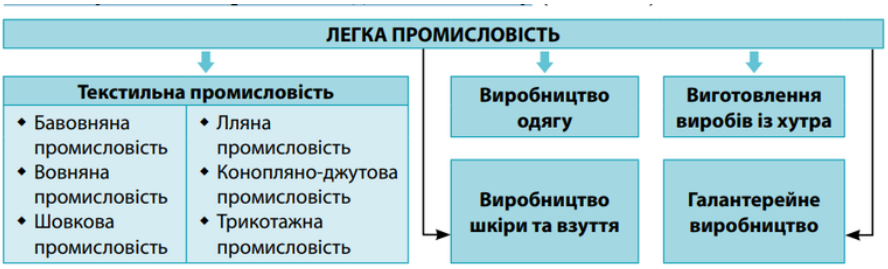
Питання, пов’язані зі збереженням довкілля, все більше відіграють важливу роль у легкій промисловості як з точки зору державних постанов, так і з точки зору очікувань споживачів. Усі продукти та послуги мають певний життєвий цикл. Життєвий цикл стосується періоду від фази сировини продукту до першого випуску готового продукту на ринок до його остаточного вилучення. Незважаючи на те, що сектор легкої промисловості є одним із найбільш споживчих секторів, методам переробки та регенерації в ньому не надається особливого значення. Оцінка та аналіз життєвого циклу (ОЖЦ) детально пояснює потенціал відходів (рис. 1), використання енергії та вплив на навколишнє середовище кожного етапу виробництва.

Промисловість має переглянути шляхи використання екологічних матеріалів і технологій, а також покращення стану переробки в цій галузі [1]. Комплексний підхід ОЖЦ зменшує ризик того, що нові рішення як для технологій виробництва текстилю, так і в цілому для легкої промисловості, які спрямовані на зменшення забруднення, просто перенесуть вплив на навколишнє середовище з однієї фази життєвого циклу на іншу або з одного типу впливу на навколишнє середовище на інший.

Рис. 1. Схема оцінки життєвого циклу виробу

Аналіз останніх джерел

Легка промисловість включає виробництво текстилю, одягу, шкіри та взуття, виготовлення виробів із хутра та галантерейне виробництво (рис. 2) і тому матиме декілька видів кінцевих продуктів, які відносяться до виробів легкої промисловості.



Склад легкої промисловості

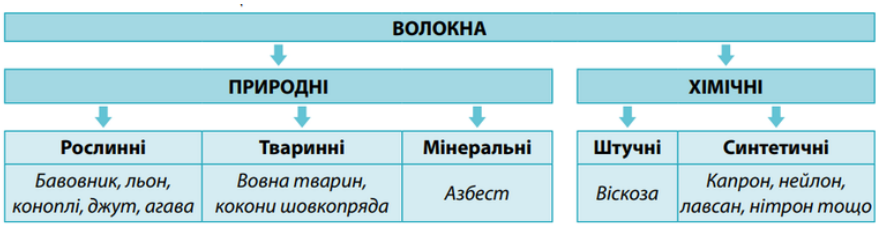
Рис. 2. Основні складові галузі легкої промисловості

Кінцевою продукцією текстильного виробництва є тканини. Швейна промисловість з тканин виробляє готовий одяг, інші вироби побутового та технічного призначення. Шкіряно-взуттєва промисловість виготовляє натуральну шкіру та шкірозамінники, а також вироби з них: взуття та шкіряний одяг. Хутряна промисловість спеціалізується на виготовленні виробів з хутра. Галантерейне виробництво виготовляє сотні дрібних побутових товарів повсякденного попиту [2]. Широкий асортимент виробів легкої промисловості пов'язаний і з різноманіттям сировини (матеріалів), які використовуються для їх виготовлення.

Легка промисловість найтісніше пов'язана виробничими зв'язками з сільським господарством та хімічною промисловістю.

З одного боку, для виробництва тканин, шкіри та хутра використовується рослинна, тваринна або хімічна сировина. З іншого боку, під час виробництва тканин та обробки шкур тварин використовують різні хімічні речовини: кислоти, луги, барвники.

Початковим виробництвом легкої промисловості є текстильне виробництво. Воно складається з групи виробництв, які виробляють різні за походженням та хімічним складом тканини. Для виробництва тканин у переробку йдуть волокна – довгі гнучкі нитки, які одержують з природних або синтетичних полімерів (рис. 3).



Сировина для легкої промисловості

Рис. 3. Основна сировина для легкої промисловості

Розрізняють природні та хімічні волокна. Природні волокна мають рослинне, тваринне або мінеральне походження. Рослинні волокна одержують при переробці кількох культурних рослин, які називаються волокнистими. Основа рослинного волокна – целюлоза.

Тваринні волокна за своїм хімічним складом є білковими полімерами, тому вони еластичні. Їх одержують з вовни тварин (овечок, ангорських кіз, лам, верблюдів, окремих порід собак) або коконів тутового шовкопряда.

До натуральної сировини зазвичай додають якусь частку хімічної та отримують штучні та синтетичні волокна. Синтетичне волокно є продукцією хімічної промисловості, його одержують в результаті переробки природного газу, нафти. До синтетичних волокон належать понад 600 тис. їх видів, з яких у промислових масштабах добувають близько десятої частини. Назви найвідоміших з них можна прочитати на етикетках у складі тканин: поліамідні (капрон, нейлон), поліестерні (лавсан), поліакрилові (нітрон) та інші волокна.

За останні роки в легкій промисловості вжито багато заходів щодо збору та покращення використання вторинних матеріальних ресурсів, але на даний час рівень використання значних видів відходів не можна вважати задовільним.

Вторинні матеріальні ресурси можуть використовуватися як сировина або як доповнення до неї в господарстві. Як і первинні вони являють собою природні, хімічні і змішані речовини (суміш природних та хімічних в різних включеннях і пропорціях).

На теперішній час найбільш перспективним і економічно ефективним для легкої промисловості є використання отриманих вторинних матеріальних ресурсів у вигляді волокнистих відходів та подальше використання їх, наприклад, для виробництва неклеєних матеріалів з високими теплозвукоутворюючими і гідроізоляційними властивостями.

Можливість використання різних видів в'яжучих речовин у процесі їх виробництва, обробки розчинами біопрепаратів, антипіренів та інших спеціальних інгредієнтів ще більше розширює сферу їх застосування в будівництві та інших галузях народного господарства.

Метою первинної переробки вторинної текстильної сировини є перетворення невикористаної сировини в придатну, тобто придатну для промислового використання. Технологічний процес первинної обробки полягає в очищенні від шкідливих мікробів, видаленні пилу, відокремленні, сортуванні, пресуванні, упакуванні і маркуванні. Для багатьох видів вторинної текстильної сировини така попередня обробка буде недостатньою і доповнюватиметься процесами прання та насичення. Для нових випадів, що надходять з ткацьких цехів швейних і трикотажних підприємств, знезараження, відділення старих, а іноді і сортування не проводять.

Основна маса відновлених волокон направляється на переробку нетканих матеріалів, які виготовляються за різними технологіями залежно від їх призначення. У балансі сировини для виробництва нетканих матеріалів на частку вторинних ресурсів припадає близько 40%. Майже 60% з них становлять відходи бавовняної промисловості [3]. Зазвичай первинна переробка являє собою механічний рециклінг.

Типовий процес механічного рециклінгу виглядає наступним чином [4]: металеві компоненти та нетекстильні матеріали видаляються в процесі, який називається «очищенням». Потім тканини пресують у тюки та розрізають за допомогою обертового леза на дрібні шматки. Потім волокна відокремлюються за допомогою процесу, відомого як «збирання», «витягування» або «розривання», коли тканини накочуються на дедалі менші поверхні з шипами, щоб розбити їх на частини та видалити волокна. Нарешті, необхідні методи подальшої обробки для підвищення якості волокон, видалення коротких волокон і пилу та за потреби - змішування з первинними волокнами [5].

Метою роботи є дослідження та порівняльна оцінка життєвого циклу виробів легкої промисловості, а саме, тканин на основі первинної та вторинної сировини для покращення екологічних характеристик матеріалів та удосконалення виробничих процесів легкої промисловості.

Виклад основного матеріалу

Дослідження життєвого циклу тканин на основі різної сировини обрано з метою обґрунтування потенційних переваг механічної переробки текстильних відходів для навколишнього середовища та удосконалення процесів легкої промисловості.

Текстильне виробництво, включає в себе безліч виробничих процесів, кожен з яких виконується різними учасниками [6]. З європейської точки зору той факт, що процеси текстильного виробництва географічно розташовані здебільшого за межами європейського континенту, додає додаткових викликів екологічному менеджменту виробів легкої промисловості.

Основний вплив виробів легкої промисловості на навколишнє середовище виникає через частину життєвого циклу текстильного виробництва, найбільш важливі впливи з яких пов’язані з використанням і емісіями токсичних речовин, а також використанням води та енергії (з відповідними викидами парникових газів), що призводить до зміни клімату.

Кожен крок текстильного виробництва включає різноманітні матеріали, процеси та обладнання. Типи залучених процесів варіюються від сільського господарства та тваринництва для отримання волокон до хімічної обробки та механічних операцій.

Оскільки акцентом, який обумовлює негативний вплив виробів легкої промисловості в рамках ОЖЦ є саме хімічні речовини та матеріали, які там використовуються. Це можуть бути чисті речовини або, частіше, сумішами речовин. Найбільша кількість таких речовин використовується у текстильному виробництві. Такі текстильні хімікати також включають продукти перетворення, які являють собою речовини, що утворюються в результаті основних або побічних хімічних реакцій за участю текстильних

хімікатів, або їх продукти розкладання у навколишньому середовищі та організмі людини. Домішки, що входять до складу хімічних продуктів, які є забруднювачами та не утворюються під час відповідного виробничого процесу, а також залишки, які є речовинами, що утворюються під час виробничого процесу як побічні продукти або як вихідний матеріал, що не прореагував, можуть міститися в текстильних хімікатах у невеликих кількостях.

В межах цього дослідження текстильні хімічні речовини визначаються як хімічні речовини в життєвому циклі текстилю, які безпосередньо застосовуються до текстилю в будь-якій частині його виробничого процесу.

Значною мірою через вплив текстильної промисловості на навколишнє середовище та здоров'я з'являються нові технології виробництва для покращення екологічних показників. Хасанбейгі та Прайс надали огляд 18 нових технологій для ефективного використання енергії, води та зменшення забруднення в текстильній промисловості. Новітні технології описані і в останньому дослідженні Європейської комісії щодо покращення навколишнього середовища продукції для текстилю [7], а також у роботах інших вчених [8–13]. До таких технологій відносять нанотехнології нетканих матеріалів, вихрове і струменеве прядіння пряжі, фрикційне прядіння пряжі, багатофазне ткацтво на верстаті, ферментативна, ультразвукова і електронно-променева обробки, використання озонування при відбілюванні, надкритичного CO_2 при фарбуванні, струменевий друк, плазмова технологія, технологія піни для обробки текстилю, водовідштовхувальні покриття на основі кремнію та вуглеводнів та ін.

ОЖЦ передбачає включення найбільш серйозних категорій впливу на навколишнє середовище. У випадку текстилю це зміна клімату, використання води та токсичність. Зміна клімату та використання води є двома відносно добре розвиненими категоріями впливу в ОЖЦ.

Модель USEtox була обрана для розрахунку впливу токсичності Дослідження проводилися у відповідності до класичної схеми дослідження ОЖЦ [14].

Для цього було обрано два об'єкти дослідження: вироби на основі первинної та вторинної сировини, отриманий механічною переробкою поліестерних відходів. В якості функціональної одиниці було обрано 1 км переробленої пряжі 25 м/г (400 дтекс).

Дані про збір і сортування використаного текстилю та відходів були зібрані за допомогою серії інтерв'ю з переробними виробництвами та підприємствами легкої промисловості. Це включало дані про походження текстилю, енергію, спожиту транспортуванням, і загальну кількість текстилю, зібраного та відсортованого за рік (таблиці 1).

Таблиця 1

Потоки енергії та матеріалів в рамках продукту - текстиль

Процес	Вхідні дані		Вихідні дані	
Транспортування до пунктів збору	Дизель Вживаний текстиль	0,008 кг 0,426 кг	Вживаний текстиль	0,426 кг
Засоби збору	Вживаний текстиль Електрика	0,426 кг 0,008 МДж	Вживаний текстиль	0,426 кг
Транспортування до сортувальних установок	Вживаний текстиль Дизель	0,426 кг 0,017 кг	Вживаний текстиль	0,426 кг
Сортувальні засоби	Вживаний текстиль Електрика Термальна енергія	0,426 кг 0,0260 МДж 0,0003 МДж	Ганчірки Взуття (повторне використання) Текстильні відходи Текстиль (повторне використання) Текстиль (переробка)	0,071 кг 0,028 кг 0,024 кг 0,208 кг 0,09 кг

В Україні система збору використаного текстилю лише впроваджується, тому говорити про сортувальні лінії для таких відходів зараз взагалі не приходиться. В країнах ЄС текстильні вироби з різних місць збираються в пункті перевалки, а потім відправляються до сортувальних установок. Це відповідає близько 75 % спожитого текстилю, тоді як 25 % купується у компаній, включаючи невелику частину збору від «дверей до дверей». У сортувальних цехах не текстильні вироби з спожитого текстилю вилучають і відправляють на спалювання. Решту текстилю відправляють на сортувальні потужності, де кваліфікований персонал сортує за допомогою обладнання і близько 21 % таких відходів підлягає механічній переробці в подальшому (таблиця 2).

Розглянемо варіант виробництва виробів легкої промисловості з використанням вторинної сировини (механічна переробка).

У наведеній блок-схемі (рисунок 4) описано процес механічної переробки, яка відображається у трьох етапах. Частини одягу, які не підлягають переробці, такі як блискавки та гудзики, видаляються, потім очищений матеріал розрізають і розтягують на волокна. Після цього перероблені волокна можна змішувати з первинними волокнами. Повністю гомогенізовані волокна прочесують і переробляють в пряжу.

Таблиця 2

Матеріальні та енергетичні потоки механічної переробки

Процес	Вхідні дані		Вихідні дані	
Попередня обробка	Відсортований і збережений текстиль Електрика	0,022 кг 0,039 МДж	Затискачі для переробки Блискавки, гудзики та ярлики (відходи)	0,014 кг 0,008 кг
Різання та переробка	Електрика Затискачі для переробки	0,020 МДж 0,0140 кг	Перероблені волокна Текстильні відходи	0,013 кг 0,0005 кг
Параметри відновлення	Вода Перероблені волокна Електрика Волокна	0,212 кг 0,013 кг 0,358 МДж 0,031 кг	Пряжа Відходи коротких волокон Мікроволокна/пил	0,04 кг 0,003 кг 0,002 кг

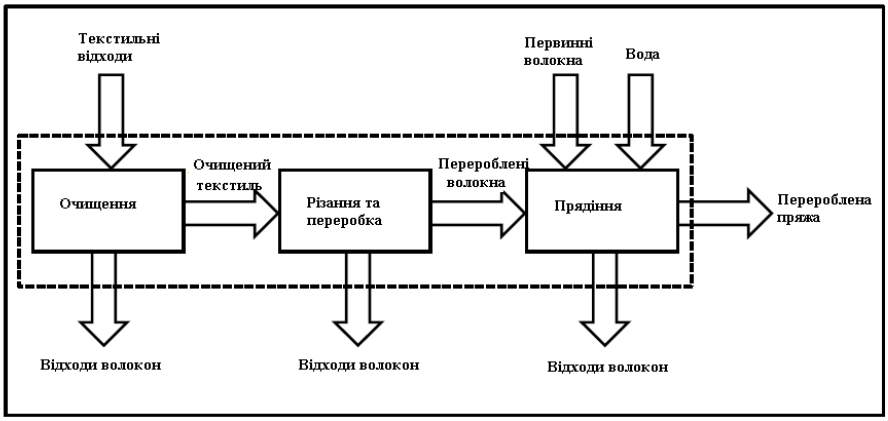


Рис. 4. Блок-схема процесу механічної переробки

Для порівняння при ОЖЦ виробів легкої промисловості у якості базового було обрано виробництво пряжі з первинної сировини (рисунок 5).

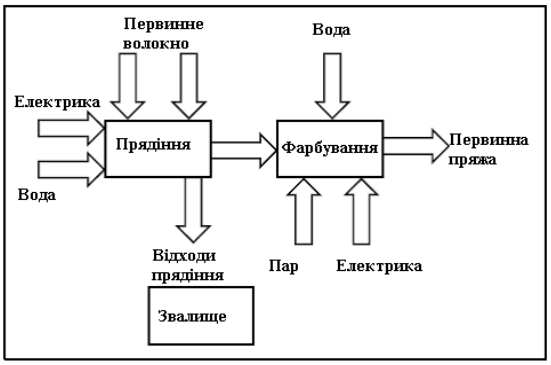


Рис. 5. Блок-схема процесу виробництва первинної пряжі

Виробництво первинної пряжі в усіх прикладах було змодельовано за тим самим підходом прядіння, щоб можна було порівняти з альтернативною переробленою пряжею. У цьому випадку волокниста сировина для кожного прикладу змішується, прядеться в пряжу та фарбується в бажаний колір. У результаті виходить пряжа різного складу, готова до ткацтва чи в'язання.

На блок-схемі (рис. 6) пояснюється процес виробництва переробленого поліетилентерефталату (ПЕТФ) із використаних пляшок.

Енергетичні та матеріальні дані для процесів механічної переробки та прядіння були зібрані у виробництв з механічної переробки шляхом серії інтерв'ю. Відходи не спалюються, і через відсутність іншої інформації ввелося припущення, що переробка передбачає захоронення без відновлення енергії. Для роботи були використані дані з бази даних GaBi для полігону

У випадку виробів на основі вторинної сировини (механічна переробка), то передбачається, що буде здійснюватися переробка фракції споживчого текстилю на пряжу для нового одягу. Побутовий текстиль спочатку сортується на придатний для повторного використання і придатний для переробки. Останні поділяються на три основні кольори: білий, джинсовий і різнокольоровий. Відсортований за кольором текстиль відправляється на механічну переробку, де з них відділяють матеріали, які не підлягають вторинній переробці (17 % відходів відправляється на звалище). Остаточний склад пряжі складається з 70 % споживчої

пряжі (87,5 % бавовни, 10,2 % поліестеру та 2,2 % інших) і 30 % переробленої. Нарешті, пряжа транспортується для виробництва різних видів виробів легкої промисловості.

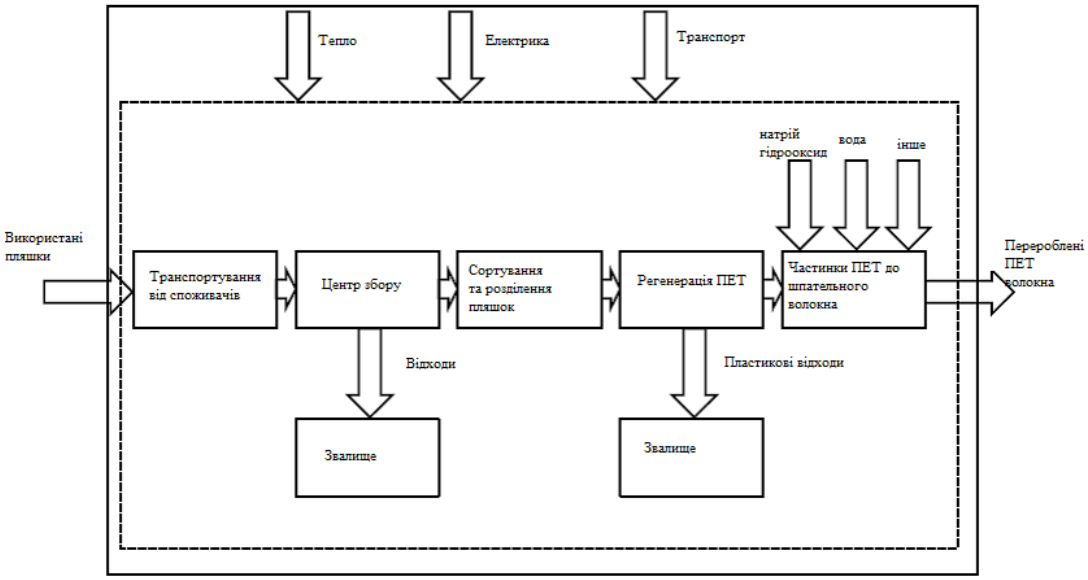


Рис. 6. Блок-схема процесу механічної переробки ПЕТФ пляшок

Функція: біла пряжа придатна для використання у виробництві текстилю (одягу).

Функціональна одиниця: 1 км білої пряжі щільністю 25 Нм зі складу 61,25 % бавовни та 38,75 % поліестеру.

Альтернатива Virgin: 1 км білої первинної пряжі 25 Нм (або 400 дтекс) із складом 61,25 % бавовни та 38,75 % поліестеру.

Блок-схема оцінки життєвого циклу для виробу легкої промисловості (ВЛП) наведено на рисунку 7.

Перероблена альтернатива**:**1 км білої переробленої пряжі 25 Нм (або 400 дтекс) із складом 61,25 % бавовни та 38,75 % поліестеру з 70 % перероблених волокон із текстилю та 30 % перероблених ПЕТФ-волокон із використаних пляшок.

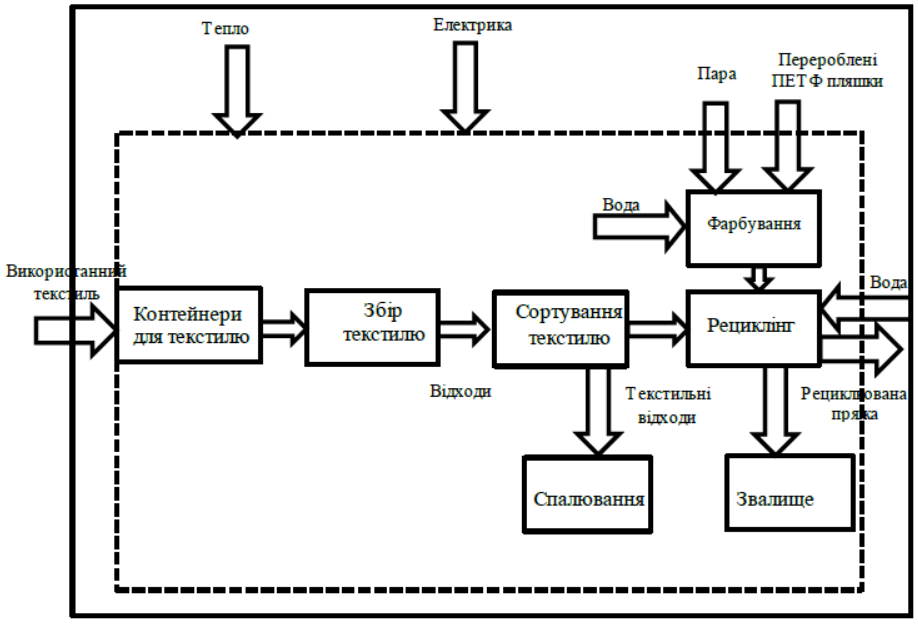


Рис. 7. Блок-схема процесу виробництва переробленої пряжі для ВЛП.

Результати порівняльного аналізу життєвого циклу для механічної переробки вживаного текстилю у новий одяг у порівнянні з тим самим процесом із первинних матеріалів показано на рис. 8.

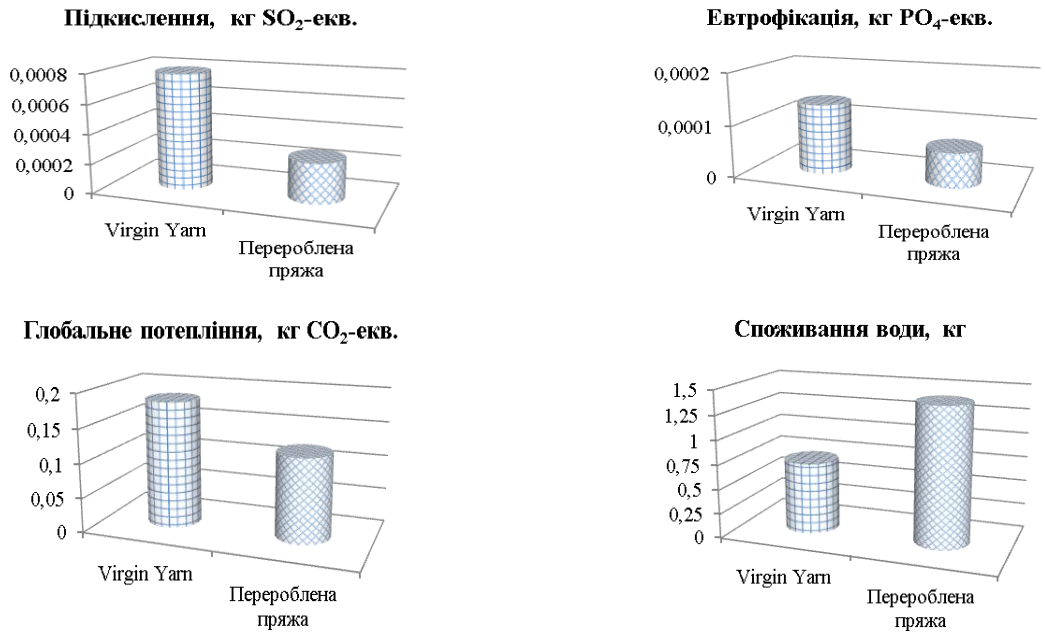


Рис. 8. Вплив на навколишнє середовище для змішаного випадку

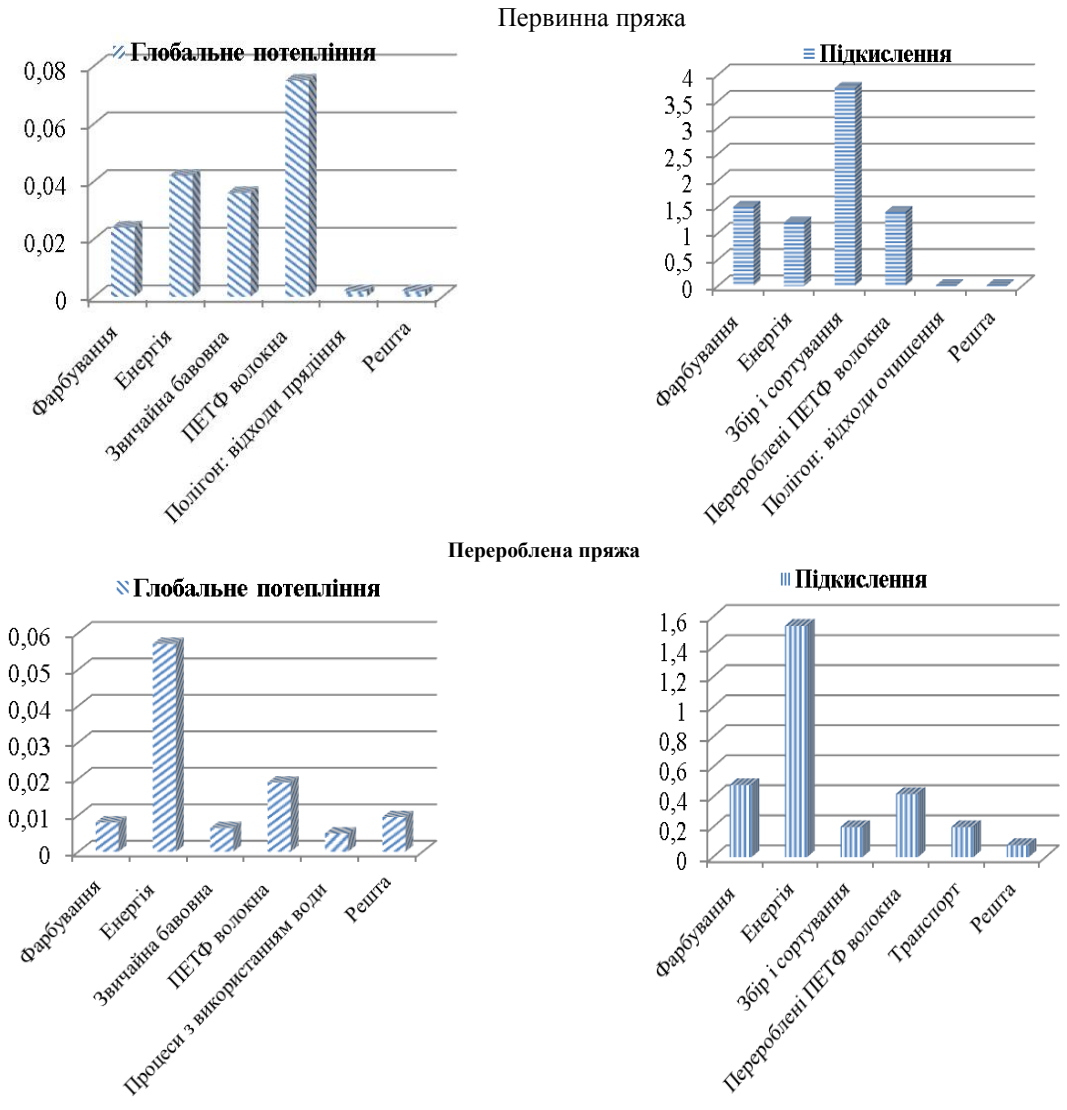


Рис. 9. Фактори, що сприяють підкисленню (кг SO_2-екв.) і глобальному потеплінню (кг CO_2-екв.)

Для збору та сортування вплив на навколишнє середовище було розподілено на основі маси. Таким чином, 21% переробленого текстилю відповідає 21% загальних викидів для збору та сортування, оскільки інші продукти продаються для інших цілей. Фотохімічне утворення озону було виключено як категорію через невизначеність даних. Як видно з рисунка 9, перероблена пряжа має менший вплив на навколишнє середовище в усіх категоріях. Перероблена пряжа демонструє зниження підкислення та евтрофікації на 65,5 % та 50,7 % порівняно з пряжею первинного еквівалента. Він також має третину впливу на навколишнє середовище, тоді як споживання води на 98,0 % менше, що очікується через усунення введення первинної бавовни.

Виробництво звичайної бавовни є найбільшим фактором, що сприяє підкисленню (48 %) (рис. 9), за ним йдуть фарбування (19 %), виробництво ПЕТФ-волокна (18 %) та електроенергія (15 %). У випадку вторинної переробки електроенергія (від прядіння) створює найбільший вплив (52 %), а також фарбування (17 %) і переробка волокон ПЕТФ (14 %). У категорії кліматичних змін ПЕТФ-волокна домінують у викидах первинної пряжі (41 %), за якою йдуть звичайна бавовна (20 %), електроенергія (головним чином прядіння) (23 %) і фарбування (14 %). У разі вторинної переробки електроенергія від прядіння має найбільший вплив (53 %), потім йдуть перероблені ПЕТФ волокна з пляшок (18 %). Фарбування, збір і сортування та захоронення відходів прибирання (що становить 17 % порівняно з іншими дослідженнями, які становлять близько 30-35 %) інші сприяючі фактори. Висновки полягають у тому, що заміна ПЕТФ та бавовняних волокон переробленим матеріалом зменшує викиди, навіть якщо включимо енергію, необхідну для збору, сортування та переробки текстилю після споживання.

Що стосується глобального потепління, еквівалент первинної пряжі має на третину менший вплив, ніж перероблена пряжа, якщо споживання води зменшиться на 74 % у переробленій пряжі. У випадку переробки (80 % переробленої суміші ПЕТФ- бавовни, механічна переробка (рисунок 10) результати порівняльної характеристики показують, що перероблена пряжа має менший вплив у всіх категоріях. Найбільше скорочення спостерігається у споживанні води (97 %), а потім підкислення (65,9 %). Глобальне потепління на 36% менше. В обох випадках вплив зміни клімату був приблизно на третину меншим. Відмінності в трьох перших категоріях можна пояснити заміною виробництва натуральної бавовни на перероблену бавовну, а зниження глобального потепління можна пояснити зменшенням споживання первинного ПЕТФ на користь переробленого. У двох інших випадках зменшення впливу було меншим для більшості категорій.

Процеси отримання бавовни значно впливають на споживання води. Заміна сировини у відповідних випадках призведе до очікуваного скорочення споживання води до 98 %, завдяки водоємності вирощування культури. На 1 кг бавовняного волокна використовується близько 2610 м^3 води. В той же час процеси отримання ПЕТФ волокон найбільше впливають на зміну клімату, що також очікувано, оскільки він виробляється з викопного палива. Вони домінують у викидах при виробництві первинної сировини, так і у змішаному випадку з вмістом первинного ПЕТФ 41 % і 38 %.

Впровадження переробленої бавовни призводить до зменшення кислотності та споживання води. Збільшення відсотка переробленого ПЕТФ зменшило вплив на зміну клімату у змішаному випадку до 33 %.

Виробництво електроенергії за впливом на довкілля йде за виробництвом первинного волокна та в більшості випадків домінує над впливом на навколишнє середовище. З аналізу внеску, у первинній сировині внесок використання електроенергії складає 15 % у змішаному випадку. У переробленій сировині впливи переважали для тих самих випадків у межах від 43 % до 62 %. По глобальному потеплінню вплив первинної пряжі коливався від 11 % до 37 %, а для переробленої пряжі вони домінували в усіх категоріях від 42% до 53%.

При аналізі підготовчих операцій, встановлено, що у більшості випадків транспорт не відіграє суттєвої ролі, оскільки він впливає на зміну клімату та підкислення менше ніж на 10 %. Вплив підкислення коливається від 1% до 8% у всіх випадках, а зміна клімату однакова, від 2 до 9%. Ручне сортування та автоматичне сортування мають незначний вплив на це, тому для покращення потрібно дивитися на ефективність логістики**.** Нарешті, автоматизоване сортування допомагає зменшити витрати.

Технології механічної переробки утворюють досить багато текстильних відходів, оскільки в таких процесах неможливо використати частини одягу з не текстильних матеріалів, такі як значки, блискавки та гудзики. У результаті їх потрібно викидати вручну, розрізаючи значну частину одягу. Внесок у зміну клімату коливається від 6 % для відходів сортування у змішаному випадку з 17 % відходів після очищення до 16 % у випадку переробки, коли більше 35 % матеріалу викидається.

У змішаному випадку первинна пряжа вимагала фарбування, якого уникали або скорочували у випадках перероблених матеріалів завдяки належному змішуванню використаного текстилю. Фарбування спричинило приблизно 20 % підкислення для пряжі первинного виробництва, уникнення чи зменшення якого разом з іншими факторами призвело до зниження на понад 60 % цієї категорії впливу.

Висновки

У результаті аналізу внесків при ОЖЦ виробів легкої промисловості на основі первинної та вторинної сировини визначено найбільш впливові етапи процесу переробки. Дослідження включало первинні дані з різних процесів у життєвому циклі, включаючи механічну переробку, збір текстилю та ручне та автоматизоване сортування. За результатами досліджень, які включають механічну переробку та високий відсоток переробленої сировини, перероблена пряжа мала потенціал для зменшення впливу, включаючи підкислення, евтрофікацію та споживання води. В обох випадках вплив зміни клімату був приблизно на

третину меншим.

Згідно з проведеним аналізом, найбільшим впливом виявлено вміст первинних волокон, виробництво електроенергії, процес збору текстилю, управління текстильними відходами та фарбування. Незначний внесок внесли сам процес переробки, ручне та автоматичне сортування. В розрізі аналізу збору текстилю, більш ефективне планування маршруту може допомогти зменшити викиди вуглекислого газу, а також знизити витрати для компаній.

References

1. Life cycle analysys of textiles. **https://textilevaluechain.in/in-depth-analysis/articles/textile-articles/%C2%AClife-cycle-analysis-of-textiles**

2. Peculiarities of the production process and factors of location of enterprises for the production of fabrics, clothing, footwear. URL: https://geografiamozil2.jimdofree.com/%D0%B3%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D0%B0/%D0%B2%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D1%86%D1%82%D0%B2%D0%BE-%D1%82%D0%BA%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%BD-%D0%BE%D0%B4%D1%8F%D0%B3%D1%83-%D1%82%D0%B0-%D0%B2%D0%B7%D1%83%D1%82%D1%82%D1%8F-%D0%B2-%D1%83%D0%BA%D1%80%D0%B0%D1%97%D0%BD%D1%96-%D1%82%D0%B0-%D1%83-%D1%81%D0%B2%D1%96%D1%82%D1%96/

3. Sayfullayev S., Solikhugli K., Sherkul Sh. The Effectiveness of the Use of Secondary Material Resources of the Textile and Light Industry. Texas Journal of Multidisciplinary Studies. A Bi-Monthly, Peer Reviewed International Journal. 2022. № 9. P. 108-113.

4. Langley K.D., Kim Y.K. Manufacturing nonwovens and other products in recycled fibres containing spandex. Recycling in Textiles. 2006. P. 137-164.

5. Zamani B., Svanstrom M., Peters G., Rydberg T. A Carbon Footprint of Textile Recycling A Case Study in Sweden. Journal of Industrial Ecology. 2015. № 19. P. 676–687.

6. Kogg B. Responsibility in the Supply Chain Interorganisational management of environmental and social aspects in the supply chain Case studies from the textile sector. III, Lund University, Lund Sweden. 2009.

7. Beton A., Dias D., Farrant L., Gibon T., Le Guern Y., Desaxce M., Perwueltz A., Boufateh I., Wolf O., Kougoulis J., Cordella M., Dodd N. Environmental Improvement Potential of textiles (IMPRO Textiles). European Union, Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2014.

8. Agnhage T., Perwuelz A., Behary N. Eco-innovative coloration and surface modification of woven polyester fabric using bio-based materials and plasma technology. Ind. Crops Prod. 2016. № 86. P. 334–341.

9. Hafrén J., Zou W., Córdova A. Heterogeneous "organoclick"derivatization of polysaccharides. Macromol. Rapid Commun. 2006. № 27, P. 1362–1366.

10. IES, 2015. EPD WRSD Fabrics (spun dyed and piece dyed versions)

11. Mahltig B., Böttcher H. Modified silica sol coatings for water-repellent textiles. J. Sol-Gel Sci. Technol. 2003. № 27. P. 43–52.

12. Reddy N., Chen L., Zhang Y., Yang Y. Reducing environmental pollution of the textile industry using keratin as alternative sizing agent to poly(vinyl alcohol). J. Clean. Prod. 2014. № 65. P. 561–567.

13. Terinte N., Manda B.M.K., Taylor J., Schuster K.C., Patel M.K. Environmental assessment of coloured fabrics and opportunities for value creation: spin-dyeing versus conventional dyeing of modal fabrics. J. Clean. Prod. 2014. № 72. P. 127–138.

14. Sala S., Goralczyk M. Chemical footprint: a methodological framework for bridging life cycle assessment and planetary boundaries for chemical pollution. Integr. Environ. Assess. Manag. 2013. № 9. P. 623–632.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-98-102
УДК 502.171.3:661.083.81

ІЛЛЯШ ОКСАНА
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
https://orcid.org/0000-0003-4710-3202
e-mail: iloks2504@gmail.com
БРЕДУН ВІКТОР
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
https://orcid.org/0000-0002-8214-3878
e-mail: bvi37h@gmail.com

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МІСЦЯ ДОСЛІДЖЕННЯ МОРФОЛОГІЧНОГО СКЛАДУ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

В роботі визначені чинники, що впливають на процеси формування морфологічного складу твердих побутових відходів, утворених в територіальних громадах. На основі даних чинників виконана типізація територіальних громад Полтавської області з урахуванням особливостей адміністративного устрою, демографічних, архітектурно-планувальних, соціально-економічних аспектів, специфіки існуючої системи поводження з відходами та сформовано перелік критеріїв для обґрунтування вибору місця проведення досліджень морфологічного складу побутових відходів. За обраними критеріями обґрунтовано вибір Котелевської територіальної громади в якості об'єкту дослідження в рамках реалізації українсько-австрійського науково-дослідного проєкту «Дослідження складу твердих побутових відходів та їх ресурсного потенціалу».

Ключові слова: система управління відходами, морфологічний склад відходів, територіальна громада, критерії.

ILLIASH OKSANA, BREDUN VIKTOR
Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic National University

JUSTIFICATION OF THE CHOICE OF THE SITE FOR STUDYING THE MORPHOLOGICAL COMPOSITION OF HOUSEHOLD WASTE

Purpose. The research is designed to substantiate the choice of a territorial community in the territory of Poltava region, which is typical for the region regarding the processes of forming the morphological composition of household waste. Methodology. The work uses the methods of factor analysis of factors affecting the processes of forming the morphological composition of solid household waste in the conditions of territorial communities of the Poltava region. The results. The document defines nine criteria by which territorial communities are selected for research. These include: the type of settlement, the demographic composition of the settlement, the structure of development and the existing housing stock, architectural and planning features, features of the social and household system, the industrial specifics of the region, the structure of the communal economy, the existing waste collection system, the available equipment for garbage collection. On the basis of the specified criteria, the selection of the Kotelva territorial community as an object of research within the framework of the implementation of the Ukrainian-Austrian scientific project "Investigation of the composition of solid household waste and its resource potential" is substantiated. Originality. Methodological bases for the justification of the choice of territorial communities based on the processes of forming the morphological composition of solid household waste have been developed and tested. Practical value. The results of the study were used in the implementation of the Ukrainian-Austrian research project "Study of the composition of solid household waste and its resource potential" with the aim of increasing the efficiency of the regional waste management system.

Keywords: waste management system, morphological composition of waste, united community, criteria.

Постановка проблеми

Регіональним планом управління відходами в Полтавській області до 2030 року [1] передбачено поетапне формування та подальший розвиток регіональної та місцевих систем управління відходами. Важливою складовою процесу формування системи управління з відходами є впровадження передового європейського досвіду, й перш за все, у сфері технологій роздільного збирання відходів. Але в умовах різних за особливостями територіальних громад морфологічний склад відходів може суттєво відрізнятись, тому важливим є визначення відповідних чинників, що впливають на формування морфологічного складу твердих побутових відходів в рамках муніципальних структур України та Європи. Відповідно дане завдання є одним із ключових в рамках українсько-австрійського науково-дослідного проекту, спрямованого на дослідження складу твердих побутових відходів та їх ресурсного потенціалу. В даній роботі проведено типізацію територіальних громад Полтавської області на основі визначених чинників та головна увага приділена встановленню переліку критеріїв, на основі яких можливе здійснення обґрунтованого вибору місця/об'єкту/території дослідження морфологічного складу побутових відходів в умовах територіальних громад Полтавської області.

Мета. Визначення критеріїв й обґрунтування вибору місця подальших досліджень морфологічного складу побутових відходів та виділення громади для цілей даних досліджень, яка є характерною, враховуючи особливості адміністративного устрою Полтавської області.

Аналіз останніх досліджень

Практика дослідження морфологічного складу твердих побутових відходів (ТПВ) при розробці систем управління відходами є поширеною як в Україні, так і за кордоном. Ґрунтовний аналіз морфологічного складу ТПВ у громадах Полтавської області було проведено на стадії розробки проєкту «Регіонального плану управління відходами в Полтавській області до 2030 року» [1]. Більшість досліджень

морфологічного складу твердих побутових відходів проводились для конкретних населених пунктів без відповідного обґрунтування їх вибору.

Основним нормативним документом, що регламентує процедуру проведення досліджень морфологічного складу твердих побутових відходів є Методичні рекомендації [2]. Але дані Рекомендації теж не містять опису критеріїв та процедури обрання місця/об'єкту даних досліджень.

Виклад основного матеріалу

В ході роботи над Регіональним планом управління відходами в Полтавській області до 2030 року авторським колективом було зібрано великий об'єм інформації різного роду по усім 60 громадам області. Детальний аналіз даної інформації допоміг нам виділити основні чинники, що, на нашу думку, впливають на процеси формування морфологічного складу твердих побутових відходів: тип громади, демографічні показники громади, структура забудови та житлового фонду, архітектурно-планувальні особливості, специфіка соціально-побутового сектору, промислова специфіка регіону, структура комунального господарства громади та наявна спеціалізована техніка для збирання ТПВ, існуюча муніципальна система збирання ТПВ.

За вище наведеними чинниками нами проведено аналіз громад Полтавської області та виконано типізацію територіальних громад для цілей подальших досліджень морфологічного складу побутових відходів.

За результатами проведеної типізації сформовано перелік критеріїв для обґрунтування вибору місця/об'єкту досліджень морфологічного складу побутових відходів. До переліку головних критеріїв віднесено:

1. Тип громади згідно адміністративного устрою
2. Демографічні показники громади
3. Структура забудови та житлового фонду
4. Архітектурно-планувальні особливості громади, їх розташування відносно основних транспортних магістралей та місця оброблення/захоронення побутових відходів
5. Специфіка соціально-побутової сфери
6. Промислово-господарська специфіка громади
7. Структура комунального господарства громади
8. Наявна спецтехніка
9. Існуюча система збору ТПВ

На основі даних критеріїв був проведений аналіз територіальних громад Полтавської області та обрано в якості об'єкту дослідження полігон (звалище) ТПВ селища Котельва, а територію Котелевської громаду в якості «характерного» представника громад Полтавської області, враховуючи особливості адміністративного устрою області.

Охарактеризуємо більш детально відповідність визначеним критеріям обраного «характерного» представника – Котелевської територіальної громади.

1. Тип громади – селищно-сільська. Котелевська громада утворена частиною бувшого Котелевського району Полтавської області. Котелевська громада відноситься до класичних громад селищно-сільського типу нашої області. В основі даної громади лежить селище міського типу Котельва. Згідно Закону України № 8263 «Про дерадянізацію порядку вирішення окремих питань адміністративно-територіального устрою» Котельва за кількістю населення підпадає під статус міста, але за структурою забудови відповідає категорії селища. За вище зазначеним законом селища відносяться до населених пунктів сільського типу.

Характерними особливостями таких населених пунктів є концентрація інфраструктури міського типу в центрі селища, наявність невеликої кількості об'єктів багатоповерхової забудови, а також значна кількість територій, які мають сільський характер планування.

Основна частина населення громади проживає в адміністративному центрі. Інша частина населення проживає у селах. Як правило чисельність сільських населених пунктів становить від декількох одиниць до декількох сотень осіб на один населений пункт. Невелика кількість населених пунктів сільського типу мають кількість населення в районі 1000 осіб. Цим ознакам відповідає більша частина громад області, в тому числі й Котелевська громада.

2. Демографічні показники громади з урахуванням вимушено переміщених осіб (ВПО). Для Котелевської громади як для «характерного» представника громад області селищно-сільського типу властиві наступні демографічні показники:

– у структурі населення переважають люди передпенсійного та пенсійного віку;

– кількість молодого населення в громадах поступово скорочується і в останні роки ця тенденція посилюється;

– характерним процесом для останніх 1,5 років є збільшення частини тимчасово переміщених осіб по різним громадам та в цілому для Полтавської області. Характерною є наявність приблизно 10% ВПО у загальній чисельності населення громади.

3. Структура забудови та житлового фонду. Близько 58% від всього населення Полтавської області (за даними 2021 року), що проживає в громадах різних типів – це мешканці приватного сектору

забудови (в більшості це одноповерховий житловий фонд) з присадибними ділянками, які використовуються для введення особистого сільського господарства.

Для Котелевської громади характерним є переважання у житловому фонді приватної забудови, що також характерне для багатьох подібних громад Полтавської області. Тобто *для селищно-сільських громад приватна забудова може складати до 90% від усього житлового фонду, а у громадах сільського типу – 100%.*

Житловий фонд в різних типах громад має свої особливості. Для громад селищно-сільського типу, в тому числі й Котелевської громади, в яких більшість житлового фонду - це одноповерхова приватна садибна забудова, характерними є наступні ознаки:

– наявність присадибних індивідуальних ділянок, *при обслуговуванні яких утворюються відходи садівництва (сільськогосподарські відходи);*

– забезпеченість мережами освітлення, підведеними мережами газопостачання та переважна відсутність мереж централізованого водопостачання та мереж централізованої каналізації, тобто каналізація організована у вигляді вигрібних ям та септиків на територіях приватних ділянок, *що передбачає утворення рідких побутових відходів*;

– наявний небагато чисельний багатоквартирний житловий фонд, який, як правило, не має одного з видів благоустрою (централізованих опалення або водопостачання, або каналізації) та відсутні присадибні індивідуальні ділянки, що, *з одного боку, знижує обсяги потенційного утворення відходів садівництва, а з іншого боку, збільшуються обсяги харчових відходів за відсутності можливостей індивідуального компостування*;

Такі особливості житлового фонду є характерними для більшості селищ й громад Полтавської області, зокрема й для селища Котельва та Котелевської громади.

4. Архітектурно-планувальні особливості селища Котельва та сіл громади, їх розташування відносно основних транспортних магістралей та полігону (звалища) ТПВ. Архітектурно-планувальні особливості населених пунктів Полтавської області полягають у наступному.

Для сільських населених пунктів характерною особливістю архітектурного планування даних поселень є як правило наявність однієї центральної вулиці, вздовж якої розташована більшість одноповерхового приватного житлового фонду з присадибними ділянками різної площі, на яких ведеться особисте сільське господарство. Для таких сільських населених пунктів характерним є низька якість або відсутність твердого дорожнього покриття, що суттєво впливає на можливості санітарного обслуговування даних територій.

Для селищ, у тому числі й Котельви, характерною особливістю є відсутність чітко вираженої радіальної чи лінійної структури планування вуличної мережі, обмеженість ширини окремих вулиць (в першу чергу це стосується другорядних вулиць, проїздів, провулків, які віддалені від центра населеного пункту). В більшості ширина таких вулиць складає близько 3 м. Це формує специфічні умови для організації руху спеціалізованого транспорту під час збирання відходів на даних вулицях, а також складність з встановленням контейнерних майданчиків.

Зазначені архітектурно-планувальні особливості сільських населених пунктів обумовлюють складності в питанні облаштування контейнерних майданчиків для збирання побутових відходів від населення, перш за все з метою роздільного збирання, а іноді й взагалі унеможливлює їх організацію. *Відповідно в більшості випадків це призводить до можливості організації лише системи збирання змішаних побутових відходів, що безпосередньо впливає на морфологічний склад побутових відходів, які направляються на місце їх видалення*.

5. Специфіка соціально-побутової сфери. Сільські населені пункти практично в більшості своїй не мають розвиненого соціально-побутового сектору. Як правило соціально-побутова мережа обмежується сільрадою, магазином, може бути фельдшерсько-акушерський пункт. *Відповідно переважні обсяги побутових відходів утворюються в житловому фонді*.

Селища мають достатньо розвинену структуру об'єктів соціально-побутового призначення, особливо в центральній частині, та об’єкти промислової сфери. Відповідно 20-40% від загального обсягу побутових відходів, що в подальшому видаляються на полігони й звалища ТПВ, утворюються в сфері соціального обслуговування та промислово-господарської діяльності. Одними з найбільших утворювачів побутових відходів у сфері соціально-побутового обслуговування населених пунктів є заклади охорони здоров'я та різні навчальні заклади.

Даний фактор суттєво впливає на специфіку формування морфологічного складу ТПВ, що характерно також й для Котелевської громади.

6. Промислово-господарська специфіка громади. За специфікою промислової організації Котелевська громада має характерну структуру, яка є притаманною для більшості селищно-сільських громад середньої частини Полтавської області. Основним напрямом діяльності більшості промислових об'єктів області є сільське господарство та переробка сільськогосподарської сировини. Також, в селищі Котельва та навколо неї функціонують невелика кількість невеликих промислових підприємств та розміщені об’єкти нафтогазового комплексу. Така структура характерна для більшості громад Полтавської області, а саме її північної, центральної, східної та південно-східної частини.

Відповідно підприємства є значними утворювачами відходів, зокрема тих, що видаляються на полігони й звалища відходів, й відповідно цей фактор впливає на формування морфологічної структури відходів.

7. Структура комунального господарства громади. Як правило, у більшості громад області комунальне підприємство територіально розташоване в адміністративному центрі громади і обслуговує, здебільшого, адміністративний центр громади. В окремих випадках здійснюється і обслуговування сільських населених пунктів громади, які мають максимальну чисельність жителів або територіально розташовані в рамках однієї агломерації з адміністративним центром.

Характерною особливістю організації комунального обслуговування в Котелевській громаді є обслуговування всіх населених пунктів, в тому числі й сільських, одним централізованим комунальним підприємством громади, яке розташоване в селищі Котельва.

Даний досвід є важливим, оскільки дозволяє в рамках одного об'єкту поводження з відходами (полігону (звалища) ТПВ Котельва) дослідити морфологічний склад відходів, утворених в різних населених пунктах громади та на об'єктах їх обслуговування, а також в господарсько-промисловому секторі.

8. Наявна спецтехніка. Досвід проектування схем санітарної очистки для сільських і селищно-сільських об'єднаних громад Полтавської області свідчить про те, що в більшості громад транспортне забезпечення, яке існує на комунальних підприємствах даних громад, потребує суттєвої модернізації. Частіше за все, вік транспортних засобів складає понад 10 років. Це, здебільшого, застарілі моделі транспортних засобів із застарілим технологічним обладнанням, які мають нижчий рівень технологічної ефективності, ніж передові зразки європейської продукції.

Котелевська громада, як характерний представник селищно-сільських громад області, у складі свого комунального підприємства має один автомобіль з боковим завантаженням на шасі автомобіля КрАЗ та два автомобіля з боковим завантаженням на шасі автомобілів ГАЗ-3307. Такий тип транспортно-технологічного забезпечення є найбільш розповсюдженим у громадах області, але далеко не самим ефективним.

Тому, Котелевська громада може слугувати типовим прикладом дослідження процесів модернізації транспортно-технологічного забезпечення місцевої системи управління побутовими відходами.

9. Існуюча система збору ТПВ. На даний час у Полтавській області переважає форма організації процесів збору твердих побутових відходів за декількома технологічними схемами:

- максимально поширена на даний час схема з унітарним збиранням ТПВ;
- схема із роздільним збиранням ТПВ, коли ресурсоцінні відходи збираються в один контейнер;
- схема роздільного збирання ТПВ, коли ресурсоцінні компоненти збираються в 3 контейнери (папір й картон, пластик, скло).

Кожна з територіальних громад має свої особливості організації збору твердих побутових відходів, але загальною тенденцією для громад Полтавської області є поступове поширення організації систем роздільного збирання ТПВ. Котелевська громада є однією з передових громад, яка має досвід монофракційного та перший досвід багатофракційного збирання ТПВ і поступово виходить на використання технологій збору твердих побутових відходів із сортуванням ресурсоцінних фракцій у місцях утворення ТПВ на 3 контейнери (папір й картон, пластик, скло).

Крім того, саме з територій таких громад як Котелевська планується вивозити ТПВ в крупні громади для подальшої переробки, а тому дослідження їх морфології важливим є як для організації системи збирання й вивезення ТПВ з невеликих громад, так й для «приймаючих» крупних громад. Саме такий підхід є основним, що закладений у Стратегії управління побутовими відходами на рівні Полтавської області [3] (оприлюднено в проєкті «Регіонального плану управління відходами у Полтавській області до 2030 року»).

Висновки.

Питання типізації громад за чинниками формування морфологічного складу відходів є важливим аспектом у визначенні ідентичних муніципальних формувань України та інших країн при імплементації передового європейського досвіду організації систем управління відходами. Запропоновані критерії дозволяють проводити обґрунтування вибору муніципальних формувань (територіальних громад) на території України в якості об'єктів дослідження морфологічного складу ТПВ при розробці місцевих та регіональних систем поводження з відходами з урахуванням закордонного досвіду.

За результатами проведеної типізації та визначених критеріїв проведено обґрунтування вибору місця подальших досліджень морфологічного складу побутових відходів та обрана Котелевська громада для цілей даних досліджень, яка є характерною, враховуючи особливості адміністративного устрою Полтавської області.

Досвід організації системи збирання, перевезення й оброблення (видалення) побутових відходів Котелевської громади є важливою складовою реалізації обласної Стратегії, яка потребує досвіду практичної реалізації, на базі якого можуть бути сформовані рекомендації для інших громад щодо створення й розвитку місцевих систем управління побутовими відходами.

Література

1. Регіональний план управління відходами у Полтавській області до 2030 року : проєкт [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.adm-pl.gov.ua/advert/oprilyudnennya-dlya-obgovorennya-proektu-regionalniy-plan-upravlinnya-vidhodami-u-poltavskiy.

2. Методичні рекомендації з визначення морфологічного складу твердих побутових відходів [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0039662-10#Text.

3. Комплексна програма поводження з твердими побутовими відходами у Полтавській області на 2022-2030 роки : проєкт. – Полтава, 2022. – 268 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.adm-pl.gov.ua/advert/oprilyudnennya-dlya-obgovorennya-proektu

References

1. Rehionalnyi plan upravlinnia vidkhodamy u Poltavskii oblasti do 2030 roku : proiekt [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : https://www.adm-pl.gov.ua/advert/oprilyudnennya-dlya-obgovorennya-proektu-regionalniy-plan-upravlinnya-vidhodami-u-poltavskiy.

2. Metodychni rekomendatsii z vyznachennia morfolohichnoho skladu tverdykh pobutovykh vidkhodiv [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0039662-10#Text.

3. Kompleksna prohrama povodzhennia z tverdymy pobutovymy vidkhodamy u Poltavskii oblasti na 2022-2030 roky : proiekt. – Poltava, 2022. – 268 s. [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : https://www.adm-pl.gov.ua/advert/oprilyudnennya-dlya-obgovorennya-proektu

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-103-105
УДК 004.67

КАМІНСЬКИЙ РОМАН
Національний університет «Львівська політехніка»
https://orcid.org/0000-0002-3812-2009
e-mail: kaminsky.roman@gmail.com
ПШЕНИЧНИЙ ОЛЕКСАНДР
Національний університет «Львівська політехніка»
https://orcid.org/0000-0001-8823-7472
e-mail: sasha.pshenychniy@gmail.com
ХУДИЙ АНДРІЙ
Національний університет «Львівська політехніка»
https://orcid.org/0000-0003-2029-7270
e-mail: khudyy@ukr.net

РОЛЬ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ФРАКТАЛЬНОЇ КОНСТАНТИ ЦИКЛІЧНОГО ЧАСОВОГО РЯДУ

В даній роботі наведена процедура визначення фрактальної константи послідовності елементів методом RS-аналізу та наведені результати застосування цієї процедури для двох одновимірних часових рядів: витрат електроенергії та роботи тренінгової системи в процесі атестації учасників. В обох випадках дані розглядаються як циклічні послідовності: в першому цикли мають тривалість місяця, а в другому – тривалість атестації одного учасника. Показано, що значення фрактальних констант є різними для різних циклів, а головне те, що вони характеризують природу джерела даних: джерела споживання електроенергії та індивідуальні особливості учасників при наданні кожному з них одного і того ж завдання.

Ключові слова: фрактальний аналіз, RS-аналіз, часовий ряд, послідовність даних, циклічність даних.

KAMINSKYI ROMAN, PSHENYCHNYY OLEKSANDR, KHUDYY ANDRIY
Lviv Polytechnic National University

THE ROLE AND DEFINITION OF THE FRACTAL CONSTANT OF CYCLIC TIME SERIES

Many natural and anthropogenic processes around us are cyclic in nature. The sequence of such cycles mainly occurs in time. During their existence, the sources that generate them are influenced in different ways by existing factors. The action of these factors leads to differences in characteristics between cycles. Many data within a cycle are chaotic in nature. In such cases, the following fractal indicators are used to describe the data: fractal dimension, Hirst index, fractal constant. These indicators are directly related to the statistics of the cycle data. This relationship is at the heart of the RS analysis method, namely the cumulative swing and standard deviation of cycle data. If the first two indicators are used quite often, then the fractal constant is mostly ignored or its presence is only noted. From the point of view of the mathematical description of the laws of nature, for example in physics, biology, ecology, the constant always characterizes the nature, features, structure, and material of the source within the framework of these laws. From the point of view of the system approach, the stay of the system in one or another cycle may correspond to the states of the system. In such cases, the fractal constant characterizes these states. The purpose of this study is to determine the role of the fractal constant as an indicator of the state of the source in these cycles. For this, two sequences of data were used. The first of them is the monthly consumption of electricity at an industrial facility, and the second is the certification of a group of professional training participants, when each of them is presented with the same task. The results of the study are presented in tables and presented in diagrams. The tables show indicators by cycles: data volume, arithmetic mean (used in calculating the cumulative range), standard deviation, cumulative range, fractal dimension, Gerst exponent (exponential) and fractal constant. Differences in fractal constants are shown in the corresponding diagrams. These two examples already show the value of the fractal constant as a characteristic of the nature of the source. When using the RS-analysis method to determine the fractal indicators of the data sequence, it is worth paying attention to the fact that the ratio of the cumulative range to the standard deviation is an exponential function, for which the fractal constant is no less important than the Hurst exponent or the volume of data.

Keywords: fractal analysis, RS-analysis, time series, data sequence, data cyclicity.

Постановка проблеми

Фрактальні властивості в часових рядах людської поведінки та фізіології є повсюдними, і в останні десятиліття було запропоновано кілька методів фіксації таких властивостей. На сьогоднішній день фрактальний аналіз часових рядів є досить поширеною методологією вивчення їхніх властивостей в різних галузях людської діяльності. Фрактальний аналіз широко використовується для дослідження економічних, соціальних, біологічних, та інших циклічних процесів.

Одним із його методів є R/S-метод, який широко використовують для вивчення та дослідження часових рядів. Цей метод дозволяє встановити характер часового ряду: чи є це стаціонарний коливальний процес, або ж випадкова величина.

Застосування фрактального аналізу полягає у визначенні величини фрактальної розмірності та показника Герста, проте роль фрактальної константи часто ігнорується. В той же час, для циклічного часового ряду фрактальна константа має таке ж саме значення що і інші показники, оскільки як показник пропорційності у фізичних законах, вона відповідає за природу джерела цього часового ряду.

Метою статті є показати роль та значення фрактальної константи для циклічних часових рядів на прикладі даних витрат енергоресурсу на підприємстві та атестації операторського персоналу на динамічному тренажері.

Аналіз останніх досліджень

Методам R/S аналізу, обчисленню фрактальної розмірності та показника Герста присвячено чимало досліджень у вітчизняній та зарубіжній літературі.

В статті [1] обґрунтовано математичну модель економічних циклічних явищ у вигляді циклічного випадкового процесу, що дало змогу врахувати циклічний, стохастичний характер економічних циклічних явищ та мінливість їх ритму та запропоновано на базі цієї моделі методи статистичного оцінювання ймовірнісних характеристик економічних циклічних явищ. У статті [2] наведено результати розв'язку низки задач математичного моделювання та статистичної обробки циклічних процесів електроспоживання організацій, як об'єкту наукових досліджень. На відміну методу Ходріка-Прескотта, у статті [3] представлено альтернативний метод циклічної декомпозиції, який використовує моделі структурних часових рядів і який у багатьох випадках дає більш точні оцінки та меншу кількість переглядів фази циклу. Роль моделі циклічності часових рядів, як показано в [4], має першочергове значення при такій організації дослідження, яка здійснюється за схемою «модель-алгоритм-програма». Тобто, обґрунтовується модель, відбираються аналітичні методи та створюється відповідне програмне забезпечення. В роботі [5] показано, що часовий споживання електроенергії ряд характеризується показником шорсткості H , який є мірою збереження коливань.

Стаття [6] представляє результати розробки методу фрактального аналізу для попереднього прогнозування часових рядів в мобільній торгівлі іноземною валютою та в навчанні трейдерів. У роботі [7] представлений зрозумілий і простий виклад математичних властивостей фракталів та описане застосування фракталів у різних галузях людської діяльності.

Виклад основного матеріалу: фрактальна константа в R/S методі фрактального аналізу

Методами фрактального аналізу передбачають визначення фрактальної розмірності, показника Герста та фрактальної константи. Співвідношення, що описує суть R/S-методу:

$$\frac{R}{S} = C \cdot n^{H} \tag{1}$$

де R – розмах кумулятивної суми відхилень, S – дисперсія величини часового ряду, n – кількість рівнів часового ряду $Y(t, n)$, H – показник Герста. Важливим моментом є те, що у співвідношенні (1) є присутня константа C, на яку не звертають увагу, в той час, як в загальному, сутність такої константи у її фізичній інтерпретації характеризує природу досліджуваного даного об'єкта, тобто його фізичний зміст.

З іншої сторони, можна представити вираз (1) як пропорцію:

$$\frac{R}{S} \propto C \cdot n^{D}, \tag{2}$$

з коефіцієнтом пропорційності C . В цьому сенсі про пропорційність «$\propto$» можна сказати, що між лівою і правою частинами співвідношення (1) існує деяке число C , для якого між лівою і правою частинами можна поставити знак «=». Це число для даного виразу (2) є єдиним і характеризує природу джерела тих даних, яким відповідають параметри: R, S, n, H . Значення константи C може бути легко визначеним в такий спосіб:

$$\mathrm{C} = \frac{R}{S \cdot n^{H}} \tag{3}$$

Цей параметр може бути успішно використаний при порівнюванні часових рядів з різних джерел. В сучасних літературних публікаціях цьому параметру фактично не приділено жодної уваги, хіба що фіксується факт присутності константи або про неї і не згадують. Це можна пояснити тим, що у фрактальному аналізі конкретний часовий ряд розглядають лише в цілому, з метою визначення показника Герста, для встановлення класу часового ряду. Виділення циклів та інших компонент часового ряду здійснюють звичайними статистичними методами.

При початковому виділенні циклів з наступним фрактальним аналізом кожного з них усі три фрактальних параметри відіграють свою роль. Використання системного підходу, за якого джерело даних розглядається як система ця фрактальна константа визначена для кожного циклу фактично характеризує функціональний стан досліджуваної системи. Іншими словами, послідовність циклів часового ряду характеризують динаміку функціонального стану системи.

Таким чином, обчислити фрактальну константу можна за формулою (3) з використанням:

$$R = max(z_1, \dots, z_n) - min(z_1, \dots, z_n) \tag{4}$$

$$z_i = y_i - \bar{y}, \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{5}$$

$$Z = \sum_{i=2}^{i=n} z_i = \sum_{i=2}^{i=n} \left(y_i - \bar{y} \right) \tag{6}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} \left(y_i - \bar{y} \right)^2}{N}} \quad (7)$$

$$H = 2 - D \quad (8)$$

$$D = \lim_{\delta \to 0} \left[\frac{\ln N(\delta)}{\ln\left(\frac{1}{\delta}\right)} \right] \quad (9)$$

де Z – кумулятивний часовий ряд, D – розмірність Гаусдорфа.

Оскільки R/S-метод є широко вживаним для аналізу часових рядів і добре описаним в літературі (для прикладу – [8]), – не будемо вдаватися в подальші подробиці обчислень.

Приклади фрактальні характеристики циклічних часових рядів

Для демонстрації застосування даного підходу використано два циклічних часових ряди. Такі ряди час від часу розглядаються в різних літературних джерелах. Таким чином, для експериментального дослідження приведеної методики визначення фрактальних характеристик, використано такі циклічні часові ряди:

Помісячне енергоспоживання на протязі року

Дані взято з додатку [9] як звичайний реальний числовий масив з відповідним змістом. Результати фрактального аналізу за 12 місяців приведені в табл. 2. Приведені результати – помісячного фрактального аналізу характеризують витрати електроенергії для конкретної шахти. В цьому випадку цикли мають приблизно однакову тривалість, тобто одного місяця. Такого типу часові ряди є досить поширеними і практично їх розглядають як однакові, нехтуючи відмінностями тривалості. Їх прийнято подавати як конкретний показник певного виду діяльності конкретної людини, колективу чи підприємства, тобто як економічний, фінансовий, ресурсний чи фізичний показник.

Таблиця 1

Місяць	Обсяг даних	Середнє	Середньо-квадратич. відхилення	Розмах Кумулятивної суми відхилень	Фрактальна розмірність	Експонента Герста	Фрактальна константа
K	**N**	**A**	**S**	**R**	**D**	**H**	**C**
1	31	87324	14375	112052	1,0777	0,9223	0,328
2	28	83896	8421	79480	1,0137	0,9863	0,353
3	31	81811	13402	85623	1,0441	0,9659	0,24
4	30	79581	10820	63343	1,2699	0,7301	0,489
5	31	77309	22068	72082	1,3058	0,6942	0,341
6	30	76327	10706	52086	1,0441	0,9559	0,188
7	31	73598	16464	54718	1,2137	0,7863	0,223
8	31	73563	17632	65607	1,0709	0,9291	0,153
9	30	79178	24593	58603	1,4428	0,5572	0,358
10	31	80752	9686	39363	1,1865	0,8135	0,249
11	30	80965	10129	35990	1,1781	0,8219	0,217
12	31	82218	6994	65439	1,1158	0,8842	0,449

З точки зору фрактального аналізу такі показники характеризують лише результат діяльності, тобто є зовнішніми характеристиками джерела даних, в той час як фрактальна константа, у фізичному сенсі, відображає внутрішню структуру цього джерела.

Рис. 1. Значення фрактальної константи для щомісячних енерговитрат

Атестація операторського персоналу на тренажері

Підготовка персоналу, а саме висококваліфікованих операторів керування складними технологічними процесами та системами є важливою державною задачею. В цьому плані, має місце, з однієї сторони розробка відповідних для конкретних задач психофізіологічних та психофізичних методик, а з другої – відповідних навчально-тренувальних засобів – тренажерів. Робота на тренажерах дає важливу інформацію не лише про практичні навики індивіда, але і щодо його психологічних особливостей: витривалості, стресостійкості, концентрації уваги. При атестації персоналу часто використовують груповий метод оцінювання індивідуальних показників, використовуючи для всіх одне і теж саме завдання. Тут після виконання його одним оператором зразу включається наступний, тобто момент завершення роботи даним оператором є початком роботи наступним.

Прикладом такого циклічного часового ряду є атестація групи з 10 операторів – молодих людей з числа студентів (практично одного віку). Суть завдання полягала у виявленні об'єкта заданого класу на зображеннях екрану монітору, що імітували поверхню Землі. В якості об'єктів уваги використано схематичне зображення літака. Розмір об'єкта становив 10×10 пікселів, при розмірі зображення 640×480 пікселів. Кольорова палітра включала 8 кольорів, а структура відображала вододіл, степ та ліс. Водні ділянки відображали глибоководні області та мілину. Кількість зображень в даному завданні була 180 з випадковим чином локалізованими об'єктом на кожному з них. Час експозиції зображень становив 30 секунд, після чого відбувалась заміна цього зображення на наступне. В момент надання зображення на екран, включався мілісекундомір. При виявленні зображення шуканого об'єкта оператор негайно натискав на ключ, що означало прийняте оператором рішення про виявлення об'єкта. В момент натискання ключа секундомір виключався і його значення та номер зображення реєструвались. Якщо протягом 30 секунд оператор не виявив об'єкт секундомір запускався з нуля наступним зображенням.

В табл. 2 приведені дані для 10 операторів, та результати вирішення ними завдання: виявлену кількість зображень з об'єктами *N* та середній час виявлення об'єкта *A*.

Таблиця 2

Опера-тор	Обсяг даних	Середнє	Середньо-квадратич. відхилення	Розмах Кумулятивної суми відхилень	Фрактальна розмірність	Експонента Герста	Фрактальна константа
K	N	A	S	R	D	H	C
1	150	645	138	2570	1,2084	0,7916	0,3526
2	105	767	192	3684	1,1998	0,8002	0,4638
3	104	1030	342	6336	1,1996	0,8004	0,4496
4	157	741	183	3842	1,2599	0,7401	0,4978
5	130	726	152	1672	1,3304	0,6696	0,4233
6	121	728	132	1572	1,3629	0,6321	0,5735
7	173	476	94	1615	1,2558	0,7442	0,3708
8	112	512	125	1802	1,2719	0,7284	0,4637
9	106	612	172	1220	1,2022	0,7978	0,1731
10	104	710	188	2669	1,2648	0,7352	0,4665

Рис. 2. Значення фрактальної константи атестації бригади операторського персоналу за критерієм оперативності.

Особливістю даного циклічного часового ряду є те, що цикли в ньому є незалежними один від одного, оскільки характеризують конкретні джерела даних, а саме операторів. Проте з точки зору роботи

тренажера як окремої системи, яка фактично для кожного з них надає одне і те ж завдання, маємо циклічний часовий ряд в одному часовому просторі. Іншими словами, тренажер надає один і той самий стимул, на який реагує оператор протягом певного часу, після чого цей самий стимул надається наступному оператору як передавання естафетної палички.

Висновки

Фрактальна константа, якій присвячене дане дослідження, відображає динаміку внутрішньої структури часового ряду – зміни стану системи, що генерує дані, цикл за циклом.

В даному дослідженні фрактальний аналіз є визначений трьома показниками: фрактальною розмірністю *D*, показником Герста *H* та фрактальною константою *C*. Ці три величини є результатом значень відповідних обчислень величин описової статистики, а саме: кількості рівнів часових рядів в межах циклу *N*, середнього значення, стандартного відхилення *S*, та розмаху кумулятивного часового ряду *R*. Існуючий між ними зв'язок показує співвідношення (1).

Фрактальна константа реагує на зміни в поведінці тренду показника, поданого часовим рядом. На відміну від показника Герста та фрактальної розмірності, фрактальна константа вказує на зміни у внутрішній структурі джерела, яке генерує даний циклічний часовий ряд. Саме тому не варто недооцінювати значення фрактальної константи для повного опису циклічного часового ряду.

Література

1. Горкуненко А.Б., Лупенко С.А., Луцків А.М. Математичне моделювання економічних циклічних процесів для їх автоматизованого аналізу та прогнозу. Вісник Хмельницького національного університету. 2010. № 3. С. 269–275.

2. Щербак Т.Л. Задачі математичного моделювання та статистичної обробки циклічних процесів електроспоживання. Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки : зб. наук. пр. Кам'янець-Подільський : Кам'янець-Подільськ. нац. ун-т, 2010. Вип. 4. С. 246–260.

3. Ouwehand Pim. Estimation of the cycle in economic time series. CBS | Discussion Paper | September 2019. 40 p. https://cros-legacy.ec.europa.eu/system/files/s02p1_-_estimation_of_the_cycle_in_economic_time_series.pdf

4. Приймак М.В., Приймак О.М. Математичні моделі ритмічності (циклічності) в економіці. II Міжнародна науково-методична конф. Форум молодих економістів-кібернетиків «Моделювання економіки: проблеми, тенденції, досвід». 6-8 жовтня 2011 р., м. Тернопіль. С. 71–73.

5. Sanchez J.R., Arizmendi C.M. Fractal Analysis of Electrical Power Time Series. https://www.researchgate.net/publication/1954436_Fractal_Analysis_of_Electrical_Power_Time_Series

6. Kuchansky A., Biloshchytskyi A., Bronin S., Biloshchytska S., Andrashko Y. Use of the fractal analysis of non-stationary time Series in mobile foreign exchange trading for m-learning. Auer M.E., Tsiatsos T. (eds) Internet of Things, Infrastructures and Mobile Applications (IMCL 2019). Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 1192. 2021. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-49932-7_88

7. Feder J. Fractals. Plenum Press, New York, 1988. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4899-2124-6

8. Pilgrim Ian, Taylor Richard P. Fractal Analysis of Time-Series Data Sets: Methods and Challenges. Fractal Analysis, 2018. DOI: 10.5772/intechopen.81958. https://www.intechopen.com/chapters/64463

9. Добровенко Д. Ю. Моделі та методи оцінювання та мінімізації втрат електричної енергії в розподільних мережах : магістерська дис. : 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Київ, 2020. 171 с.

References

1.1) Horkunenko A.B., Lupenko S.A., Lutskiv A.M. Matematychne modeliuvannia ekonomichnykh tsyklichnykh protsesiv dlia yikh avtomatyzovanoho analizu ta prohnozu. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. 2010. № 3. S. 269–275.

1.2) Shcherbak T.L. Zadachi matematychnoho modeliuvannia ta statystychnoi obrobky tsyklichnykh protsesiv elektrospozhyvannia. Matematychne ta kompiuterne modeliuvannia. Seriia: Tekhnichni nauky : zb. nauk. pr. Kamianets-Podilskyi : Kamianets-Podilsk. nats. un-t, 2010. Vyp. 4. S. 246–260.

1.3) Ouwehand Pim. Estimation of the cycle in economic time series. CBS | Discussion Paper | September 2019. 40 p. https://cros-legacy.ec.europa.eu/system/files/s02p1_-_estimation_of_the_cycle_in_economic_time_series.pdf

1.4) Pryimak M.V., Pryimak O.M. Matematychni modeli rytmichnosti (tsyklichnosti) v ekonomitsi. II Mizhnarodna naukovo-metodychna konf. Forum molodykh ekonomistiv-kibernetykiv «Modeliuvannia ekonomiky: problemy, tendentsii, dosvid». 6-8 zhovtnia 2011 r., m. Ternopil. S. 71–73.

1.5) Sanchez J.R., Arizmendi C.M. Fractal Analysis of Electrical Power Time Series. https://www.researchgate.net/publication/1954436_Fractal_Analysis_of_Electrical_Power_Time_Series

1.6) Kuchansky A., Biloshchytskyi A., Bronin S., Biloshchytska S., Andrashko Y. Use of the fractal analysis of non-stationary time Series in mobile foreign exchange trading for m-learning. Auer M.E., Tsiatsos T. (eds) Internet of Things, Infrastructures and Mobile Applications (IMCL 2019). Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 1192. 2021. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-49932-7_88

1.7) Feder J. Fractals. Plenum Press, New York, 1988. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4899-2124-6

1.8) Pilgrim Ian, Taylor Richard P. Fractal Analysis of Time-Series Data Sets: Methods and Challenges. Fractal Analysis, 2018. DOI: 10.5772/intechopen.81958. https://www.intechopen.com/chapters/64463

1.9) Dobrovenko D. Yu. Modeli ta metody otsiniuvannia ta minimizatsii vtrat elektrychnoi enerhii v rozpodilnykh merezhakh : mahisterska dys. : 141 Elektroenerhetyka, elektrotekhnika ta elektromekhanika. Kyiv, 2020. 171 s.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-108-110
УДК 004.67

КАМІНСЬКИЙ РОМАН
Національний університет «Львівська Політехніка»
https://orcid.org/0000-0002-3812-2009
e-mail: kaminsky.roman@gmail.com
ПШЕНИЧНИЙ ОЛЕКСАНДР
Національний університет «Львівська Політехніка»
https://orcid.org/0000-0001-8823-7472
e-mail: sasha.pshenychniy@gmail.com
ХУДИЙ АНДРІЙ
Національний університет «Львівська Політехніка»
https://orcid.org/0000-0003-2029-7270
e-mail: khudyy@ukr.net

ФРАКТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЦИКЛІЧНОГО ЧАСОВОГО РЯДУ ЧИСЕЛ ВОЛЬФА (ПОКАЗНИКА СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ)

Фрактальний аналіз циклічних часових рядів є актуальною задачею в багатьох областях людської діяльності. В даній статті наведена формальна модель циклічного часового ряду та наведені результати фрактального аналізу на прикладі сонячної активності на базі чисел Вольфа. В результаті фрактального аналізу існуючих циклів рядах визначені показники фрактальної розмірності та експоненти Герста.

Ключові слова: циклічні часові ряди, фрактальний аналіз, R/S-метод.

KAMINSKYI ROMAN, PSHENYCHNYY OLEKSANDR, KHUDYY ANDRIY
Lviv Polytechnic National University

FRACTAL ANALYSIS OF PERIODIC TIME SERIES OF WOLF NUMBERS (SOLAR ACTIVITY METRIC)

Periodic time series are ubiquitous: both natural and anthropogenic processes often follow various-length periods, resonating into complex patterns. Research aiming to detect those patterns and predict future process evolution has been active for centuries, but the real breakthrough happened in with introduction of Fractal analysis techniques by B. Mandelbrought and R/S method by H. Hurst. Current research is focused on a methodology of fractal parameters calculation such as Hurst fractal dimensions, Hurst exponent, and defining a formal model of periodic time series. The domain for approbating this methodology was chosen to be data on solar activity, defined by sunspots count – Wolf numbers. The peculiarity of the time series of the number of sunspots, is that the division into cycles is carried out naturally, namely, the absence of spots or their small number are the boundaries of the cycles. In addition, their repeatability in a qualitative sense is identical, but in a quantitative sense, we have a clearly expressed difference in the duration of the cycles, in the nature of the trends present in each of them, in the chaotic dynamics of amplitudes, and therefore in the chaotic change in the dispersion of levels, the asymmetry of the branches of growth and decline, and in values of the number of spots. By their physical essence, time series characterize the dynamics of the measured indicator, which may depend on the influence of many factors, both external and internal, and which are implicitly reflected in its behavior. This, in turn, does not create a completely identical picture of the changing states of the time series data source. For this reason, forecasting methods based on time series trends have inaccuracy and a short horizon. The selection of cycles in time series based on the nature of trend behavior can provide significant results and useful information for making and making important decisions. Fractal characteristics of cycles provide new knowledge about the cyclical process of changes in solar activity. So, the fractal dimension indicates complexity (chaoticity in the dynamics of the level values), the Hurst exponent allows to establish randomness, regularity and the presence of a trend.

Keywords: periodic time series, fractal analysis, R/S-method.

Постановка проблеми

Метод фрактального аналізу – це один із напрямків математичного аналізу, що став складовою частиною методів дискретної нелінійної динаміки і призначений для дослідження нелінійностей в динаміці часових рядів. Його широко використовують при вивченні та оцінюванні ступеня стабільності різноманітних систем, що дозволяє встановити зв'язок стану системи з фрактальними показниками.

В цьому плані, при дослідженні різних аналогічних, зокрема, циклічних процесів представляє певний інтерес їхня фрактальна природа або її відсутність. Відповідь на це дає фрактальний аналіз в результаті застосування R/S-методу (Rescaled range method). Цей метод часто використовують для встановлення характеру часового ряду, тобто ряд є чисто випадковим, чи в ньому присутній тренд, чи він є звичайним стаціонарним коливальним процесом.

Часові ряди не виникають з нічого і не є самі по собі, вони завжди є результатом спостережень за досліджуваною системою, окремим об'єктом, явищем чи процесом. Розрізняють фрактальні та звичайні часові ряди. Фрактальні часові ряди відрізняється від традиційних своїми статистичними характеристиками. Їх функції розподілів переважно мають важкі хвости, повільно згасаючі автокореляції та спектр потужності, а також можуть мати локальну або глобальну самоподібність. Будучи створені складними системами, вони проявляють свою динаміку в широкому діапазоні часових масштабів та розподілів значень.

В результаті вимірювання спостережуваних величин, формують відповідні таблиці з отриманих числових значень, у відповідності з моментами часу їх реєстрації. Такі пари числових значень – величина та час виміру відображають характер динаміки їх першоджерела.

Основною його особливістю є те, що використовуючи лише обсяг даних та показники варіації, такі як середньоквадратичне (стандартне) відхилення та розмах послідовності біжучої суми відхилень рівнів

оригінального часового ряду від його середнього арифметичного, можна визначити такі фрактальні показники як фрактальну розмірність і показник Герста. В основному, розмах кумулятивного часового ряду та середньо-квадратичного відхилення оригінального часового ряду, отримані як статистичні величини, використовують для обчислення значення величини показника Герста і з його допомогою класифікувати досліджуваний часовий ряд – встановити яким є цей ряд: персистентним (присутній тренд), антиперсистентним (ряд є коливним) або випадковим.

Метою роботи є описання цілісної методології визначення фрактальних показників та розробка формальної моделі циклічних часових рядів. В цьому плані, в рамках даного дослідження має бути представлена формальна модель циклічного часового ряду, а також наданий метод визначення точного значення фрактальної розмірності для циклічних часових рядів.

Аналіз останніх досліджень

Дослідженню часових рядів присвячено дуже багато публікацій у формі монографій, звітів, статей, сайтів. Проте, стосовно виявлення циклічності та фрактального аналізу їх значно менше і вони переважно є більш специфічні. Циклічність розглядається на рівні з трендовою і сезонною компонентами, а стосовно фрактального аналізу основна увага стосується фрактальної розмірності і показника Герста.

В статті [1] показано, що циклічність в часових рядах властива об’єктам різної природи. Цикли не є однаковими, і не є строго періодичними, кожен цикл є унікальний. Тому корисно розглядати часові ряди як реалізацію стохастичних процесів, і це ставить питання про те, як представити циклічність у стохастичних процесах. Автори вважають, що основним описовим інструментом для цього є «функція спектральної щільності», яка є предметом цієї статті. Результати огляду методів аналізу часових рядів разом із їх застосуваннями приведені в статті [2]. В роботі [3] за допомогою відповідних тестів показано застосування методу статистик фазової дисперсії до магнітних циклів, аналогічних до сонячної активності. Метод адаптивної сегментації детермінованих циклічних сигналів розроблено в [4], який дозволяє виділити цикли та визначити їх регулярність, що підтверджується наведеними прикладами оцінювання точності цього методу.

В роботі [5] показано, що фрактальний часовий ряд є самоафінним та характеризується показником шорсткості H , який є мірою збереження коливань, пов'язаних з часовим рядом, причому для вимірювання цього показника використано середні значення попиту на електроенергію в туристичному місті та цілій країні в сенсі порівняння результатів. Для фрактального аналізу часового ряду в [6] використано метод зміненого діапазону (R/S) та оцінено показники фрактальної розмірності та експоненти Герста з метою виявлення зв’язку між розподілом рівнів часового ряду та розподілом експоненти Герста. В публікації [7] використано фрактальний аналіз для форми зображень самих сонячних плям методом відношення площі до периметра. У статті [8] приведені візуально і кількісно результати щодо вимірювання передбачуваності даних часових рядів, за допомогою аналізу перемасштабованого співвідношення (R/S) і показника Герста, яке показує подібність тенденцій щодо часу і виражає подібність даних часових рядів у фрактальних термінах. В статті [9] вивчали ефективність трьох методів: аналіз скоригованого перемасштабованого діапазону, аналіз флуктуацій із виключеним трендом і аналіз часових графіків дисперсії в оцінці показника Герста і вказано, що аналіз скоригованого перемасштабованого діапазону є найбільш ефективним методом із найменшою середньоквадратичною помилкою. Процедуру оцінки стійкості в часових рядах за допомогою показника Герста запропоновано в [10], а також встановлено, що загальна відсутність довгострокової пам’яті характеризує всі часові ряди, які використовували методи Ло. У статті [11] дано огляд аналізу часових рядів разом із його застосуваннями та відображені: їхні закономірності, тенденції, сезонні коливання, нерегулярні цикли та спорадичні зміни рівнів з метою вивчення та оцінювання впливу існуючих чинників.

Виклад основного матеріалу: фрактальний аналіз та суть R/S – методу

Точне коректне визначення фрактального аналізу виявити не вдалося. Тому, для розуміння загального поняття саме фрактального аналізу взято його визначення з англомовної та україномовної вікіпедій.

Означення та зміст фрактального аналізу. Англомовний варіант подає це визначення так: «Fractal analysis is a contemporary method of applying nontraditional mathematics to patterns that defy understanding with traditional Euclidean concepts. In essence, it measures complexity using the fractal dimension». Перекладач Google дає такий переклад: «фрактальний аналіз – це сучасний метод застосування нетрадиційної математики до моделей, які не піддаються розумінню традиційними евклідовими концепціями. По суті, він вимірює складність за допомогою фрактальної розмірності».

Україномовний варіант натомість є таким: «Фрактальний аналіз – відносно молода і швидко прогресуюча галузь сучасної математики, яка засобами теорії мір дробових порядків, метричних розмірностей, операторів дробового інтегрування та диференціювання вивчає властивості математичних об'єктів зі складною локальною будовою».

Отже, в загальному, фрактальний аналіз це методологія вивчення і визначення тих характеристик об’єктів, для яких мають місце фрактальні властивості. На сьогоднішній день методами фрактального аналізу є методи визначення фрактальної розмірності, обчислення показника Герста та знаходження величини фрактальної константи.

Основна робота Г. Герста полягала у розвитку теорії R/S-методу та його практичному застосуванні [12]. Герст (1965) розробив метод аналізу «масштабованого (зміненого) діапазону», тобто статистичний метод аналізу довгих записів природних явищ. Аналіз зміненого діапазону є центральним інструментом моделювання фрактальних даних [7]. У цьому аналізі зміненого діапазону використовуються два фактори:

1) різниця між максимальним і мінімальним значеннями кумулятивного ряду,

2) стандартне відхилення від спостережуваних значень.

Ці два значення, а точніше їх відношення, описуються показниковою функцією з коефіцієнтом пропорційності C та показником степеня H, а в якості незалежної змінної використовують кількість рівнів часового ряду.

В поширенні цього методу значну роль відіграла робота Б. Мандельброта «Фрактальна геометрія природи» [12]. R/S-метод ґрунтується на так званому методі нормованого розмаху або R/S-методі. Тут нормування здійснюється шляхом ділення розмаху накопиченого відхилення ряду кумулятивних сум на стандартне відхилення для оригінального часового ряду. Реалізація цього методу, стосовно часового ряду $Y(t)$, полягає у визначенні таких фрактальних показників: фрактальної розмірності D, розмаху кумулятивної суми відхилень R, стандартного відхилення оригінального часового ряду S, показник Герста $H = 2 - D$, якого в англомовній літературі називають експонентою Герста (Hurst exponent), n – кількість рівнів часового ряду $Y(t, n)$ та фрактальної константи – коефіцієнта пропорційності C. Усі ці величини пов'язані між собою таким співвідношенням

$$\frac{R}{S} = C \cdot n^{H} . \quad (1)$$

Основна відмінність методу нормованого розмаху від інших статистичних методів, які використовують для аналізу часових рядів, полягає в тому, що даний метод включає у свій аналіз напрямок часу, у той час як інші відомі методи стосовно цього часу інваріантні.

Значення відношення *R/S* у рівності (1) відоме як *перемасштабований діапазон*, оскільки воно має середнє значення нуль (сума відхилень кумулятивного ряду) і приведене до стандартного відхилення вихідного часового ряду. Значення *R/S* масштабується, при збільшенні приросту часу, n (тут *n* представляє номер моментів часу реєстрації спостережень), на величину значення показника степеневого закону, який дорівнює H, тобто у степені показника Герста H. Усі фрактали масштабуються за степеневим законом. За цим показником можна порівнювати різні явища, розвиток яких є представлений часовим рядом.

Алгоритм R/S-методу. З теоретичної точки зору в плані цього методу можна подати деякий часовий ряд як множину $Y(t) = y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_n)$ середнє значення $\bar{y}$ і стандартне відхилення σ часового ряду. Далі необхідно перемасштабувати діапазон в такий спосіб: віднімаємо вибіркове середнє $\bar{y}$ від кожного рівня часового ряду

$$z_i = y_i - \bar{y}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

де n – кількість рівнів часового ряду (обсяг вибірки).

В результаті цієї операції отримана послідовність таких різниць має середнє значення нуль. Цю послідовність подають як кумулятивний часовий ряд *Z*:

$$Z = \sum_{i=2}^{i=n} z_i = \sum_{i=2}^{i=n} \left(y_i - \bar{y} \right). \quad (3)$$

Скоригований, тобто змінений (промаштабований) діапазон – це різниця між максимальним і мінімальним значеннями рівнів кумулятивного часового ряду *Z*:

$$R = max\left(z_1, \dots, z_n\right) - min\left(z_1, \dots, z_n\right). \quad (4)$$

Для такого кумулятивного часового ряду $max\left(z_1, \dots, z_n\right) \geq 0$, тобто завжди буде більшим або рівним нулю, натомість $min\left(z_1, \dots, z_n\right) \leq 0$, завжди буде меншим або рівним нулю. Тому скоригований (за різницею (4)) діапазон завжди буде додатнім. Іншими словами, скоригований (промаштабований) діапазон *R* – це відстань, яку система проходить за час *t*. В даній ситуації, якщо часовий ряд не залежить від часу, можна використати рівняння (2) для опису поведінки системи.

Поняття циклічного часового ряду

Циклічність даних. Категорія циклічність зустрічається в багатьох галузях і має свій зміст в кожній з них. Сонячна активність, виражена числами Вольфа, є яскравим прикладом циклічності в межах тривалості місяців та років.

Загалом циклічність або цикли в часових рядах можна подати як повторюваність визначених дій, що відбуваються протягом деякого відтинку часу і на цьому відтинку мають місце початок і завершення цих дій. Аналіз та опрацювання таких циклів суттєво покращує інформацію про такі часові ряди, особливо в

задачах прогнозування та управління. Проте з другої сторони, виходячи з принципів і суті системного підходу такі цикли переважно свідчать про зміни стану системи, яка генерує власне дані таких циклічних часових рядів. На практиці для багатьох часових рядів досить легко виділити такі цикли, проте досить часто таке виділення проводять в кінці аналізу і лише для того щоб зафіксувати їх присутність, тобто аналіз здійснюють відразу цілого часового ряду.

Особливість поняття циклічності, як вважають автори, проявляється в тому, що спочатку необхідно виявляти і розглядати послідовність таких циклів на осі часу, причому відтинки часу для даного циклу, є його межами і мають фіксований порядок, тобто моменти переходу від даного циклу до наступного за ним є одним моментом на осі часу.

Циклічна складова описує переважно тривалі періоди відносного підйому і спаду. Вона складається з окремих циклів, які змінюються за амплітудою і тривалістю, отже, її сутність в тому, що значення досліджуваного показника впродовж деякого часу зростає, досягаючи певного максимуму, потім знижується, досягаючи певного мінімуму, потім знову змінюється до попереднього рівня. Проте, циклічні складові мусять бути подібними відносно трендів, в них можуть змінюватись статистичні показники, вони можуть корелювати між собою, їх межі можуть бути строго визначеними або різними. Їх зміна залежить від впливу різних чинників, які складно ідентифікувати формальними методами. У випадку чисел Вольфа в основі цих чинників лежать внутрішні процеси Сонця, що впливають на його зовнішнє магнітне поле, і які неможливо вимірювати прямими спостереженнями. Для аналізу цієї складової часового ряду зазвичай залучається додаткова інформація, про подібні вивчені інші часові ряди. Для моделювання циклічної компоненти використовуються певні періодичні функції з періодами, що кратні циклам, а в аналітичні вирази цих функцій включають гармоніки (тригонометричні функції), періодичність яких зумовлена змістовною сутністю задачі. Математичним апаратом може слугувати теорія потоків та імпульсних процесів.

З теорії часових рядів відомо, що циклічна складова, що входить в адитивну чи мультиплікативну моделі в такому вигляді:

адитивна модель $$Y(t) = m(t) + c(t) + s(t) + \xi_t, \quad (5)$$

мультиплікативна модель $$Y(t) = m(t) \cdot c(t) \cdot s(t) \cdot \xi_t, \quad (6)$$

$m(t)$ – тренд, що характеризує тенденцію (динаміку) поведінки об’єкта дослідження;

$c(t)$ – циклічна компонента, яка виділяє на осі часу окремі, часто не повторювані, ситуації або події;

$s(t)$ – сезонною, коли враховують економічні фактори, в основному пов’язані з порами року;

ξ_t – випадкова складова, до якої відносять різні помилки, похибки, аномалії, отримані під час збирання та опрацювання даних.

Основною з них є трендова компонента яка відображає основну тенденцію в поведінці досліджуваного показника. Циклічна і сезонна компоненти не зв’язані між собою. Тобто сезонність може бути виявлена в циклічній компоненті, а цикли – в сезонній. Випадкова компонента, як правило, завжди присутня в часовому ряді і фактично в більшості випадків є незалежною.

В тім, циклічна компонента несе важливу інформацію, оскільки виділяє періоди часу, в яких зосереджена інформація про певні події, такі, що їх можна розглядати цілком окремо. Їх тривалість може бути однакова, приблизно однакова або цілком різна. Події, що відбуваються протягом тривалості циклу також можуть бути різними.

Циклічна мінливість часового ряду, як показано в [1] може бути описана періодичними функціями, такими як синус або косинус. В цьому плані циклічність має спектральне представлення коваріанси стаціонарного процесу, а сам циклічний процес може бути поданий як простий стохастичний процес у вигляді:

$$Y(t) = \alpha \cdot cos(\omega t) + \delta \cdot sin(\omega t), \quad (7)$$

де α і δ випадкові змінні з математичним сподіванням $E(\alpha) = E(\delta) = 0$; $E(\alpha \cdot \delta) = 0$, а $E(\alpha^2) = E(\delta^2) = \sigma^2$.

При такому підході процес є простим, він є періодичним з періодом $\frac{2\pi}{\omega}$, а компоненти α і δ мають в $Y(t)$ випадковими амплітуду і фазу, тобто дві будь-які реалізації матимуть різні амплітуди і різні фази.

В даній ситуації на жаль немає жодних інтуїтивних причин вважати, що цикли мають якесь відношення до синусоїдального або якого-небудь іншого періодичного процесу. В теорії хаосу існують неперіодичні цикли і хоча вони мають середню тривалість, проте точне значення тривалості наступного циклу невідоме.

Формальне подання циклічного процесу

Потреба конкретного, формалізованого і разом з тим стислого опису отриманих результатів, виникає досить часто, а особливо для їх публікації. Розглядаючи часовий ряд як послідовність певних, переважно досить подібних повторюваних подій, які розглядають та досліджують на скінченних і сумісних інтервалах часу, можна подати таку сукупність подій циклічним часовим рядом. В результаті попередньої обробки моменти переходу ситуації від події до події є відомі як межі інтервалів на яких розгортаються події, тобто границі циклів є визначені як відповідні моменти часу. Очевидно, що кожному такому циклу можна поставити у відповідність певний показник, який в тій чи іншій мірі характеризує даний цикл. Цикли в цьому випадку будуть представлені прямокутниками різної висоти. Це не буде виглядати як імпульсний процес, оскільки між імпульсами не має проміжків – зріз прямокутника першого циклу збігатиметься з фронтом прямокутника наступного циклу. Різниця тут полягатиме лише у висоті прямокутників, визначеній характеристичним показником для кожного циклу.

Якщо кожному циклу приписати значення деякого визначального показника, наприклад, значення рангу даного циклу, величину багатовимірного середнього з отриманих з аналізу його фрактальних показників або якогось окремого, важливого для даної задачі, показника. Тоді, візуалізацію такого бачення можна реалізувати, використовуючи властивості одиничної функції, або функції одиничного стрибка Гевісайда. Ця функція має такий вигляд:

$$U\left(t-t_0\right)=\begin{cases}0, & t<t_0,\\ \dfrac{1}{2}, & t=t_0,\\ 1, & t>t_0.\end{cases} \tag{8}$$

Саме у такому вигляді (2) дана функція $U\left(t-t_0\right)$ називається узагальненою одиничною функцією Гевісайда. Графік цієї функції на осі часу, зображений на рис. 1, показує те, що в момент часу $t=t_0\neq 0$ має місце зміна її значення з $U\left(t\right)=0$ до значення $U\left(t\right)=1$, а також відбувся її зсув вправо на t_0.

Позитивним моментом використання одиничної функції є те, що будь-який цикл може бути представлений різницею двох одиничних функцій однакової амплітуди, що й зображено на рис. 2.

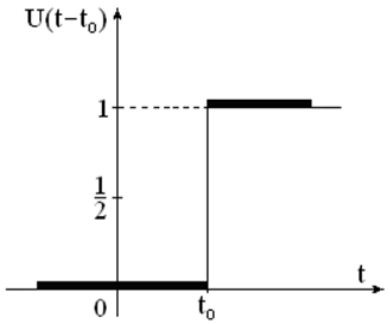


Рис. 1. Графіки одиничної функції.

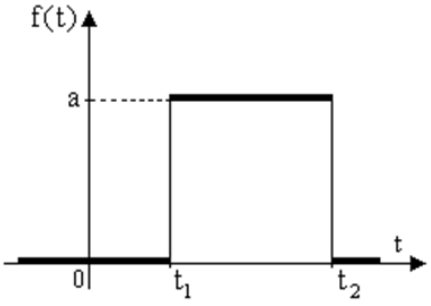


Рис. 2. Графік одиничного імпульсу локалізованого в часі.

Тобто, за допомогою узагальнених одиничних функцій легко представити локалізований в часі цикл, зображений прямокутником висотою $f\left(t\right)$, який має аналітичний опис у формі обмежень тривалості цього імпульсу

$$f\left(t\right)=\begin{cases}a, & t_1<t<t_2,\\ 0, & t<t_1, t>t_2.\end{cases} \tag{9}$$

Функцію $f\left(t\right)$ за допомогою узагальненої одиничної функції можна записати в наступний спосіб

$$f\left(t\right)=a\left[\eta\left(t-t_1\right)-\eta\left(t-t_2\right)\right]. \tag{10}$$

Графік цієї функції має вигляд зображений на рис. 3.

В цьому випадку, циклічний часовий ряд $Y\left(t\right)$ можна подати як суму послідовних в часі циклів у такому вигляді

$$Y\left(t\right)=\sum_{i=0}^{T}\sum_{k=1}^{K}Y_i^k\left(t_i\right)\cdot\left[\eta\left(t_i-t_k\right)-\eta\left(t_i-t_{k+1}\right)\right], \tag{11}$$

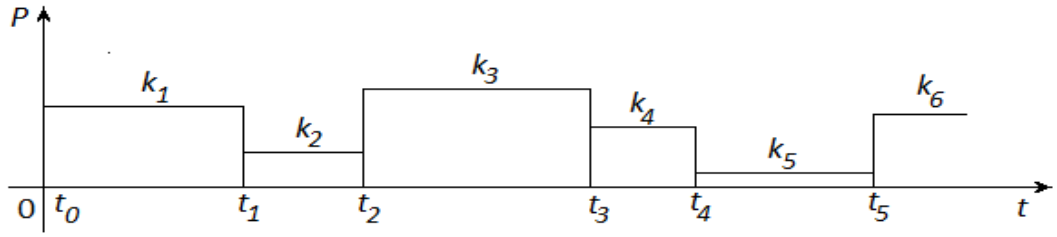


Рис. 3. Значення характеристичного показника P і тривалості циклів як $t_{i+1} - t_i$ для k_i циклів часового ряду

де k – номер моменту часу на початок циклу, а i – індекс моменту часу, в який проведено або зафіксовано дане спостереження (в загальному це біжучий час).

Оскільки значення границь циклів та їх параметрів в результаті попередньої або біжучої обробки даних ці значення є відомі візуалізація (11) у вигляді діаграми чи графіка дає наочну картину стосовно тривалості та розподілу циклів на осі часу.

Циклічні часові ряди, які побудовані на статистичних даних про конкретні реальні процеси володіють фрактальними характеристиками, а тому для їх дослідження можуть використовуватися методи фрактального аналізу. Важливість фрактального виміру часового ряду є в тому, що він вказує на те, що процес є чимось середнім між детермінованим і випадковим [10].

На практиці аналіз часового ряду переважно починають з вивчення його графіка. На основі його розгляду встановлюють вид тенденції, частоту екстремумів, спадні і зростаючі ділянки, викиди. Саме в цей момент можна виділити найбільш цікаві інтервали, які відповідають монотонному зростанню величини значень рівнів – від деякого найменшого значення до деякого найбільшого. Якщо ж циклом вважати зміну значень рівнів, тобто від якогось значення, а далі зростання і спад (чи навпаки) до такого ж значення, то в даній ситуації ми можемо говорити про напівцикли і розглядати ситуації саме в таких інтервалах часу.

Отже циклічність часового ряду може бути зумовлена як самою природою джерела, так і суб'єктом, що його досліджує, проте і в першому і в другому випадку вона є його фізичною характеристикою.

Визначення фрактальних параметрів

Алгоритм визначення точного значення фрактальної розмірності

В даній роботі значення фрактальної розмірності визначено клітинковим методом Гаусдорфа-Безіковича. Фрактальна розмірність є одним з центральних понять фрактальної геометрії. Вона характеризує міру структурованості досліджуваного об'єкта, його самоподібність, тобто відображає як цей об'єкт заповнює простір в якому знаходиться. Наприклад, лінії графіка одновимірного часового ряду зображені на площині – двовимірній системі, займають на ній певну площу і їх розмірність вже не рівна одиниці.

Часовий ряд, переважно, зображають графічно деякою множиною X, точок, кожна з яких представлена парою координат на площині, так, що ординати приймають випадкові значення, а абсциси мають строго неспадний порядок. Отже, кожен рівень часового ряду має фіксоване положення, як точки з відомими координатами. В такому разі, часовий ряд можна розглядати як множину X точок, занурених в двовимірний евклідовий простір.

Одновимірний часовий ряд в такому просторі не є плоским об'єктом (бо утворений лініями), тобто вже не належить до категорії «лінія», розмірність якої рівна одиниці, але і не належить до категорії «площина», розмірність якої – два. За [12], множина X таких точок називається фрактальною, якщо її розмірність Гаусдорфа $D(X)$ не є цілим числом. Розмірність Гаусдорфа за означенням показує яку кількість n «куль» діаметром ε потрібно для того, щоб в кожній такій кулі знаходився хоча б один елемент множини X, тобто $n(\varepsilon) \approx 1/\varepsilon^D$, коли $\varepsilon \to 0$. Логарифмуючи цей вираз та враховуючи зміну діаметр ε отримаємо вираз для розмірності Гаусдорфа, а відтак і фрактальної розмірності:

$$D = \lim_{\varepsilon \to 0} \frac{\log n(\varepsilon)}{\log\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)}. \tag{12}$$

З другої сторони, розмірність – це число D, яке виражає зв'язок природної міри геометричної фігури (наприклад, довжина, площа або об'єм) з величиною (в даному випадку довжиною), яку покладено в основу даної метричної системи. Якщо метричний еталон такої величини, прийнятий за одиницю вимірювання, збільшити (зменшити) в b раз, то вказана міра зменшиться (збільшиться) в b^D раз. Цю розмірність називають ***метричною***, а джерелом такого означення є вираз для звичайної міри M (довжини, площі чи об'єму) довільної геометричної кривої, поверхні чи тіла і її можна подати в такому вигляді:

$$M = \lim_{\delta \to 0}\left[N(\delta) \cdot \delta^D \right], \quad D = 1, 2, 3 \tag{13}$$

де $N(\delta)$ – число симплексів (відрізків, клітинок або кубів) з геометричним фактором (лінійним розміром) δ, що визначає апроксимацію вихідної множини (об'єкта) в метричному просторі.

В 1919 р. Гаусдорф запропонував своє означення розмірності компактної множини для такого типу об'єктів в довільному метричному просторі. Він зауважив, що якщо вказані множини покривати кулями радіусом δ, то мінімальне число куль $N(\delta)$, що покривають або містяться в цій множині, при зменшенні δ зростає у відповідності зі степеневим законом:

$$N(\delta) \propto \left(\frac{1}{\delta}\right)^{D}. \tag{14}$$

Причому, показник степеня D може бути обчислений точно. Цей показник Гаусдорф назвав розмірністю. Якщо логарифмувати обидві частини рівняння (14) і подати у вигляді рівності відносно D, тоді отримаємо точне визначення хаусдорфової розмірності:

$$D = \lim_{\delta \to 0} \left\lfloor \frac{\ln N(\delta)}{\ln\left(\frac{1}{\delta}\right)} \right\rfloor \tag{15}$$

Як бачимо з наведених інтерпретацій обидва вирази приводять до одного і того ж вигляду поняття розмірності, саме цей вираз і фігурує при розгляді фрактальної розмірності. На основі цього розроблено метод для обчислення точного значення фрактальної розмірності одновимірного часового ряду.

Суть методу полягає в тому, що на графік часового ряду накладають набір сіток, клітинки яких мають квадратну форму, причому, часовий ряд вважають еквідистантним. Розміри клітинок підбирають так щоб їх ширина, в додатному напрямку осі абсциси, охоплювала 2, 3, 4, 5, 6 значень часового ряду. Тоді висоту клітинок h, в напрямку осі ординати можна легко визначити за її шкалою. В результаті, кількість клітинок в кожному вертикальному стовпчику, з основою рівною ширині клітинки, буде рівна

$$n_k = \frac{max\left(y_i^k\right) - min\left(y_i^k\right)}{\Delta l} \tag{16}$$

де n – номер стовпчика, k – номер сітки, а Δl – розмір її клітинки, визначений за шкалою ординат.

Очевидно, що кількість клітинок в даному випадку і загальна їх сума будуть дробовим числами, проте це є точне значення кількості клітинок для даного розміру сітки. В результаті маємо співвідношення для обчислення точного значення кількості клітинок фрактальної розмірності для конкретного розміру сітки

$$D_k = \frac{\log\left(n_k\right)}{\log\left(\frac{1}{\Delta l_k}\right)} \tag{17}$$

Як подає рівняння (17) для кожної сітки з цього набору значення величини D_k очевидно будуть відрізнятися. Відображення цих значень в логарифмічних координатах показує, що ці значення з ростом розміру клітинок монотонно спадають за величиною.

Візуально можна стверджувати, що ця їх монотонність має лінійну залежність. На практиці цю залежність апроксимують прямою лінією $y(x) = D \cdot x + b$. Тоді, значення кутового коефіцієнта D приймається за величину фрактальної розмірності часового ряду. Значення фрактальної розмірності D є мірою шорсткості і в одновимірному просторі вищим значенням відповідає і більша шорсткість, зазубреність.

Визначення показника Герста

Аналіз поведінки різноманітних систем, представлених часовими рядами досить часто показує їх фрактальну поведінку та довгострокову залежність – тривалу пам'ять між рівнями. Ця залежність або стійкість у часових рядах пов'язана зі степеневими кореляціями і часто називається ефектом Герста. Емпіричні спостереження багатьох вчених показали, що кореляції між спостереженнями, які знаходяться далеко одне від одного в часі, затухають набагато повільніше, ніж можна було б очікувати від класичних стохастичних моделей [13]. Залежність від тривалої пам'яті характеризується показником Герста H. Варто зазначити, що фрактальна розмірність є локальною властивістю часового ряду, в той час як показник Герста є глобальною характеристикою.

На практиці досить часто фрактальну розмірність замінюють показником Герста *H*. Це пов'язано з тим, що має місце простий лінійний зв'язок між розмірністю D та показником Герста H, значення якого

належать одиничному інтервалу, тобто $H \in [0,1]$.

Для фрактальних – самоподібних часових рядів їх локальні властивості відображаються на глобальних в такий спосіб:

$$D = m + 1 - H \tag{18}$$

де m. – розмірність простору, в даному випадку одновимірного, тобто $m = 1$.

Якщо $H > 0.5$ має місце залежність від тривалої пам'яті або персистенція і, в цьому випадку, ряд має стійкий тренд. При $H < 0.5$ ряд має коливальний характер. Іншими словами, чим ближче значення показника H до 1, тим більш зазубреним буде часовий ряд. Коли значення H близьке або рівне 0.5 часовий ряд є випадковим і не пам'ятає своїх початкових умов. Отже, для визначення показника Герста достатньо знайти значення фрактальної розмірності.

Використовуючи співвідношення (18), значення показника Герста визначають так:

$$H = 2 - D \tag{19}$$

З виразу (19) випливає: точність значення величини показника H визначається точністю значення величини показника фрактальної розмірності D.

Самоподібність, безсумнівно, є природним припущенням для багатьох систем. Вважається, що через інтуїтивну привабливість і відсутність відповідних альтернатив самоподібність і лінійний зв'язок виправдані великою кількістю результатів, отриманих вченими.

Обчислення фрактальних характеристики циклічних часових рядів на прикладі даних сонячної активності – чисел Вольфа

У лівій частині виразу (1) значення величин *R* і *S* досить легко визначити за допомогою отриманих значень, проте в правій частині значення експоненти Герста *H* можна визначити, лише визначивши значення фрактальної розмірності *D*. Для демонстрації застосування даного підходу використано дані сонячної активності – числа Вольфа.

Представлення сонячної активності середньомісячними числами Вольфа, які відповідають середньому значенню спостережуваної кількості плям на Сонці протягом кожного місяця. Підрахунок цих плям є відомий з 1749 року і проводиться кожен день і в наш час. В даній роботі використано дані до 2019 року, тобто до завершення 24-го циклу [14].

Кількість рівнів цього часового ряду становить 3251, які, в свою чергу, утворюють 24 цикли з подібною структурою та з різною тривалістю. Результати фрактального аналізу інтенсивності плям на Сонці розподілених за циклами є приведені в табл. 1. В результаті як статистичного так і фрактального аналізів в таблицю внесені такі числові дані.

Таблиця 1

№ циклу	Обсяг даних	Середнє	Середньо-квадратич. відхилення	Розмах кумулят	Фрактальна розмірність	Експонента Герста
K	**N**	**A**	**S**	**R**	**D**	**H**
1	134	69,864	41,795	446,95	1,143	0,857
2	109	98,486	64,92	392,97	1,1891	0,8109
3	112	108,661	87,49	2419,78	1,1632	0,8368
4	165	102,035	75,32	5173,84	1,1931	0,8069
5	152	37,407	31,38	2133,92	1,104	0,896
6	150	31,339	30,05	1662,22	1,1538	0,8462
7	127	62,647	44,91	2325,28	1,1063	0,8937
8	117	112,309	80,04	5802,86	1,1472	0,8528
9	150	98,857	68,67	3915,95	1,1176	0,8824
10	136	91,615	60,68	3297,02	1,2252	0,7748
11	142	88,335	78,06	4629,36	1,0644	0,9356
12	136	56,432	44,73	2591,22	1,0332	0,9668
13	147	64,143	50,85	3087,1	1,1973	0,8027
14	137	53,439	43,99	2482,79	1,0577	0,9423
15	121	73,320	57,57	2792,75	1,0811	0,9189
16	122	67,744	47,6	2530,63	1,0792	0,9208
17	126	95,321	68,8	3504,12	1,0665	0,9335
18	123	108,033	67,8	4126,37	1,0261	0,9739
19	127	128,135	100,78	5730,86	1,0883	0,9117
20	141	85,082	52,69	3204,06	1,1656	0,8344
21	124	112,568	82,91	4468,64	1,137	0,863
22	117	107,863	82,91	4022,32	1,1298	0,8702
23	153	80,046	65,69	4294,68	1,2989	0,7011
24	145	49,467	41,21	2606,53	1,125	0,875

Статистичні: номер циклу K від першого до 24-го, який завершився 1 грудні 2019 року, обсягу циклу N , вираженому кількістю місяців, середнього арифметичного A кількості плям в циклі та середньо-квадратичного відхилення кількості плям S для кожного циклу.

Особливість часового ряду кількості плям на Сонці, яка у свій спосіб характеризує сонячну активність полягає в тому, що поділ на цикли здійснюється природним шляхом, а саме, відсутність плям або мала їх кількість є границями циклів. Крім того, повторюваність їх в якісному сенсі ідентична, проте в кількісному – маємо чітко виражену відмінність в тривалості циклів, в характері присутніх трендів в кожному з них, хаотичній динаміці амплітуд, а отже і хаотичній зміні дисперсії рівнів, асиметричності гілок зростання і спаду та в значенні числа плям.

Висновки

Використання фрактального аналізу, зокрема, до часових рядів має в наш час досить широке застосування, хоча використовується лише частина його можливостей. Проте, стосовно часових рядів можна зауважити, що фрактальному аналізу переважно піддають весь ряд, окремо зазначаючи присутність сезонної та циклічної компонент та інших його характеристик. На нашу думку, як і багатьох методичних матеріалів з аналізу часових рядів, виявлення сезонності і циклів має бути первинним.

За своєю фізичною суттю часові ряди фактично характеризують динаміку вимірюваного спостережуваного показника, яка може залежати від впливу багатьох чинників, як зовнішніх, так і внутрішніх, і, які неявно відображені в його поведінці. Це, у свою чергу, не створює повної ідентичної картини зміни станів джерела даних часового ряду. Власне, з цієї причини, мають неточність та малий горизонт методи прогнозування на основі трендів часових рядів.

Виділення циклів в часових рядах на основі характеру поведінки тренду може дати вагомі результати та корисну інформацію для вироблення і прийняття важливих рішень.

Фрактальні характеристики циклів дають нові знання про циклічний процес зміни сонячної активності. Так, фрактальна розмірність вказує на складність (хаотичність в динаміці значень рівнів), показник Герста дозволяє встановити випадковість, регулярність та присутність тренду.

Література

1. Watson M. W. Time Series: Cycles. https://www.princeton.edu/~mwatson/papers/isb201119.pdf

2. Jonath Jose. Introduction to time series analysis and its applications. https://www.researchgate.net/publication/362389180

3. Olspert N., Kapyla M. J. and Peltz J. Method for estimating cycle lengths from multidimensional time series: Test cases and application to a massive “in silico” dataset. arXiv:1612.01791v1 [astro-ph.SR] 6 Dec 2016. https://ieeexplore.ieee.org/document/7840977

4. Lytvynenko Iaroslav. Method of segmentation of determined cyclic signals for the problems related to their processing and modeling. Scientific Journal of the Ternopil National Technical University 2017, № 4 (88) 153-169.

5. Sanchez J.R., Arizmendi C.M. Fractal Analysis of Electrical Power Time Series. https://www.researchgate.net/publication/1954436_Fractal_Analysis_of_Electrical_Power_Time_Series

6. Malhar Kale, Ferry Butar Butar. Fractal Analysis of Time Series and Distribution Properties of Hurst Exponent. https://www.researchgate.net/publication/281092858

7. Rajkumar B. Haque S. Hrudey W. Fractal dimensions of umbral and penumbral regions of sunspots. Solar Physics volume 292, Article number: 170 (2017). https://doi.org/10.1007/s11207-017-1184-2

8. Bal A., Ganguly D., Chatterjee K. (2021). Stationarity and Self-similarity Determination of Time Series Data Using Hurst Exponent and R/S Ration Analysis. In: Hassanien, A.E., Bhattacharyya, S., Chakrabati, S., Bhattacharya, A., Dutta, S. (eds) Emerging Technologies in Data Mining and Information Security. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 1300. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4367-2_57

9. Ceballos Roel F., Largo Fe F. On The Estimation of the Hurst Exponent Using Adjusted Rescaled Range Analysis, Detrended Fluctuation Analysis and Variance Time Plot: A Case of Exponential Distribution. arXiv:1805.08931 [stat.CO] (or arXiv:1805.08931v1 [stat.CO] for this version). https://doi.org/10.48550/arXiv.1805.08931, Journal reference: Imperial Journal of Interdisciplinary Research 2017 (Volume 3, Issue 8, pp. 424-434)

10. Brooks C. (1995) A measure of persistence in daily pound exchange rates. Applied Economics Letters, 2 (11). pp. 428-431. ISSN 1466-4291. doi: https://doi.org/10.1080/135048595356998.

11. Jonath Jose. Introduction to time series analysis and its applications. https://www.researchgate.net/publication/362389180_INTRODUCTION_TO_TIME_SERIES_ANALYSIS_AND_ITS_APPLICATIONS

12. Mandrlbrot Benoit B. The Fractal Geometry of Nature. Times Books, 1982, 468 pages, ISBN-10: 0716711869.

13. Chu Kiong Loo, Andrews Samraj, and Gin Chong Lee. Evaluation of Methods for Estimating Fractal Dimension in Motor Imagery-Based Brain Computer Interface. Discrete Dynamics in Nature and Society, Volume 2011, Article ID 724697, 8 pages, doi:10.1155/2011/724697

14. NASA data on solar activity observation. https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch/SN_m_tot_V2.0.txt.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-117-122
УДК 621

ГОРЯЩЕНКО КОСТЯНТИН
Хмельницький національний університет
ORCID ID: 0000-0002-7034-8702
e-mail: kostyakst@ukr.net
СТЕЦЮК ВІКТОР
Хмельницький національний університет
e-mail: sv_rt@i.ua
ГОРЯЩЕНКО СЕРГІЙ
Хмельницький національний університет
ORCID ID: 0000-0001-6623-2523
e-mail: tnt7@ukr.net
ЛИСИЙ АНДРІЙ
Хмельницький національний університет
ORCID ID 0009-0001-0065-9740
e-mail: Andrii.lysyi1@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

Анотація - *Синхронні двигуни з постійними магнітами (СДПМ) відомі давно. В Україні цей тип двигунів використовується недостатньо широко. Синхронні двигуни потребують менше енергії для забезпечення достатньої продуктивності, ніж добре відомі асинхронні двигуни. Показано, якого обладнання потребують синхронні двигуни для забезпечення плавного пуску, руху та зупинки ротора.*

Наразі відомі три схеми керування двигунами: вольт-частотне (VF), бездатчикове векторне керування (SVC) та векторне керування (VC). Але тільки керування енкодером при VC-керуванні забезпечує адекватний запуск синхронного двигуна. PMSM дозволяють архівувати постійне збільшення швидкості, швидку реакцію на навантаження ротора. Вихідний крутний момент PMSM автоматично регулюється напругою і струмом живлення при стабільних обертах.

У статті наведено результати порівняння існуючого двигуна PMSM з енкодером з використанням драйвера векторного керування та віртуальної моделі PMSM зі змінним навантаженням.

Ключові слова -- синхронний двигун, керування, енкодер, векторне керування

KOSTYANTYN HORIASHCHENKO
Khmelnytskyi National University
ORCID ID: 0000-0002-7034-8702
kostyakst@ukr.net
VIKTOR STETSIUK
Khmelnytskyi National University
sv_rt@i.ua
SERHIY HORIASHCHENKO
Khmelnytskyi National University
ORCID ID: 0000-0001-6623-2523
tnt7@ukr.net
ANDRIY LYSYI
Khmelnytskyi National University, Ukraine
ORCID ID 0009-0001-0065-9740
Andrii.lysyi1@gmail.com

MODELLING AND TESTING OF SYNCHRONOUS MOTORS WITH PERMANENT MAGNETS

Abstract - *Permanent magnet synchronous motors (PMSM) have been known for a long time. In Ukraine, this type of motors is not used widely enough. Synchronous motors require less energy to provide sufficient performance than the well-known induction motor. It shows what PMSM require control equipment to ensure smooth rotor start, motion and stop.*

Starting methods such as the use of pony motors, starting with external drives, or the use of specialized starting equipment such as synchronous motor starters or static frequency converters are used to overcome these problems.

In the case of a permanent magnet synchronous motor, one of the fundamental problems is starting from an unknown position. Starting movement from an unknown position can lead to a temporary reverse movement of the rotor until the fields of the rotor and stator are aligned. Three schemes like Volt-Frequency (VF), Sensorless Vector Control (SVC) and Vector Control (VC) to control motors are currently known. But only the control of the encoder at VC control type ensures an adequate start of the synchronous motor. PMSM allow you to archive a constant increase in speed, a quick response to the rotor load. The output torque of the PMSM is automatically regulated by the supply voltage and current with stable rotations.

The article shows results of comparing existing PMSM motor with an encoder with use of Vector Control Driver and virtual model of PMSM with a variable load. The high-speed response of the frequency converter together with the control system ensures a constant rate of increase in the motor speed regardless of load changes. Thus, the synchronous motor maintains stable mechanical characteristics regardless of changes in load and rotation frequency. At the same time, the motor voltage and current are dynamically adjusted to ensure the desired output performance

Keywords —- synchronous motor, control, encoder, vector control

Вступ

Зростаюча увага до захисту навколишнього середовища, енергозбереження та раціонального використання ресурсів у всьому світі призвела до посилення уваги до екологічності не лише промислового обладнання, а й побутових приладів. Очевидно, що побутові прилади демонструють значно нижчі показники енергоспоживання. Однак широке використання побутових приладів зумовлює необхідність всебічного аналізу в цій сфері. За різними оцінками, на побутову техніку припадає до 40% всієї енергії, що генерується різними технічними засобами [1].

Поява систем автономного енергоспоживання, що використовують такі джерела, як сонячна, вітрова або гідроелектроенергія, зумовлює необхідність зменшення потужності обладнання при збереженні того ж рівня функціональності. Одним із значних споживачів енергії в побутовій техніці є двигун.

Асинхронні двигуни, які зазвичай використовуються, не мають інтелектуальних систем керування, і мають такі механічні характеристики, як:

1. Високий механічний крутний момент на роторі двигуна, навіть на низьких швидкостях.
2. Висока щільність потужності на одиницю об'єму двигуна.

Тому для задоволення експлуатаційних вимог побутової техніки використовуються як однофазні, так і трифазні двигуни. Нижче наведено приклади класичних і сучасних типів двигунів, що використовуються в цих приладах:

Класичні двигуни включають в себе:

- Однофазні асинхронні двигуни.
- Однофазні універсальні двигуни.

Сучасні двигуни в тому числі:

- Трифазні асинхронні двигуни.
- Трифазні синхронні двигуни.

У синхронних двигунах можна досягти широкого діапазону зміни швидкості. Здатність змінювати швидкість обертання ротора має важливе значення для сучасних побутових приладів, таких як холодильники, пральні машини, міксери та різноманітні конвеєри. Ці пристрої зазвичай вимагають низьких швидкостей обертання і високого крутного моменту під час запуску і роботи.

Особливістю таких двигунів є високе механічне тягове зусилля на нульовій швидкості або в режимі утримання ротора. Крім того, ці двигуни демонструють постійну вихідну потужність у широкому діапазоні швидкостей. Тому синхронний двигун з постійними магнітами повинен не тільки працювати на номінальній швидкості, але й забезпечувати постійну потужність на більш високих швидкостях.

Для досягнення векторного керування синхронними двигунами необхідна інформація про положення ротора. Залежно від бажаної роздільної здатності використовуються різні методи. Рішення з низькою роздільною здатністю можуть використовувати енкодер положення, рішення з середньою роздільною здатністю - резольвер або датчики на основі ефекту Холла, а рішення з високою роздільною здатністю, як правило, покладаються на оптичні датчики.

Рис. 1. Інкрементний енкодер компанії FENAC, Туреччина

На рисунку 1 показано оптичний енкодер з 1024 імпульсами на оборот.

У цій технології датчик обертання встановлюється безпосередньо на ротор без необхідності використання додаткових передавальних елементів. При цьому потужність передається безпосередньо на робочий пристрій. Ця концепція, відома як "прямий привід", забезпечує швидку динамічну реакцію, зменшення акустичного шуму, зниження рівня вібрації та значне зниження енергоспоживання. Ці покращення сприяють значному збільшенню часу роботи системи.

Технічні засоби, що використовуються для визначення положення ротора в цих системах, дозволяють досягти високопродуктивних результатів. Трифазні контролери з електронним керуванням відіграють вирішальну роль у досягненні високих показників ефективності.

Основна частина

Серед синхронних двигунів синхронний двигун з постійними магнітами - єдиний варіант, який відноситься до категорії трифазних машин. Статор такого двигуна складається з традиційних трифазних обмоток. У роторі синхронного двигуна з постійними магнітами постійні магніти виконують ту ж функцію, що і в звичайній синхронній машині. Розробка нових магнітних матеріалів, включаючи використання рідкоземельних матеріалів, дозволила створити ці постійні магніти.

Синхронний двигун з постійними магнітами (див. рис. 2) має ряд переваг для розробки сучасних систем керування рухом, таких як [5]:

1. Зменшена вага.
2. Компактний розмір.

3. Усунення масла, що призводить до скорочення часу на технічне обслуговування.
4. Низька швидкість обертання ротора (наприклад, 120 об/хв для швидкості автомобіля 1 м/с).
5. Високий крутний момент.
6. Здатність до рекуперації енергії, що дозволяє відновлювати до 30% енергії.
7. Здатність утримувати автомобіль на нульовій швидкості з меншим виділенням тепла в порівнянні з асинхронними двигунами.

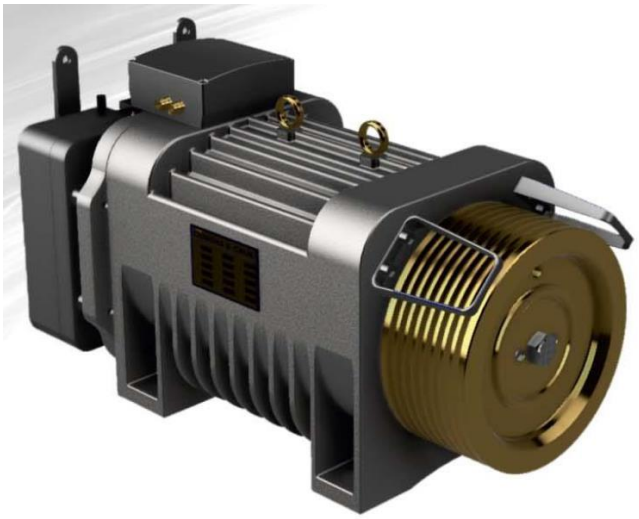
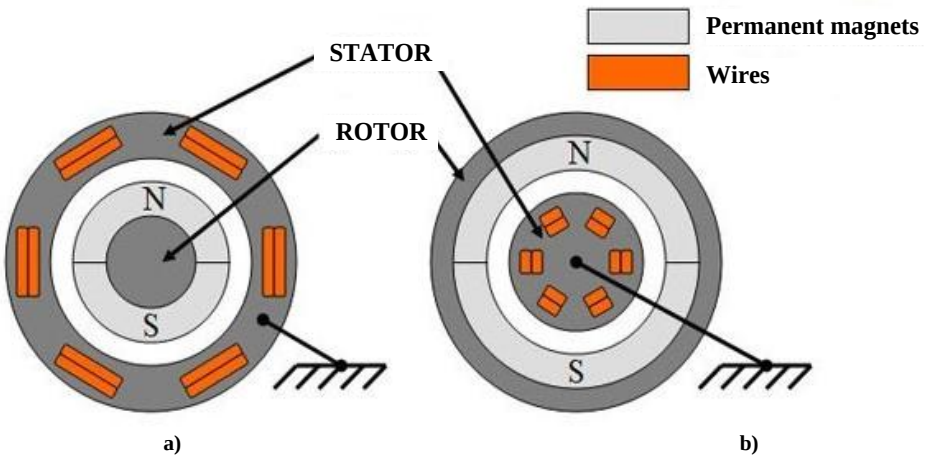


Рис. 2. Модель двигуна CLS6-A компанії CLINDAS, Туреччина

Дійсно, використання постійних магнітів в синхронних двигунах з постійними магнітами дозволяє генерувати потужний магнітний потік в повітряному зазорі між ротором і статором, що призводить до високоефективної роботи двигуна.

Наприкінці 1960-х років для асинхронних двигунів було впроваджено векторне керування (також відоме як керування по полю або FC), що дозволило швидко реагувати на тягове зусилля, порівнянне з машинами постійного струму [2]. З часом методи керування набули широкого застосування і використовувалися в багатьох сферах аж до кінця 2018 року.

У синхронному двигуні швидкість обертання визначається швидкістю поля статора, відомою як синхронна швидкість. Синхронна швидкість (ωs) визначається частотою живлення статора (fs) і кількістю пар полюсів (p). Зазвичай обмотки статора трифазної синхронної машини з'єднані за синусоїдальним законом розподілу (див. рис. 3).



a) **b)**

Рис. 3. Магніти в синхронних двигунах [6].

Коли на ротор двигуна подається трифазна напруга живлення, генерується обертове магнітне поле, яке обертається в певному напрямку в залежності від послідовності вхідних фаз. Передбачається, що магнітне поле також розподіляється за синусоїдальним законом розподілу.

Швидкість обертання двигуна, позначена як N (синхронна швидкість), визначається рівнянням (1), яке пов'язує синхронну швидкість з частотою живлення статора і кількістю пар полюсів:

$$N = \frac{120\, f_s}{p} \tag{1}$$

де N - синхронна швидкість в обертах за хвилину (об/хв).

f_s - частота живлення статора в герцах (Гц).

p - кількість пар полюсів у двигуні.

Це рівняння дозволяє розрахувати синхронну швидкість на основі частоти живлення статора і кількості пар полюсів.

Проблеми пуску синхронних двигунів

Синхронні двигуни можуть зіткнутися з певними проблемами під час процесу запуску. Ось деякі поширені проблеми, пов'язані із запуском синхронних двигунів:

Високий пусковий струм: Синхронні двигуни зазвичай споживають високий пусковий струм, що може спричинити падіння напруги та вплинути на стабільність електричної системи. Високий пусковий струм може викликати занепокоєння, особливо в тих випадках, коли одночасно запускаються декілька синхронних двигунів.

Відсутність можливості самозапуску: На відміну від асинхронних двигунів, синхронні двигуни не мають можливості самозапуску. Потрібні зовнішні засоби, щоб вивести двигун на синхронну швидкість, перш ніж він почне працювати синхронно із заданою частотою.

Початкове збудження: Синхронні двигуни потребують початкового збудження магнітного поля ротора перед запуском. Це може бути досягнуто за допомогою зовнішнього джерела постійного струму або допоміжної обмотки, відомої як "демпферна обмотка" [4] для створення початкового магнітного поля.

Для подолання цих проблем застосовуються такі методи запуску, як використання поні-двигунів, запуск за допомогою зовнішніх приводів або використання спеціалізованого пускового обладнання, такого як пускачі синхронних двигунів або статичні перетворювачі частоти [5, 6].

У випадку синхронного двигуна з постійними магнітами однією з фундаментальних проблем є початок руху з невідомого положення. Початок руху з невідомого положення може призвести до тимчасового зворотного руху ротора, поки поля ротора і статора не вирівняються.

Ця проблема стає критичною зі збільшенням потужності двигуна і може призвести до пошкодження двигуна або проблем з пусковими струмами. Такі умови неприйнятні для багатьох застосувань. [7] Наприклад, у сценаріях, де синхронні двигуни використовуються з навантаженням на первинний ротор, наприклад, у кухонних ліфтах, це може призвести до пошкодження не тільки двигуна, але й усього механізму, включаючи вантаж.

Математична модель синхронного двигуна

У математичній моделі синхронного двигуна використовується рівняння статора асинхронного двигуна, що враховує взаємодію з ротором через магнітний потік. Положення магнітів ротора визначається самою конструкцією ротора, незалежно від напруг і струмів статора. Також визначається миттєве значення індукованої електрорушійної сили (ЕРС), що дозволяє визначити струми статора і крутний момент ротора [8, 9].

Однак на цьому аналогія з асинхронним двигуном закінчується. У синхронному двигуні магнітні потоки ротора не є незалежними, а визначаються у взаємодії з напругами і струмами статора. При розгляді систем відліку ротора це означає, що еквівалентні площини q і d трансформуються у відповідні системи відліку, які індукують обертання і визначають швидкість ротора.

У синхронному двигуні різниця між магнітними полями ротора і статора прагне до нуля, тому двигун називається синхронним. В результаті площини q і d ротора і площини q і d статора мають фіксований фазовий зсув відносно одна одної.

Рівняння, що зв'язують магнітні потоки, мають вигляд [1]:

$$v_{qs}^{r} = R_q i_{qs}^{r} + p\lambda_{qs}^{r} + \omega_r \lambda_{ds}^{r} \quad (2)$$

$$v_{ds}^{r} = R_d i_{ds}^{r} + p\lambda_{ds}^{r} - \omega_r \lambda_{qs}^{r} \quad (3)$$

де R_q та R_d - опори квадратурної площини та площини прямої осі гілок.

Тут і далі використовується опір R_S , а для площин q і d магнітний потік статора пов'язаний з потоком ротора рівняннями [1]:

$$\lambda_{qs}^{r} = L_s i_{qs}^{r} + L_m i_{qs}^{r} \quad (4)$$

$$\lambda_{ds}^{r} = L_d i_{ds}^{r} + L_m i_{ds}^{r} \quad (5)$$

Однак самоіндукція статора в областях q і d дорівнює L_s тільки тоді, коли магніти ротора мають електричний кут 180°. Це важливо, коли магнітні та міжполюсні осі відрізняються.

Коли положення обмоток статора (наприклад, площина *d) збігається* з магнітним полем ротора, сила відштовхування максимальна: магнітне відштовхування магніту майже таке ж, як і відштовхування через повітряний зазор. І тому індуктивність в цей час найменша.

Тоді за індуктивність приймається індуктивність прямої площини L_d . В цей час площина q обмоток спрямована до траєкторії інтерполяції ротора, магнітний потік не визначається магнітами, тому що він знаходиться в точці мінімального рівня потоку. Тому відштовхування мінімальне, а індуктивність максимальна. Індуктивність q площини відома як L_q .

Оскільки магніти ротора і напрямки обмоток статора q і d визначені в просторі, то індуктивність

істотно не змінюється в залежності від положення ротора. Тоді для розрахунку потоку втрат статора в площинах *q* і *d* потрібні струми ротора і статора.

Збудження в постійних магнітах можна змоделювати, припускаючи постійний струм джерела, i_{fr} . Потік ротора розміщений в площині *d*, тому струм ротора в площині *d дорівнює* i_{fr} . Струм в площині *q приймається рівним* нулю, припускаючи, що в цій площині немає потоку. Тоді потоки можна описати як:

$$\lambda_{qs}^{r} = L_q i_{qs}^{r} \tag{6}$$

$$\lambda_{ds}^{r} = L_d i_{ds}^{r} + L_m i_{fr}^{r} \tag{7}$$

де L_m - взаємна індукція між обмотками статора і магнітами ротора.

Підстановка цих виразів у вирази для напруги статора дає наступні вирази:

$$\begin{pmatrix} v_{qs}^{r} \\ v_{ds}^{r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_q + L_q p & \omega_r L_d \\ -\omega_r L_q & R_d + L_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{qs}^{r} \\ i_{ds}^{r} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \omega_r L_m i_{fr} \\ 0 \end{pmatrix} \tag{8}$$

Електромагнітний момент визначається як:

$$T_e = \frac{3}{2}\frac{P}{2}\left(\lambda_{ds}^{r} i_{qs}^{r} - \lambda_{qs}^{r} i_{ds}^{r}\right) \tag{9}$$

яка, використовуючи підстановку потоків в термінах індуктивності та струму, буде такою:

$$T_e = \frac{3}{2}\frac{P}{2}\left(\lambda_{af} i_{qs}^{r} + (L_d - L_q) i_{qs}^{r} i_{ds}^{r}\right) \tag{10}$$

тут потік втрат ротора буде мати вигляд

$$\lambda_{af} = L_m i_{fr} \tag{11}$$

Результати моделювання редставлені на графіках (рис.4 та рис.5).

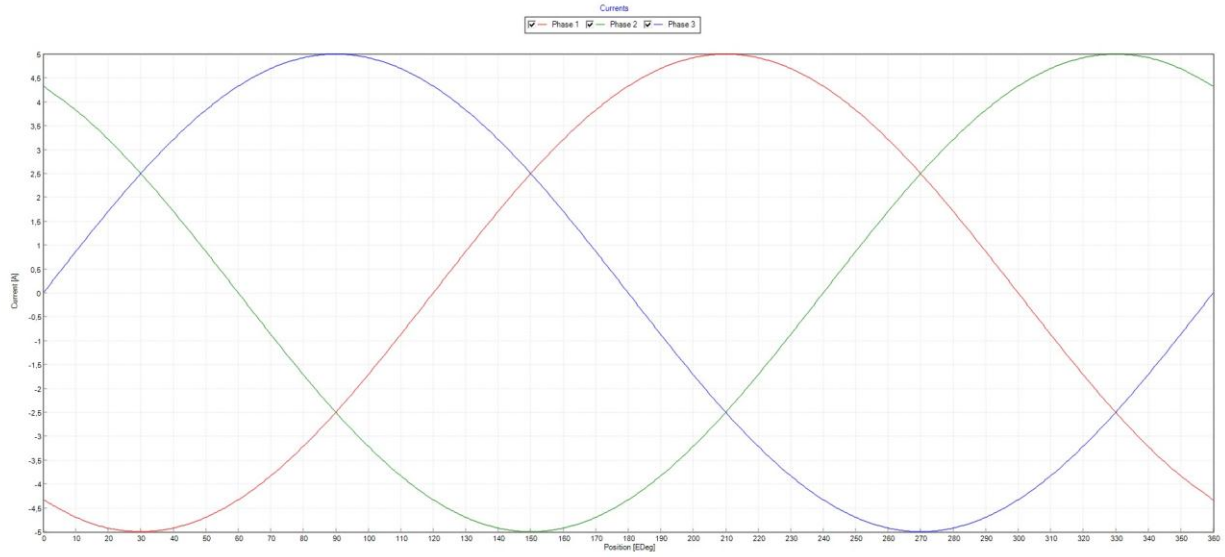


Рис.4. Графік зміни струмів

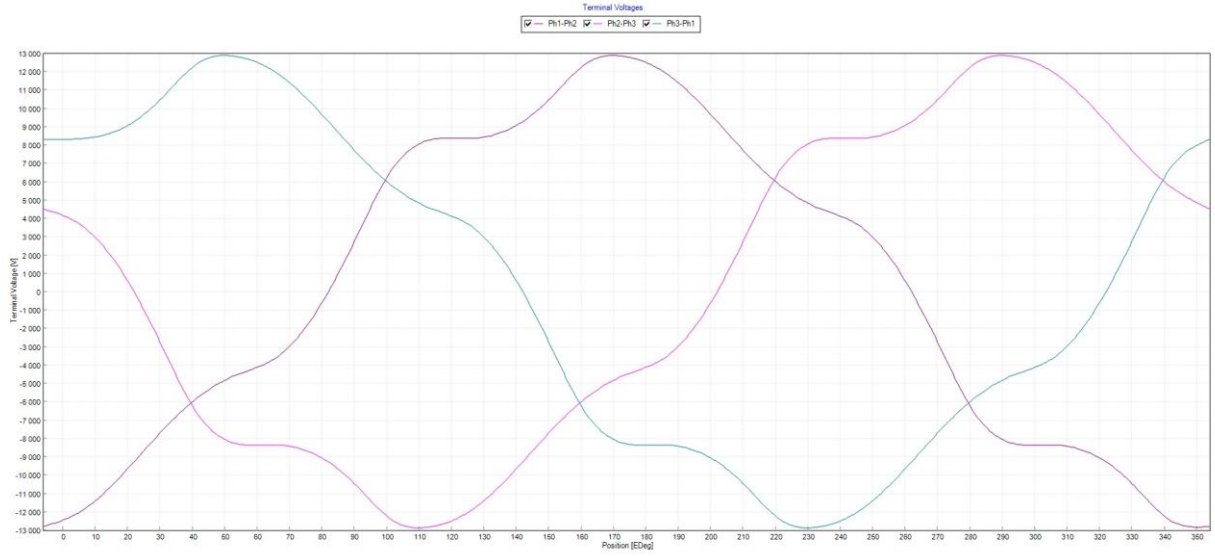


Рис.5. Графік напруги статора

Висновки

Двигуни, що використовуються в цьому дослідженні, відносяться саме до ліфтових двигунів. Синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM) широко застосовуються в таких механізмах завдяки їх здатності "утримувати положення", коли гальма двигуна вимкнені, при цьому навантаження підтримується виключно самим двигуном PMSM. Високошвидкісна реакція перетворювача частоти разом із системою керування забезпечує постійну швидкість збільшення частоти обертання двигуна незалежно від зміни навантаження. Таким чином, синхронний двигун підтримує стабільні механічні характеристики незалежно від зміни навантаження і частоти обертання. Одночасно напруга і струм двигуна динамічно регулюються для забезпечення бажаних вихідних показників.

Література

1. Шахат Е.І. Універсальна система приводу синхронного двигуна з асинхронним двигуном для автомобільних застосувань / Факультет електротехніки та комп'ютерної інженерії, Університет штату Огайо, США, JES 2010 on-line: journal.esrgroups.org/jes

2. Канакарадж, Дж. Теорія електричних машин і приладів / публікація в рамках програми уряду Тамілнаду з розповсюдження безкоштовних підручників, Корпорація підручників Тамілнаду, Коледж Роуд, Ченнаї - 600 006, (2011).

3. Musiał, J., Horiashchenko, S., Horiashchenko, K., & Wilczarska, J. (2021). Diagnosis of multilayer structures and composite parts by multifrequency phase detection. In MATEC Web of Conferences (Vol. 332, p. 01020). EDP Sciences. https://doi.org/10.1051/matecconf/202133201020

4. .Modelling of diagnostics of the technical condition of cable lines and power supply systems/ Janusz Musiał, Kostyantin Horiashchenko, Serhiy Horiashchenko & Robert Polasik// MATEC Web of Conferences 351, 01008 (2021) https://doi.org/10.1051/matecconf/202135101008

5. Automatic diagnostic device with measurement of distances to damages by the combined pulse-phase method/Janusz Musiał, Kostyantin Horiashchenko*, Serhiy Horiashchenko and Mikołaj Szyca// MATEC Web of Conferences 351, 01008 (2021) https://doi.org/10.1051/matecconf/202135101010

6. Horiashchenko, S., Polishchuk, O., Łukasiewicz, M., Matuszewski, M., & Boykov, V. (2021). Systems of vibration parameters automated control for diagnostics of equipment technical state. In MATEC Web of Conferences (Vol. 332, p. 01013). EDP Sciences.

7. Обертання часових складових сумарного сигналу в фазовій дальнометрії/ Горященко, К. Л.// Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки, т.1,2007, - с.144-147

8. Horiashchenko, S., Golinka, I., Bubulis, A., & Jurenas, V. (2018). Simulation and Research of the Nozzle with an Ultrasonic Resonator for Spraying Polymeric Materials. Mechanika, 24(1). http://dx.doi.org/10.5755/j01.mech.24.1.20215

9. Development of a Synchronous Motor with Frequency Control System for Light Industry Equipment/ Kostyantin Horiashchenko*, Serhiy Horiashchenko Ievgeniia Golinka, Georgy Drapak// Proceedings of the 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2022, https://doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005685

References

1. Shakhat E.I. Universalna systema pryvodu synkhronnoho dvyhuna z asynkhronnym dvyhunom dlia avtomobilnykh zastosuvan / Fakultet elektrotekhniky ta kompiuternoi inzhenerii, Universytet shtatu Ohaio, SShA, JES 2010 on-line: journal.esrgroups.org/jes

2. Kanakaradzh, Dzh. Teoriia elektrychnykh mashyn i pryladiv / publikatsiia v ramkakh prohramy uriadu Tamilnadu z rozpovsiudzhennia bezkoshtovnykh pidruchnykiv, Korporatsiia pidruchnykiv Tamilnadu, Koledzh Roud, Chennai - 600 006, (2011).

3. Musiał, J., Horiashchenko, S., Horiashchenko, K., & Wilczarska, J. (2021). Diagnosis of multilayer structures and composite parts by multifrequency phase detection. In MATEC Web of Conferences (Vol. 332, p. 01020). EDP Sciences. https://doi.org/10.1051/matecconf/202133201020

4. .Modelling of diagnostics of the technical condition of cable lines and power supply systems/ Janusz Musiał, Kostyantin Horiashchenko, Serhiy Horiashchenko & Robert Polasik// MATEC Web of Conferences 351, 01008 (2021) https://doi.org/10.1051/matecconf/202135101008

5. Automatic diagnostic device with measurement of distances to damages by the combined pulse-phase method/Janusz Musiał, Kostyantin Horiashchenko*, Serhiy Horiashchenko and Mikołaj Szyca// MATEC Web of Conferences 351, 01008 (2021) https://doi.org/10.1051/matecconf/202135101010

6. Horiashchenko, S., Polishchuk, O., Łukasiewicz, M., Matuszewski, M., & Boykov, V. (2021). Systems of vibration parameters automated control for diagnostics of equipment technical state. In MATEC Web of Conferences (Vol. 332, p. 01013). EDP Sciences.

7. Obertannia chasovykh skladovykh sumarnoho syhnalu v fazovii dalnometrii/ Horiashchenko, K. L.// Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky, t.1,2007, - s.144-147

8. Horiashchenko, S., Golinka, I., Bubulis, A., & Jurenas, V. (2018). Simulation and Research of the Nozzle with an Ultrasonic Resonator for Spraying Polymeric Materials. Mechanika, 24(1). http://dx.doi.org/10.5755/j01.mech.24.1.20215

9. Development of a Synchronous Motor with Frequency Control System for Light Industry Equipment/ Kostyantin Horiashchenko*, Serhiy Horiashchenko Ievgeniia Golinka, Georgy Drapak// Proceedings of the 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2022, https://doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005685

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-123-127
УДК 692.435

КАЧАН РОМАН
Київський національний університет технологій та дизайну
https://orcid.org/0000-0001-7974-2784
e-mail: kachanr@gmail.com
ПЕТРОВА ЛЕСЯ
Київський національний університет технологій та дизайну
e-mail: leska.petrova1998@gmail.com
ПРОХОРЕНКО МАРІЯ
Київський національний університет технологій та дизайну
e-mail: masha3744@ukr.net
СОБОЛЄВА КАТЕРИНА
Київський національний університет технологій та дизайну
e-mail: katerinka.khareshko@gmail.com

ОБҐРУНТУВАННЯ СКЛАДУ ПОЛІМЕРНОГО КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ З ФУНГІЦИДНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

У роботі проаналізовано форми полімерних композиційних засобів, які можуть використовуватись для профілактики та комплексного лікування оніхомікозів. Встановлено, що найбільш оптимальною формою є лак. Також вивчались плівкоутворювачі, які потенційно можуть використовуватись у складі полімерного композиційного препарату з фунгіцидними властивостями. Обґрунтовано доцільність використання нітроцелюлози або акрилат сополімеру у якості плівкоутворювача лаку з фунгіцидними властивостями.

Ключові слова: полімерний композиційний матеріал з фунгіцидними властивостями, лак, нітроцелюлоза, акрилат сополімер, метилцелюлоза, оніхомікоз

KACHAN ROMAN, PETROVA LESYA, PROHORENKO MARIA, SOBOLEVA KATERINA
Kyiv National University of Technology and Design

JUSTIFICATION OF THE COMPOSITION OF THE POLYMER COMPOSITE MATERIAL WITH FUNGICIDAL PROPERTIES

The paper analyzed the forms of polymer composite agents that can be used for the prevention and complex treatment of onychomycosis. As you know, there are many soft forms for the prevention and treatment of fungal infections: creams, ointments, gels, varnishes and plasters. Cream-like substances are easily absorbed, but are not able to penetrate deep into the tissues. The gel is a medicinal form that does not contain fats and oils, its acid-alkaline parameters are close to those of the skin. It is easily distributed on the skin, quickly absorbed, does not clog pores. However, gels are easily wiped off and washed off with water, accordingly, they cannot have prolonged fungicidal activity on the surface of the nail. Ointment is a medicinal form based on fats. It is absorbed more slowly than gel-like and cream-like preparations, but it works longer. Penetrates deeply. It is applied to dry surfaces, scars, seals. Smeared areas can be covered with bandages. It is inconvenient to use this shape on the nail. A patch is a medicinal form that can be a solid or a liquid form of the drug according to its aggregate state. According to the degree of dispersion of the plaster mass, they can be alloys, solutions, suspensions, emulsions or combined systems. An effective form for the treatment of onychomycosis. But it has one significant drawback when applied to the nail - aesthetics. Varnish is a medicinal form intended for application to fingernails and toenails. Any typical modern nail polish contains four main types of ingredients: polymer, solvent, plasticizer and active ingredient. After applying the varnish, the active substance penetrates into the nail plate and then into the nail bed, where it begins to act. It has been established that the most optimal form is varnish. Film formers, which can potentially be used as part of a polymer composite drug with fungicidal properties, were also studied. The expediency of using nitrocellulose and acrylate copolymer as a film-forming varnish with fungicidal properties is substantiated. 12 variants of varnish compositions with fungicidal properties based on these substances are offered.

Keywords: polymer composite material with fungicidal properties, varnish, nitrocellulose, acrylate copolymer, methylcellulose, onychomycosis

Постановка проблеми

Місцевих засобів, які володіють протигрибковими властивостями, є велика кількість. Проте більшість з них не можуть бути використані для профілактики та під час комплексного лікування оніхомікозу. Це пов’язано з багатьма факторами. У першу чергу, значна кількість засобів не в змозі тривалий час знаходитись на поверхні нігтю і дифундувати активну речовину до його товщі. Слід пам’ятати і про естетичний аспект. Людина, яка нанесе на ніготь засіб, повинна себе комфортно почувати. Тому актуальним залишається вибір форми місцевого засобу з фунгіцидними властивостями. Новий засіб повинен забезпечувати пролонговану фунгіцидну дію у ніготь, не змиватись водою протягом тривалого часу, не витиратись, мати естетичний вид на нігті.

Також важливим елементом дослідження є оптимальний вибір полімерів, що можуть бути використанні для створення основи полімерного композиційного матеріалу з фунгіцидними властивостями. Пропонується створення декілька видів матриць (основа полімерного композиційного матеріалу, яка дифундує фунгіцидний агент до нігтю) з різними властивостями. Один вид матриць з швидкою дією та легким нанесенням, інший вид з тривалою пролонгованою дією.

Аналіз останніх досліджень

Як відомо, системні засоби для лікування грибкових захворювань є досить токсичними. Тому останнім часом, є велика кількість досліджень зі створення місцевих засобів для лікування мікозів. Це

переважно засоби у формі мазей, кремів, розчинів. Для профілактики та лікування оніхомікозів ці форми місцевих засобів через ряд причин не підходять. Таким чином, існує потреба у створенні цілеспрямованого місцевого засобу (виріб медичного призначення) з фунгіцидними властивостями для захисту та знезараження від збудників оніхомікозу. Найбільш оптимальним варіантом такого засобу є полімерний композиційний матеріал з фунгіцидними властивостями у формі лаку.

Метою роботи є обґрунтування складу полімерного композиційного матеріалу з фунгіцидними властивостями, який можна використовувати для профілактики та під час комплексного лікування оніхомікозу.

Виклад основного матеріалу

Місцева терапія могла б бути привабливим альтернативним підходом до лікування оніхомікозу, оскільки вона, як було виявлено, здатна подолати більшість обмежень системного введення і націлювання препарату на місце його дії з мінімальними взаємодією та побічними ефектами. Обмеженість проникнення препарату через нігтьову пластину та кровопостачання ураженої ділянки може призвести до субтерапевтичної концентрації і може бути подолана за допомогою місцевого застосування. Перевагою спеціалізованих місцевих лікарських засобів є можливість місцевого лікування препаратами для зовнішнього застосування цілого ряду дерматологічних патологій при незначному впливі на організм в цілому. Діюча речовина у високій концентрації потрапляє безпосередньо на ділянку, де потрібний вплив лікарського засобу, при цьому ризик розвитку небажаних побічних ефектів мінімальний. Пацієнтам легко використовувати препарати для зовнішнього застосування, крім того, зволожуючий ефект таких лікарських форм, як креми та мазі, може бути додатковою перевагою при деяких захворюваннях шкіри. Для лікування грибкових захворювань в сфері місцевих фунгіцидних лікарських форм використовуються креми, мазі, гелі, лаки та пластирі. Креми є лікарською формою, основу якої складають жир (олія) та вода. Кремоподібні речовини легко вбираються, проте, вони не здатні проникати глибоко в тканини. Їх можна наносити на поверхні, які постійно намокають. У більшості випадків креми вбираються повністю і не бруднять одяг. Перевагою кремів є те, що їх можна нанести і відправитися у своїх справах [1 ,2].

Гелі – це лікарська форма, що не містить жирів та олій, його кислотно-лужні показники близькі до показників шкіри. Вони легко розподіляються по шкірі, швидко вбираються, не забиваючи пори. Іноді після висихання гелів залишається повітронепроникна плівка. За структурою гелеподібні препарати бувають рідкуваті (наприклад, Троксевазин) або в'язкими. При зберіганні в холодильнику вони частково згущуються, але при нагріванні до кімнатної температури відновлюють свої властивості. Як і креми, гелі є зручними у використанні протягом дня.

Мазі – це лікарська форма на основі жирів. Вони всмоктуються повільніше, ніж геле- та кремоподібні препарати, натомість, діють довше. Проникають глибоко. Їх наносять на сухі поверхні, рубці, ущільнення. Змащені ділянки можна прикривати пов'язками. Залишки жирової основи зазвичай доводиться видаляти вручну, тому під одяг наносити мазеподібні речовини слід обережно. Деякі з них мають специфічний запах. Найщільніші мазі називаються пастами. У них міститься до 20 % порошкоподібних речовин.

Лаки – це лікарська форма, призначена для нанесення на нігті пальців рук, а також ніг. Будь-який типовий сучасний лак містить чотири основних типи інгредієнтів: полімер, розчинник, пластифікатор та активний фармацевтичний інгредієнт. Після нанесення лаку активний фармінгредієнт проникає у нігтьову пластину і далі – у нігтьове ложе, де починає свою дію. Перевагою лаків є універсальність їх застосування та легкість нанесення, що підсумовується з гарним захистом ураженої ділянки від чинників оточуючого середовища.

Пластирі – лікарська форма, що за агрегатним станом може бути твердою і рідкою формою препарату. За ступенем дисперсності маси пластирі можуть бути сплавами, розчинами, суспензіями, емульсіями або комбінованими системами. За складом пластирі ділять на смоляно-воскові, каучукові та рідкі. Залежно від медичного призначення та глибини терапевтичної дії пластирі бувають епідерматичними, ендерматичними та діадерматичними. Епідермічні пластирі складаються лише з основи. Ендерматичні пластирі обов'язково містять лікарські речовини різної терапевтичної дії, наприклад, кератолітичні пластирі. Їх застосовують для лікування захворювань шкірних покривів на місці накладання пластиру. Діадерматичні пластирі містять лікарські речовини, які проникають через шкіру і надають загальну лікувальну дію або впливають на субдермальні тканини. Ендерматичні та діадерматичні пластирі м'якіші за консистенцією та повинні забезпечувати необхідний вплив лікарських засобів, полегшуючи їх проникнення на визначену глибину [3].

Місцева терапія дозволяє створювати на поверхні нігтя дуже високі концентрації протигрибкового препарату. Такі концентрації, фунгіцидні для більшості збудників оніхомікозу, неможливо створити при системному призначенні, оскільки це було б пов'язане з токсичною дією на організм хворого. При місцевому нанесенні препарат не всмоктується в системний кровотік, тому таке лікування більш безпечне [4].

Головна перевага місцевої терапії – відсутність побічних і токсичних ефектів, які спостерігаються при застосуванні системних препаратів. Недоліком місцевої терапії є те, що при нанесенні препарату на поверхню нігтя він не завжди досягає збудника – грибка, розташованого в нігтьовому ложі і тим більше в матриксі. Твердий шар кератину і компактна структура нігтьової пластини виступають в якості бар'єру для дифузії лікарських засобів через нігтьову пластину. Концентрація місцевого препарату може зменшитись у

1000 разів від зовнішньої до внутрішньої поверхні. Гідрофільний характер нігтьової пластини також виключає абсорбцію більшості ліпофільних молекул з високою молекулярною масою. Тому для підведення препарату до зараженого нігтьового ложа при явищах гіперкератозу вдаються до допоміжних засобів – застосування кератолітиків, видалення нігтьової пластинки, чищення ложа [5].

Місцеві протигрибкові препарати містять високі концентрації діючих речовин, активних проти грибів – збудників оніхомікозу. Однак, такі високі концентрації створюються лише на поверхні нігтьової пластини, а вглиб, до нігтьового ложа, де розташовані найбільш життєздатні гриби, антимікотики не завжди проникають в ефективних концентраціях. Крім того, більшість зазвичай використовуваних складів не адаптовані спеціально для нігтів, оскільки вони легко видаляються тертям або миттям. Щоб подолати ці бар'єри, можна вибрати доставку ліків через нігтьову пластину. Існують два рішення цієї проблеми. Традиційний підхід – використання допоміжних засобів, що дозволяють видалити уражені рогові структури нігтя. При цьому оголюється нігтьове ложе, що містить збудники. Цей підхід дуже ефективний, але не завжди прийнятний для пацієнта і займає багато часу. Альтернативним рішенням може бути застосування полімерних композиційних матеріалів у формі лаків для нігтів з фунгіцидними властивостями (виріб медичного призначення). Ця форма краще, ніж традиційні препарати, проникає через нігтьову пластинку. Саме ця форма протигрибкового препарату найбільш підходить для лікування власне оніхомікозу, решта протигрибкових препаратів частіше використовують при лікуванні інших грибкових інфекцій шкіри [6].

Спеціальні лаки для нігтів, розроблені для лікування оніхомікозів, дозволяють краще проводити антимікотик через нігтьову пластину вглиб, до ложа нігтя. Крім того, плівка лаку, застигаючи на поверхні нігтя, перешкоджає випаровуванню препарату з нігтя, таким чином концентруючи препарат на поверхні нігтя, створюючи бар'єр для інфекції. Ця плівка потім діє як лікарське депо і, збільшуючи гідратацію нігтя, підсилює дифузію лікарського засобу [1].

Головна перевага сучасних лаків, використовуваних в лікуванні оніхомікозів, полягає в тому, що їх можна наносити на нігтьову пластину без її видалення. Інші препарати не можуть проникати через нігтьову пластину, що вимагає її попереднього видалення або, принаймні, значного стоншування [4].

Діючі антимікотики, що входять до складу лаків, надовго затримуються в нігтях після нанесення, ефективні концентрації зберігаються в нігті протягом принаймні 7 діб. Це дозволяє наносити лаки один або два рази на тиждень [3].

Найбільш важливим компонентом для полімерного композиційного матеріалу є плівкоутворювач. У більшості випадків це полімер.

Таблиця 1

Фізико-хімічні властивості полімерів, які використовуються у якості компонентів полімерних композиційних матеріалів з фунгіцидними властивостями

Назва полімеру	**Властивості**
Метил-целюлоза	Це білий, без запаху, нетоксичний, гідрофільний порошок, з хорошою розчинністю у холодній воді. Він повільно набухає, утворюючи колоїдну дисперсію. Розчинність у воді зменшується з підвищенням температури від приблизно 50 °C. Утворюється в'язкий гелеподібний розчин (поведінка термічного гелеутворення). Таким чином, розчинність метилцелюлози дуже залежить від температури води (розчинна нижче 40 °C). Майже нерозчинна в абсолютному етанолі, ацетоні. Широко використовується, як основа у виробництві гелів.
Ацетил-целюлоза	Аморфні сполуки білого кольору (порошки, добре сипкі гранули або пластівці), без смаку й запаху або з незначним запахом оцту. Високоестерифіковані ацетати целюлози розчинні в метиленхлориді, дихлоретані, хлороформі, метановій (мурашиній) та етановій кислотах. Зниження ступеня заміщення уможливлює розширення асортименту розчинників для ацетатів целюлози й поліпшення їхньої сумісності з низько-молекулярними пластифікаторами. Ацетати целюлози, які випускають у промислових масштабах, нерозчинні в етанолі, воді. Отриманні плівки руйнуються під впливом води. Ацетати целюлози мало гігроскопічні, світлостійкі, мають належні фізико-механічні властивості (волокно- та плівкоутворювальні), практично незаймисті. Плівки на основі ацетату целюлози в порівнянні з нітроцелюлозними є менш горючими, мають кращі термо- та світлостійкість, але нижчу водостійкість, слабку адгезію до металу.
Нітроце-люлоза	За виглядом нагадує бавовну. Нерозчинна у воді, але розчинна у багатьох органічних розчинниках. При підпалюванні швидко згорає світлим полум'ям з виділенням великої кількості тепла. Плівки стійкі до дії води.
Акрилат сополімер	Рідина білого кольору. Використовують, як плівко- та гелеутворювач. Розчиняється у воді та в органічних розчинниках.

Як видно з табл. 1, для створення полімерного композиційного матеріалу у формі лаку найбільш підходить нітроцелюлоза та акрилат сополімер. Тому ці два полімери пропонується використовувати у якості плівкоутворювача при виробництві лаків. Ацетилцелюлоза, не дивлячись на велику кількість переваг, має один суттєвий недолік – лак на її основі нестійкий до дії води, а потрібний такий полімерний композиційний матеріал, при нанесенні якого людина може вести нормальний образ життя – приймати душ, ходити у басейн, мити ноги та руки. При створенні технології лаку на основі нітроцелюлози слід

обов'язково враховувати її вогненебезпеку. Метилцелюлозу можна використати для створення гелю з фунгіцидними властивостями.

Також для ефективності лаку з фунгіцидними властивостями є важливими й інші компоненти. У якості пластифікатору пропонуються використовувати триацетин. Він у порівнянні з багатьма іншими пластифікаторами є безпечним для організму людини та має відмінні функціональні властивості. У якості розчинників пропонується використовувати три розчинники. Етилацетат відповідає за швидкість висихання та формування плівки, бутилацетат для забезпечення рівного розподілу лаку по поверхні нігтя. Етиловий спирт є гарним розчинником, в малих концентраціях застосовується для різкого зниження вибухо- і вогненебезпечних властивостей нітроцелюлози. Крім цього, етиловий спирт є ефективним консервантом. Ізопропанол використовується, як розчинник і як консервант гель-лаках. Всі ці розчинники використовуються в харчовій промисловості. Карбамід має маленькі розміри його молекул, завдяки чому він може бути агентом-провідником потрібних речовин в глибокі шари нігтя. Крім цих властивостей, карбамід розпушує та пом'якшує нігтьову пластину нігтя. Мікрокристалічний парафін використовується в гель-лаках для термосклеювання, як світлостабілізуючий компонент, пластифікатор. Hydroxycyclohexyl phenyl ketone – фотоініціатор. Поглинає ультрафіолетові промені та запускає процес полімерізації. Диметикон – силіконовий полімер, утворює плівку і виконує багато інших функцій, у тому числі робить плівку більш рухливою, стабілізатор в'язкості.

Якість лаку для нігтів з фунгіцидною дією визначається сукупністю фізико-хімічних та споживчих властивостей. Він вкриває уражену ділянку нігтьової пластини шаром полімеру, надає естетичний зовнішній вигляд, виконує гігієнічні функції і знешкоджує збудників оніхомікозу.

До характерних особливостей лаку для нігтів можна віднести такі як швидкість висихання, щільність, вкриваюча та проникаюча здатність, запах та колір. Усі перелічені особливості залежать від складових компонентів, що входять до складу виробу медичного призначення. Споживчі властивості лаків для нігтів наведені у табл. 2 [3].

Таблиця 2

Споживчі властивості лаків для нігтів

Властивість	Показник	Ефективність
Функціональність	Зовнішній ефект Ефективність лаку Швидкість висихання	Функціональність лікувального лаку для нігтів виражається у забезпеченні належних лікарських та фізико-хімічних якостей препарату.
Ергономічність	Фізіологічні потреби Психологічні потреби	Ергономічність – можливість легкого та комфортного використання препарату. Така властивість як ергономічність лаку виражається у консистенції лаку, продуманості упаковки та інструментів для нанесення, що полегшують використання лікарського засобу.
Естетичні якості	Зовнішній вигляд Колір Запах Дизайн упаковки Інформативність упаковки	Важливий фактор, що впливає на вибір покупцем продукції. Естетичні якості відіграють важливу роль для пацієнта адже терапія може тривати від декількох місяців та нести за собою певні особливості соціального характеру.
Безпечність	Склад Якість складових компонентів Умови зберігання Умови застосування	Засіб не впливає негативно на організм людини.

Для відповідності цим критеріям до складу полімерного композиційного засобу з фунгіцидними властивостями, слід використати лише високобезпечну для організму людини сировину. Також у рецептурах пропонується 4 види фунгіцидних агентів (суміш 4 ЧАС, дидецилдиметиламоній хлорид, третинний амін, полігексабігуанідин гідрохлорид), які відносяться до катіон активних ПАР, мають виражену фунгіцидну дію та не застосовувались раніше у протигрибкових засобах. Це, на нашу думку, дасть змогу отримати ефективний засіб з фунгіцидними властивостями й відсутністю резистентності збудників оніхомікозу до нового засобу. Для зручності використання полімерного композиційного матеріалу з фунгіцидними властивостями було вибрано форму у вигляді лаку, що дозволяє нанести протигрибковий засіб на ніготь та використовувати його без обмежень протягом як мінімум 5-7 діб.

Для відповідності зазначеним критеріям, при створенні нового препарату на основі полімерних композиційних матеріалів, пропонуються такі рецептури.

У табл. 3 наведені рецептури без відсоткового вмісту компонентів, це пов'язано з продовженням робіт зі створення оптимальних складів лаку з фунгіцидними властивостями.

Таблиця 3

Рецептури полімерних композиційних матеріалів з фунгіцидними властивостями

Назва рецептури	Склад рецептури
Рецептура 1	Нітроцелюлоза; Триацетин; Бутилацетат; Етилацетат; Карбамід; Суміш 4 ЧАС ; Етанол абсолютний
Рецептура 2	Нітроцелюлоза; Триацетин; Бутилацетат; Етилацетат; Карбамід; Дидецилдиметиламоній хлорид; Етанол абсолютни
Рецептура 3	Нітроцелюлоза; Триацетин; Бутилацетат; Етилацетат; Карбамід; Третинний амін; Етанол абсолютний
Рецептура 4	Нітроцелюлоза; Триацетин; Бутилацетат; Етилацетат; Карбамід; Полігексабігуанідин гідрохлорид; Етанол абсолютний
Рецептура 5	Нітроцелюлоза; Триацетин; Бензофенон -1; Бутилацетат; Етилацетат; Карбамід; Суміш 4 ЧАС; Етанол абсолютний
Рецептура 6	Нітроцелюлоза; Триацетин; Бензофенон -1; Бутилацетат; Етилацетат; Карбамід; Дидецилдиметиламоній хлорид; Етанол абсолютний
Рецептура 7	Нітроцелюлоза; Триацетин; Бензофенон -1; Бутилацетат; Етилацетат; Карбамід; Третинний амін; Етанол абсолютний
Рецептура 8	Нітроцелюлоза; Триацетин; Бензофенон -1; Бутилацетат; Етилацетат; Карбамід; Полігексабігуанідин гідрохлорид; Етанол абсолютний
Рецептура 9	Акрилат сополімер; Ізопропанол; Бутилацетат; Диметикон (Polydimethylsiloxane); Карбамід; Суміш 4 ЧАС ; Мікрокристалічний парафін; Hydroxycyclohexyl phenyl ketone
Рецептура 10	Акрилат сополімер; Ізопропанол; Бутилацетат; Диметикон (Polydimethylsiloxane); Карбамід; Дидецилдиметиламоній хлорид; Мікрокристалічний парафін; Hydroxycyclohexyl phenyl ketone
Рецептура 11	Акрилат сополімер; Ізопропанол; Бутилацетат; Диметикон (Polydimethylsiloxane); Карбамід; Третинний амін; Мікрокристалічний парафін; Hydroxycyclohexyl phenyl ketone
Рецептура 12	Акрилат сополімер; Ізопропанол; Бутилацетат; Диметикон (Polydimethylsiloxane); Карбамід; Полігексабігуанідин гідрохлорид; Мікрокристалічний парафін; Hydroxycyclohexyl phenyl ketone

Було запропоновано 12 складів полімерного композиційного засобу з фунгіцидними властивостями у формі лаку. Вісім зразків у якості плівкоутворювача містили нітроцелюлозу – це класичні лаки. Полімерні композиційні матеріали на основі нітроцелюлози мають стійкість на нігтьовій поверхні 5-7 днів, а у чотирьох зразках було використано акрилат сополімер, як плівкоутворювач. Лаки на його основі є відносно новим видом – гель-лаки, вони мають стійкість на поверхні нігтю до 21 доби. У деяких рецептурах є Бензофенон 1, який захищає лаки на основі нітроцелюлози від негативного впливу сонячного випромінення. Кожен із запропонованих варіантів нових полімерних композиційних матеріалів мають свої переваги та недоліки.

Висновки

За результатами роботи обґрунтовано найоптимальнішу форму полімерного композиційного матеріалу з фунгіцидними властивостями – лак. Проаналізовано полімери, які можна використовувати у якості плівкоутворювачів для лаків. Встановлено, що найбільш якісний полімерний композиційний матеріал з фунгіцидними властивостями у вигляді лаку доцільно отримувати з нітроцелюлози або з акрилат сополімеру. Наведенні вище речовини використовувались у якості плівкоутворючів. Було отримано 2 типи лаків: 8 варіантів рецептур на основі нітроцелюлози та 4 варіанти рецептур на основі акрил сополімеру. Лаки на основі нітроцелюлози утворюють твердий шар після випаровування розчинників, який залишається стійким протягом 5-7 діб, а на основі акрил сополімеру утворюється лак на поверхні після 2-3 хвилин взаємодії з УФ лампами, що залишається стійким протягом 21 доби на поверхні нігтю.

References

1. Hay R. The future of onychomycosis therapy may involve a combination of approaches. British Journal of Dermatology. 2001. №145. P. 3–8.

2. Lipner S., Scher R. Treatment and prevention of recurrence. J. Am. Acad. Dermatol. 2019. № 80. P. 853–867.

3. Krasaeath R., Elizondo J. Topical antifungals for treatment of onychomycosis. Am. Fam. Physician. 2016. № 94. P. 734.

4. Dhamoon R., Popli H., Gupta M. Novel drug delivery strategies for the treatment of onychomycosis. Pharm. Nanotechnol. 2019. № 7. P. 24–38.

5. Christenson J. , Peterson G., Naunton M. Challenges and opportunities in the management of onychomycosis. J. Fungi. 2018. № 4. P. 87.

6. Piraccini B., Tosti A. Ciclopirox hydroxypropyl chitosan: Efficacy in mild-to-moderate onychomycosis. Skin Appendage Disord. 2018. № 5. P. 13–19.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-128-135
UDC 004.932

KOVALENKO BOGDAN
National Aerospace University – KhAI
https://orcid.org/0000-0002-9360-0691
e-mail: b.kovalenko@khai.edu
LUKIN VOLODYMYR
National Aerospace University – KhAI
https://orcid.org/0000-0002-1443-9685
e-mail: v.lukin@khai.edu

ANALYSIS OF DISTORTIONS DUE TO BPG-BASED LOSSY COMPRESSION OF NOISE-FREE AND NOISY IMAGES

Compression algorithms have become a popular way to deal with the problem of rapidly increasing data volume produced by images from different sources. These algorithms can be divided into two groups called lossless and lossy compression. In the case of providing a high compression ratio, lossy compression is needed. The paper utilizes Better Portable Graphics (BPG) as one of the promising lossy compression coders. For compression procedures, noise presence plays an important role in the sense that noise can affect compression performance and resulting image quality. This article deals with an analysis of the statistical characteristics of distortions introduced due to image lossy compression by the BPG coder.

The subject of this paper is the statistical characteristics of distortions introduced due to lossy compression of noise-free and noisy grayscale images. The goal is to analyze the characteristics of distortions introduced by the BPG coder and provide information about residual noise that can appear due to the compression of noisy images. The task is to calculate the statistical characteristics of distortions for several cases (noise-free vs. compressed; noise-free vs. noisy-compressed; noisy vs. noisy-compressed), create histograms, and analyze their behavior.

The main results are the following. The properties of the introduced distortions have to be studied for the reasonable setting of the coder parameters and control of compressed image quality. We show that the distortions might have distribution close to a Gaussian but it can be also heavy-tailed. This depends on several factors including the noise presence in an image to be compressed, image complexity, and the coder parameter Q. The noise presence leads to specific properties of introduced distortions and residual noise that can be useful for further post-filtering of compressed noisy images.

Keywords: BPG coder, lossy image compression, distortion analysis, greyscale images.

КОВАЛЕНКО БОГДАН, ЛУКІН ВОЛОДИМИР
Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "ХАІ"

АНАЛІЗ СПОТВОРЕНЬ, СПРИЧИНЕНИХ BPG-СТИСНЕННЯМ З ВТРАТАМИ БЕЗШУМНИХ І ЗАШУМЛЕНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Алгоритми стиснення стали популярним способом вирішення проблеми швидкого збільшення обсягу даних, отриманих із зображень з різних джерел. Ці алгоритми можна розділити на дві групи, які називаються стисненням без втрат і стисненням з втратами. У випадку забезпечення вищого коефіцієнту стиснення потрібно використовувати стиснення з втратами. У статті використано Better Portable Graphic (BPG) як один з перспективних методів стиснення з втратами. Для процедур стиснення наявність шуму відіграє важливу роль у тому сенсі, що шум може впливати на якість стиснення та якість отриманого зображення. Ця стаття присвячена аналізу статистичних характеристик спотворень, що вносяться внаслідок стиснення зображень з втратами за допомогою кодера Better Portable Graphics (BPG).

Предметом дослідження є статистичні характеристики спотворень, що вносяться внаслідок стиснення з втратами напівтонових зображень з шумом та без шуму. Мета – проаналізувати характеристики спотворень, що вносяться BPG-кодером, та надати інформацію про залишкові шуми, які можуть з'являтися при стисненні зашумлених зображень. Завдання полягає в обчисленні статистичних характеристик спотворень для кількох випадків (без шуму проти стисненого; без шуму проти стисненого зображення з шумом; зображення з шумом проти зображення з шумом та стисненого), побудові гістограм та аналізі їхньої поведінки.

Основні результати полягають у наступному. Вивчено властивості внесених спотворень для обґрунтованого налаштування параметрів кодера та контролю якості стисненого зображення. Показано, що спотворення можуть мати розподіл, близький до гаусівського, але розподіл може мати і важкий хвіст. Це залежить від декількох факторів, включаючи наявність шуму в зображенні, що стискається, складність зображення та значення параметру кодера Q. Наявність шуму призводить до специфічних властивостей внесених спотворень та залишкового шуму, знання яких може бути корисними для подальшої пост-фільтрації стиснутих зображень з шумом.

Ключові слова: BPG-кодер, стиснення зображень з втратами, аналіз спотворень, напівтонові зображення.

Problem overview

Compression has become an inalienable part of image processing nowadays [1]. This is because of several reasons. First, images are the one of the main parts of visual information transferred via networks and stored [2]. Second, in many areas, a huge number of images is produced, for example, this relates to remote sensing, advertising, medicine, and so on [3, 4]. So, to reduce the size of such data, compression methods and algorithms are used [5]. There are various techniques that can be applied to solve this task. All of them can be divided into two groups: lossless and lossy ones [6]. The key differences between these two groups are the compression ratio (CR) and introduced distortions. Lossy compression can provide significantly higher CR, but it also brings some information loss. In image compression, information loss might appear as artifacts, smoothed details, and so on [7]. As a result, there should be some trade-off between image quality and compression ratio. Such a trade-off depends

on the application since, in some situations, better quality is preferred whilst, in other applications, a smaller output size (a larger CR) is more important [8, 9].

There are applications where the quality of original and compressed images is not high (e.g., due to the noise presence) and such images require additional quality improvement. A solution in this case can be decompressed image post-filtering [10]. This procedure is often able to improve the overall image quality and makes the final image more acceptable for some applications. To maximize the positive effect of filtering, it is desired to know the exact type and properties of the noise present in the target image before and after lossy compression. That is why, this study aims to provide detailed information about distortions that lossy compression brings to an image.

Recall that the noise can be of different types and intensity. It can be visible or invisible [11]. As a result, noise affects distortions introduced by lossy compression of images in a different manner [12]. In addition, distortions depend on image complexity and the coder used. Here we consider the better portable graphics (BPG) coder [13], which is characterized by certain advantages compared to other modern lossy compression techniques.

Analysis of recent sources

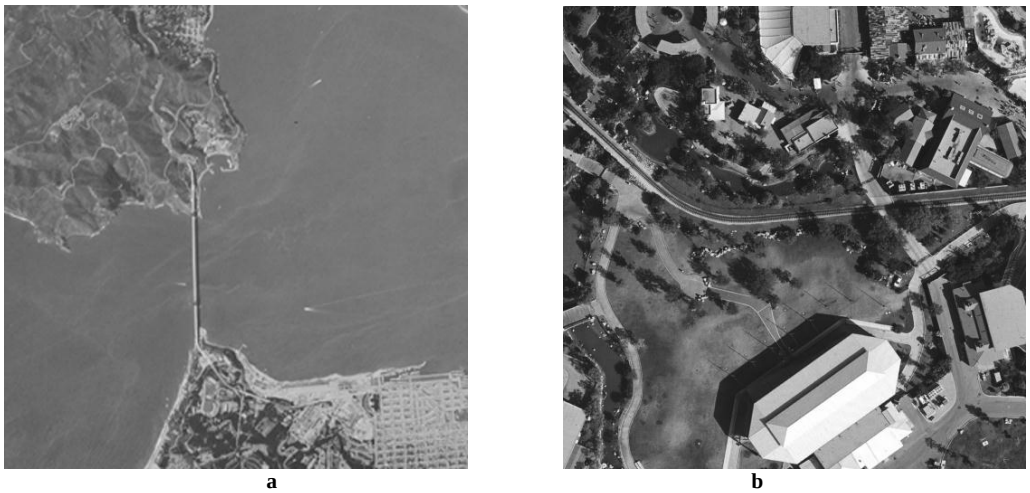
The influence of statistics of distortions due to lossy compression on image visual quality and classification accuracy has been already studied by Aiazzi et al [14, 15] and Lukin et al [16, 17]. Italian researchers [14, 15] considered the task of near-lossy compression of hyperspectral data to prevent classification accuracy reduction due to distortions. Statistical analysis for AGU and ADCT coders (https://ponomarenko.info/#dow) for grayscale noise-free images was performed in [16]. Both coders belong to the discrete cosine transform (DCT) based family of coders. The authors studied the statistical and spatial-spectral characteristics of distortions introduced by lossy compression and showed that distortion distribution is close to normal for small values of compression control parameters (CCP), but it can significantly differ from normal for large values of CCP. The dependence of distortion characteristics on the image complexity and structure has been recently demonstrated in [17].

Taking into account that the BPG coder also belongs to the DCT-based family of coders, it is expected to have similar distortions characteristics. It is also worth studying the case of noisy images, which was not considered in the previous research (taking into account the prevalence of noise-affected images in some real-life situations).

The purpose of the work is: to analyze the distortions introduced by lossy compression performed by the BPG encoder for noise-free images as well as for images corrupted by additive white Gaussian noise. In the first order, we determine are statistical characteristics Gaussian or non-Gaussian.

Presentation of the main material

It was mentioned in the introduction that there are dependencies between image properties and compression results. For this study, we have used two images that can be treated as having simple and complex structures. The term “image complexity” can be described in various quantitative and qualitative ways. Verbally it can be described in the following way: an image is considered more simple if a larger percentage of its pixels correspond to image homogeneous (or, at least, quasi-homogeneous) regions. Quantitatively, the complexity of noise-free images can be characterized by entropy. Examples of simple and complex structure images used in our study are presented in Fig.1. The image Frisco represents an example of a simple structure image whilst the image fr01 is a complex structure one (contains considerably more pixels that correspond to edges, small-sized details, and textures.



a **b**

Fig. 1. The used test images Frisco (a) and fr01 (b)

The reasons for studying the (BPG) coder were the following. First, this is a quite novel coder that aims to replace the widely used JPEG [13]. The BPG coder can provide a higher compression ratio for similar quality compared to JPEG. Second, it has native support of 8 to 14 bits per channel, as well as support for the same color formats as JPEG (grayscale, YCbCr 4:2:0, 4:2:2, 4:4:4). The compression control parameter that is used in this coder is called the Q parameter, and its higher values lead to higher values of CR, resulting in a downgrade in image quality. The values of parameter Q vary from 1 to 51. Third, it is also a well-studied coder; in our previous works,

the coder showed good results in lossy image compression and proved its effectiveness both in working with grayscale and color images corrupted by various types of noise [18, 19].

The overall method of distortion analysis for the noise absence case can be performed as follows: an initial noise-free 8-bit grayscale image that can be denoted as I_{ij}, i = 1, …, N_I; j = 1, …, N_J (N_I and N_J represent the size of the image); then compress this image with different values of the Q parameter. Each compressed image can be presented as I_{ij}^{C} (Q), i = 1, …, N_I; j = 1, …, N_J, N_I and N_J. As a result, the distortions obtained during lossy compression for specific values of Q can be described by differences

$$\Delta_{ij}(Q) = I_{ij} - I_{ij}^{TC}(Q),\ i = 1, \ldots, N_i;\ j = 1, \ldots, N_j \quad (1)$$

where I_{ij}^{TC} compressed noise-free image.

The next step is to analyze the obtained array of differences (1). Such an analysis can be performed in different ways. One of them is to carry out simple statistical analysis, e.g., to obtain histograms of differences and to check whether or not the distributions follow the normal law. Additionally, it is worth calculating statistical parameters to answer some additional questions: how heavy is the tail of the distribution if it turns out to be non-Gaussian, and is the distribution symmetric? For this purpose, we further use such parameters as variance, mean, kurtosis, and skewness [20]. The two latter parameters have to be close to zero if the distribution of a random variable (random process) is close to normal.

It was said that we deal with multiple values (a certain range) of Q values. This is explained by two facts. First, in practice, one might need to provide different characteristics of compressed images depending on requirements and their priority. Second, for the case of noisy image compression, we have to pay the main attention to the neighborhood of the optimal operation point (OOP) [19] since it is of major practical value in real-life situations. That is why, we use values of Q that start at 15 and end at 40 with a step of 5.

First, let us start our analysis with the simple image Frisco where noise is absent. The calculated statistical parameters obtained for this case are presented in Table 1.

Table 1

Statistical characteristics of distortions for the Frisco image

Q	Kurtosis	Skewness	Mean	Variance
15	0.2003	-0.0021	-0.0026	0.5289
20	0.4136	0.0147	-0.0019	1.1677
25	0.9217	0.0125	-0.0204	2.5667
30	2.0129	0.0539	-0.0341	5.2719
35	3.4047	0.0835	-0.0880	10.6142
40	4.9193	0.2543	0.0062	22.5580

From data in Table 1, the following conclusions can be drawn: for Q equal from 15 to 20, the values of kurtosis are close to zero, as are the values of skewness, which means that the obtained distortions can be treated as Gaussian. With Q increasing, values of kurtosis start to increase as well. For Q = 25, kurtosis is about unity, and each next step increases the values of kurtosis by one. As a result, the distribution looks less and less like Gaussian. It also needs to be noted that the values of mean and skewness are close to zero for all considered cases of Q. Thus, we have a symmetric heavy-tailed distribution of introduced errors. Also, note that the variance of differences (mean square error (MSE) of introduced distortions) quickly increases with Q growth and the distortions become visible for Q=40 (this usually happens if MSE exceeds 20).

The next studied situation is the compression of a more complex image. Statistical parameters for the obtained differences are presented in Table 2.

Table 2

Statistical characteristics of distortions for the fr01 image

Q	Kurtosis	Skewness	Mean	Variance
15	-0.0226	0.0037	-0.0155	0.5855
20	0.1362	0.0277	-0.0139	1.8969
25	0.3321	0.0465	-0.0505	6.0132
30	0.8125	0.0902	-0.0359	16.4319
35	1.6626	0.1742	-0.0735	41.4552
40	2.9806	0.2448	-0.1909	93.4525

In this case, the situation is similar except for the following points. Kurtosis is close to zero for a wide range of Q values (from 15 to 25), and it becomes close to unity for Q = 30. From these results, the following conclusion can be drawn – the distribution of distortions retains its Gaussian properties even for larger values of Q in comparison with the case of compression of simple stricture images. One more difference between simple and

complex structure image compression is that the variance of the differences is higher for complex images, especially for Q>25.

The obtained conclusions can also be confirmed by analysis of the obtained histograms. For the Frisco image (Fig. 2), for Q equal to 30 and more, the distribution becomes non-Gaussian (heavy-tailed).

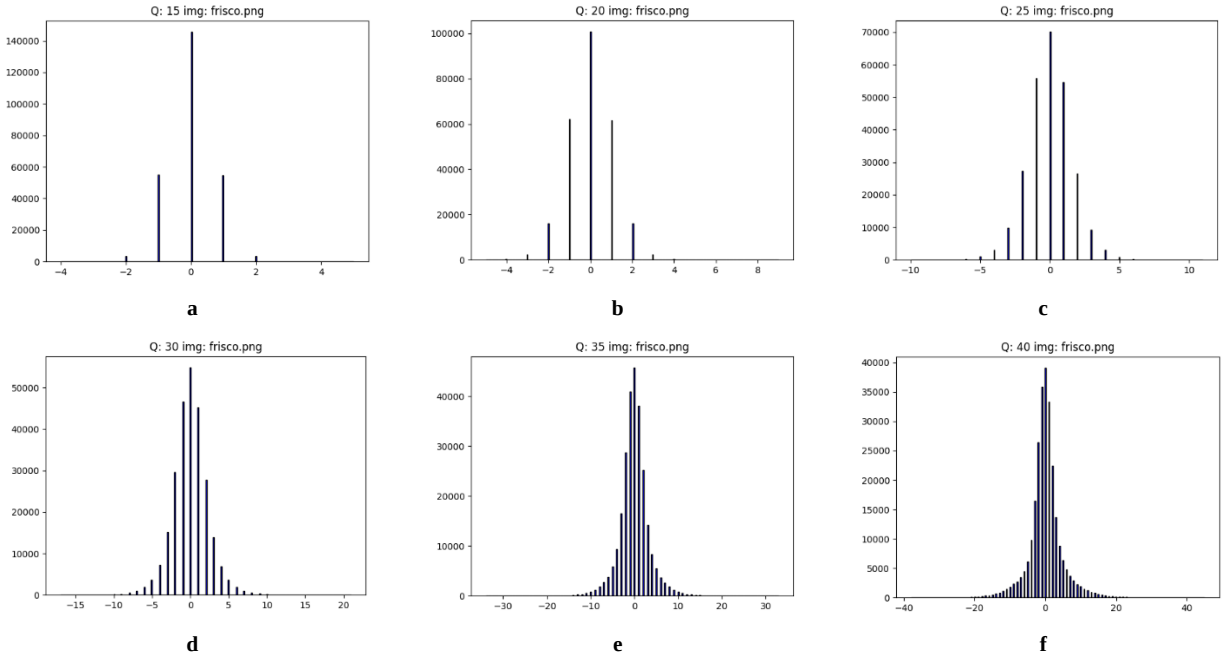


Fig. 2. The histogram of difference for the Frisco image for six values of Q

The distributions of differences (1) obtained for compression of the fr01 image are presented in Fig.3.

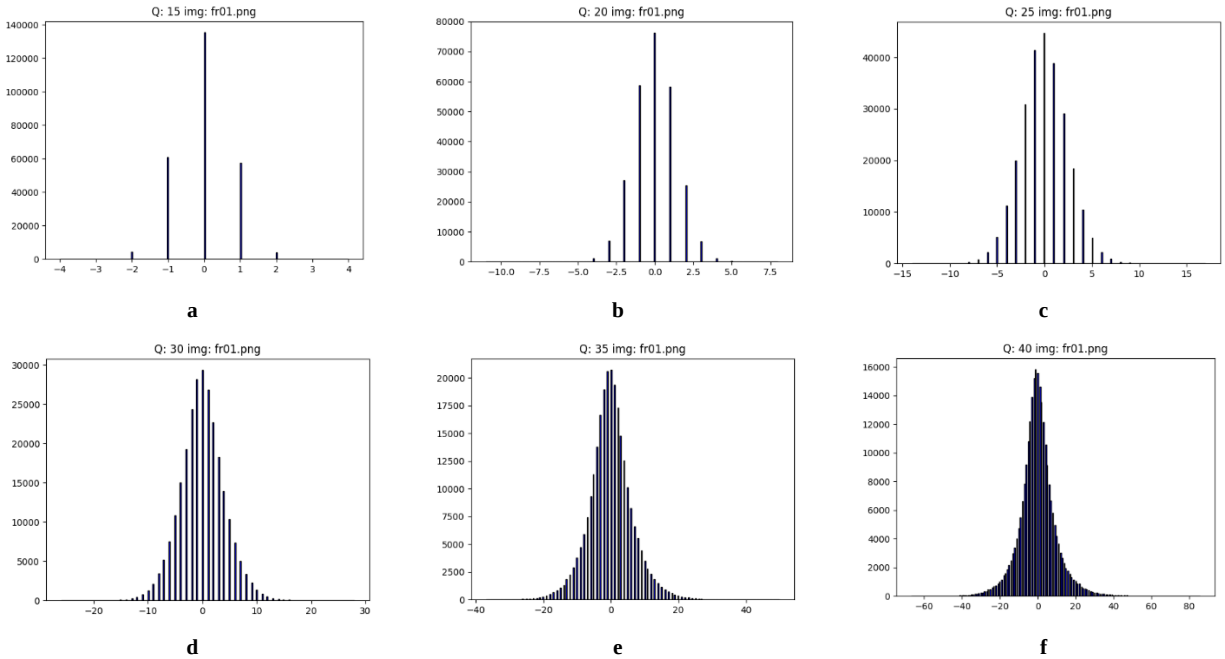


Fig. 3. The histograms of differences values for the fr01 image for six values of Q

Overall, similar situations exist for the simple image. The distribution becomes less Gaussian with Q increasing. But in this case, the distributions are clearly non-Gaussian for larger Q.

The next step is to check if the noise that can be present (recall that, in real life, it is hard to acquire a noise-free image, except in the cases of computer-generated images) affects the behavior of distortions. In the case of noisy images, it is possible to use two ways of using the formula for differences (1). The first is to use (1) as it was previously (for noise-free images). In this case, an initial noise-free image compared to an image that was corrupted by noise and then compressed with some Q parameter. This allows studying the properties of residual noise in compressed images, this is important for the methods of compressed image post-filtering [10]. The second one is to

use I_{ij}^{N} (noised image) instead of I_{ij} (noise-free image); in other words, a compressed image is compared to the corresponding noisy image.

The first variant is to check what are the properties of combined distortions that is the joint influence of the noise and lossy compression. In the second case, the difference analysis characterizes the properties of distortions introduced by the encoder applied to noisy images or how the presence of noise in the image affects the distortions' distribution.

For noise simulation in this work, we have used additive white Gaussian noise (AWGN), which is known as one of the simplest noise models and a good starting point in research. Overall, according to the noise model, a noisy image can be described in the following way:

$$I_{ij}^{n} = I_{ij}^{true} + n_{ij}, \quad (2)$$

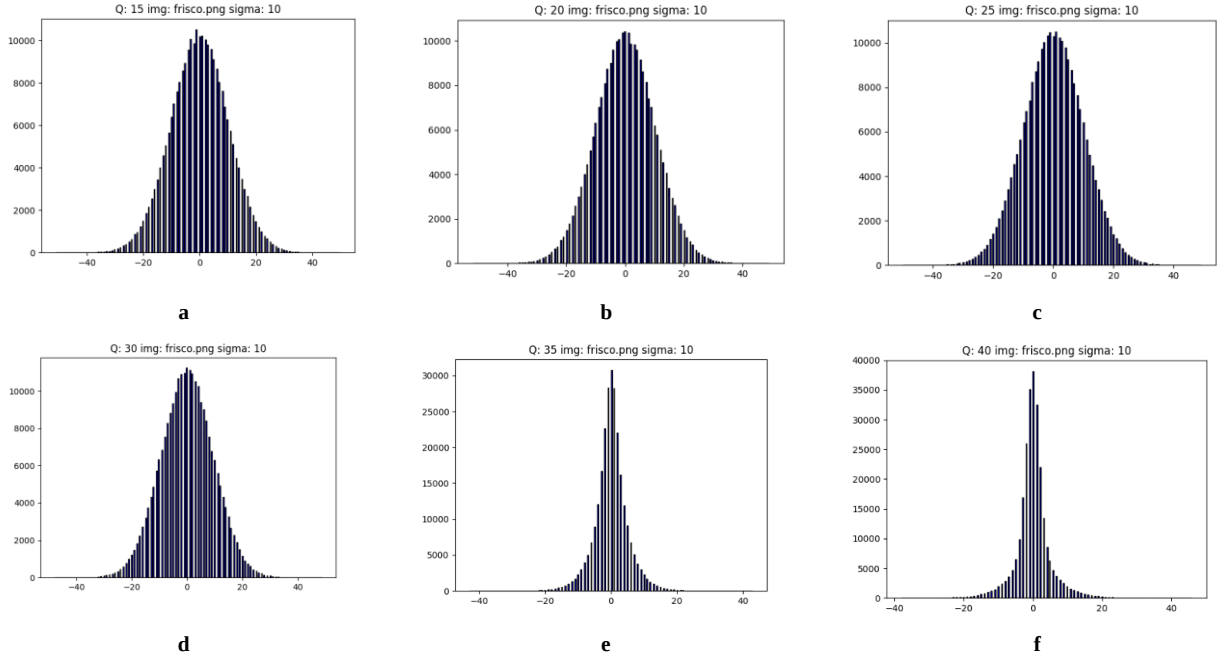
where I_{ij}^{n} denotes the noisy ij-th pixel value, I_{ij}^{true} is the true ij-th pixel value, n_{ij} is the value of AWGN having zero mean and the variance σ^2. Below we assume that noise variance is a priori known or accurately pre-estimated in advance.

Let us start from the first case when we add noise to the image and use the (1) formula, taking into account that now we compress the noisy image. As a result, the formula (1) can be changed in the following way:

$$\Delta_{ij}(Q) = I_{ij} - I_{ij}^{NC}(Q),, \; i = 1, \ldots, N_i; \; j = 1, \ldots, N_j, \quad (3)$$

where I_{ij}^{NC} is the compressed noisy image.

First, let us look at the histograms obtained for this variant that are presented in Figs. 4–5. It is also important to note that the variance of AWGN is equal to 100 (in this case, the noise is visible in most noisy images).



a **b** **c**

d **e** **f**

Fig. 4. The histograms of differences between the noise-free and compressed noisy images for the Frisco image

From the analysis of data in Fig. 4, it is possible to see that for Q in the range of 15 to 30, the distribution has a Gaussian shape. For larger Q, it seems that the residual noise in the compressed image starts to be non-Gaussian. The noise filtering effect due to lossy compression is observed for Q=35 and Q=40 where Q=35 corresponds to the optimal operation point [10].

Table 3

Statistical characteristics of distortions (residual noise) for the noisy Frisco image

Q	Kurtosis	Skewness	Mean	Variance
15	0.0198	-0.0105	-0.0252	104.0136
20	0.0247	-0.0078	-0.0139	103.3174
25	0.0329	-0.0052	0.0046	100.1885
30	0.0419	-0.0079	0.0031	90.8979
35	2.6541	0.0054	-0.0148	24.9837
40	4.7843	0.2334	-0.0180	25.0086

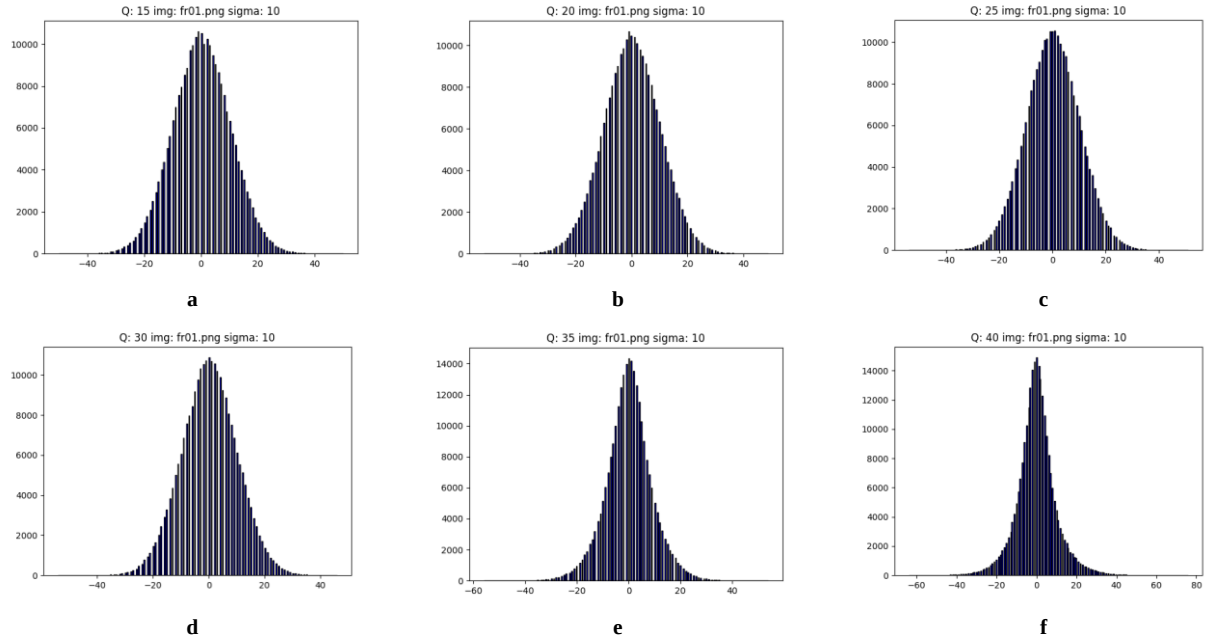


Fig. 5. The histograms of differences between the noise-free and compressed noisy images for the fr01 image

In the case of a more complex image (see data in Fig. 5), the tendencies are similar. This time the histograms might have additional or local peaks (are not as smooth as previously). The distributions in Figures 5,e, and 5,f seem narrower than for other histograms. This deals with partial noise suppression when lossy compression is applied to noisy images [10].

Table 4

Statistical characteristics of distortions (residual noise) for the noisy fr01 image

Q	Kurtosis	Skewness	Mean	Variance
15	0.0382	-0.0074	0.0285	103.3563
20	0.0389	-0.0079	0.0303	103.0498
25	0.0558	-0.0095	0.0535	101.6223
30	0.0716	-0.0077	0.0331	98.9175
35	0.9200	-0.0102	0.0107	77.7847
40	2.6319	0.1937	-0.0498	98.4561

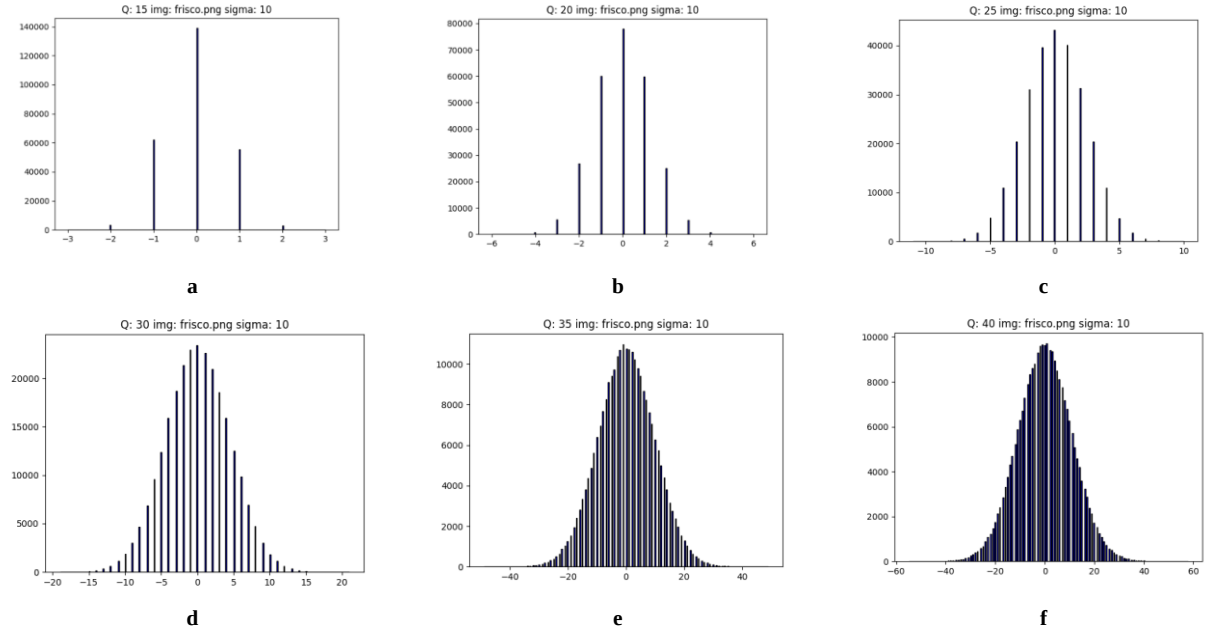


Fig. 6. The histogram of differences (3) for the noisy Frisco image

As one can see, the distributions seem to be close to Gaussian for almost all values of Q.

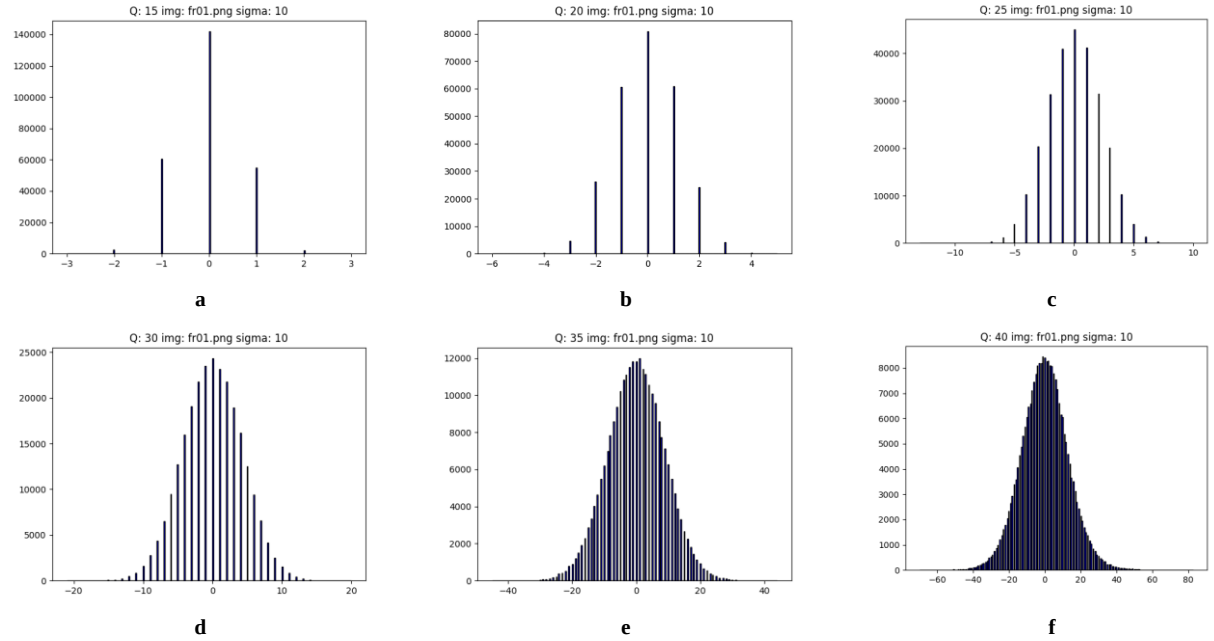


Fig. 7. The histogram of differences (3) for the noisy fr01 image

Preliminary conclusions that follow from histogram (Fig. 4 and 5) analysis are confirmed by statistical data presented in Tables 3 and 4. Kurtosis is close to zero for Q=30 and less. But it is not close to zero for Q=35 and 40 indicating non-Gaussian properties of residual noise. Another interesting moment is that the variance of distortions is smaller than the AWGN variance for Q=30, 35, and 40 – this is associated with the aforementioned noise filtering effect.

The final situation to be considered is when the differences obtained due to lossy compression for specific values of Q can be described as:

$$\Delta_{ij} = I_{ij}^{N} - I_{ij}^{NC},, \; i = 1, \ldots, N_i; \; j = 1, \ldots, N_j, \tag{4}$$

where I_{ij}^{N} is the noisy image (artificially noised image in our simulations) and I_{ij}^{NC} is the compressed noisy image. The histograms of Δ_{ij} are presented in Fig. 6, and Fig 7. Overall, at the first glance, for both images, it appears that distortions are more Gaussian-like than those shown previously.

The statistical parameters (presented in Tables 5 and 6) prove that statement. For the simple structure image, the kurtosis and skewness is close to zero for all values of Q. The complex structure image (see data in Table 6) shows similar results except for Q equal to 40.

Table 5

Statistical characteristics of distortions for the noisy Frisco image

Q	Kurtosis	Skewness	Mean	Variance
15	-0.1551	0.0260	-0.0276	0.5396
20	-0.1021	0.0022	-0.0162	1.7164
25	-0.0656	-0.0058	0.0023	5.6524
30	-0.0310	-0.0002	0.0008	19.8241
35	0.0331	0.0017	-0.0171	94.6806
40	0.1052	0.0188	-0.0204	120.9301

Table 6

Statistical characteristics of distortions for the noisy fr01 image

Q	Kurtosis	Skewness	Mean	Variance
15	-0.2062	0.0179	-0.0243	0.5137
20	-0.1956	-0.0134	-0.0225	1.5821
25	-0.1404	-0.0012	0.0007	5.1657
30	-0.0633	-0.0076	-0.0197	18.3098
35	0.0621	-0.0036	-0.0421	78.5642
40	0.5193	0.0802	-0.1026	169.9732

Conclusions

In this study, we have analyzed the characteristics of distortions due to lossy image compression by the Better Portable Graphics coder. The cases of noisy and noise-free images are also considered. It is shown that for the noise-free images, as Q increases, the introduced distortions tend to become non-Gaussian. This starts to happen for

Q about 30. For larger Q, the distribution of distortions becomes non-Gaussian.

It is also shown that the presence of noise in an image to be compressed affects the distortion introduced by the considered encoder. In this paper, the noise model used was AWGN, and as a result, the combined distortions are mostly close to Gaussian, especially when comparing a noisy image with a compressed one.

Further research steps can deal with the development of an approach to post-filtering that takes into account the information about distortions obtained due to compression to increase the overall quality of the final (compressed) image.

References

1. Shelke S. K., Sinha S. K., Patel G. S. Study of End to End Image Processing System Including Image De-noising, Image Compression & Image Security. Wireless Pers Commun. 2021. Volume 121. P. 209–220. DOI: https://doi.org/10.1007/s11277-021-08631-9.

2. Pan S., Jiang J., Qiu H., Qiao J., Xu M. Research on Mass Image Data Storage Method for Data Center. 3D Imaging—Multidimensional Signal Processing and Deep Learning. Smart Innovation, Systems and Technologies, 2023. Volume 349. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-1230-8_6.

3. Monika R., Dhanalakshmi S. An efficient medical image compression technique for telemedicine systems. Biomedical Signal Processing and Control, 2023. Volume 80, part 2. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bspc.2022.104404.

4. Alam F., Ofli F. & Imran M. Processing Social Media Images by Combining Human and Machine Computing during Crises. International Journal of Human–Computer Interaction, 2018. Volume 34. Issue 4. P. 311–327. DOI: 10.1080/10447318.2018.1427831

5. Fu C., Du B. Remote Sensing Image Compression Based on the Multiple Prior Information. Remote Sensing, 2023. Volume 15. No. 8. DOI: https://doi.org/10.3390/rs15082211.

6. Hussain A. J., Al-Fayadh A., Radi N. Image compression techniques: A survey in lossless and lossy algorithms. Neurocomputing, 2018. Volume 300. P. 44–69.

7. Sultana Z., Nahar L., Tasnim F., Hossain M. S., Andersson K. Lossy Compression Effect on Color and Texture Based Image Retrieval Performance. ntelligent Computing & Optimization. ICO 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, 2023. Volume 569. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-19958-5_108.

8. Veena S., Rao M. Handling Tradeoff Between Visual Perception and Compression in Video Codec Using Optimal Intra-Frame Prediction. Wireless Pers Commun, 2021. Volume 119. P. 1515–1540. DOI: 10.1007/s11277-021-08293-7.

9. Setiawan I., Dahlan R., Basuki A. I., Susanto H., Rosiyadi D. Trade-off between Image Quality and Computational Complexity: Image Resizing Perspective. Jurnal Teknik Elektro, 2022. Volume 14. No. 1. P. 24–28. DOI: https://doi.org/10.15294/jte.v14i1.37629.

10. Kovalenko B., Rebrov V., Lukin V. Analysis of the potential efficiency of post-filtering noisy images after lossy compression. Ukrainian journal of remote sensing, 2023. Volume 10. No. 1. DOI: 10.36023/ujrs.2023.10.1.231.

11. Chatterjee P., Milanfar P. Is Denoising Dead? IEEE Transactions on Image Processing, 2010. Volume 19. No. 4. P. 895–911. DOI: 10.1109/TIP.2009.2037087.

12. Al-Chaykh O. K., Mersereau R. M. Lossy compression of noisy images. IEEE Transactions on Image Processing, 1998. Volume 7. No. 12. P. 1641–1652.

13. Albalawi U., Mohanty S., Kougianos E. A Hardware Architecture for Better Portable Graphics (BPG) Compression Encoder. 2015 IEEE International Symposium on Nanoelectronic and Information Systems, 2015. P. 291–296. DOI: 10.1109/iNIS.2015.12.

14. Aiazzi B., Baronti S., Santurri L., Selva M., Alparone L. Impact of irreversible data compression on spectral distortion of hyper-spectral data. Geoinformation for European-wide Integration, 2003. ISBN 90-77017-71-2.

15. Aiazzi B., Alparone L., Baronti S., Lastri C., Selva M. Spectral Distortion in Lossy Compression of Hyperspectral Data. Journal of Electrical and Computer Engineering, 2012. Volume 2012. Article ID 850637. DOI: https://doi.org/10.1155/2012/850637.

16. Shvec I., Lukin V. Analiz harakteristik iskazhenij pri szhatii izobrazhenij sovremennymi metodami na osnove dkp [Analysis of distortion characteristics in image compression by modern dcp-based methods]. Aviacionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya, 2017. No. 2. Issue 137. ISSN – 1727-7337.

17. Abramova V., Lukin V., Abramov S., Abramov K., Bataeva E. Analysis of Statistical and Spatial Spectral Characteristics of Distortions in Lossy Image Compression. 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW), 2022. P. 644–649. DOI: 10.1109/UkrMW58013.2022.10036949.

18. Kovalenko B., Lukin V., Vozel B. BPG-Based Lossy Compression of Three-Channel Noisy Images with Prediction of Optimal Operation Existence and Its Parameters. Remote Sensing, 2023. Volume 15. No. 6. DOI: https://doi.org/10.3390/rs15061669.

19. Lukin V., Kovalenko B., Vozel B. A Fast and Accurate Prediction of BPG Compression Parameters in Optimal Operation Point Neighbourhood for Three-channel Noisy Images. Fundamental Research and Application of Physical Science, 2023. Volume 8. P. 129–160. DOI: https://doi.org/10.9734/bpi/fraps/v8/7110A.

20. Ranganathan P., Gogtay N. An Introduction to Statistics - Data Types, Distributions and Summarizing Data. Indian Journal of Critical Care Medicine, 2019. Volume 23. P. 169–170. DOI: 10.5005/jp-journals-10071-23198.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-136-140
УДК 621

СТАНІСЛАВ КОВАЛЬОВ
Український державний хіміко-технологічний університет
https://orcid.org/0000-0001-8839-2392
e-mail: sv_kovalyov@i.ua
ВЛАДИСЛАВА МІЩЕНКО
Український державний хіміко-технологічний університет
https://orcid.org/0000-0002-1867-3874
e-mail: vlada@ua.fm
ОЛЕГ ГІРІН
Український державний хіміко-технологічний університет
https://orcid.org/0000-0001-7712-2290
e-mail: girin@ua.fm

ВЛАСТИВОСТІ НІКЕЛЕВИХ ПОКРИТТІВ ЕЛЕКТРООСАДЖЕНИХ У МАГНІТНОМУ ПОЛІ НИЗЬКОЇ ІНДУКЦІЇ

Робота присвячена вивченню властивостей нікелевих покриттів, отриманих у магнітному полі низької індукції.

Ключові слова: електрокристалізація, нікелеві покриття, магнітне поле, мікротвердість.

STANISLAV KOVALYOV, VLADYSLAVA MISHCHENKO, OLEG GIRIN
Ukrainian State University of Chemical Technology

PROPERTIES OF NICKEL DEPOSITS ELECTRODEPOSITED IN A LOW INDUCTION MAGNETIC FIELD

The paper presents the results of research into the properties, phase composition, and morphology of nickel deposits obtained by electrocrystallization in a magnetic field of weak induction. Electrodeposition of nickel deposits was carried out on a copper base using a magnetic field of 0.0005 T. The stationary magnetic field was located perpendicular to the electrode surface. The deposit was obtained in an electrolyte with the composition: 0.64 M $NiSO_4$ $7H_2O$ + 0.5 M NH_4Cl + 0.49 M H_3BO_3. A current density was 3 A/dm². The research was carried out using chronopotentiometry, scanning electron microscopy and X-ray phase analysis. The properties of the obtained deposits were studied by measuring reflectivity, microhardness and internal stresses. The studies conducted in the work prove that the weak-induction magnetic field applied in the electrolysis process affects the electrodeposition process and the morphology, structure, and properties of nickel deposits. When applying a magnetic field by induction of 0.0005 T, an increase in the overvoltage of nickel electrodeposition is observed. The morphology of the deposit changes when a magnetic field is applied. The use of a magnetic field during electrolysis allows obtaining a deposit with increased microhardness and gloss and reduced internal stresses. Electrodeposition conditions of nickel deposits are proposed: current density of 3 A/dm² and magnetic field with induction of 0.0005 T. The use of a magnetic field makes it possible to exclude the use of surface-active substances and make the deposition process more technological.

Key words: electrocrystallization, nickel *deposits*, magnetic field, microhardness, internal stresses.

Постановка проблеми

Нікелеві покриття використовують як функціональні завдяки їх високій корозійній стійкості, відбивній здатності та нескладним умовам отримання. В роботі поставлена задача підвищення експлуатаційних властивостей (зниження внутрішніх напружень, підвищення мікротвердості) нікелевих покриттів.

Аналіз останніх джерел

За допомогою стаціонарних та динамічних електрохімічних досліджень вивчено вплив статичного горизонтального магнітного поля 0,7 Т на процес електроосадження композиційного покриття Ni/нано-Al_2O_3 у модифікованому електроліті Уоттса [1]. Дослідження показали посилення масопереносу та процесу переносу заряду при накладенні магнітного поля. Орієнтація кристалів (220) посилювалась за рахунок збільшення щільності магнітного потоку. Також збільшувалась швидкість осадження за рахунок магнітодинамічного ефекту.

Авторами статті [2] вивчався вплив зовнішнього магнітного поля на сплав нікель-залізо. Електроосадження проводилось з електроліту 0,5 М $NiSO_4$ $6H_2O$ + 0,01 М $FeSO_4$ $7H_2O$ + 0,4 М H_3BO_3 у магнітних полях до 0,5 Т на основі лінійної та нелінійної диференціальної зміни перемінного струму. Було встановлено вплив магнітного поля в діапазоні від 1 до 100 Гц. Вони вказують, що на кінетику адсорбції іонів може впливати додатковий масоперенос, який викликаний магнітною конвекцією.

Електроосадження сплавів Ni-Co-Fe-Zn проводили у розчині хлорид-іону з наявністю постійного паралельного (по відношенню до поверхні катоду) магнітного поля та без нього [3]. Процес осадження контролювався за допомогою хронопотенціометрії. Було виявлено, що струм електроосадження збільшувався при наявності магнітного поля (9 Т), у порівнянні з його відсутністю. Вимірювання атомно-силової мікроскопії показали зменшення шорсткості поверхні плівок при наявності магнітного поля. Постійне паралельне магнітне поле впливає на електрохімічну реакцію, зменшуючи товщину подвійного шару, й таким чином, збільшуючи щільність струму та масу осаду.

Досліджено вплив зовнішнього постійного магнітного поля до 0,7 Т на електроосадження сплавів Ni-Fe [4]. Показано, що магнітне поле впливає реакцію виділення водню. Було отримано збільшення

парціального струму з допомогою виділення водню, якщо магнітне поле прикладене перпендикулярно електричному полю. Наявність та напрямок магнітного поля впливає на морфологію шарів. На шорсткість покриттів впливу виявлено не було.

В роботі вивчався гігантський магнітний імпеданс в гальванічних мікродротах Ni-Fe-Mo/Cu [5]. Електроосадження Ni проводили в електроліті 60 г/л $NiSO_4 \cdot 7H_2O$, 4 г/л $FeSO_4 \cdot 6H_2O$, 10 г/л NaCl, 66 г/л лимонної кислоти, 3 г/л сахаріну при струмі щільністю 30 мА/см^2 з прикладеним перпендикулярно до осі дроту магнітним полем 200 кА/м. Вплив магнітного поля на електроосадження було виявлено після осадження багатошарового Ni на поверхню Au-електроду. Осаджений Ni на поверхні золота був намагніченим, швидкість електроосадження Ni була прискорена, а швидкість видалення осадженого Ni на електроді знижена у присутності магнітного поля. Застосування постійного магнітного поля впливало на морфологію та розмір частинок відкладень.

У всіх вищезазначених роботах проводили дослідження з використанням магнітного поля індукцією від 0,5 до 9 Т. Було встановлено вплив магнітного поля на процеси електроосадження та морфологію осаджених покриттів.

Досліджувався вплив магнітного поля низької індукції при електроосадженні міді. Було одержано збільшення мікротвердості отриманих осадів в декілька разів [6, 7], показано вплив магнітного поля низької індукції на процес електроосадження, морфологію, структуру осадів та їх властивості. В роботі [8] показано вплив магнітного поля на електрокристалізацію олова.

Для зміни процесів електрокристалізації, зміни морфології та покращення властивостей покриттів нікелю запропоновано використовувати магнітне поле низької індукції (0,0005 Т), замість додавання органічних домішок в електроліти для поліпшення механічних властивостей, що дозволить полегшити організацію технологічного процесу, убезпечити виробничий персонал та навколишнє середовище від шкідливого впливу.

Метою роботи є вивчення впливу магнітного поля низької індукції (0,0005 Т) на електрокристалізацію, морфологію, фазовий склад та властивості нікелевих покриттів.

Виклад основного матеріалу

Електрохімічні дослідження проводили з використанням постійного магнітного поля індуктивністю до 0,0005 Т, комірку розташовували згідно з методом, що описаний у [9]. Лінії магнітної індукції були спрямовані паралельно поверхні електроду. Нікелеві покриття отримували в електроліті складу, моль/л: $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0,64, NH_4Cl – 0,5, H_3BO_3 –0,49. Електроосадження проводилось при щільності струму – 3 А/дм^2 при температурі 298±3 °К. Електрокристалізаця нікелевого покриття проводилась на мідну основу товщиною 0,3 мм та розміром 2×2 см. Анодом була нікелева пластина. В якості електроду порівняння використовували хлорсрібний електрод заповнений насиченим розчином KCl.

Морфологічні дослідження поверхні нікелевих покриттів проводили за допомогою РЕМ-106І з формуванням зображень у вторинних електронах. Фазовий аналіз проводили на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-2.

Мікротвердість та відбивну здатність досліджували за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 та фотоелектричного блискоміра ФБ-2. Внутрішні напруження вимірювали методом гнучкого катоду.

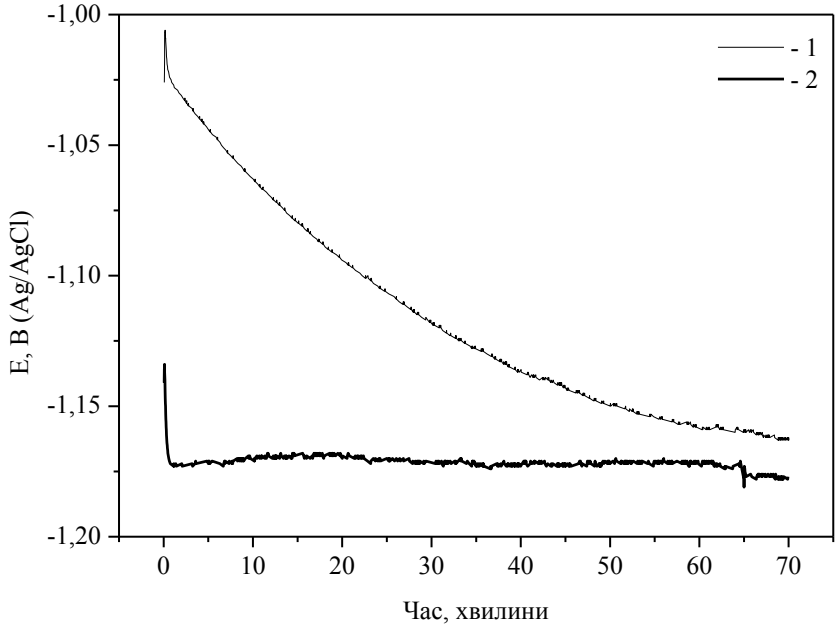
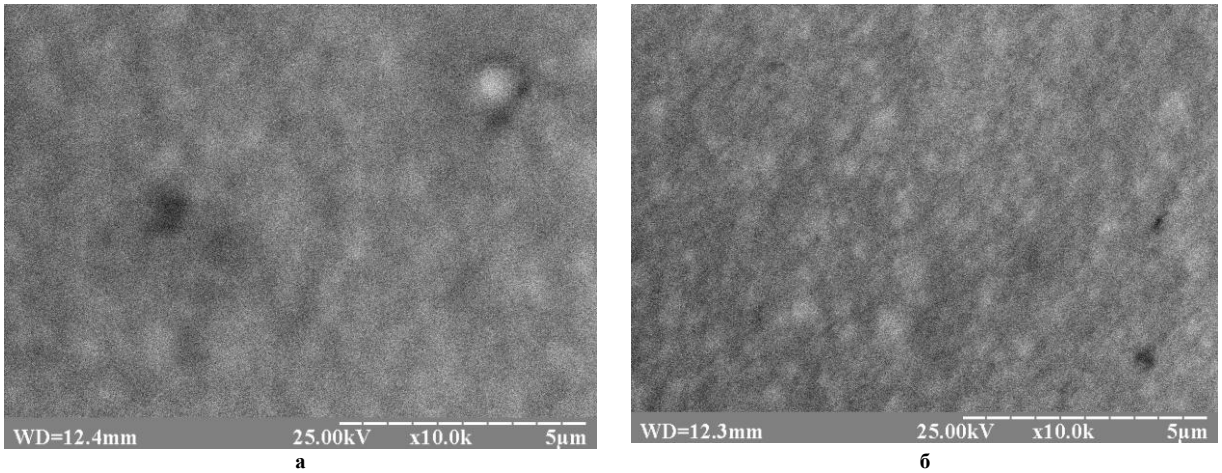


Рис. 1. Хронопотенціограма електроосадження нікелевого покриття при індукції магнітного поля, мТ: 1 – 0; 2 – 0,5

Електрохімічні дослідження. За допомогою методу стаціонарної хронопотенціометрії вивчався вплив магнітного поля низької індукції на електроосадження нікелевих покриттів. Дослідження показали, що на кривих (рис.1), отриманих у магнітному полі індукцією 0,5 мТ, потенціал осадження має нижче значення, ніж потенціал електрода без застосування магнітного поля. На початковому етапі процесу потенціал відрізняється майже на 150 мВ. Проте, на при кінці електролізу, значення потенціалів майже вирівнюються, за рахунок збільшення потенціалу процесу електрокристалізації без магнітного поля. На відміну від електрокристалізації без магнітного поля, у магнітному полі виявляється стабільніший потенціал електроосадження –1,175 мВ. Наведені дані вказують на розбіжність процесів, які протікають при електрокристалізації на поверхні катоду, що, безумовно, впливає на структуру, морфологію та властивості одержаних покриттів.

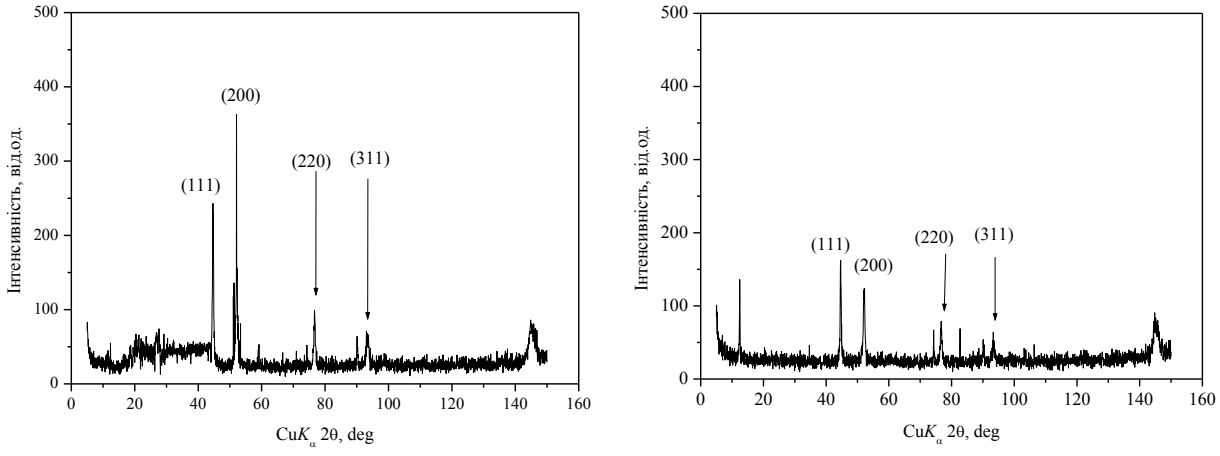
Структурні дослідження. Згідно фото растрової електронної мікроскопії (рис. 2), покриття, одержані у магнітному полі, мають структуру з зернистими агрегатами меншого розміру ніж покриття, отримані в звичайних умовах.



а **б**

Рис. 2. Фото морфології поверхні нікелевих покриттів (збільшення - х10000), де а – зразок осаду, одержаного у звичайних умовах; б – зразок осаду, одержаного при застосуванні магнітного поля 0,5 мТ

Дані фазового дослідження (рис. 3) свідчать про те, що в осадах присутня тільки фаза нікелю з відсутністю інших фаз, як у випадку з застосуванням магнітного поля, так і без нього. Проте розміри піків опосередковано вказують на деяку відмінність структури одержаних осадів.



а) **б)**

Рис. 3. Рентгенівські дифрактограми електроосаджених покриттів нікелю при індукції магнітного поля, мТ: а – 0; б – 0,5

Дослідження фізико-механічних властивостей покриттів. Фізико-механічні властивості покриттів вивчали шляхом вимірювання мікротвердості, відбивної здатності, блиску та внутрішніх напружень.

Одержані нікелеві покриття у магнітному полі низької індукції та за його відсутності – це сріблясто-сірі блискучі покриття з ледь помітним жовтуватим відтінком.

Згідно з даними, наведеними у таблиці 1, спостерігається вплив магнітного поля низької індукції на властивості покриттів. Слід зазначити, що вихід за струмом зменшився на 2,5%, а товщина осадженого нікелю на 3,9%. Це пояснюється збільшенням катодного потенціалу при електроосадженні покриттів у магнітному полі (рис. 1). Збільшення потенціалу при електроосадженні покриття виникає при додаванні до електроліту поверхнево-активних домішок, що приводить до збільшення мікротвердості та блиску поверхні.

Тобто можна припустити, що магнітне поле впливає аналогічним чином. Це також підтверджується збільшенням блиску покриттів на 8 %. Крім того, вимірювання мікротвердості осадів, отриманих у магнітному полі низької індукції, показали її збільшення на 31 % (табл. 1).

Одним із основних механічних параметрів нікелевого покриття є внутрішні напруження, які прямо впливають на працездатність та цілісність покриття. Застосування магнітного поля дозволяє зменшити внутрішні напруження в 4,19 рази (табл. 1).

Таблиця 1

Фізико-механічні властивості нікелевих покриттів

Умови одержання, індуктивність магнітного поля, мТ	Вихід за струмом, %	Товщина, мкм	Блиск, відн. од.	Відбивна здатність, відн. од.	Твердість, МПа	Внутрішні напруження, МПа
0	100	43,8	73	100	4146	851
0,5	97,5	42,14	79	100	5554	203

Висновки

Дослідження проведені в роботі доказують, що магнітне поле низької індукції, застосоване в процесі електролізу, впливає на процес електроосадження і, як наслідок, на морфологію, структуру та властивості нікелевих осадів.

Вплив магнітного поля аналогічний до впливу поверхнево-активних речовин (ПАР), які додають до електроліту, для одержання більш гладких та твердих нікелевих покриттів. Застосування магнітного поля дозволяє виключити використання ПАР та зробити процес осадження більш технологічним. Детальні висновки наведені нижче:

1. При застосуванні магнітного поля індукцією 0,0005 Т спостерігається збільшення перенапруження виділення нікелю.
2. Морфологія покриття при застосуванні магнітного поля змінюються.
3. Фазовий склад однаковий для осадів одержаних з та без використання магнітного поля.
4. Використання магнітного поля під час електролізу дозволяє отримати покриття з підвищеними мікротвердістю та блиском і зменшеними внутрішніми напруженнями.
5. Запропоновано умови електроосадження нікелевих осадів: щільність струму 3 А/дм^2 та магнітне поле індукцією 0,0005 Т.

Література

1. Wang C., Zhong Y.-B., Wang J. Effect of magnetic field on electroplating Ni/nano-Al_2O_3 composite coating. Journal of Electroanalytical Chemistry. 2009. № 630. P. 42–48.

2. Ispas A., Matsushima H., Bund A. A study of external magnetic-field effects on nickel–iron alloy electrodeposition, based on linear and non-linear differential AC electrochemical response measurements. Journal of Electroanalytical Chemistry. 2011. № 651. P. 197 – 203.

3. Ebadi M., Basirun W.J., Alias Y. Electrodeposition of quaternary alloys in the presence of magnetic field. Chemistry Central Journal. 2010. № 4:14.

4. Ispas A., Matsushima H., Plieth W. Influence of a magnetic field on the electrodeposition of nickel–iron alloys. Electrochimica Acta. 2007. № 52. P. 2785–2795.

5. Velleuera J., Munoz A.G., Yakabchuk H. Giant magneto impedance in electroplated NiFeMo/Cu microwires. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2007. № 311. P. 651 – 657.

6. Kovalyov S. V., Girin O. B., Debiemme-Chouvy C., Mishchenko V. I. Copper electrodeposition under a weak magnetic field: Effect on the texturing and properties of the deposits. Journal of Applied Electrochemistry. 2021. Vol. 51, № 11. P. 1–9.

7. Kovalyov S.V., Debiemme-Chouvy C., Koval'ova N.V. Influence of Weak Magnetic Field on Electrodeposition and Properties of Copper Films. J. Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2021, Vol. 57, No. 3, pp. 308–314.

8. Kovalyov S.V., Girin O.B., Debiemme-Chouvy C. Properties of Tin Films Electrodeposited Under a Weak Magnetic Field. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2018. V. 54. № 6. P. 593-598.

9. Пат. 121411 Україна, МПК (06.2016) C25D 3/00, C25D 5/00, C25D 7/00. Спосіб електрохімічного нанесення покриттів у магнітному полі, яке створено матеріалом основи / Ковальов С. В., Гірін О. Б., Міщенко В.І. (Україна) ; заявник та патентовласник держ. вищ. навч. заклад «Укр. держ. хім.-технол. ун-т». – № a201801782 ; заявл. 22.02.2018 ; опубл. 25.05.2020, Бюл. № 10.

References

1. Wang C., Zhong Y.-B., Wang J. Effect of magnetic field on electroplating Ni/nano-Al2O3 composite coating. Journal of Electroanalytical Chemistry. 2009. № 630. P. 42–48.

2. Ispas A., Matsushima H., Bund A. A study of external magnetic-field effects on nickel–iron alloy electrodeposition, based on linear and non-linear differential AC electrochemical response measurements. Journal of Electroanalytical Chemistry. 2011. № 651. P. 197 – 203.

3. Ebadi M., Basirun W.J., Alias Y. Electrodeposition of quaternary alloys in the presence of magnetic field. Chemistry Central Journal. 2010. № 4:14.

4. Ispas A., Matsushima H., Plieth W. Influence of a magnetic field on the electrodeposition of nickel–iron alloys. Electrochimica Acta. 2007. № 52. P. 2785–2795.

5. Velleuera J., Munoz A.G., Yakabchuk H. Giant magneto impedance in electroplated NiFeMo/Cu microwires. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2007. № 311. P. 651 – 657.

6. Kovalyov S. V., Girin O. B., Debiemme-Chouvy C., Mishchenko V. I. Copper electrodeposition under a weak magnetic field: Effect on the texturing and properties of the deposits. Journal of Applied Electrochemistry. 2021. Vol. 51, № 11. R. 1–9.

7. Kovalyov S.V., Debiemme-Chouvy C., Kovalova N.V. Influence of Weak Magnetic Field on Electrodeposition and Properties of Copper Films. J. Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2021, Vol. 57, No. 3, pp. 308–314.

8. Kovalyov S.V., Girin O.B., Debiemme-Chouvy C. Properties of Tin Films Electrodeposited Under a Weak Magnetic Field. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2018. V. 54. № 6. R. 593-598.

9. Pat. 121411 Ukraina, MPK (06.2016) S25D 3/00, C25D 5/00, C25D 7/00. Sposib elektrokhimichnoho nanesennia pokryttiv u mahnitnomu poli, yake stvoreno materialom osnovy / Kovalov S. V., Hirin O. B., Mishchenko V.I. (Ukraina) ; zaiavnyk ta patentovlasnyk derzh. vyshch. navch. zaklad «Ukr. derzh. khim.-tekhnol. un-t». – № a201801782 ; zaiavl. 22.02.2018 ; opubl. 25.05.2020, Biul. № 10.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-141-149
УДК 675.043.44

КОПИТІНА ІРИНА
Київський національний університет технологій та дизайну
https://orcid.org/0009-0002-0721-1355
e-mail: i.v.kopytina@gmail.com
АНДРЕЄВА ОЛЬГА
Київський національний університет технологій та дизайну
https://orcid.org/0000-0001-8374-2306
e-mail: wayfarer14@ukr.net
МОКРОУСОВА ОЛЕНА
Київський національний університет технологій та дизайну
https://orcid.org/0000-0003-1943-8048
e-mail: olenamokrousova@gmail.com

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ЕНЗИМІЗАЦІЇ ШКІРЯНОГО ВИРОБНИЦТВА

Проведено аналіз сучасних досліджень в області ензимізації шкіряного виробництва. Розглянуто інноваційні підходи до використання комерційно доступних і нещодавно виділених ферментних препаратів у технологічних процесах основного виробництва натуральної шкіри, первинного оброблення шкірсировини, а також при створенні вторинних матеріальних ресурсів з промислових відходів. Акцент зроблено на виготовленні якісної продукції, ресурсоощадженні та екологічному імперативі технології. Одержані результати планується застосувати у майбутніх наукових дослідженнях при розробленні та впровадженні ресурсоощадної екологічно орієнтованої технології виробництва шкіри з використанням сучасних ферментних препаратів.

Ключові слова: ферменти та ферментні препарати, шкіряне виробництво, ресурсоощадження, екологія

KOPYTINA IRYNA, ANDREYEVA OLGA, MOKROUSOVA OLENA
Kyiv National University of Technologies and Design

INNOVATIVE APPROACHES TO ENZIMIZATION OF LEATHER PRODUCTION

Genuine leather production, which involves the use of a wide range of chemicals and is accompanied by the formation of a significant amount of waste, remains a difficult area for the creation and application of cleaner technologies. To replace harmful chemicals, you can use enzymes, which are natural substances that are safe for the environment. At the same time, from an economic point of view, it is practiced to use not the enzymes themselves, but their preparations, however, all the same, the cost of their use remains high, as the cost of raw hides and other reagents used for its processing remains increasingly high. This creates new problems for the industry. Therefore, for the sustainable development of the leather industry towards the production of competitive products, resource saving and greening of production, it is necessary to look for, develop and implement effective innovative approaches to improving the technology of leather manufacturing, including through the wider use of enzymatic processes.

As a result of the analysis of modern research in the field of enzymization of leather production, innovative approaches to the use of commercially available and new enzyme preparations in the technological processes of the main production of natural leather, primary processing of raw materials, and industrial waste disposal have been identified. It has been established that the reasonable use of enzymes at different stages of the technological cycle of processing leather materials contributes to the manufacture of competitive products with a more careful attitude to raw materials, material and energy resources, and the ecological state of the environment.

Key words: enzymes and enzyme preparations, leather production, resource saving, ecology.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Шкідливий вплив виробничої діяльності промислових підприємств на навколишнє середовище та населення у районах, розташованих поблизу цих підприємств, потребує впровадження новітніх технологій, які дозволять скоротити застосування агресивних хімічних реагентів та забезпечити ефективний захист довкілля.

Оскільки виробництво натуральної шкіри передбачає використання великого асортименту хімічних реагентів і супроводжується утворенням значної кількості відходів, оброблення шкіри залишається складним завданням зі створення та застосування екобезпечних технологій. У якості альтернативи шкідливим хімічним реагентам можна використовувати ферменти (ензими), які є природними речовинами, безпечними для навколишнього середовища. Однак, вартість застосування ферментів залишається високою, все більш високою стає і вартість шкіряної сировини та інших застосовуваних для її оброблення реагентів, що створює нові проблеми для підприємств галузі. Тому для сталого розвитку шкіряної промисловості у напряму виготовлення конкурентоспроможної продукції, ресурсоозбереження та екологізації виробництва необхідно шукати, розробляти та впроваджувати ефективні інноваційні підходи до удосконалення технології виготовлення шкіри, у тому числі, шляхом ензимізації різних етапів технологічного циклу.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій

З аналізу попередніх досліджень і публікацій [1–4] встановлено доцільність використання ферментів і одержаних на їх основі ферментних препаратів у різних галузях промисловості, оскільки це сприяє підвищенню культури виробництва, більш раціональному використанню сировинних та матеріальних ресурсів.

Розроблення, апробація та впровадження ферментних технологій – найперспективніші напрями удосконалення процесів шкіряного виробництва, які дозволяють мінімізувати втрати колагену як основного компонента шкури та шкіри й отримати при цьому високу якість готової продукції, надаючи їй м'якість, пластичність, рівномірне забарвлення та інші привабливі з точки зору споживача характеристики. Крім того, ці технології сприяють поліпшенню екологічного стану довкілля за рахунок скорочення скидання стічних вод та зниження вмісту в них продуктів розпаду білків, жирів, лугів, сульфідів, вапна, сполук хрому та інших виробничих забруднювачів [1, 5].

Формулювання цілей статті

Метою роботи є аналіз останніх сучасних досліджень в області ензимізації шкіряного виробництва, спрямованих на більш раціональне використання сировинних та матеріальних ресурсів, зменшення шкідливого навантаження на навколишнє середовище, одержання продукції високої якості. За об'єкт дослідження обрано ферменти та ферментні препарати, технологічні процеси основного шкіряного виробництва, первинного оброблення шкірсировини, одержання вторинних матеріальних ресурсів з промислових відходів. Предмет дослідження – інноваційні підходи до використання ферментів у шкіряному виробництві в цілому. Для кращого пізнання предмета дослідження, виявлення та визначення закономірностей його розвитку, встановлення взаємодії та зв'язків окремих частин і пізнання зазначеного предмета як єдиного цілого, застосовано поширені загальнонаукові методи у вигляді аналізу та синтезу.

Виклад основного матеріалу

Під час пошуку та аналізу інформації цікаво було прослідкувати як при розробленні інноваційних підходів до забезпечення сталого розвитку шкіряного виробництва науковці та практики поступово приходили до його ензимізації, починаючи від первинного оброблення сировини до утилізації відходів.

1. Ферменти у первинному обробленні шкірсировини

Багато шкідливих проблем у шкіряній промисловості, наприклад, пошкодження лицьової поверхні, зниження міцності шкіряного виробу, можуть виникати вже під час первинного оброблення сировини внаслідок гниття після мікробного забруднення та механічного навантаження через важкість і тиск глинобитного гною, який важко видалити зі шкур великої рогатої худоби.

Стандартний розчин для замочування сировини, який зазвичай використовується на практиці для полегшення видалення гною, складається з високої (0,10-0,15 %) концентрації біоциду та поверхнево-активної речовини. Для зниження екологічного навантаження та більш ефективного очищення необроблених шкур, для їх зберігання та транспортування терміново потрібні нові методи замочування (або миття). При складанні ідеального розчину для миття досліджено амфіфільні властивості детергентів і здатність гліцерину вбудовуватися в міцели миючого засобу. Оскільки розм'якшення затверділого гною є ключовим під час процесу його видалення, представлені у роботі [6] пошукові експерименти поставили таким чином, щоб зміну твердості кульок гною можна було відстежити за допомогою аналізатора текстури. Для забезпечення однакової кількості деформацій зразка гною вимірювання виконували до та після замочування шкур у відповідних композиціях. Різні типи миючих засобів / аніонний (SDS), неіонний (Tween 20 і TritonX-114) і цвіттеріонний (LDAO)/ оцінювали та порівнювали з біорозкладною поверхнево-активною речовиною софороліпід (SL). Таким чином було виявлено, що софороліпід із додаванням неочищеного гліцерину є найбільш ефективним у розм'якшенні зразків затверділого гною. Це було враховано при видаленні зі шкури гною типу «саман».

Виходячи із зацікавленості переробників шкірсировини у виявленні потенційного впливу складів для замочування на якість шкіри, у наступному дослідженні [7] автори встановили, що при використанні неочищеного гліцерину та карбонату натрію використання лише ~10-25 % стандартного розчину для замочування має потенціал для пом'якшення та полегшення видалення глинобитного гною. Механічні властивості та стан лицьової поверхні виробів, виготовлених зі шкур, змочених розробленими складами, виявилися кращими порівняно із виробами, виготовленими з використанням стандартного розчину.

Але і на цьому дослідники не зупинились. Мета нового дослідницького проекту [8] полягала у виявленні потенційних ефектів **включення ферментів**, які можуть атакувати гній типу «саман» та руйнувати адгезію для покращення його видалення. Автори виходили з того, що у разі включення оптимальної кількості ферментів целюлази або ксиланази, що використовуються окремо або в їх комбінації, можливим є зниження концентрації неочищеного гліцерину з 10 до 5 %. Судячи з одержаних результатів (Рис. 1), комбінація целюлази та ксиланази працювала синергетично, оскільки нижча концентрація кожної з них, ніж при окремому застосуванні, також продемонструвала покращення ефективності розм'якшення гною. Аналіз текстури замоченого затверділого гною показав наступне: ферменти є досить перспективними реагентами для пом'якшення гною, що можна пояснити розпушенням останнього. До змочувального складу також були включені діоксид хлору для зменшенням запаху гною та гідроксид натрію для посилення інгібування мікробного росту патогенних бактерій, які були протестовані. Вартість впровадження нових рецептур подібна до тих, що традиційно використовуються у промисловості. Крім того, нові розчини для замочування сировини мають більш сприятливий вплив на навколишнє середовище.

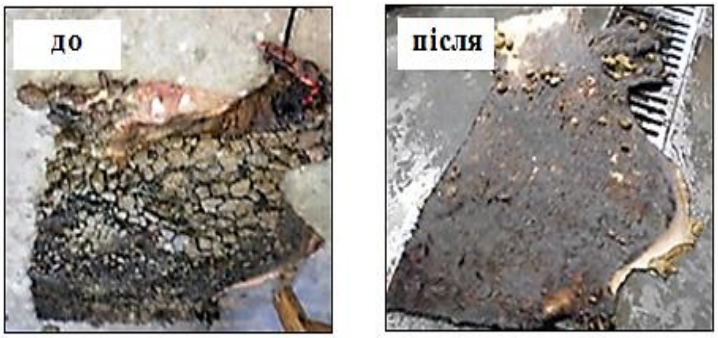


Рис. 1. Зразки шкури із поверхневим гноєм до та після замочування [8]

2. Ферменти в основному виробництві натуральної шкіри

Завдяки своєму різноманіттю, специфічній активності та м'яким умовам реакцій ферменти знаходять широке застосування переважно у підготовчих процесах шкіряного виробництва: відмочуванні, зневолошуванні та знежирюванні.

Біокаталітичні процеси **відмочування-зоління** шкіряної сировини досліджено у роботі [9], мета якої полягала у доведенні ефективності використання бактерій *Bacillus subtilis*, ензимів панкреатину та ферментного препарату Chemizym BH (Польща) під час зневолошування-зоління шкур бичка та шкурок кроля. Ефективність хімічних реагентів визначали оцінюванням хімічного складу і фізико-механічних властивостей сформованого шкіряного напівфабрикату. У результаті дослідження встановлено скорочення тривалості процесу відмочування вдвічі та зменшення на 20 % витрати екологічно небезпечних реагентів при золінні. Розроблена біотехнологія відмочування-зоління дає можливість об'єднати послідовні процеси лужного оброблення сировини. Реалізацію технологій зневолошування-зоління з використанням ферментного препарату Chemizym BH за концентрації 0,3 % впродовж 12 годин з подальшим одногодинним м'якшенням у виробничих умовах можна вважати перспективною для виробництва еластичних шкір хромового дублення для верху взуття (у тому числі робочого і військового), одягу та галантерейних виробів.

У шкіряному виробництві **зневолошування** та зоління є найбільш забруднюючими довкілля процесами. Традиційна технологія гідролізу (так званого спалювання) волосу призводить до величезного забруднення стічних вод, на що вказують високі показники вмісту сульфідів, ХСК та БСК. Популярним методом заміни сульфідного видалення шерсті є ферментативне зневолошування, яке дозволяє зберегти волос. Однак, існують деякі проблеми, пов язані із ферментативним видаленням шерсті, які обумовлені необхідністю більш суворого контролю параметрів процесу та можливістю пошкодження лицьової поверхні шкури. Для подолання цих проблем зроблено спробу використати іони двовалентних металів для безпечного та ефективного ферментного зневолошування бичачих шкур. Досліджено вплив іонів металів Ca(II), Mg(II), Mn(II) та Zn(II), на активність протеази *AS1.398* – продукту гідролізу колагену та казеїну. Одержані висновки підтверджені ефектом видалення волосу зі шкури та гарною якістю готової шкіри. Результати дослідження доповнюють знання ферментативного видалення волосу, які призведуть до більш екологічно безпечного виробництва шкіри [10].

У роботі [11] вперше за методом флуоресцентного трасування досліджено дифузію протеази в шкуру під час ферментативного зневолошування. Встановлено, що швидкість проникнення протеази в шкуру досить низька, фермент залишається у сосочковому шарі дерми навіть після видалення волосу, що є основною причиною того, що ферментативне зневолошування може пошкодити або розпушити лицьову поверхню. Протеаза здатна ефективно видалити епідерміс за короткий час. Виходячи з цих уявлень, автори розробили ферментативне зневолошування з низькою витратою сульфідів (*EALS unhairing*), засноване на pH-чутливості нейтральної протеази. Для уникнення ризику пошкодження відмочену шкуру ВРХ (pH 8) спочатку обробили нейтральною протеазою (активність 20 од/г шкури) протягом 40 хвилин при 22 °C для розщеплення епідермісу, але не для видалення шерсті. Потім відразу ж додали 1 % вапна (гідроксиду кальцію) для інактивації нейтральної протеази (pH > 12) та імунізації (закріплення) волосу. Нарешті, за допомогою 0,8 % сульфіду натрію шкура була повністю позбавлена волосся з неушкодженим стрижнем волосу. Інтелектуально контрольована дія протеази, а також синергетичний ефект протеази, вапна та сульфіду натрію забезпечили повне видалення волосу та епідермісу зі зменшеною витратою хімічних матеріалів і запобігли утворенню дефектів шкіри. Склад стічних водах після використання *EALS unhairing* помітно покращився через різке зниження надходження сульфіду та вапна, а також збереження волосу.

У Бразилії оцінювалась ефективність видалення волосу з коров'ячої шкури за допомогою ферментного екстракту, отриманого штамом *Bacillus subtilis*, у поєднанні з пероксидом водню [12]. Автори проаналізували дію різних концентрацій ферментного екстракту (100 і 300 од/ г шкури) та пероксиду водню (4 і 8 %). Стан шкури оцінювали візуально, а стічних вод – за вмістом загального азоту, загальних, фіксованих та летких речовин, глікозаміногліканів, протеогліканів і гідроксипроліну. Таким чином з'ясували, що окиснювально-ферментативне зневолошування не руйнує волос, проте, скорочує тривалість процесу порівняно зі звичайним та чистоензимним зневолошуванням, тобто може бути життєздатною альтернативою використанню сульфіду натрію та вапна.

Для екологічно чистого ферментативного видалення шерсті з козячих шкур досліджено гетерологічну експресію лужних металопротеїназ у *Bacillus Subtilis* SCK6 [13]**.** Ген лужної металопротеази 1067 був клонований з *Planococcus halotolerans* SCU63T і гетерологічно експресований у *Bacillus subtilis* SCK6. Використовуючи у якості вихідного середовища бульйон Луріа Бертані (LB), оптимальне середовище одержали шляхом серії ферментації та оптимізації культури (г/л): екстракт дріжджів – 10, соєвий порошок – 15, сечовина – 20, хлорид калію – 6,7, хлорид кальцію – 13,3, хлорид натрію – 10. Виходячи з оптимального середовища, найбільшу ферментативну активність 1259,21 од/мл отримано при культивуванні при 30 °С протягом 40 годин з pH 8, кількістю інокуляту 4 % та обсягом заповнення 50 мл. EDTA пригнічує, а PMSF посилює активність протеази, вказуючи на те, що це метало-, а не серинова протеаза. Оптимальні умови: температура реакції 70 °С, pH 9. Іони металів Zn^{2+}, Co^{2+} та ПАР β-ME, Tween 80 підвищують активність протеази. Результати видалення волосу та мікроскопічного аналізу вказують на те, що ця металопротеаза повністю зневолошує козлину, а шкіра після ферментативного зневолошування має більш м᾽яку текстуру і гладку поверхню без явних пошкоджень.

М᾽якшення, яке протягом століть використовує для оброблення шкур трипсин, є важливим біотехнологічним процесом шкіряного виробництва. У роботі китайських вчених [14] оцінено дію протеази з *Bacillus subtilis SCK6* (NGG) на лицьову поверхню шкіри. Показники активності лужної протеази у стані послаблення були подібними до показників активності трипсину (TBE). М᾽якшення шкур для меблевої шкіри здійснювали при температурі 30-40 °С. Після витримки шкури піддавали пікелюванню та хромовому дубленню за традиційною технологією. Порівняно з трипсином, концентрація гідроксипроліну у лужних розчинах протеази була нижчою, а розподіл сполук хрому у шкірі більш рівномірним. Результати гістологічного аналізу і СЕМ-мікроскопії дослідних шкур і шкір демонструють зменшення пошкоджень та пухкості колагенових волокон, підвищену гладкість їх поверхні. Це свідчить про те, що м᾽якшення новою лужною протеазою дає змогу зменшити ризик пошкодження лицьової поверхні шкіри та виключити використання дефіцитного трипсину.

Як відомо [2, 15], сильний гідроліз колагену ферментами призводить до пошкодження лицьової поверхні шкіри, що є одним із потенційних ризиків м'якшення. Електронні мікрофотографії показують, що немає очевидної різниці у малюнку мережівки шкір, пром'якшених протеазою NGG при змінній температурі від 30 до 40 °С: на мікрофотографіях добре помітні візерунки поверхні та пори від волосся, і повнота виглядає схожою. А от мережівка шкіри після м'якшення трипсином TBE при 35 °С пошкоджена, і чітко видно, що її лицьова поверхня негладка. Таким чином, можна констатувати, що заміна трипсину TBE на протеазу NGG може допомогти захистити колагенові волокна від надмірного пошкодження, підвищити якість і сортність шкіри.

Лужні протеази зазвичай використовуються у шкіряному виробництві у процесах зневолошування та м᾽якшення для отримання шкіри гарної якості. У дослідженні [16] перевіряли ефективність **м᾽якшення** новою лужною протеазою NGG, отриманою з *Bacillus crolab MTCC,* порівнювали його вплив на пористість козячих шкур, підданих ферментативному і традиційному зневолошуванню. Оброблена ферментами шкура була вільна від бубняви та плям, з тонкою, чистою, білою, більш шовковистою лицьовою поверхнею та пластичністю. Розмір/розподіл пор та паропроникність у дослідній групі були кращими, ніж у разі застосування комерційного пом'якшувача трипсина TBE і традиційного зневолошування. Скануюча електронна мікроскопія та гістологічний аналіз шкіри, отриманої в результаті використання лужної протеази NGG, підтвердили повне видалення бубняви та краще розкриття колагенових волокон (рис. 2). При цьому колаген не був пошкоджений, що призвело до хорошої якості шкіри. Результати дослідження вказують на ефективність застосування бактеріальної лужної протеази для оброблення шкіри на стадії підготовчих процесів.

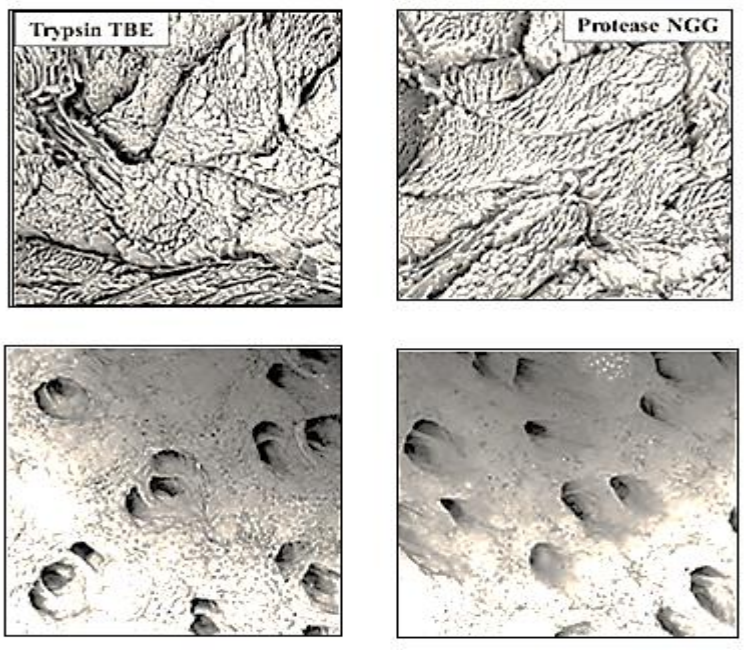


Рис. 2. СЕМ-зображення вертикального перерізу (×1000; 5кВ) та лицьової поверхні (×300; 5kV) шкіри Краст [16]

Звичайне **знежирювання** шкур та шкір потребує великої кількості органічних розчинників та миючих засобів, які викликають проблеми з навколишнім середовищем. У дослідженні туніських науковців [17] встановлено, що ліпаза LIP2 із дріжджів *Yarrowia lipolytica* (YLLIP2) ефективно знежирює овчини, тим самим зменшуючи кількість шкідливих хімічних речовин. Використовуючи 6 мг ліпази/кг

сирої шкури, успішне знежирення було досягнуто всього за 15 хвилин при pH 8 і 30 °C. Мас-спектри ToF-SIMS хімічно та ферментативно оброблених овчин узгоджуються з процесом селективного виключення для ферментативного оброблення. Порівняльна СЕМ-мікроскопія, ІЧ-спектроскопія та фізико-хімічний аналіз показали кращі властивості шкіри, обробленої ферментами, ніж після хімічного оброблення. Фізико-хімічні параметри стічних вод свідчать про те, що ферментативне оброблення є чистішим способом знежирювання. В цілому дана робота відкриває нові горизонти для використання ліпази YLLIP2 як більш ефективну альтернативу у шкіряній промисловості.

Останнім часом все більше уваги приділяється застосуванню ферментів у найрізноманітніших процесах виробництва шкіри. Литовські науковці визначали дію ферментативного **пікелювання** на колаген дерми та його вплив на наступні процеси, властивості хромового напівфабрикату та готової шкіри [18]. Застосування активних у кислому середовищі протеолітичних ферментів під час пікелювання призвело до додаткового впливу на структуру дерми: колаген був задіяний сильніше, зменшувалась пористість дерми, але шкіра ставала більш термостійкою. Ферментативно пікельований напівфабрикат зв'язував більше хромового дубителя і досягав вищої температури зварювання при дубленні; барвники проникали глибше при фарбуванні; більше речовин взаємодіяло з колагеном при жируванні. Проте, дія ферментів погіршувала фізико-механічні властивості шкіри, оскільки дослідна шкіра була слабшою за звичайну як в цілому, так і у відношенні лицьового шару, мала значно більше відносне подовження. Отже, у міру поліпшення одних властивостей та погіршення інших під час пікелювання застосування кожного ферменту має бути ретельно вивчене та оптимізоване для отримання шкіри із заданими властивостями.

Останнім часом завдяки удосконаленням біотехнології підвищена увага приділяється повторному м᾽якшенню у післядубильних процесах. Так, у своїй новій роботі [19] науковці з Литви дослідили можливість застосування ферментного препарату під час **додублювання**, його вплив на процес додублювання, шкіряний напівфабрикат і готовий продукт. Ферментативне оброблення Вет-блу призвело до підвищення температури зварювання (1-6 °C), поглинання парів води (0,3-5,5 %), покращення використання сполук хрому при додублюванні (4-21 %) та проникнення барвника в дерму при фарбуванні. Виявлено більший вплив концентрації ферментного препарату на процес додублювання порівняно з його тривалістю. Проте, ніякого впливу на фізико-механічні властивості шкіри та процес жирування не спостерігалось.

Дослідження [20] було спрямоване на розуміння впливу ферментів, застосованих на різних виробничих стадіях, на характеристики шкіри. Вплив на характеристики шкіри протеази, амілази та ліпази описаний у багатьох роботах. У цьому ж дослідженні показано вплив на шкіру таких нетрадиційних ферментів протеолітичної дії, як пепсин, трипсин і папаїн. Трипсин використали для оброблення знезоленої голини, пепсин – пікельованої голини, папаїн – напівфабрикату хромового дублення. Вибір ферментів для оброблення трьох різних матеріалів визначався природою та оптимальною активністю ферментів. Пепсин є аспарагіновою протеазою, тоді як трипсин є сериновою протеазою. Папаїн, який ще називають «рослинним пепсином», дуже активний у нейтральному діапазоні pH, тоді як пепсин і трипсин діють у кислотному та основному діапазонах pH відповідно. Характеристики шкіри Краст оцінювали за допомогою комбінації випробувань міцності на розтяг, вимірювання міцності лицьового шару та мікроскопічного аналізу. Результати показали відсутність значного впливу на функціональні᾽ властивості шкіри, у той час як мало місце деяке зниження міцності лицьового шару, що, можливо, пов᾽язано з ферментативним впливом на лицьову поверхню дослідних зразків, проте, за органолептичним оцінюванням їх лицьова поверхня була гладенькою і приємною на дотик.

3. Ферменти та промислові відходи

Шкіряна промисловість не лише задовольняє соціальні потреби, використовуючи побічні продукти м᾽ясної промисловості (велика та дрібна шкіряна сировина), але й робить значний внесок у глобальне економічне зростання за рахунок торгівлі та створення робочих місць. Водночас, в умовах глобалізації виробники шкіри стикаються з такими проблемами, як дотримання екологічних вимог та покращення утилізації **відходів, що утворюються при обробленні шкіри**. У роботі [21] описується вилучення волосу та жиру з міздрі, отриманої після ферментативного видалення вовни з козячих шкур за допомогою протеази з ізоляту штаму *Bacillus cereus 1-p*. Для обґрунтування рекомендацій промислового застосування утилізованого волосу та жиру вони були додатково охарактеризовані. На підставі візуального оцінювання волосу визначили його довжину, густоту, однорідність, міцність та загальний стан. Утилізоване волосся виявилося неушкодженим і його якість оцінювалася від середньої до доброї. Аналіз жиру полягав у визначенні складу жирних кислот за допомогою методу газової хроматографії – мас-спектрометрії. Було встановлено, що найбільш поширеною (вміст 31,65 %) жирною кислотою є метил-9Z-октадеценоат (9Z-гептадеценова кислота; олеїнова кислота). В результаті проведеного експерименту автори зробили висновок про те, що утилізація волосу та жиру при зневолошуванні козлини екстрактом ферменту зі штаму *Bacillus cereus 1-p* економічно та екологічно вигідніша у порівнянні з вилученням волосу та жиру з традиційних сульфідних систем зневолошування: продукти утилізації не містять сульфідів та домішок вапна, тому їх легше очищати і можна використати як вторинні матеріальні ресурси для виробництва кормів для птиці, органічних добрив, біодизелю та біопалива, жирувальних агентів, мила і косметики після додаткового очищення у разі необхідності.

Можливість утилізації та використання золених голинних обрізків у якості замінника дорогого продукту є вагомим аргументом на користь більш екологічного виробництва шкіри. Зазначені відходи

містять багато колагену і є цінною сировиною для одержання гідролізату, який потенційно може бути використаний для додублювання-наповнювання шкіри. У роботі [22] розглянуто характеристику та використання гідролізату колагену, одержаного шляхом ферментативного гідролізу таких відходів. Гідролізат готували з використанням трипсину. Зразки гідролізату були проаналізовані за допомогою методів швидкісної білкової рідинної хроматографії (FPLC) та лазерної десорбції з матрицею з іонізацією-часом прольоту (MALDI-TOF). При ферментативному гідролізі спостерігали близько шести переважних фракцій пептидів гідролізату колагену і встановили, що молекулярна маса гідролізатів знаходиться в діапазоні від 1750 до 5800 дальтон. Для додублювання-наповнювання використали гідролізати колагену, приготовані з використанням різних (0,8, 1,0 та 1,2 %) концентрацій трипсину. Краще поглинання барвника продемонстрував продукт, одержаний гідролізом в присутності 0,8 % трипсину протягом 3 годин. Крім того, оброблена таким гідролізатом шкіра мала значно кращі показники міцності порівняно зі шкірою, обробленою відомим білоквмісним наповнювачем.

Значна кількість відходів утворюється і в інших сферах промисловості. Так, при рибогосподарському перероблені викидається до 50 % сировини, що складається з луски, панцирів, каркасів, хребтів, нутрощів, голови, печінки, шкіри, черевних клаптів, темних м’язів тощо. До того ж, деякі види риби та молюсків призводять до вилову значної кількості прилову, який не становить комерційної цінності через низьку споживчу привабливість. Чутливість до швидкого гниття рибних відходів негативно впливає на навколишнє середовище, що вимагає вжиття серйозних заходів для виправлення цього становища. Вторинне перероблення відходів, крім усунення небезпеки навколишнього середовища, може призвести до утворення ряду цінних побічних продуктів, таких як білки, ферменти, каротиноїди, жири та мінерали [23].

Дослідження з одержання та застосування білкових речовин, і насамперед, колагену з рибних відходів знайшли відображення у низці робіт [24–28]. Наприклад, у [24] наведено результати дослідження з одержання колагенових гідролізатів з відходів скумбрії (*Scomber*) лужно-ферментативним методом окремо або у поєднанні з пероксидом водню при звичайній та підвищеній температурі. Ступінь гідролізу визначали за вмістом загального азоту у кінцевому продукті. На думку авторів, такі гідролізати можуть бути використані для виробництва органічних добрив та стимуляторів росту у тваринництві, а після подальших модифікацій – як компонент біополімерних матеріалів. Проте, публікацій з одержання ферментів з відходів морепродуктів дуже мало, до прикладу можна привести статтю V. Venugopal, науковця Bhabha Atomic Research Centre в Індії [23]. Автор зазначає, що відходи рибальства є хорошим джерелом протеази, ліпази, хітінази, лужної фосфатази, трансглютамінази, гіалуронідази, ацетилглюкозамінідази тощо. Ці ферменти можуть мати різне застосування у рибній промисловості, включаючи виділення та модифікацію білків та морських олій, у виробництві біоактивних пептидів, для прискорення традиційної ферментації, очищення та видалення молюсків, зняття луски з риби, видалення мембран з риб'ячої ікри, екстракції ароматизаторів, продовження терміну придатності, модифікації текстури, видалення неприємних запахів, а також контролю якості або безпосередньо, або у складі біосенсорів. Ферменти з риби та молюсків з холодних місць проживання особливо корисні, оскільки можуть функціонувати при нижчих температурах, тим самим заощаджуючи енергію та захищаючи харчові продукти.

З урахуванням викладеного, у авторів [29] виникла ідея використати компоненти рибних відходів для створенні нового матеріального ресурсу – ферментного препарату для оброблення шкіри. Після проведення низки операцій з рибними відходами отримали дослідний ферментовмісний зразок (препарат) у вигляді дрібно волокнистої субстанції коричневого кольору, добре розчинної у теплій воді. Експериментально встановили, що активність ферментного препарату по специфічному хромогенному субстрату становить 260 мкмоль pNa/хв·мг білка, вміст білка в 1 мг екстракту 0,41 мг. Висока активність досліджуваного об’єкта підтверджена також методом осадження (450 од/1 г препарату). За результатами ІЧ-спектроскопії виявили поліфункціональну природу ферментного препарату, наявність низки активних груп, які беруть участь в утворенні водневих зв’язків. Пошукові дослідження з використанням 0,20-0,65 % препарату при м’якшенні овчини виявили його сумісність з колагеном і показали цілком обнадійливі результати щодо доцільності подальших досліджень у цьому напряму.

Оскільки активність ферментів може змінюватися у часі, у новій серії експериментів дослідили активність нового препарату після зберігання у холодильній камері при температурі +7…+8 °С протягом трьох років [30]. Було виявлено, що він не втратив свого зовнішнього вигляду: не спостерігалось ані зміни консистенції та кольору, ані появи неприємного запаху. Значення pH 10 % розчину становило 4,6. При оцінюванні активності препарату методом осадження виявлено незначне зменшення показника щодо показника у вихідному стані (435 од/г проти 450 од/г). Це свідчить про певну стабільність структури та властивостей досліджуваного об’єкта. Вплив температури на активність препарату оцінювали в діапазоні 30-60 °С, цілком прийнятному для рідинних фізико-хімічних процесів шкіряного виробництва. Встановлено тенденцію підвищення активності препарату при зростанні температури від 30 до 40-50 °С та її зниження при подальшому підвищенні температури.

Висновки з даного дослідження

Використання чистіших технологій оброблення шкіри сьогодні викликає великий інтерес у зв'язку зі світовими тенденціями на користь екологічно чистого виробництва. Модернізація та впровадження таких технологій, як каталіз на основі ферментів замість звичайного неорганічного каталізу, можуть підвищити

якість та знизити вартість виробництва готової продукції, зробивши її більш екологічно стійкою.

В результаті аналізу сучасних досліджень в області ензимізації шкіряного виробництва виявлено інноваційні підходи до використання комерційно доступних і нових ферментних препаратів у технологічних процесах основного виробництва натуральної шкіри, первинного оброблення сировини, утилізації промислових відходів. Встановлено, що обґрунтоване використання ферментів на різних етапах технологічного циклу шкіряних матеріалів сприяє виготовленню конкурентоспроможної продукції при більш дбайливому відношенні до сировинно-матеріальних та енергетичних ресурсів, екологічного стану навколишнього середовища.

Перспективи подальших досліджень

Одержана інформація буде застосована у майбутніх наукових дослідженнях при розробленні та впроваженні ресурсоощадної екологічно орієнтованої технології виробництва шкіри з використанням сучасних ферментних препаратів.

Література

1. Копитіна І., Андреєва О., Мокроусова О., Охмат О. Ферменти та підходи до їх використання у виробництві натуральної шкіри. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2022. № 5 (313). С. 227–232.

2. Гаркавенко С. С., Стаценко Д. В., Злотенко Б. М. Використання ензимів у шкіряно-взуттєвому виробництві : монографія. К. : КНУТД, 2016. 188 с.

3. Choundhary R. B., Jana A. K., Jha M. K. Enzyme technology applications in leather processing. Indian Journal of Chemical Technology. 2004. Vol. 11. P. 659–671.

4. Dettmer A., Schacker Dos Anjos P., Gutterres M. Special Review Paper: Enzymes in the Leather Industry. The Journal of the American Leather Chemists Association. 2013. Vol. 108 (4). P. 146–158.

5. Колесник Т. О., Андреєва О. А. Вдосконалення технології виробництва пергаменту. Інноватика в освіті, науці та бізнесі: виклики та можливості : матеріали II Всеукраїнської конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених (18 листопада 2021 р., м. Київ). К. : КНУТД, 2021. Т. 1. С. 277-281.

6. Aldema Ramos M., Muir Z., Ashby R. and Liu C-K. Soaking Formulations that can Soften Hardened Bovine Manure. The Journal of the American Leather Chemists Association. 2011. Vol. 106 (7). P. 212–218.

7. Aldema Ramos M., Muir Z. and Ashby R. Soaking Formulations that can Soften and Remove Hardened Bovine Manure: Part II, Effects on Quality of Leather. The Journal of the American Leather Chemists Association. 2012. Vol. 107 (5). P. 167–174.

8. Aldema-Ramos M., Muir Z., Wheeler T. Pathogenic Bacteria Inhibition of Bovine Hide Presoaking Solutions Formulated with Enzymes that can Remove Adobe-type Manure. The Journal of the American Leather Chemists Association. 2013. Vol. 108 (9). P. 355–362.

9. Данилкович А. Г., Ліщук В. І., Охмат О. А. Біотехнологічні процеси формування шкіряних матеріалів. Наукові праці НУХТ. 2018. Том 24. № 5. С. 14–24.

10. Mei Chen, Mingfang Jiang, Min Chen and Haiming Cheng. Approach Towards Safe and Efficient Enzymatic Unhairing of Bovine Hides. The Journal of the American Leather Chemists Association. 2018. Vol. 113 (2). P. 59–64.

11. Yunhang Zeng, Qian Yang, Ya-nan Wang et al. Neutral Protease Assisted Low-sulfide Hair-save Unhairing Based on pH-sensitivity of Enzyme. The Journal of the American Leather Chemists Association. 2016. Vol. 111 (9). P. 345–353.

12. Andrioli E. and Gutterres M. Associated Use of Enzymes and Hydrogen Peroxide for Cowhide Hair Removal. The Journal of the American Leather Chemists Association. 2014. Vol. 109 (2). P. 41–48.

13. Shihao Zhang, Ruoshi Zhang, Xiaoguang Li et al. Heterologous Expression of Alkaline Metalloproteinases in Bacillus Subtilis SCK6 for Eco-Friendly Enzymatic Unhairing of Goatskins. The Journal of American Leather Chemists Association. 2022. Vol. 117 (3). P. 113–126.

14. Li Fuyi, Shi Liwen, Tao Huadong et al. Reducing the Risk of Grain Damage during Bating of Leather Manufacturing: An Alternative to Pancreatic Enzymes with Alkaline Protease from Novel Bacillus Subtilis SCK6. The Journal of the American Leather Chemists Association. 2020. Vol. 115 (9). P. 315–323.

15. Андреєва О. А. Фізика та хімія протеїнів : підручник. К. : КНУТД, 2003. 223 с.

16. Ranjithkumar A., Durga J., Ramesh R. Studies on Alkaline Protease from Bacillus crolab MTCC 5468 for Applications in Leather Making. The Journal of the American Leather Chemists Association. 2017. Vol. 112 (7). P. 232–239.

17. Emna Moujehed, Zied Zarai, Haifa Khemir et al. Cleaner degreasing of sheepskins by the Yarrowia lipolytica LIP2 lipase as a chemical-free alternative in the leather industry. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2022. Vol. 211. P. 112292.

18. Renata Biškauskaitė, Violeta Valeikienė, and Virgilijus Valeika. Enzymes for Leather Processing: Effect on Pickling and Chroming. Materials (Basel). 2021 Mar. Vol. 14 (6). P. 1480.

19. Biškauskaite R., ValeikaV. Wet Blue Enzymatic Treatment and Its Effect on Leather Properties and Post-Tanning Processes. Materials. 2023. Vol. 16. P. 2301.

20. Jayakumar G. C., Karthik V., Jeyas Kandhan S., Kanagaraj J. Effect of Enzymatic Treatment in Leather Manufacture at Different Processing Stage. The Journal of American Leather Chemists Association. 2022. Vol. 117 (12). P. 534–541.

21. Joseph Ondari Nyakundi, Jackson Nyarongi Ombui, Wycliffe Chisutia Wanyonyi and Francis Jakim Mula. Recovery of industrially useful hair and fat from enzymatic unhairing of goatskins during leather processing. The Journal of American Leather Chemists Association. 2022. Vol. 117 (6). P. 243–250.

22. Hussien M., Kumar Ramadass S., Madhan B. and Raghava Rao J. Enzymatic Hydrolysis of Limed Trimmings: Preparation, Characterization and Application of Collagen Hydrolysate. The Journal of the American Leather Chemists Association. 2017. Vol. 112 (2). P. 44.

23. Venugopal V. Enzymes from seafood processing waste and their applications in seafood processing. Advances in Food and Nutrition Research. 2016. Vol. 78. P. 47–69.

24. Коляда М. К., Плаван В. П., Сафранов Т. А., Мельник К. С. Розробка методу утилізації колагенвмісних відходів рибопереробної промисловості. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Технічні науки. 2016. № 2. С. 177–182.

25. Chalamaiah M., Dinesh Kumar B., Hemalatha R., Jyothirmayi T. Fishprotein hydrolysates: proximate composition, aminoacid composition, antioxidant activities and applications: a review. Food Chem. 2012. Vol.135 (4). P. 3020–3038.

26. Vázquez J. A. Production, Characterization, and Bioactivity of Fish Protein Hydrolysates from Aquaculture Turbot (Scophthalmus maximus). Wastes. Biomolecules. 2020. Vol.10 (2). P. 310–323.

27. Villamil O., Váquiro H., Solanilla J. F. Fishviscera protein hydrolysates: Production, potential applications and functional and bioactive properties. Food Chem. 2017. 224. P. 160–171.

28. Zamora-Sillero J., Gharsallaoui A., Prentice C. Peptides from Fish By-product Protein Hydrolysates and Its Functional Properties: an Overview. Mar Biotechnol (NY). 2018. 20 (2). P. 118–130.

29. Атаманова А. А., Андреєва О. А., Савчук О. М. Дослідження властивостей ферментів, одержаних з відходів промисловості. Achievements and prospects of modern scientific research. Abstracts of the 1st International scientific and practical conference. Editorial EDULCP. Buenos Aires, Argentina. 2020. P. 144–149.

30. Давидюк Д., Копитіна І., Андреєва О. Дослідження ферментного препарата, одержаного з рибних відходів : Innovative Approaches To Solving Scientific Problems. Proceedings of the XIX International Scientific and Practical Conference. Tokyo, Japan (May 16-19, 2023). С. 426–428.

References

1. Kopytina I., Andreieva O., Mokrousova O., Okhmat O. Fermenty ta pidkhody do yikh vykorystannia u vyrobnytstvi naturalnoi shkiry. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. 2022. № 5 (313). S. 227–232.

2. Harkavenko S. S., Statsenko D. V., Zlotenko B. M. Vykorystannia enzymiv u shkiriano-vzuttievomu vyrobnytstvi : monohrafiia. K. : KNUTD, 2016. 188 s.

3. Choundhary R. B., Jana A. K., Jha M. K. Enzyme technology applications in leather processing. Indian Journal of Chemical Technology. 2004. Vol. 11. P. 659–671.

4. Dettmer A., Schacker Dos Anjos P., Gutterres M. Special Review Paper: Enzymes in the Leather Industry. The Journal of the American Leather Chemists Association. 2013. Vol. 108 (4). R. 146–158.

5. Kolesnyk T. O., Andreieva O. A. Vdoskonalennia tekhnolohii vyrobnytstva perhamentu. Innovatyka v osviti, nautsi ta biznesi: vyklyky ta mozhlyvosti : materialy II Vseukrainskoi konferentsii zdobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh uchenykh (18 lystopada 2021 r., m. Kyiv). K. : KNUTD, 2021. T. 1. S. 277-281.

6. Aldema Ramos M., Muir Z., Ashby R. and Liu C-K. Soaking Formulations that can Soften Hardened Bovine Manure. The Journal of the American Leather Chemists Association. 2011. Vol. 106 (7). R. 212–218.

7. Aldema Ramos M., Muir Z. and Ashby R. Soaking Formulations that can Soften and Remove Hardened Bovine Manure: Part II, Effects on Quality of Leather. The Journal of the American Leather Chemists Association. 2012. Vol. 107 (5). R. 167–174.

8. Aldema-Ramos M., Muir Z., Wheeler T. Pathogenic Bacteria Inhibition of Bovine Hide Presoaking Solutions Formulated with Enzymes that can Remove Adobe-type Manure. The Journal of the American Leather Chemists Association. 2013. Vol. 108 (9). R. 355–362.

9. Danylkovych A. H., Lishchuk V. I., Okhmat O. A. Biotekhnolohichni protsesy formuvannia shkirianykh materialiv. Naukovi pratsi NUKhT. 2018. Tom 24. № 5. S. 14–24.

10. Mei Chen, Mingfang Jiang, Min Chen and Haiming Cheng. Approach Towards Safe and Efficient Enzymatic Unhairing of Bovine Hides. The Journal of the American Leather Chemists Association. 2018. Vol. 113 (2). R. 59–64.

11. Yunhang Zeng, Qian Yang, Ya-nan Wang et al. Neutral Protease Assisted Low-sulfide Hair-save Unhairing Based on pH-sensitivity of Enzyme. The Journal of the American Leather Chemists Association. 2016. Vol. 111 (9). R. 345–353.

12. Andrioli E. and Gutterres M. Associated Use of Enzymes and Hydrogen Peroxide for Cowhide Hair Removal. The Journal of the American Leather Chemists Association. 2014. Vol. 109 (2). R. 41–48.

13. Shihao Zhang, Ruoshi Zhang, Xiaoguang Li et al. Heterologous Expression of Alkaline Metalloproteinases in Bacillus Subtilis SCK6 for Eco-Friendly Enzymatic Unhairing of Goatskins. The Journal of American Leather Chemists Association. 2022. Vol. 117 (3). R. 113–126.

14. Li Fuyi, Shi Liwen, Tao Huadong et al. Reducing the Risk of Grain Damage during Bating of Leather Manufacturing: An Alternative to Pancreatic Enzymes with Alkaline Protease from Novel Bacillus Subtilis SCK6. The Journal of the American Leather Chemists Association. 2020. Vol. 115 (9). R. 315–323.

15. Andreieva O. A. Fizyka ta khimiia proteiniv : pidruchnyk. K. : KNUTD, 2003. 223 s.

16. Ranjithkumar A., Durga J., Ramesh R. Studies on Alkaline Protease from Bacillus crolab MTCC 5468 for Applications in Leather Making. The Journal of the American Leather Chemists Association. 2017. Vol. 112 (7). R. 232–239.

17. Emna Moujehed, Zied Zarai, Haifa Khemir et al. Cleaner degreasing of sheepskins by the Yarrowia lipolytica LIP2 lipase as a chemical-free alternative in the leather industry. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2022. Vol. 211. R. 112292.

18. Renata Biškauskaitė, Violeta Valeikienė, and Virgilijus Valeika. Enzymes for Leather Processing: Effect on Pickling and Chroming. Materials (Basel). 2021 Mar. Vol. 14 (6). R. 1480.

19. Biškauskaite R., ValeikaV. Wet Blue Enzymatic Treatment and Its Effect on Leather Properties and Post-Tanning Processes. Materials. 2023. Vol. 16. R. 2301.

20. Jayakumar G. C., Karthik V., Jeyas Kandhan S., Kanagaraj J. Effect of Enzymatic Treatment in Leather Manufacture at Different Processing Stage. The Journal of American Leather Chemists Association. 2022. Vol. 117 (12). R. 534–541.

21. Joseph Ondari Nyakundi, Jackson Nyarongi Ombui, Wycliffe Chisutia Wanyonyi and Francis Jakim Mula. Recovery of industrially useful hair and fat from enzymatic unhairing of goatskins during leather processing. The Journal of American Leather Chemists Association. 2022. Vol. 117 (6). R. 243–250.

22. Hussien M., Kumar Ramadass S., Madhan B. and Raghava Rao J. Enzymatic Hydrolysis of Limed Trimmings: Preparation, Characterization and Application of Collagen Hydrolysate. The Journal of the American Leather Chemists Association. 2017. Vol. 112 (2). R. 44.

23. Venugopal V. Enzymes from seafood processing waste and their applications in seafood processing. Advances in Food and Nutrition Research. 2016. Vol. 78. P. 47–69.

24. Koliada M. K., Plavan V. P., Safranov T. A., Melnyk K. S. Rozrobka metodu utylizatsii kolahenvmisnykh vidkhodiv rybopererobnoi promyslovosti. Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Tekhnichni nauky. 2016. № 2. S. 177–182.

25. Chalamaiah M., Dinesh Kumar B., Hemalatha R., Jyothirmayi T. Fishprotein hydrolysates: proximate composition, aminoacid composition, antioxidant activities and applications: a review. Food Chem. 2012. Vol.135 (4). P. 3020–3038.

26. Vázquez J. A. Production, Characterization, and Bioactivity of Fish Protein Hydrolysates from Aquaculture Turbot (Scophthalmus maximus). Wastes. Biomolecules. 2020. Vol.10 (2). P. 310–323.

27. Villamil O., Váquiro H., Solanilla J. F. Fishviscera protein hydrolysates: Production, potential applications and functional and bioactive properties. Food Chem. 2017. 224. P. 160–171.

28. Zamora-Sillero J., Gharsallaoui A., Prentice C. Peptides from Fish By-product Protein Hydrolysates and Its Functional Properties: an Overview. Mar Biotechnol (NY). 2018. 20 (2). P. 118–130.

29. Atamanova A. A., Andreieva O. A., Savchuk O. M. Doslidzhennia vlastyvostei fermentiv, oderzhanykh z vidkhodiv promyslovosti. Achievements and prospects of modern scientific research. Abstracts of the 1st International scientific and practical conference. Editorial EDULCP. Buenos Aires, Argentina. 2020. R. 144–149.

30. Davydiuk D., Kopytina I., Andreieva O. Doslidzhennia fermentnoho preparata, oderzhanoho z rybnykh vidkhodiv : Innovative Approaches To Solving Scientific Problems. Proceedings of the XIX International Scientific and Practical Conference. Tokyo, Japan (May 16-19, 2023). S. 426–428.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-150-153
УДК 637.5.02

КОШЛАНЬ МИКОЛА
Національний університет «Львівська політехніка»
https://orcid.org/0000-0002-1477-124x
ШАХОВСЬКА НАТАЛІЯ
Національний університет «Львівська політехніка»
https://orcid.org/0000-0002-6875-8534
Nataliya.b.shakhovska@lpnu.ua
МЕЛЬНИКОВА НАТАЛІЯ
Національний університет «Львівська політехніка»
https://orcid.org/0000-0002-2114-3436

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ РОЗПІЗНАВАННЯ ЛІТАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ

Проведено аналіз результатів застосування нового алгоритму класифікації зображень, який був випробуваний на датасеті, що включає зображення об'єктів у небі. Отримані результати свідчать про високу точність цього алгоритму у класифікації зображень, і він ефективно працює у паралельному режимі. Для оцінки ефективності запропонованого алгоритму було проведено порівняльний аналіз швидкості обчислень при різних кількостях потоків. Один із можливих напрямків для майбутніх досліджень може включати розширення обсягу дослідження на інші типи зображень і використання більш складних архітектур нейронних мереж для покращення результатів. Отримані результати можуть бути застосовані у розробці систем автоматичної класифікації зображень в різних галузях, таких як медицина, безпека, маркетинг та інші.

Ключові слова: нейронні мережі, CNN, точність, розпаралелення.

KOSHLAN N., SHAKHOVSKA N., MEKNYKOVA N.
Lviv Polytechnic National University

METHODS AND MEANS OF RECOGNITION OF FLYING OBJECTS

This research project revolves around the development of a sophisticated system dedicated to the recognition of objects in the sky. The analysis of the results of the application of a new image classification algorithm was carried out, which was tested on a dataset that includes images of objects in the sky. The obtained results demonstrate the high accuracy of this algorithm in image classification, and it works effectively in parallel mode. To evaluate the efficiency of the proposed algorithm, a comparative analysis of the speed of calculations with different amounts of flows was carried out. It was found that parallel computations significantly reduce the execution time of the algorithm compared to the sequential approach. One possible direction for future research could include extending the scope of the study to other types of images and using more complex neural network architectures to improve the results. The obtained results can be applied in the development of automatic image classification systems in various fields, such as medicine, security, marketing, and others. Leveraging cutting-edge neural networks, state-of-the-art machine learning techniques, and advanced image processing technologies, this system exhibits the remarkable capability to autonomously detect and categorize a diverse array of objects within Earth's atmosphere. The dataset comprises photos of airplanes, helicopters, missiles, fighter jets, drones. One of the pivotal objectives of this endeavor is to ensure not only the efficiency but also the user-friendliness of the system. This dual focus is aimed at facilitating a seamless integration of this technology into a plethora of domains, including meteorology for more accurate weather forecasting, security for enhanced surveillance and monitoring capabilities, and scientific research within the realms of astronomy and aerospace technology, enabling groundbreaking discoveries and innovations. In conclusion, this research represents a significant leap forward in our quest to gain a deeper understanding of our ever-evolving skies and harness this knowledge for various practical applications. It underscores the transformative potential of modern technology in addressing multifaceted challenges and expanding the horizons of human knowledge.

Keywords: neural networks, CNN, accuracy, concurency

Вступ

Процес виявлення повітряних цілей може здатися простим через несумісність літальних апаратів, вертольотів, БПЛА та дронів щодо фону ясного неба. Коли враховуються зміни фону, зміна яскравості неба ускладнює процес. Зміни у формах і типах хмар додають цьому процесу ще одну складність. Процес відстеження безпосередньо залежить від процесу виявлення та типу потоку даних. Практичні системи, що використовуються для відео виявлення та супроводу повітряних цілей, є ручними, а ручні конструкції мають деякі недоліки порівняно з автоматичними. Для програм відеоспостереження, інструкцій, регіональної безпеки та оборони в щільному середовищі процес автоматичного виявлення та відстеження може бути радше обов'язковим, ніж перевагою.

Задачею роботи є дослідження проблеми розпізнавання та відстеження об'єктів на відео неба, а також створення базової моделі для розв'язання даної задачі. Результатом виявлення об'єктів на дорозі вважається:

- Розпізнавання типу об'єкту
- Робота моделі з використанням переданого відео.

Аналіз літературних джерел

У дослідженні [1] запропоновано алгоритм автоматичного виявлення та супроводу відео потоків повітряних цілей. Наземна рухома камера знімає відеодані, і в русі перебувають не тільки літаючі об'єкти, але, ймовірно, і камера. Хоча виявлення та відстеження рухомих об'єктів за допомогою рухомих датчиків є відносно важким завданням, це поширений випадок у сценаріях реального життя. Системи відео детектування та стеження мають один або кілька рухомих відео датчиків, коли один або кілька літаючих

апаратів знаходяться в зоні дії. Запропонований алгоритм включає етап обробки зображення для виявлення та етап відстеження для ініціації та продовження. Було проведено оціночне дослідження фактичних відеоданих і встановлено, що запропонований метод дає успішні результати для процесів виявлення, формування доріжок і продовження.

Дослідження [2] присвячено зображенням з туманною сценою які страждають від низької контрастності, що знижує видиму якість сцени, що робить виявлення об’єктів більш складним завданням. Низька контрастність може бути результатом туманної погоди під час отримання зображення. Усунення затемнення — це процес видалення туману з фотографії туманної сцени. Добре відомими методами в цій галузі є Single-image dehazing на основі попереднього темного каналу. Стаття [3] має на меті систематичний огляд методів відстеження та виявлення об’єктів у разі загроз для додатків на основі GANN. Вибрані дослідження базувалися на різних факторах, таких як рік публікації, метод, реалізований у статті, надійність вибраних алгоритмів і розмір набору даних. Кожне дослідження підсумовується, призначаючи його для одного з двох попередньо визначених завдань: застосування GANN або використання традиційних методів машинного навчання (ML).

У статті [4] автори пропонують новий метод виявлення відео об’єктів, який використовує як контекст руху об’єкта, так і просторово-часові агреговані характеристики для підвищення ефективності виявлення відео об’єктів. По-перше, контекст руху об’єкта витягується за допомогою оператора кореляції між картами ознак двох сусідніх кадрів. На додаток до створення контексту руху, карти просторових функцій для N суміжних кадрів агрегуються, щоб підвищити якість карти функцій із закритою мережею уваги. У дослідженні [5] розповідається, що виявлення відео об'єктів є важливим напрямком досліджень комп'ютерного зору. Завдання виявлення відео об’єктів полягає у виявленні та класифікації рухомих об’єктів у послідовності зображень. На основі детектора об’єктів статичного зображення більшість існуючих методів виявлення об’єктів відео використовують унікальну часову кореляцію відео для вирішення проблеми пропущеного виявлення та помилкового виявлення, спричиненого оклюзією та розмиттям рухомого об’єкта. Широко використовується інша модель виявлення відео об'єктів, керована мережею оптичного потоку. Агрегація ознак суміжних кадрів виконується шляхом оцінки поля оптичного потоку. У [6] пропонується метод виявлення відео об’єктів, який поєднує функції руху та YOLO. У цьому методі використовується метод фільтрації відеокадрів без ознак руху та сегментації відеокадрів із ознаками руху, щоб зменшити тиск міркувань моделі алгоритму YOLO. У цьому процесі відеокадри, що містять рухомі об’єкти, спочатку отримуються модулем виявлення рухомих об’єктів. По-друге, рухома ціль буде розпізнана модулем розпізнавання цікавого об’єкта. Нарешті, модуль фонового прийняття рішень записує та аналізує результати виявлення, щоб отримати оновлення фонової моделі або результат.

Методи та моделі

Щоб навчити систему було використано датасет з фотографій об'єктів в небі. Датасет складався з об'єктів п’яти типів: airplane (1 425 фото), helicopter (1 388 фото), missile (1 335 фото), fighter_jet (1 868 фото), drone (1333 фото). Було використано фото двох типів PNG та JPEG. Після обробки, система формує вихідні дані у вигляді відео, у підписі якого є додана інформація з такими даним: Object recognition – назва виявленого об'єкта, FPS – кількість кадрів в секунду. Аугментація даних відіграє важливу роль у підвищенні стійкості моделей у різних умовах та середовищах, а також у запобіганні перенавчанню, коли модель стає надто адаптованою до конкретного набору даних. Вона допомагає зробити моделі більш універсальними та ефективними в реальних сценаріях використання.

Для оптимізації розпізнавання зображень з відеоряду у статті запропоновано розпаралелення обробки кадрів. Підхід полягає у розділенні обробки відео на паралельні задачі, де кожен кадр відеоряду обробляється окремо. Це дозволяє ефективно використовувати ресурси обчислювального обладнання та забезпечує швидку обробку кадрів. Застосовуючи розпаралелення обробки кадрів, можливо досягти високої продуктивності та точності розпізнавання зображень у відеоряді. Було проведено аналіз різних підходів для оптимізації та встановлено, що більшість підходів базуються на глибоких нейронних мережах, які забезпечують високу точність розпізнавання [7], але при цьому потребують значних обчислювальних ресурсів. Однак, на сьогодні, відсутній універсальний метод для цієї задачі, що би забезпечував високу точність при низьких витратах на обчислювальні ресурси. Для реалізації згорткової нейронної мережі було покращено модель шляхом комбінування кількох шарів згортки, ректифікації, пулінгу та дропауту. Також важливим кроком є правильний підбір функцій активації, що потенційно покращують точність класифікації. Пошарова будова мережі:

1. Conv2D: шар згортки з 32, 64, 96 та 128 фільтрами відповідно.
2. Activation: шар активації за допомогою функції ReLU, яка розгладжує нелінійність ознак.
3. BatchNormalization: шар нормалізації пакету даних для зменшення внутрішньокласової дисперсії.
4. MaxPooling2D: шар зменшення розміру зображення, застосовується після кожного блоку Conv2D.
5. Dropout: рандомно відкидає частину нейронів, що допомагає уникнути перенавчання моделі.
6. Flatten: шар розгортання, що перетворює матричний вихід із шарів згортки в вектор.
7. Dense: пов'язаний шар, що з'єднує всі вхідні вузли з усіма вихідними вузлами.
8. Activation: шар активації за допомогою функції ReLU.
9. BatchNormalization: шар нормалізації пакету даних.
10. Dropout: рандомно відкидає частину нейронів.

11. Dense: пов'язаний шар, що з'єднує всі вхідні вузли з усіма вихідними вузлами.

Нарешті, модель компілюється з використанням оптимізатора Adam та втрати "binary_crossentropy". Модель тренується з використанням методу fit_generator. Основні параметри навчання включають кількість епох, розмір пакету та кількість кроків на епоху. Після навчання графік відображається для відслідковування втрат та точності навчання та валідації.

Для розпаралелення використовується модуль multiprocessing, а саме його функція Pool. Після того, як програма завантажила модель, створюється об'єкт пулу процесів: pool = Pool(). Наступним кроком програма читає кадри з веб-камери в циклі за допомогою webcam.read(), і передає кожен з них у функцію process_frame() для обробки. Замість того, щоб обробляти кадри послідовно, вони оброблюються паралельно на різних процесах. Для цього функція map() викликає функцію process_frame() для кожного кадру. Результатом роботи функції map() є список оброблених кадрів, які далі відображаються відразу на екрані з використанням cv2.imshow().

Результати експерименту

Для тренування моделі та визначення об'єкта у небі було обрано датасет, що називається "Flying planes" [8]. Цей набір даних складається з близько 6500 фотографій різних об'єктів у небі, і використовується для навчання та тестування алгоритмів комп'ютерного зору та машинного навчання.

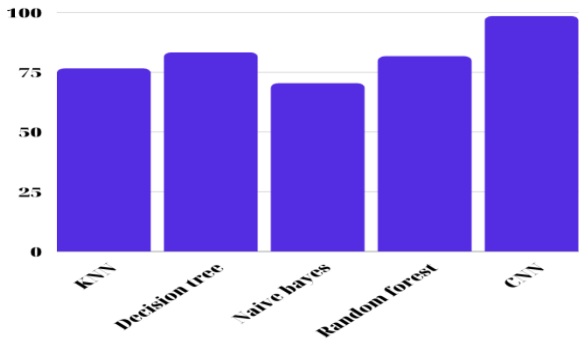


Рис. 1. Результати точності для різних моделей

Було навчено 5 різних типів моделей. Як результат було отримано різні показники точності (accuracy) рис. 1. Отже, модель CNN показала найвищу точність серед усіх досліджених моделей, досягнувши 95.15%. Це свідчить про те, що CNN є дуже потужною та ефективною моделлю для завдань класифікації об'єктів на зображеннях, особливо коли дані мають великий обсяг та складну структуру. Під час крос-валідації нашої моделі було використано серію метрик для оцінки її ефективності під час кожного із збірних тестувань. Зазвичай ці метрики обчислюються окремо для кожного фолду (частини даних у крос-валідації) та подальше об'єднуються для отримання загального результату.

Нижче наведено результати крос-валідації:

Таблиця 1

Результати крос-валідації

Фолд	***Accuracy***	***Precision***	***Recall***	***Specificity***	***F1-score***
1	*0.9112*	*0.9106*	*0.9482*	*0.9462*	*0.9467*
2	*0.922*	*0.9235*	*0.9391*	*0.9473*	*0.9322*
3	*0.9354*	*0.9223*	*0.9374*	*0.9724*	*0.9362*
4	*0.9572*	*0.9248*	*0.9531*	*0.9346*	*0.9546*
5	*0.9515*	*0.9369*	*0.9668*	*0.9582*	*0.9618*
Середнє	*0.93566*	*0.9236*	*0.9489*	*0.95174*	*0.9463*

Виведемо графік відношення метрик до кількості епох для більшої наглядності процесу навчання моделі (рис. 2. та рис. 3).

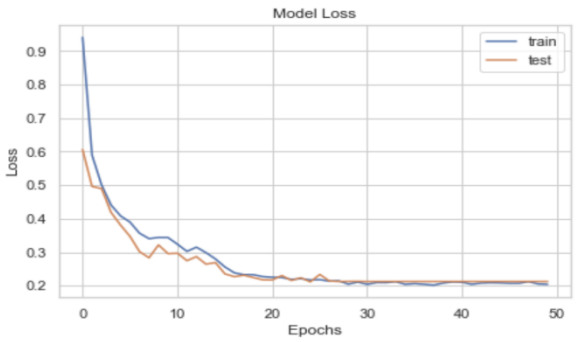


Рис. 2. Відношення метрики Loss до кількості епох

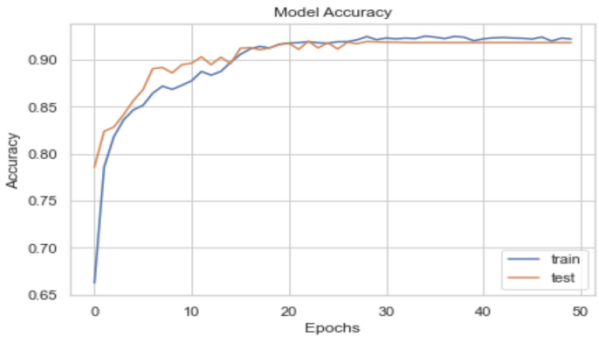


Рис. 3. Відношення метрики Accuracy до кількості епох

Наступним кроком є використання навченої моделі для розпізнавання об'єктів на тестовому відео. Для цього, перш за все, потрібно визначити оптимальну кількість потоків при розпаралелюванні обробки кадрів. Були проведені експерименти з використанням одного, двох, чотирьох та восьми потоків. В результаті експериментів було отримані результати, які показують значне покращення у швидкості в наслідок використання паралельної обробки кадрів (таблиця 2).

Таблиця 2

Показники ефективності на різній кількості потоків

К-сть потоків	1	2	4	8
Час обробки 1 кадру	~329 мсек	~238 мсек	~163 мсек	~90 мсек
Кількість оброблених кадрів за 30 секунд	91	126	183	331

Висновок

Порівняно з результатами досліджень [4, 5], наша модель показала вищу точність класифікації. Однак вона демонструє меншу точність, ніж модель з дослідження [6]. Треба відзначити, що наша модель забезпечує більшу швидкість обробки кадрів на секунду, оскільки ми вдосконалили процес обробки кадрів в режимі онлайн відео шляхом використання розпаралелення, що дозволило нам значно підвищити темп обробки кадрів на секунду. Порівнюючи результати, виявилося, що при використанні однопотокового підходу програма обробляла всього близько 90 кадрів за 30 секунд, у той час як використання восьми потоків істотно покращило продуктивність – досягнуто близько 331 кадрів за 30 секунд, що еквівалентно 11 кадрам на секунду. Один із можливих напрямків для майбутніх досліджень може включати розширення обсягу дослідження на інші типи зображень і використання більш складних архітектур нейронних мереж для покращення результатів.

References

1. Pakfiliz G. A New Method for Surface-to-Air Video Detection and Tracking of Airborne Vehicles. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 56, no. 5, pp. 3908-3922, Oct. 2020.

2. Sahu G., Seal A., Krejcar O., and Yazidi A. Single image dehazing using a new color channel. IEEE Access, vol. 8, pp. 82613-82622, 2020.

3. Al Jaberi S. M., Patel A., and AL-Masri A. N. Object tracking and detection techniques under GANN threats: A systemic review. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, vol. 12, no. 3, pp. 2857-2872, Mar. 2021

4. Kim J., Koh J., and Choi J. W. Video Object Detection Using Motion Context and Feature Aggregation. Journal of Image Processing and Information Sciences, vol. 10, no. 2, pp. 369-379, Apr. 2020.

5. You H., Lu Y., and Tang H. Improved Feature Extraction and Similarity Algorithm for Video Object Detection. Journal of Electronic Imaging, vol. 30, no. 6, pp. 063020, Nov. 2021.

6. Xiao C., Liu P., Zhou Y. Research on Video Object Detection Methods Based on YOLO with Motion Features. Journal of Computer Science and Information Security, v.18, no. 3, pp. 69-76, Mar. 2020.

7. Ma X., Liu W. (2018). Remote sensing image classification using adaptive sparse representation and stacked denoising autoencoder. Remote Sensing, 10(4), 538. doi: 10.3390/rs10040538

8. Kaggle. Flying Vehicles Dataset. URL: https://www.kaggle.com/datasets/eabdul/flying-vehicles

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-154-159
УДК 620.113.4

КУТІНА МАРИНА
Вінницький національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0001-7185-6795
e-mail: kytinamv@gmail.com
КОВАЛЬОВ АРТЕМ
Вінницький національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0002-2212-7577
e-mail: kovallowartem@gmail.com

ДІАГНОСТИЧНІ ПАРАМЕТРИ ОБ'ЄКТА МОДЕЛІ

Запропоновано метод аналізу моделі діагностики для визначення параметрів, які використовуються для властивостей моделі і оцінки її елементів, а саме визначення області впливу параметрів графа, розділу моделі незалежної частини укладання вершини графа. Вершини моделі графа за допомогою інтегрального показника, а ребра графа оцінюються за кількістю інформації, яку вони передають. На сьогоднішній день залишаються актуальними вимоги щодо ефективного функціонування та розвитку електричних мереж. При значній розвиненості мереж спостерігається істотний дисбаланс навантаження в окремих його елементах. За останні роки значно зросло навантаження на розподільні мережі, що живлять переважно побутових споживачів та суттєво знизилось споживання електричної енергії промисловим сектором.

Ключові слова: *діагностичні параметри, моделі, електрообладнання.*

KUTINA MARYNA, KOVALOV ARTEM
Vinnytsia National Technical University

DIAGNOSTIC PARAMETERS OF THE MODEL OBJECT

A method of analysis of the diagnostic model is proposed to determine the parameters used for the properties of the model and to evaluate its elements, namely, the determination of the area of influence of the parameters of the graph, the section of the model of the independent part of the stacking of the top of the graph. The vertices of the graph model are evaluated using an integral indicator, and the edges of the graph are evaluated by the amount of information they convey. In recent years, the load on distribution networks, which supply mainly domestic consumers, has increased significantly, and the consumption of electrical energy by the industrial sector has significantly decreased.

Keywords: diagnostic parameters, models, electrical equipment.

Вступ

Для створення обладнання всі з параметрів мають свою певну функцію і по своєму важливі на етапі створення електрообладнання. Але якщо розглядати електрообладнання з позиції його технічного обслуговування і ремонту, то підхід до значення параметрів інший. Так, є така група параметрів, яка хоч і змінюється в процесі експлуатації, однак практично не впливає на якість електрообладнання до його утилізації. В той час коли можна виділити таку групу параметрів, які змінюються в процесі експлуатації і впливають на властивості електрообладнання безпосередньо, або через інші елементи до такої міри, що приходиться приймати міри з їх відновлення декілька разів до повного морального або фізичного зносу електрообладнання. Це по суті справи, деградуючі параметри конструктивних і не конструктивних елементів – їх називають діагностичними параметрами, так як вони змінюються в процесі експлуатації і впливають на властивості електрообладнання.

Розробка принципів і методів визначення діагностичних параметрів – одна із найбільш важливих і складних задач створення діагностичного забезпечення на всіх етапах життєвого циклу електрообладнання.

Результати досліджень

При оцінці роботоздатності об'єкта за його характеристиками або параметрами для вибору сукупності контрольованих показників використовують значення їх чутливостей до змін, які відбуваються в стані об'єкта [1].

Чутливість показників можна отримати в формі частинних похідних

$$S_{b_j}^{a_i} = \frac{\partial a_i}{\partial b_j}$$

де a_i – показники, b_j – величини, які характеризують стан об'єкта.

В разі оцінки роботоздатності об'єкта за його часовими характеристиками в якості показників використовують час перехідного процесу, величину перегулювання, час першого максимуму, або його величину, крутизну характеристик, частоту коливань, період коливань, і таке інше. В існуючих методах вибору сукупності контрольованихдіагностичних показників [2–5] враховують два аспекти:

1) вагу кожного показника в оцінці технічного стану об'єкта. Для цього використовують чутливістьнулів та полюсів передатної функції до зміни показників.

2) технічну реалізацію об'єкта, тобто тип елементів, із яких складається об'єкт і спосіб їх з'єднання. З цієї точки зору любий технічний об'єкт характеризується ймовірністю безвідмовної роботи.

Оцінив об'єм інформації, яку несе кожний показник, можна визначити ймовірність оцінки дійного стану об'єкта, яка досягається при реалізації вибраної категорії перевірок. При цьому не враховується повний опис всіх класів технічного стану, доступність для контролю і вимірювання, мінімум вартості і часу контролю всіх параметрів, границя розділу при розпізнаванні окремих несправностей та інше.

Мета статті – спрощення процедури вибору сукупності діагностичних показників і підвищення рівня їх інформативності.

Запропоновано попередній вибір діагностичних параметрів здійснювати на основі топологічної моделі діагностування.

Для більшості діагностичних об'єктів в апріорі відсутній значний обсяг інформації для побудови достатньої аналітичної моделі для вибору сукупності контрольованих показників. Тому в якості математичного опису об'єкта запропоновано використовувати топологічну модель і варіанти її відображення у вигляді граф-моделі [6].

Будемо вважати, що топологічна модель – це пара ($W^{\wedge}$, ξ), де $W^{\wedge}$ – множина фізичних властивостей об'єкта; ξ – топологія, задана у вигляді графа, або матриці з відображенням причинно-наслідкових відношень між фізичнимивластивостями.

Вважається, що між двома властивостями існує причинно-наслідкові відношення *Wi*, φ, *Wj* , якщо поява одного викликає появу другого без участі третього. Вилучення моделі із топологічного Для вибору діагностичних показників модель задається в просторі параметрів. Перехід від простора нормальних властивостей і функцій *T* в простір параметрів $T^{\wedge}$ математично здійснюється методом неперервного відображення простора *T* в $T^{\wedge}$. Простір *T* безперервно відображається в просторі $T^{\wedge}$, якщо кожній точці W_i околиці U(W) із T відповідає околиця $U(W^{\wedge})$ із $T^{\wedge}$ така, що

$$\Gamma[U(W)] \subseteq U(W')$$

де Г – символ відображення простору.

Простір математично уявляє собою замикання множини внутрішніх властивостей [*N*]:

$$W^{\wedge} = \bigcup_{\varphi=1}^{m} W^{\wedge}_{\varphi} = |N|$$

де $W^{\wedge}$– точка дотику множини *N*.

Топологічна модель об'єкта в просторі властивостей відображається у вигляді графа з множиною вершин $W^{\wedge}$ і множиною дуг *Q* (рис. 1).

В просторі параметрів *T* множина *W* складається

$$W = KVRVFV\text{э}VE$$

де *K* – підмножина вхідних параметрів; *R* – підмножина характеристик; *F* – підмножина параметрів основних процесів; э – підмножина супутніх процесів; *E* – підмножина структурних параметрів.

Будемо вважати, що причиною виникнення несправності є наявність суттєвого дефекту або комплексу дефектів (*d*). Дефектами є значення структурних параметрів *e*, які не відповідають установленим нормам. Кожній вершині моделі можна надати вагову характеристику:

$$\lambda = \gamma a + \delta b + \varepsilon c + \cdots.$$

де *a, b, c* – оцінки вершини за різними факторами;

γ, ε, δ, – коефіцієнти значимості факторів:

$$\gamma + \delta + \varepsilon + \cdots = 1.$$

В якості факторів можна використати: вартість інформаційно-вимірювальної системи, час вимірювання, точність вимірювання, заробітна плата оператора, періодичність контролю та інше. Кожній дузі графа може бути надана вагова характеристика $I(\frac{W_\gamma}{W_i})$ відносна кількість інформації про стан параметра W_γ, отриманий при контролі W_i. Оцінка елементів моделі здійснюється методом експертних оцінок. Ступінь згоди експертів визначається коефіцієнтом рангової кореляції, або конкордації. Після побудови моделі можна відмовитись від змістового вмісту і користуватись лише топологічними властивостями і вагою елементів [7].

Розглянемо процедуру вибору діагностичних параметрів. Будемо виходити с того, що діагноз несправності за прямим вимірюванням значень елементів *e* не завжди можна здійснити. В загальному випадку більшість несправностей необхідно визначати опосередковано через інші доступні для вимірювання параметри.

Всі несправності розпізнаються в множині параметрів {P} і які ми розпізнаємо через ці параметри. Такими, що розпізнають будемо називати внутрішні параметри об'єкта, які є найбільш чутливі до тої чи іншої несправності елемента. Знаходити їх будемо шляхом об'єднання синдромів P_{ei} вершин *e*. Синдромом вершини будемо вважати підмножину вершин які ми можемо досягнути по графу вершини, що розглядається. Склад синдромів коректується за допомогою інформаційної відстані вершин:

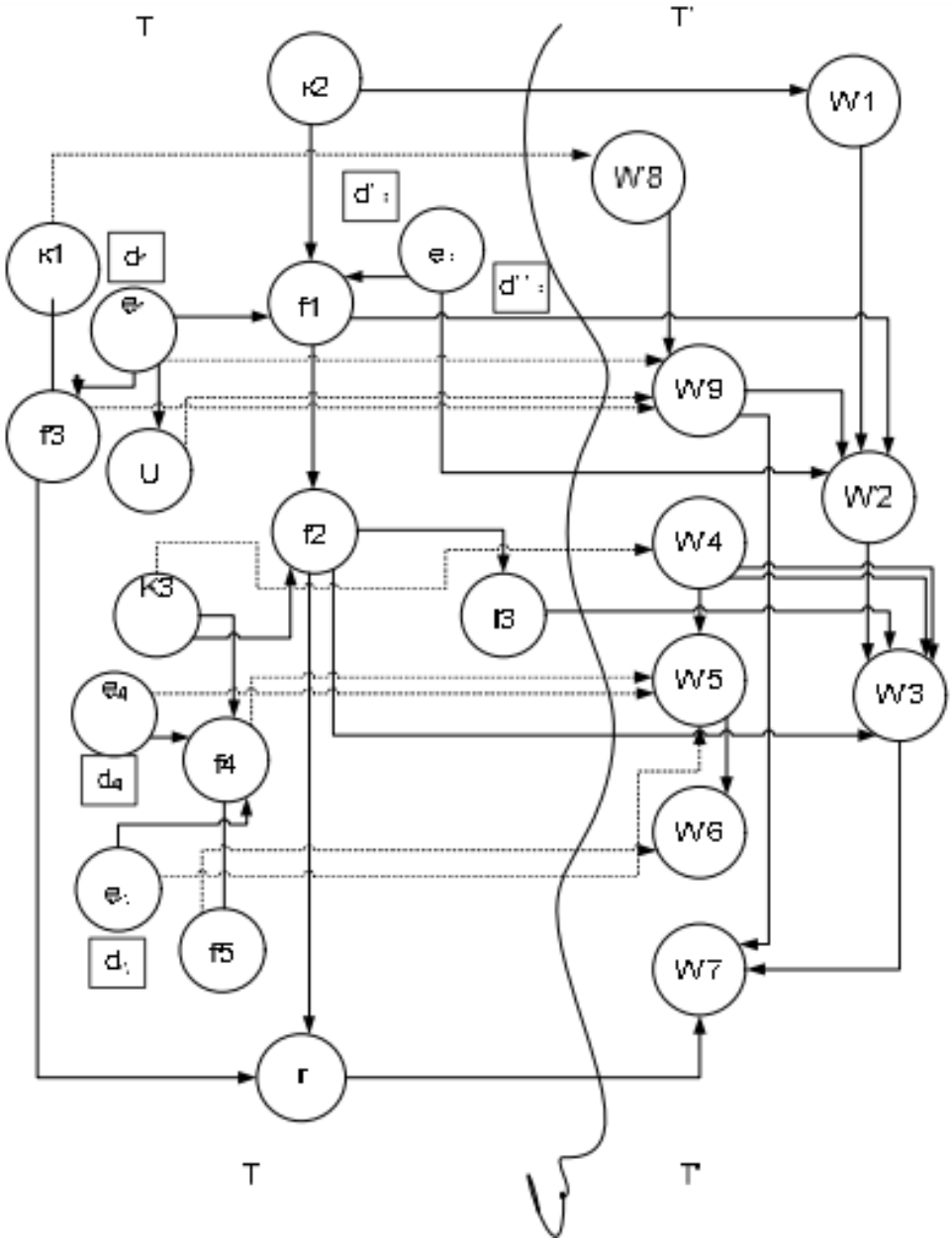


Рис. 1. Граф топологічної моделі

$$\rho(W_i, W_j) = \sum_{i=1}^{j-1} \Gamma(\frac{W_i}{W_{i+1}})$$

де

$$\Gamma\left(\frac{w_i}{w_{i+1}}\right) = (I_{max} + I_{min}) - I\left(\frac{w_i}{w_{i+1}}\right)$$

$I_{\text{мах}}$, I_{min} – максимальне і мінімальне значення ваги дуг. В синдром входять вершини, інформаційна відстань яких від e і менше або дорівнює $\rho_{\text{крит}}$ (рис. 2)

Параметри які розпізнають визначимо як:

$$P = P_{e_1} U P_{e_2} U \dots U_{e/r}$$

Робочу граф-модель складають вершини $W = PUE$.

Значення кожного параметра P, що розпізнає залежить від одного або групи структурних параметрів *e*, а тому від одиноких або кратних несправностей і характеризується підмножиною g_i множини несправностей *D*

$$d = \bigcup_{I=1}^{S} g_i$$

Параметри, які розпізнають вважаються незалежними, якщо підмножини несправностей не перетинаються. Розбиття множини {P} на незалежні групи параметрів, які розпізнають, дозволяє розділити робочу модель на незв'язані підгрупи (рис. 2) В подальшому кожний підграф можна розглядати окремо, що дозволяє значно зменшити розмірність задачі. Отримані підграфи в загальному випадку можуть не відповідати розділенню об'єкта на блоки і вузли в реальному об'єкті, що є дуже цінною властивістю математичної моделі

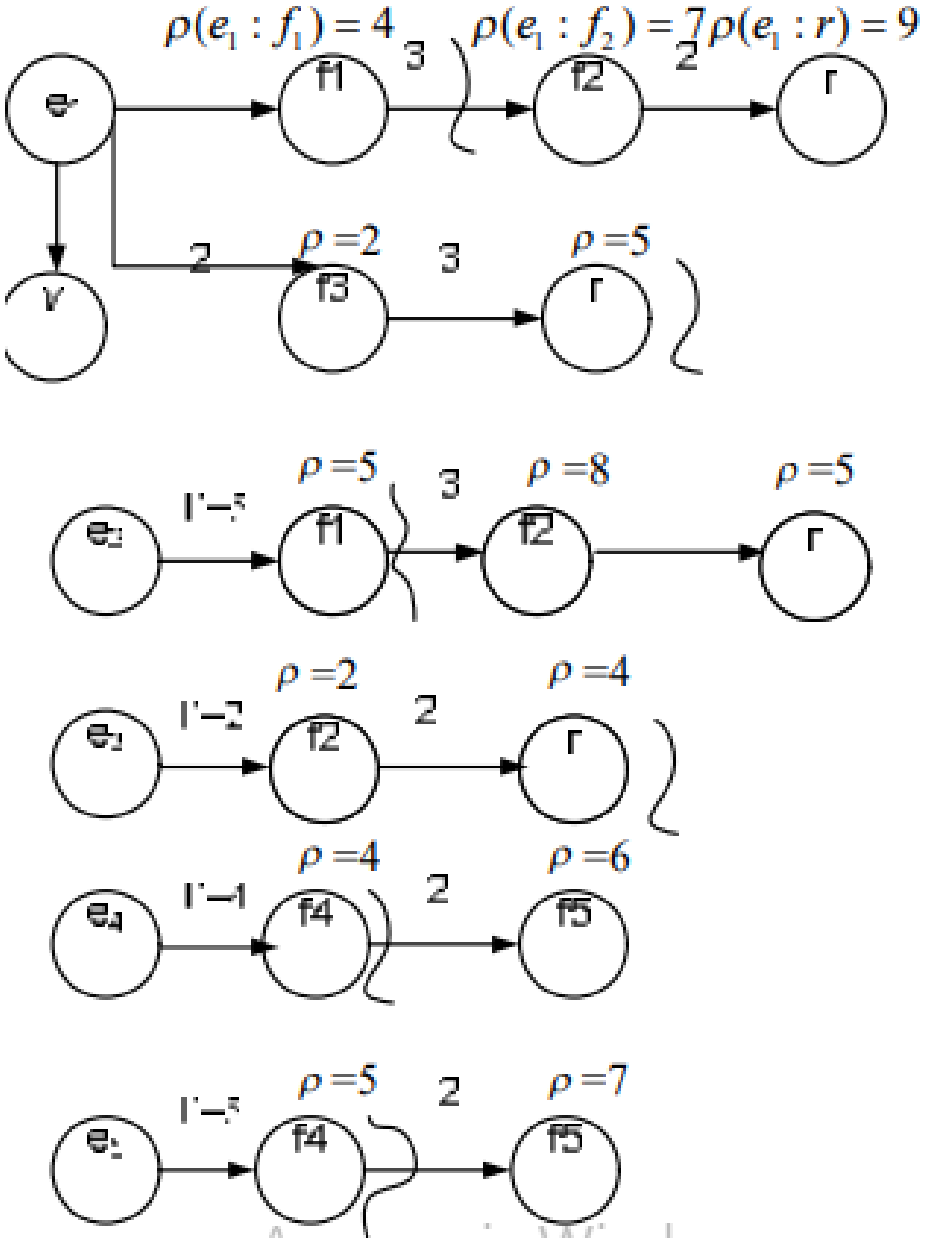


Рис. 2. Вибір діагностичних параметрів

Ефективною множиною діагностичних параметрів будемо вважати таку множину {A}, яка відповідає вимогам:

1) забезпечує опис всіх класів технічногостану (несправностей);
2) має найбільшу чутливість до зміни значеньструктурних параметрів;
3) має мінімальний склад (кількістьпараметрів)
4) має доступ для контролю та вимірювання;
5) забезпечує мінімум вартості і часу контролю всіх параметрів;
6) забезпечує високий рівень розділення робочої моделі на незв'язані підграфи при розпізнаванні окремих несправностей.

Визначення складу множини {А} здійснімо шляхом дослідження зовнішньо стійкої підмножини (ЗСП) граф-моделі. Шляхом мінімізації числа контрольних точок визначимо множину {А}, граф-моделі, яка задовольняє першій вимозі. Для виконання третьої вимоги на зовнішньо стійку підмножину граф-моделі накладаємо обмеження мінімальності (МЗСП)

Для обмеження об'єму перебору сімейства МЗСП і задоволення іншим вимогам вибору {А} передує упорядкована множина (ЗСП) граф-моделі так, щоб менші порядкові номера отримали більш підходящі вершини. Упорядкування вершин здійснюється у відповідності зі зменшенням показника *H*:

$$H = \alpha\Omega_i^* + \beta\gamma_i^*$$

де Ω_i^* – нормовані значення коефіцієнта переваги вершини по інформативності; γ_i^* – нормативне значення ваги вершини;

α, β – коефіцієнт значимості оцінок.

Коефіцієнт переваги Ω_i^* дозволяє врахувати другу і шосту вимогу і може бути визначений як

$$\Omega_1 = \frac{\sqrt{I^2(W_i) + \sum_{j\in\Gamma^{-1}((W_i)} I^2(\frac{W_j}{W_i})}}{\sqrt{\sum_{j\in\Gamma(W_i)} I^2(\frac{W_j}{W_i})}}$$

де $I(W_i)$ – відносна кількість інформації про стан параметра W_i, яка пропорційна власній вазі замикаючої дуги; $\Gamma(W_i)$ – образ вершини W_i при відповідності Г; $\Gamma^{-1}(W_i)$- прообраз вершини W_i при відповідності Г.

Так як перевага вершини W_i по інформативності зменшується по мірі присвоювання порядкових номерів вершинам, які входять в $\Gamma(W_i)$ і $\Gamma^{-1}(W_i)$ після присвоєння чергового номера будь-якій вершині необхідно здійснювати перерахунок показників в Ω і *H* для не пронумерованих вершин, що залишились. При цьому чисельник (1) зменшується на кількість інформації яка надходить від пронумерованих вершин, а знаменник збільшується на кількість інформації, яка переходить на пронумеровані вершини. В підсумку отримуємо упорядковану множину вершин граф-моделі. Вершини з меншим порядковим номером в більшій мірі задовольняють висунутим вимогам.

Для знаходження {А} будується впорядкована матриця суміжності С вершин в якій розташовують в порядку отриманих номерів. Множина {А} формується з перших номерів упорядкованої множини С.

Висновки

Запропоновану процедуру можна застосовувати неодноразово до моменту, коли будуть отримані не зв'язані між собою вершини. Вибраний таким чином склад ефективної множини діагностичних параметрів задовольняє першим п'яти вимогам і в якійсь мірі шостій.

Література

1. Кідиба В.П. Редейний захист електроенергетичних систем : підручник. Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2013. 533 с.

2. Калкаманов С.А., Коваленко А. В., Шавкун В. М. Конспект лекцій з дисциплін «Технічна діагностика електромеханічних систем», «Діагностування рухомого складу електричного транспорту» (для студентів усіх форм навчання за напрямом підготовки 6.050702 «Електромеханіка» спеціальності "Електричний транспорт") ; Харк. нац. ун-т міськ. госпва ім. О. М. Бекетова. Х. : ХНУМГ, 2014. 152 с.

3. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Міненерговугілля України. Харків : Видавництво «Форт», 2017. 760 с.

4. Єрмолаєв С.О., Яковлєв В.Ф. Експлуатація і ремонт електрообладнання та засобів автоматизації. За ред. С.О. Єрмолаєва. К. : Урожай, 1996. 336 с.

5. Осис Я.Я. Топологическая модель функционирования систем. Рига : Зинатие, 1969. № 5. С. 28-30.

6. Лут М.Т., Мірошник О.В., Трунова І.М. Основи технічної експлуатації енергетичного обладнання АПК : підручник для студентів ВНЗ. Харків : Факт, 2008. 438 с.

7. Кутін В.М., Вашковський В.В. Метод та система неперервного контролю технічного стану розподільної мережі напругою 6–35 кВ. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2004. № 3. С. 42-45.

References

1. Kidyba V.P. Redeinyi zakhyst elektroenerhetychnykh system : pidruchnyk. Lviv : Vydavnytstvo Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika», 2013. 533 s.

2. Kalkamanov S.A., Kovalenko A. V., Shavkun V. M. Konspekt lektsii z dystsyplin «Tekhnichna diahnostyka elektromekhanichnykh system», «Diahnostuvannia rukhomoho skladu elektrychnoho transportu» (dlia studentiv usikh form navchannia za napriamom pidhotovky 6.050702 «Elektromekhanika» spetsialnosti "Elektrychnyi transport") ; Khark. nats. un-t misk. hospva im. O. M. Beketova. Kh. : KhNUMH, 2014. 152 s.

3. Pravyla ulashtuvannia elektroustanovok. Vydannia ofitsiine. Minenerhovuhillia Ukrainy. Kharkiv : Vydavnytstvo «Fort», 2017. 760 s.

4. Yermolaiev S.O., Yakovliev V.F. Ekspluatatsiia i remont elektroobladnannia ta zasobiv avtomatyzatsii. Za red. S.O. Yermolaieva. K. : Urozhai, 1996. 336 s.

5. Osys Ya.Ia. Topolohycheskaia model funktsyonyrovanyia system. Ryha : Zynatye, 1969. № 5. S. 28-30.

6. Lut M.T., Miroshnyk O.V., Trunova I.M. Osnovy tekhnichnoi ekspluatatsii enerhetychnoho obladnannia APK : pidruchnyk dlia studentiv VNZ. Kharkiv : Fakt, 2008. 438 s.

7. Kutin V.M., Vashkovskyi V.V. Metod ta systema neperervnoho kontroliu tekhnichnoho stanu rozpodilnoi merezhi napruhoiu 6–35 kV. Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. 2004. № 3. S. 42-45.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-160-165
УДК 004.896:[623.4:355.422]:005.52

ЛАКТІОНОВ ОЛЕКСАНДР
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
https://orcid.org/0000-0002-5230-524X
e-mail: laktionov.alexander@ukr.net
ПЕДЧЕНКО НАЗАР
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
https://orcid.org/0000-0002-0018-4482
e-mail: jashsfenix@ukr.net

КОНЦЕПЦІЯ ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ ГОТОВНОСТІ РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ДО ВИКОНАННЯ БОЙОВИХ ЗАВДАНЬ

Стаття присвячена процесу створення концепції визначення рівня готовності робототехнічних систем до виконання бойових завдань. Проаналізовано техніки розробки теоретичних основ концепцій та їх елементів. За результатами порівняльного аналізу визначено складові структури елементів типової концепції та передумови їх розробки. Запропоновано концепцію визначення рівня готовності робототехнічних систем до виконання бойових завдань, яка базується на принципах: прохідність робототехнічної системи, злагодження підрозділу, оптимізація визначення маршруту руху, оптимізація визначення цілі та її ураження, надійність, безпека, діагностика, аналіз середовищ перебування системи.

Ключові слова: концепція, рівень готовності, робототехнічна система, бойові дії.

LAKTIONOV OLEKSANDR
National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»
PEDCHENKO NAZAR
National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»

THE CONCEPT OF DETERMINING THE READINESS LEVEL OF ROBOTIC SYSTEMS FOR PERFORMING COMBAT TASKS

The article is dedicated to the process of developing a concept for assessing the readiness level of robotic systems for performing combat tasks. It analyzes techniques for establishing the theoretical foundations of concepts and their elements. Based on the results of a comparative analysis, the components of a typical concept's structure and the prerequisites for their development have been identified. The typical structure of the concept includes principles, models, methods, technologies, and has certain prerequisites that influence its content. Prerequisite 1 relates to the principles of the concept, where specific models can be employed. Prerequisite 2 encompasses aspects of creating methodologies through the enhancement of existing methods. Prerequisite 3 defines the procedure for selecting a particular group of methods, including clustering methods when data distribution information is lacking.

A concept for assessing the readiness level of robotic systems for performing combat tasks has been proposed, which is based on principles such as system possibility, unit coordination, optimization of route planning, optimization of target identification and engagement, reliability, safety, diagnostics, and analysis of the system's environmental conditions. Other components of the proposed concept include action scenarios and action models that depend on the characteristics of input data and allow for the simulation of the expected outcomes of activities. Furthermore, the concept involves the existence of a method for determining the integral readiness level of the robotic system and corresponding software implementation. Among the limitations of the proposed concept, it is important to highlight the absence of a formal description of the research object and the determination of the specifics of the research methodology tools.

Key words: concept, readiness level, robotic system, combat operations.

Вступ та постановка проблеми

У звіті про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії росії проти України за рік від початку повномасштабного вторгнення [1], опублікованого березнем 2023 року, наведено динаміку збитків різних секторів. Зростання вказаних збитків фіксується й сьогодні. Одним із напрямів мінімізації збитків, зокрема збереження життя людей, є використання сучасних робототехнічних технологій, що є складовою промислової революції 5.0 [2]. Тому актуалізується питання, щодо розробки, обслуговування, ремонту роботів, безпілотних літальних апаратів та використання останніх у різних сферах. Це породжує розвиток й модернізацію не лише технологій, а й методологій, важливим аспектом котрих є діагностика й перевірка готовності конкретно обладнання до роботи.

Передумовою розробки концепцій робототехнічних систем є аналіз роботизованих комплексів армій світу [3]. Досвід використання відомих робототехнічних систем вказує на синергію роботів наземних і повітряних типів [4]. Це дозволяє оптимізувати процес використання наземних роботів. Відповідно до промислової революції 5.0, активно проводяться дослідження роботизованих систем на основі штучного інтелекту або інтелектуальних роботизованих систем [5].

Так у [5] прийнято інноваційне рішення щодо керування роботизованими платформами. Цінність підходу полягає у тому, що льотчик і комп’ютери літака керують усією своєю підлеглою повітряною технікою у повітрі. Крім цього робототехнічна платформа повинна обов'язково трансформуватися [6]. Нові, принципові інновації, та застарілі доповнюють один одного у структурі концепції. Це породжує складнощі й обмеження, зокрема з необхідністю визначення рівня готовності обладнання до виконання бойових завдань.

Передумови структурованого вирішення проблеми діагностики складних технічних систем запропоновано у роботі [7]. Серед пропозицій розглянуто загальні кроки для досягнення мети діагностики, наведено постановку завдання у теоретико-множинному вигляді.

Оскільки існуючі рішення складені відповідно до відомих концепцій, що не враховують умови війни, то це аргументує та актуалізує розробку концепції визначення рівня готовності робототехнічних систем до виконання бойових завдань.

Аналіз останніх досліджень

Існуючі науково-дослідні роботи є різносторонніми, де вивчається або процес створення теоретичних основ концепцій, або лише елементів концепцій. Так робота [8] наводить методичні основи формування концепції розбудови системи висвітлення надводної обстановки на морській (річковій) ділянці в контексті забезпечення прикордонної безпеки. За результатами досліджень сформовано завдання для забезпечення безпеки й надано пропозиції визначення показника безпеки експертним шляхом.

Теоретико-методологічні основи інформаційного аналізу еколого-техногенних загроз для потенційно небезпечних об'єктів критичної інфраструктури в умовах збройного конфлікту на сході України вивчалися у [9]. Запропоновано заздалегідь вивчати об'єкти критичної інфраструктури та прогнозувати різні способи наслідків на зовнішнє середовище. Для цього побудовано відповідну модель класифікації з описом подій. Попереднє вивчення об'єктів у цьому дослідженні є прототипом діагностики готовності об'єктів.

У роботі [10] проведено аналіз методологічного апарату оцінки загроз у сфері безпеки державного кордону. Цінністю досліджень є доповнення існуючих методологій оборонного планування методами SWOT-аналізу та Q-аналізу.

Створення елементів методологій передбачає вивчення не лише теоретико-методологічних аспектів, а й аналізу моделей, методів, технологій, концептуальних основ використання військових наземних роботизованих систем [11]. Тому розробка нової концепції або удосконалення існуючої потребує ґрунтовного, ретельного аналізу концепцій. Підтвердженням цього є роботи [8–11], які зорієнтовані на розробку теоретико-методологічних основ для створення концепцій моделювання безпеки, техногенних загроз й інших факторів на рівні країни. Запропоновані підходи є цінними, але не зрозуміло як використати цей досвід для розробки концепції діагностики робототехнічної системи.

Крім концептуальних основ розглядають теоретичні моделі розробки концепцій. Підтвердженням цього є робоча концепція дисертаційних досліджень з розробки теорії обробки сигналів у цифровому сегменті спеціальних систем та комплексів радіозв'язку на основі технології MIMO [12]. Описана загальна стратегія щодо розробки концепцій для розробки теорії обробки сигналів на основі сучасних технологій. Це дозволяє у майбутніх дослідженнях сформувати конкретний об'єкт дослідження та розробити певну концепцію.

У статті [13] запропонована концепція багатофункціональної системи кооперативної робототехніки на основі онтологічного підходу. Ця система базується на інтелектуальних агентах на основі онтологічного підходу, всі спільні знання системи представляються у вигляді онтологій. Модель тлумачиться як один з принципів методології, що потужно. У якості принципів можуть бути використані конкретні моделі, а, власне, методологія може бути удосконалена шляхом додавання нового інструментарію. Саме такі дослідження проводилися у науково-дослідних роботах [17–19].

За результатами дослідження особливостей використання фізичного діагностування при побудові інтелектуальної системи діагностики радіоелектронної техніки запропоновано комплексне використання методів. Це дозволяє істотно підвищити вірогідність діагностування, що особливо важливо для об'єктів критичної інфраструктури [17].

Науково-дослідна робота [18] присвячена розробці методики діагностичного забезпечення радіоелектронної техніки на основі енергостатичного методу діагностування з використанням інформаційних технологій. Авторами проаналізовано залежність кількості відмов цифрових пристроїв від часу експлуатації, структуру діагностичного модуля. Проаналізовані залежності є підставою для розробки діагностичної методики, котра вирішує проблеми надійності техніки.

В тім, з практичної точки зору, інформація про тип діагностичних даних та їх розподіл відома не завжди. Тому використовуються методи кластеризації [19], та зокрема комбінований метод нечіткої кластеризації даних в системах технічної діагностики. Метод складається з таких кроків [19]: вибір структури діагностичної моделі; збір даних та їх підготовка до кластеризації; визначення кількості кластерів з використанням MSF, МННК-k та фільтрації Калмана; нечітка кластеризація даних з використанням метода ГК; оцінювання якості кластеризації.

Методологія побудови моделі якості комплексної системи розглядається у [16]. Методологія деталізовано описує процес вирішення конкретної наукової проблеми. Але в роботі не вирішується проблема щодо рівня готовності до виконання бойових завдань. Розглянемо загальні складові концепцій досліджень складних систем, табл. 1.

За результатами порівняльного аналізу структур концепцій, кожна концепція є унікальною та зорієнтована на вирішення конкретного завдання. Концепція забезпечення гарантоздатності обслуговуваних ІКС [14], включає три принципи, три моделі, два методи, дві інформаційні технології й чотири домени. Вона розроблена на основі розвитку парадигми Дж. Фон-Неймана. Саме вказана парадигма дозволила обгрунтувати та обрати відповідні моделі та методи дослідження, котрі впроваджено у процеси розробки, верифікації, сертифікації та супроводу гарантоздатних ІКС. Ефективність діяльності запропонованого підходу виміряно за кількома критеріями. Так, зросла точність оцінювання гарантоздатності на 0,34-2,7 %. Покращено значення мінімуму функції готовності при виборі процедур багатоцільового обслуговування на 1-10,5 % та збільшено часовий інтервал виконання вимог до гарантоздатності у 1,5-2 рази.

Таблиця 1

Загальна структура концепцій дослідження складних систем

1	Концепція забезпечення гарантоздатності обслуговуваних ІКС [14]
	Принцип врахування змін в ІКС та середовищі протягом життєвого циклу, комплексного врахування різних видів відмов та впливів змін, багатоцільового обслуговування
	Моделі: багатофрагментні, мультифазні, імітаційні
	Методи: визначення параметрів гарантоздатних ІКС, вибору параметрів процедур обслуговування для забезпечення гарантоздатності ІКС
	Інформаційні технології: оцінювання показників гарантоздатності критичних ІКС при багатоцільовому обслуговуванні, вибору параметрів стратегії багатоцільового обслуговування
	Домени: Вебсервіси, ІКС космічних апаратів, Системи автоматизації розумних будинків, Системи нормальної експлуатації ІКС АЕС
2	Концепція людиноцентрованого підходу побудови інтелектуальних систем прийняття рішень [15]
	Принципи: інтерпретованості, пояснювальності, транспарентності, простежуваності, всебічності розгляду, аналізованості
	Методи: формування множини систем прийняття рішень, формування ансамблю систем прийняття рішень, сегментування даних за агрегацією рішень ансамблю СПР й інші
	Інформаційна технологія: інтелектуальні інформаційна технологія отримання довірчих рішень

Концепція людиноцентрованого підходу побудови інтелектуальних систем прийняття рішень [15] включає шість принципів, масив методів та інформаційну технологію. Основою концепції є інтелектуальна інформаційна технологію отримання довірчих рішень, яка реалізує рух інформаційних потоків формування рішень за складовими довіри. Це і є перевагою запропонованої концепції над існуючими. За результатами експериментальної верифікації вказана концепція продемонструвала наступні показники ефективності. Підвищено точність класифікації в максимальних значеннях до 3 %, повноту – до 9 %. Як видно з [14-15] загальна структура концепцій дозволяє їх використовувати у конкретних напрямках.

Аналіз існуючих підходів [8–19], дозволяє сформувати наступні передумови розробки концепції діагностики робототехнічних систем.

Передумова 1. У якості принципів концепції можуть бути використані конкретні моделі.

Передумова 2. Методологія може бути удосконалена шляхом додавання нового інструментарію, зокрема одного або групи методів.

Передумова 3. Факт встановлення або не існування залежностей між набором вхідних оцінок вказує на необхідний тип використаних методів концепції.

Саме ці складові надають відповідь на питання щодо впливу конкретних методів на структуру та особливості концепції.

Мета роботи: запропонувати концепцію визначення рівня готовності робототехнічних систем до виконання бойових завдань, яка базується на принципах: прохідність робототехнічної системи, злагодження підрозділу, оптимізація визначення маршруту руху, оптимізація визначення цілі та її ураження, надійність, безпека, діагностика, аналіз середовищ перебування системи. Це надало змогу сформувати загальну основу концепції за рахунок синергії інструментів дослідження.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо формальну структуру концепції визначення рівня готовності робототехнічних систем до виконання бойових завдань. Структура концепції передбачає існування восьми принципів, восьми сценаріїв дій, множини моделей, методів, кількість котрих необхідно з'ясувати, два програмні засоби та технології або функціонал робототехнічної системи.

У якості принципів концепції запропоновано використати: прохідність робототехнічної системи, злагодження підрозділу, оптимізація визначення маршруту руху, оптимізація визначення цілі та її ураження, надійність, безпека, діагностика, аналіз середовищ перебування системи. Запропоновані принципи структурують загальну основу концепції.

Сценарії дій та моделі будуються залежно від необхідної кількості завдань. Кожна модель дій залежить від сценарію дій та особливостей вхідних даних. У табл. 2 подано взаємозв'язок сценаріїв дій та моделей.

Таблиця 2

Сценарії дій та моделі концепції визначення рівня готовності робототехнічних систем до виконання бойових завдань

№ з/п	Вхідні дані	Сценарій дій	Модель дій	Прогнозований результат діяльності
1	$ВД_1$	$СД_1$	$МД_1$	$ПРД_1$
…	…	…	…	…
n	$ВД_n$	$СД_n$	$МД_n$	$ПРД_n$

Змодельовані сценарії та моделі дій аналізуються на предмет прогнозованих результатів діяльності, зокрема час виконання завдання при певних технічних характеристиках робота тощо.

Створені моделі дій об'єднуються в інтегральний метод визначення рівня готовності робототехнічних систем до виконання бойових завдань. В рамках наступного етапу досліджень варто обгрунтувати наявність існування розробки інших методів діагностики.

Оцінки розраховані за методом визначення рівня готовності робототехнічних систем до виконання бойових завдань накопичуються у базі даних та використовуються для аналізу й прийняття рішень щодо можливості використання робототехнічної системи. При цьому варто враховувати технології робототехнічної системи.

Якщо відтворити загальну ієрархію концепції визначення рівня готовності робототехнічних систем до виконання бойових завдань, то маємо стандарти роботи обладнання, концепцію, принципи концепції, сценарії дій (умови, правила), моделі дій, що залежать від сценаріїв, метод визначення рівня готовності системи, засоби реалізації методів. Наведена ієрархія є елементом методології.

Таким чином запропонована концепція дозволить здійснювати перевірку готовності робототехнічної системи до виконання бойових завдань, зокрема розвідки, визначення небезпечних об'єктів, розмінування територій, перевезення військових пристроїв тощо.

Висновки

Проведений аналіз існуючих концепцій діагностики складних технічних систем дозволив з'ясувати структуру концепції визначення рівня готовності робототехнічних систем до виконання бойових завдань.

Запропоновані елементи концепції визначення рівня готовності робототехнічних систем до виконання бойових завдань, що на відміну від існуючих враховують принципи такі як: прохідність робототехнічної системи, злагодження підрозділу, оптимізація визначення маршруту руху, оптимізація визначення цілі та її ураження, надійність, безпека, діагностика, аналіз середовищ перебування системи.

Серед недоліків запропонованої концепції варто виокремити відсутність технічних характеристик об'єкта дослідження та його будови. Це дозволило б розробити конкретні кроки дій для проведення експериментів на реальних зразках техніки.

Література

1. Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії росії проти України за рік від початку повномасштабного вторгнення [Електронний ресурс]. – [Б. м. : б. в.], 2023. – 49 с. – Режим доступу : https://kse.ua/wp-content/uploads/2023/03/UKR_Feb23_FINAL_Damages-Report-1.pdf.

2. Ryvak N. O. Industry 5.0: transition to a sustainable and human-oriented industry. Socio-Economic Problems of the Modern Period of Ukraine. 2022. № 3(155). P. 41–46. https://doi.org/10.36818/2071-4653-2022-3-7 (дата звернення: 01.09.2023). – Назва з екрана.

3. Залипка В. Д. Особливості створення та застосування наземних роботизованих комплексів у провідних країнах світу та Україні [Електронний ресурс] / В. Д. Залипка // Scientific Bulletin of UNFU. – 2022. – Т. 32, № 4. – С. 60–65. – Режим доступу : https://doi.org/10.36930/40320410 (дата звернення: 01.09.2023). – Назва з екрана.

4. Trofymenko S. A universal transforming platform for evacuating wounded using ground unmanned remotely controlled complexes [Електронний ресурс] / S. Trofymenko // Наукові праці Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. – 2022. – № 11. – С. 136–141. – Режим доступу : https://doi.org/10.37701/dndivsovt.11.2022.15

5. Yashchenko V. O. Intelligent robotic systems to ensure life safety in emergency situations of peace and war [Електронний ресурс] / V. O. Yashchenko // Mathematical machines and systems. – 2020. – Т. 1. – С. 3–29. – Режим доступу : https://doi.org/10.34121/1028-9763-2020-1-3-29

6. Залипка В. Аналіз та синтез класифікаційних ознак засобів взаємодії із зовнішніми об'єктами та середовищем багатоцільових роботизованих платформ для подальшої їх трансформації [Електронний ресурс] / Василь Залипка // International Science Journal of Engineering & Agriculture. – 2023. – Т. 2, № 2. – С. 21–33. – Режим доступу : https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230202.03

7. Лактіонов О.І. Передумови розробки структурованого вирішення проблеми діагностики складних технічних систем / О.І. Лактіонов // Тези 75-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (Полтава, 02 трав.–25 трав. 2023 р.). – Т. 1. – С. 8–9.

8. Мазур В. Ю. Методичні основи формування концепції розбудови системи висвітлення надводної обстановки на морській (річковій) ділянці в контексті забезпечення прикордонної безпеки [Електронний ресурс] / Валентин Юрійович Мазур, Олег Васильович Боровик // Theoretical Foundations of Information Technologies Creation and Use. – 2017. – С. 137–145. – Режим доступу : http://sit.nuou.org.ua/article/view/213686/213807.

9. Чумаченко С. Теоретико-методологічні основи інформаційного аналізу еколого-техногенних загроз для потенційно-небезпечних об'єктів критичної інфраструктури в умовах збройного конфлікту на сході України [Електронний ресурс] / Сергій Чумаченко, Рустам Мурасов, Ярослав Мельник // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – 2021. – Т. 40, № 1. – С. 117–122. – Режим доступу : https://doi.org/10.33099/2311-7249/2021-40-1-117-122

10. Братко А. Аналіз методологічного апарату оцінки загроз у сфері безпеки державного кордону

[Електронний ресурс] / Артем Братко, Анатолій Мисик // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – 2021. – Т. 40, № 1. – С. 95–98. – Режим доступу : https://doi.org/10.33099/2311-7249/2021-40-1-95-98

11. Шугуров О. С. Розвиток військових наземних роботизованих систем в контексті нових концепцій управління: перспективи України / Олександр Сергійович Шугуров // Стратегічні пріоритети. – 2007. – № 4(5). – С. 198–205.

12. Масесов М. О. Робоча концепція дисертаційних досліджень з розробки теорії обробки сигналів у цифровому сегменті спеціальних систем та комплексів радіозв'язку на основі технології MIMO / Микола Олександрович Масесов // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – 2013. – № 3(18). – С. 60–62.

13. Krasovskyi M. V. The concept of the multifunctional system of cooperative robotics. Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences. 2020. Т. 1, № 6. С. 90–95. https://doi.org/10.32838/tnu-2663-5941/2020.6-1/15

14. Поночовний Ю. Л. Методологічні основи та інформаційні технології забезпечення гарантоздатності інформаційно-керуючих систем з багатоцільовим обслуговуванням : автореф. дис. … д-ра техн. наук : 05.13.06 / Поночовний Юрій Леонідович ; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – Харків, 2021. – 43 с.

15. Манзюк Е. А. Теоретичні та прикладні засади інтелектуальної інформаційної технології отримання довірчих рішень за людиноцентрованим підходом : автореф. дис. … д-ра техн. наук : 05.13.06 / Манзюк Е. А. ; Хмельницький національний університет. – Хмельницький, 2022. – 48 с.

16. Gitto J.-P. A Methodology for Complex System Quality Model Construction – First level. IFAC-PapersOnLine. 2016. Т. 49, № 12. С. 319–324. URL: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.624

17. Сакович Л. М. Методика фізичного діагностування цифрових пристроїв об'єктів радіоелектронної техніки [Електронний ресурс] / Л. М. Сакович [та ін.] // Системи озброєння і військова техніка. – 2020. – № 2(62). – С. 93–101. – Режим доступу : https://doi.org/10.30748/soivt.2020.62.12.

18. Лєнков С. В. Методика розробки діагностичного забезпечення радіоелектронної техніки на основі енергостатичного методу діагностування з використанням інформаційних технологій / С. В. Лєнков, М. К. Жердєв, І. В. Толок, С. І. Глухов, Г. Б. Жиров // Системи озброєння і військова техніка. – 2017. – № 4. – С. 46–51.

19. Удовенко С. Г. Комбінований метод нечіткої кластеризації даних в системах технічної діагностики [Електронний ресурс] / С. Г. Удовенко, Д. В. Келембет, О. В. Тесленко // Системи обробки інформації. – 2020. – № 1(160). – С. 7–17. – Режим доступу : https://doi.org/10.30748/soi.2020.160.01

References

1. Zvit pro priami zbytky infrastruktury vid ruinuvan vnaslidok viiskovoi ahresii rosii proty Ukrainy za rik vid pochatku povnomasshtabnoho vtorhnennia [Elektronnyi resurs]. – [B. m. : b. v.], 2023. – 49 s. – Rezhym dostupu : https://kse.ua/wp-content/uploads/2023/03/UKR_Feb23_FINAL_Damages-Report-1.pdf.

2. Ryvak N. O. Industry 5.0: transition to a sustainable and human-oriented industry. Socio-Economic Problems of the Modern Period of Ukraine. 2022. № 3(155). R. 41–46. https://doi.org/10.36818/2071-4653-2022-3-7 (data zvernennia: 01.09.2023). – Nazva z ekrana.

3. Zalypka V. D. Osoblyvosti stvorennia ta zastosuvannia nazemnykh robotyzovanykh kompleksiv u providnykh krainakh svitu ta Ukraini [Elektronnyi resurs] / V. D. Zalypka // Scientific Bulletin of UNFU. – 2022. – T. 32, № 4. – S. 60–65. – Rezhym dostupu : https://doi.org/10.36930/40320410 (data zvernennia: 01.09.2023). – Nazva z ekrana.

4. Trofymenko S. A universal transforming platform for evacuating wounded using ground unmanned remotely controlled complexes [Elektronnyi resurs] / S. Trofymenko // Naukovi pratsi Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky. – 2022. – № 11. – S. 136–141. – Rezhym dostupu : https://doi.org/10.37701/dndivsovt.11.2022.15

5. Yashchenko V. O. Intelligent robotic systems to ensure life safety in emergency situations of peace and war [Elektronnyi resurs] / V. O. Yashchenko // Mathematical machines and systems. – 2020. – T. 1. – S. 3–29. – Rezhym dostupu : https://doi.org/10.34121/1028-9763-2020-1-3-29

6. Zalypka V. Analiz ta syntez klasyfikatsiinykh oznak zasobiv vzaiemodii iz zovnishnimy obiektamy ta seredovyshchem bahatotsilovykh robotyzovanykh platform dlia podalshoi yikh transformatsii [Elektronnyi resurs] / Vasyl Zalypka // International Science Journal of Engineering & Agriculture. – 2023. – T. 2, № 2. – S. 21–33. – Rezhym dostupu : https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230202.03

7. Laktionov O.I. Peredumovy rozrobky strukturovanoho vyrishennia problemy diahnostyky skladnykh tekhnichnykh system / O.I. Laktionov // Tezy 75-yi naukovoi konferentsii profesoriv, vykladachiv, naukovykh pratsivnykiv, aspirantiv ta studentiv Natsionalnoho universytetu «Poltavska politekhnika imeni Yuriia Kondratiuka» (Poltava, 02 trav.–25 trav. 2023 r.). – T. 1. – S. 8–9.

8. Mazur V. Yu. Metodychni osnovy formuvannia kontseptsii rozbudovy systemy vysvitlennia nadvodnoi obstanovky na morskii (richkovii) diliantsi v konteksti zabezpechennia prykordonnoi bezpeky [Elektronnyi resurs] / Valentyn Yuriiovych Mazur, Oleh Vasylovych Borovyk // Theoretical Foundations of Information Technologies Creation and Use. – 2017. – S. 137–145. – Rezhym dostupu : http://sit.nuou.org.ua/article/view/213686/213807.

9. Chumachenko S. Teoretyko-metodolohichni osnovy informatsiinoho analizu ekoloho-tekhnohennykh zahroz dlia potentsiino-nebezpechnykh obiektiv krytychnoi infrastruktury v umovakh zbroinoho konfliktu na skhodi Ukrainy [Elektronnyi resurs] / Serhii Chumachenko, Rustam Murasov, Yaroslav Melnyk // Suchasni informatsiini tekhnolohii u sferi bezpeky ta oborony. – 2021. – T. 40, № 1. – S. 117–122. – Rezhym dostupu : https://doi.org/10.33099/2311-7249/2021-40-1-117-122

10. Bratko A. Analiz metodolohichnoho aparatu otsinky zahroz u sferi bezpeky derzhavnoho kordonu [Elektronnyi resurs] / Artem Bratko, Anatolii Mysyk // Suchasni informatsiini tekhnolohii u sferi bezpeky ta oborony. – 2021. – T. 40, № 1. – S. 95–98. – Rezhym dostupu : https://doi.org/10.33099/2311-7249/2021-40-1-95-98

11. Shuhurov O. S. Rozvytok viiskovykh nazemnykh robotyzovanykh system v konteksti novykh kontseptsii upravlinnia: perspektyvy Ukrainy / Oleksandr Serhiiovych Shuhurov // Stratehichni priorytety. – 2007. – № 4(5). – S. 198–205.

12. Masesov M. O. Robocha kontseptsiia dysertatsiinykh doslidzhen z rozrobky teorii obrobky syhnaliv u tsyfrovomu sehmenti spetsialnykh system ta kompleksiv radiozviazku na osnovi tekhnolohii MIMO / Mykola Oleksandrovych Masesov // Suchasni informatsiini tekhnolohii u sferi bezpeky ta oborony. – 2013. – № 3(18). – S. 60–62.

13. Krasovskyi M. V. The concept of the multifunctional system of cooperative robotics. Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences. 2020. T. 1, № 6. S. 90–95. https://doi.org/10.32838/tnu-2663-5941/2020.6-1/15

14. Ponochovnyi Yu. L. Metodolohichni osnovy ta informatsiini tekhnolohii zabezpechennia harantozdatnosti informatsiino-keruiuchykh system z bahatotsilovym obsluhovuvanniam : avtoref. dys. … d-ra tekhn. nauk : 05.13.06 / Ponochovnyi Yurii Leonidovych ; Natsionalnyi tekhnichnyi universytet «Kharkivskyi politekhnichnyi instytut». – Kharkiv, 2021. – 43 s.

15. Manziuk E. A. Teoretychni ta prykladni zasady intelektualnoi informatsiinoi tekhnolohii otrymannia dovirchykh rishen za liudynotsentrovanym pidkhodom : avtoref. dys. … d-ra tekhn. nauk : 05.13.06 / Manziuk E. A. ; Khmelnytskyi natsionalnyi universytet. – Khmelnytskyi, 2022. – 48 s.

16. Gitto J.-P. A Methodology for Complex System Quality Model Construction – First level. IFAC-PapersOnLine. 2016. T. 49, № 12. S. 319–324. URL: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.624

17. Sakovych L. M. Metodyka fizychnoho diahnostuvannia tsyfrovykh prystroiv obiektiv radioelektronnoi tekhniky [Elektronnyi resurs] / L. M. Sakovych [ta in.] // Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika. – 2020. – № 2(62). – S. 93–101. – Rezhym dostupu : https://doi.org/10.30748/soivt.2020.62.12.

18. Lienkov S. V. Metodyka rozrobky diahnostychnoho zabezpechennia radioelektronnoi tekhniky na osnovi enerhostatychnoho metodu diahnostuvannia z vykorystanniam informatsiinykh tekhnolohii / S. V. Lienkov, M. K. Zherdiev, I. V. Tolok, S. I. Hlukhov, H. B. Zhyrov // Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika. – 2017. – № 4. – S. 46–51.

19. Udovenko S. H. Kombinovanyi metod nechitkoi klasteryzatsii danykh v systemakh tekhnichnoi diahnostyky [Elektronnyi resurs] / S. H. Udovenko, D. V. Kelembet, O. V. Teslenko // Systemy obrobky informatsii. – 2020. – № 1(160). – S. 7–17. – Rezhym dostupu : https://doi.org/10.30748/soi.2020.160.01

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-166-172
УДК 685.34.013

НАДОПТА ТЕТЯНА
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0002-9338-7827
e-mail: nadoptate@khmnu.edu.ua
МИХАЙЛОВСЬКА ОКСАНА
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0001-5025-6571
e-mail: mykhailovskao@khmnu.edu.ua
ОЛІЙНИК АНАСТАСІЯ
Хмельницький національний університет
e-mail: asyusholiynyk11@gmail.com

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ПОПЕРЕДНІХ ДЕФОРМАЦІЙ НА СТІЙКІСТЬ СПЕЦІАЛЬНОГО ВЗУТТЯ ДО БАГАТОРАЗОВОГО ЗГИНУ

У статті розглянуті поняття впливу деформації натуральної шкіри на її стійкість до багаторазового згину для спеціального взуття військового призначення. Довговічність спеціального взуття для військовослужбовців безпосередньо пов'язана зі стійкістю виробу до багаторазових деформацій. Таке взуття піддається значним деформаціям, оскільки призначене для екстремальних умов експлуатації, а також значні фізичні навантаження викликають відповідне згинання деталей взуття, особливо союзок.

У результаті досліджень натуральних шкір хромового методу дублення (ялівка легка та кінська шкіра хромового методу дублення) щодо стійкості до згину, встановлено, що міцність шкір, окрім впливу експлуатаційних деформацій, зменшується ще й за рахунок змін у структурі і властивостях шкіри під дією впливу попередньої деформації розтягуванням при виготовленні шкір. Отримані результати будуть враховані при проєктуванні та удосконаленні технологічних процесів виготовлення спеціального взуття для військовослужбовців.

Ключові слова: *спеціальне взуття, натуральна шкіра, попередня деформація, стійкість, багаторазовий згин.*

NADOPTA TETYANA, MYKHAILOVSKA OKSANA, OLIYNYK ANASTASIA
Khmelnytskyi National University

DETERMINATION OF THE INFLUENCE OF PREVIOUS DEFORMATIONS ON THE RESISTANCE OF SPECIAL SHOES TO MULTIPLE BENDING

The article examines the concept of natural leather deformation on its resistance to multiple bending for special military footwear. Durability of special shoes for military personnel is directly related to the product's resistance to repeated deformations. Such shoes are subject to significant deformations, as they are intended for extreme conditions of operation, as well as significant physical loads, causing the respective bending of the parts of the shoes, especially vamps.

As a result of studies of natural leather of the chrome tanning method (heifer light and horsehide of the chrome tanning method) regarding resistance to bending, it has been established that durability of leather, excluding the influence of operational deformations, also decreases due to changes in the structure and properties of the leather under the influence of the previous deformation by stretching during the process of leather manufacture. The obtained results will be taken into account when designing and improving technological processes of manufacturing special shoes for military personnel.

Keywords: special shoes, comfortable shoes, genuine leather, previous deformation, durability, repeated bending.

Постановка проблеми

Сучасні умови розвитку технологій значно підвищують ефективність, точність та стійкість виробничих процесів, створюючи їх більш конкурентоспроможними і пристосованими до сучасного ринку. Особливо, це актуально для виготовлення спеціального взуття для військовослужбовців з огляду на вимоги сьогодення. Традиційно, таке взуття виготовляють з натуральної шкіри. Натуральна шкіра відзначається високою міцністю і стійкістю. Перед шкіряною промисловістю гостро постає проблема підвищення конкурентоспроможності продукції та цілий комплекс завдань, пов'язаних із виробництвом високоякісної натуральної шкіри. Розуміння процесів, які відбуваються в натуральній шкірі під впливом інтенсивної експлуатації взуття і призводять до зміни її фізико-механічних властивостей, дасть змогу розвитку нових виробничих підходів та технологій виготовлення спеціального взуття для військовослужбовців [1]. Одним із шляхів підвищення якості шкіри є – дослідження попередніх деформацій у процесі її виготовлення. Як відомо, деформаційна здатність матеріалів для деталей верху взуття відіграє важливу роль щодо якості та довговічності взуття в цілому. Під час виготовлення взуття його деталі піддаються різним технологічним впливам: розтягування, стискування, зрізання, проколювання і згинання. При цьому виникають різного виду деформації, що значною мірою залежать від деформаційних властивостей матеріалів і визначають якість виконання технологічних операцій під час обробки окремих деталей, та якість готового взуття.

Аналіз останніх джерел

Одним із важливих аспектів якості спеціального взуття для військовослужбовців є його зручність і комфортність під час інтенсивного та тривалого терміну експлуатації, які в свою чергу визначаються не лише необхідними гігієнічними властивостями матеріалів, але й їх здатністю до багаторазового згину,

зберігаючи при цьому форму взуття.

Автори [1] розглядають спеціальне взуття як захисну конструкцію з відповідними властивостями матеріалів верху і низу взуття. Від того, наскільки вдало підібрано матеріали, залежатимуть його захисні та гігієнічні властивості.

Проведені дослідження фізико-механічних властивостей натуральних шкір хромового методу дублення для верху взуття [4] підтвердили здатність матеріалів до багаторазового згину та формування.

Сучасні технології виробництва натуральних шкір з використанням мінеральних наповнювачів дозволяють регулювати формування структури дерми шкури та необхідних експлуатаційних властивостей готової шкіри [5–7].

Проте, до цього часу жодне з проведених досліджень фізико-механічних властивостей натуральних шкір, не враховувало їх зміну, зумовлену післядубильними та опоряджувальними операціями, зокрема операціями витягування та пролежування.

Формулювання цілей статті

Метою наукової роботи є дослідження впливу попередніх деформацій натуральних шкір для виготовлення верху взуття на стійкість спеціального взуття до багаторазового згину.

Виклад основного матеріалу

В процесі виготовлення взуття, зокрема при виконанні обтяжно-затягувальних операцій, частина релаксаційної здатності до деформації забираєтьсяw, але для зразка залишається невелика здатність до деформації. Від величини цієї деформаційної здатності залежить якість взуття і його стійкість до багаторазового згину, а також і довговічність готового взуття.

Якщо в процесі виготовлення шкіри та взуття зразки позбавити здатності до деформації, то в процесі затягувальних операцій заготовку неможливо буде відформувати на колодці. Для забезпечення необхідних деформаційних властивостей, необхідно визначити допустиму величину деформаційної здатності шкіри, яку необхідно залишити для зразка, щоб матеріал був раціонально використаний та мав достатні характеристики міцності.

Для цього проведено дослідження властивостей стомлюваності шкір хромового методу дублення, а саме дослідження впливу деформації шкіри на її стійкість до багаторазового згину.

Дослідження складалися з чотирьох основних етапів, які дозволяють визначити властивості шкіри хромового методу дублення під час багаторазового згинання та розриву:

- вибір зразків: на першому етапі були вибрані зразки шкіри, які підлягають дослідженню;
- попереднє розтягування зразків: на другому етапі зразки шкіри були піддані попередньому розтягуванню;
- випробування зразків багаторазовим згинанням на машині МІРМ: третій етап включав випробування зразків шкіри на машині МІРМ шляхом багаторазового згинання. Це випробування проводиться з визначенням міцності та стійкості шкіри до згинання, а також визначення її деформаційних властивостей;
- дослідження зразків на розривній машині РТ-250: на четвертому етапі зразки шкіри були досліджені на розривній машині РТ-250. Це дослідження включало в себе визначення міцності та розриву шкіри, її деформаційних властивостей після багаторазового згинання та оцінку її стійкості до руйнування.

Ці етапи дослідження охоплюють повною мірою деформаційні властивості шкіри та її стійкість до навантаження, які можуть виникати під час експлуатації взуття.

Метод планування експерименту був застосований для розрахунку оптимальної кількості визначень, необхідних для виконання дослідження для двох типів зразків шкір. Основною метою цього статистичного та математичного інструменту є максимізація якості результатів і мінімізація необхідних ресурсів. Оскільки мета цього експерименту не включалася в процес оптимізації, а у визначенні оптимальної кількості експериментів для кожного тесту, був обраний повний факторний план, оскільки дає можливість вивчити вплив двох або більше змінних на результат експерименту, враховуючи всі можливості комбінації рівнів цих змінних.

Об'єктом досліджень були вибрані: шкіра хромового методу дублення зі шкур великої рогатої худоби (ялівка легка) та кінська шкіра хромового методу дублення.

Для проведення експериментальних досліджень з цих шкір викроювалися зразки прямокутної форми розміром 60х90 мм. При цьому довжина зразка розміщувались вздовж хребтової лінії шкіри.

Для підбору груп зразків з однаковими властивостями, їх викроювали з однієї шкіри за методом асиметричної бахроми.

Метод асиметричної бахроми є ефективним способом підбору та групування зразків шкіри з подібними властивостями. Основна ідея цього методу полягає в тому, щоб викроювати зразки з однієї шкіри таким чином, щоб вони мали такі особливості та характеристики, а також таких само груп, що за середньою величиною показника розривної міцності були б ідентичні.

Цей метод дає можливість при вивченні впливу певних факторів на властивості шкіри виключити вплив особливостей її топографічних ділянок.

Метод асиметричної бахроми стосовно однієї шкіри полягає в тому, що ціла шкіра ділиться

хребтовою лінією навпіл; перпендикулярно до хребтової лінії шкіру ділять на кількість смужок-ременів, кратну кількості факторів, що досліджуються, і кількості ременів, що вводяться в кожну факторну групу.

Для досліджень було складено 4 групи зразків, вводячи в кожну групу по 4 ремені, тобто, з однієї шкіри було отримано 120 зразків (таблиця 1).

Таблиця 1

Групування зразків для дослідження

Група	Номери зразків														
I	4а	8а	12а	16а	20а	24а	28а	2б	6б	10б	14б	18б	22б	26б	30б
	4с	8с	12с	16с	20с	24с	28с	2г	6г	10г	14г	18г	22г	26г	30г
II	5а	9а	13а	17а	21а	25а	29а	3б	7б	11б	15б	19б	23б	27б	1с
	5с	9с	13с	17с	21с	25с	29с	3г	7г	11г	15г	19г	23г	27г	1а
III	6а	10а	14а	18а	22а	26а	30а	4б	8б	12б	16б	20б	24б	28б	2с
	6с	10с	14с	18с	22с	26с	30с	4г	8г	12г	16г	20г	24г	28г	2а
IУ	7а	11а	15а	19а	23а	27а	1б	5б	9б	13б	17б	21б	25б	29б	3с
	7с	11с	15с	19с	23с	27с	1г	5г	9г	13г	17г	21г	25г	29г	3а

Перед проведенням досліджень на багаторазовий згин зразки піддавали спеціальній обробці, а саме розтягуванню з наступним пролежуванням. На основі розвідувальних експериментів виявилось, що оптимальний час витримки зразків в розтягнутому стані (розтягування) складає 168 годин, і 1 година після зняття навантаження для релаксації зразків.

З прикладанням навантаження зразок розтягнеться на певну величину, характерну для даного матеріалу, потім збільшення довжини зразків буде продовжуватися, але наростання її з часом буде сповільнюватися. І через певний час, характерний для кожного матеріалу, деформація припиниться.

Якщо через деякий час зняти навантаження, зразок миттєво скоротиться на деяку величину, і потім поступово буде скорочувати свою довжину до тих пір, поки не дійде до певної постійної величини. Саме цю величину було виміряно.

Попереднє розтягування зразків проводилося на розривній машині РТ-250. Машина має шкалу, на якій записується розривне зусилля, та шкалу відносного видовження зразків.

Дослідження зразків на багаторазовий згин проводилися на приладі МІРМ, що призначений для таких досліджень в природних умовах. Прилад складається з таких основних вузлів: вузол дослідження та вузол привода.

Вузол дослідження складається з 6 пар затискачів рухомих та нерухомих. Рухомі затискачі отримують рух від електродвигуна через редуктор і кривошипно-шатунний механізм, що здійснює зворотно-поступальний рух в вертикальній площині зі швидкістю 200 циклів за хвилину. Для фіксації кількості згинів на приладі є лічильник.

З групи контрольних зразків відібрано 4 та досліджено їх на машині РТ-250.

З групи контрольних зразків відібрано 2 і досліджено їх на 0,5 млн циклів, після чого для них визначені розривне навантаження та відносне видовження (таблиця 3).

З контрольних зразків відібрано 2 і досліджено їх на 1 млн циклів, після чого для них визначені розривне навантаження та відносне видовження (таблиця 3).

Таблиця 2

Результати попереднього розтягування досліджуваних зразків

Показник		Номер групи зразків				Середнє значення
		I	II	III	IV	
Навантаження ***P***, кгс/см^2	Шкіра ВРХ	32,4	28,7	37,0	28,5	32,5
	Кінська шкіра	27,5	25,6	32,8	24,5	27,6
Абсолютне видовження Δl, мм	Шкіра ВРХ	20	22	25	24	22,5
	Кінська шкіра	25,3	27	31	29,5	28,2

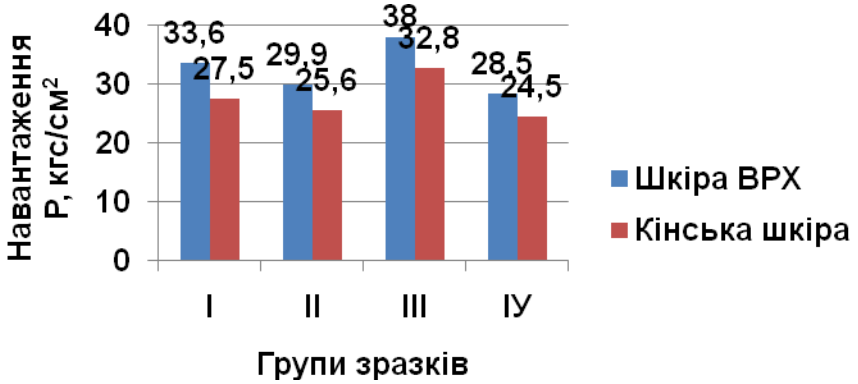


Рис. 1. Навантаження для попереднього розтягування чотирьох груп зразків

З контрольних зразків відібрано 1 і досліджено їх на 2 млн циклів, після чого для них визначені розривне навантаження та відносне видовження (таблиця 3).

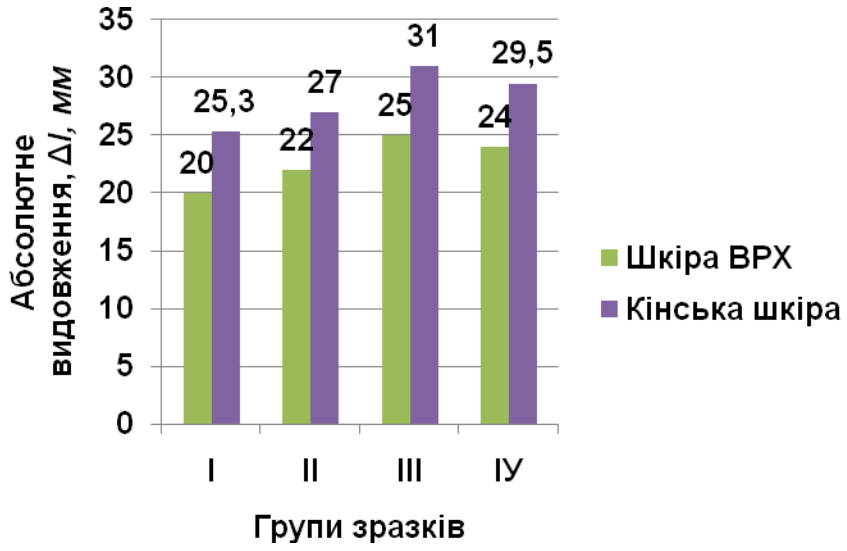


Рис. 2. Абсолютне видовження по групах зразків після попереднього розтягування

Таблиця 3

Результати розривного навантаження та відносного видовження досліджуваних зразків

Кількість циклів згину		Міцність *P*, кгс	Абсолютне видовження, Δ*l*, мм	Відносне видовження, ε, %
$5*10^5$	Шкіра ВРХ	39,5	19	40
	Кінська шкіра	32	22	45
$1*10^6$	Шкіра ВРХ	50	18	36
	Кінська шкіра	40	20,2	40
$2*10^6$	Шкіра ВРХ	19	28,5	57
	Кінська шкіра	13	29,6	59,2

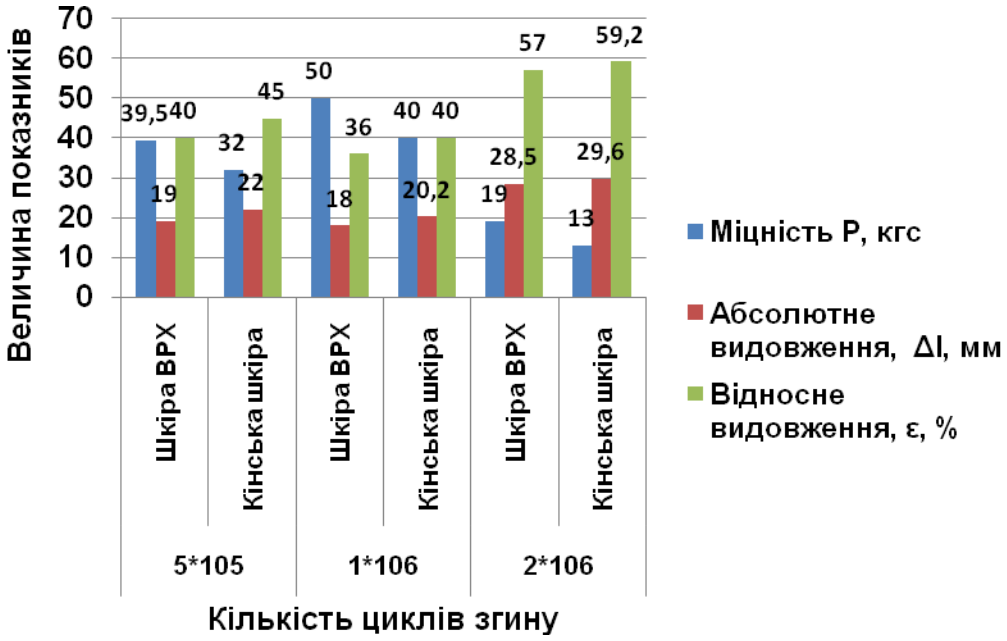


Рис. 3. Показники випробувань контрольної групи зразків (без обробки розтягуванням)

З першої, другої, третьої груп зразків відібрано по одному і попередньо розтягнуто, залишаючи їм відповідно 10%, 20%, 30% деформації. Для фіксації такої деформації зразків їх витримано в розтягнутому стані: час релаксації, визначений експериментально, становить 168 годин.

Підготовлені зразки були поміщені в машину МІРМ і досліджені на багатоцикловий згин на 1×10^6 циклів, після чого досліджені на розривній машині РТ-250.

Результати досліджень представлені в таблиці 4

Таблиця 4

Результати фізико-механічних досліджень

Кількість циклів випробувань	Контрольна група			Величина можливої відносної деформації								
				10%			20%			30%		
	$P_к$, кгс	Δl, мм	ε, %	$P_{обр}$, кгс	Δl, мм	ε, %	$P_{обр}$, кгс	Δl, мм	ε, %	$P_{обр}$, кгс	Δl, мм	ε, %
Шкіра ВРХ (ялівка легка)												
$5*10^5$	39,5	19	40	27,5	24	48	31	25,5	51	38,5	28	56
$1*10^6$	50	18	36	33	21	42	31	28,5	57	35	29	58
$2*10^6$	19	28,5	57	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Кінська шкіра												
$5*10^5$	32	22	45	20	26,5	53	24,5	28,5	56	30	31,5	62
$1*10^6$	40	20,2	40	23	23,2	46,5	24	30	61	25	30	63
$2*10^6$	13	29,6	59,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-

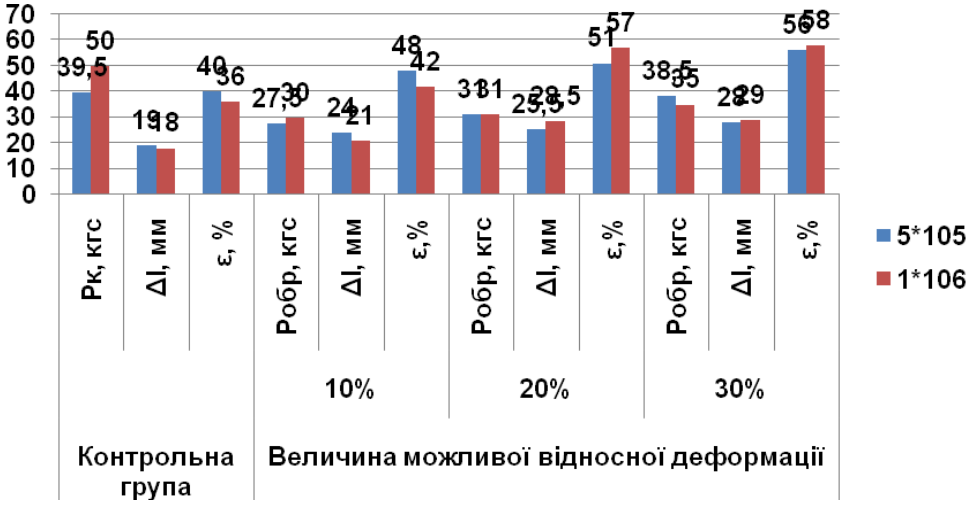


Рис. 4. Показники міцності та подовжень (абсолютного та відносного) шкіри ВРХ (ялівки легкої) після випробувань на багаторазовий згин

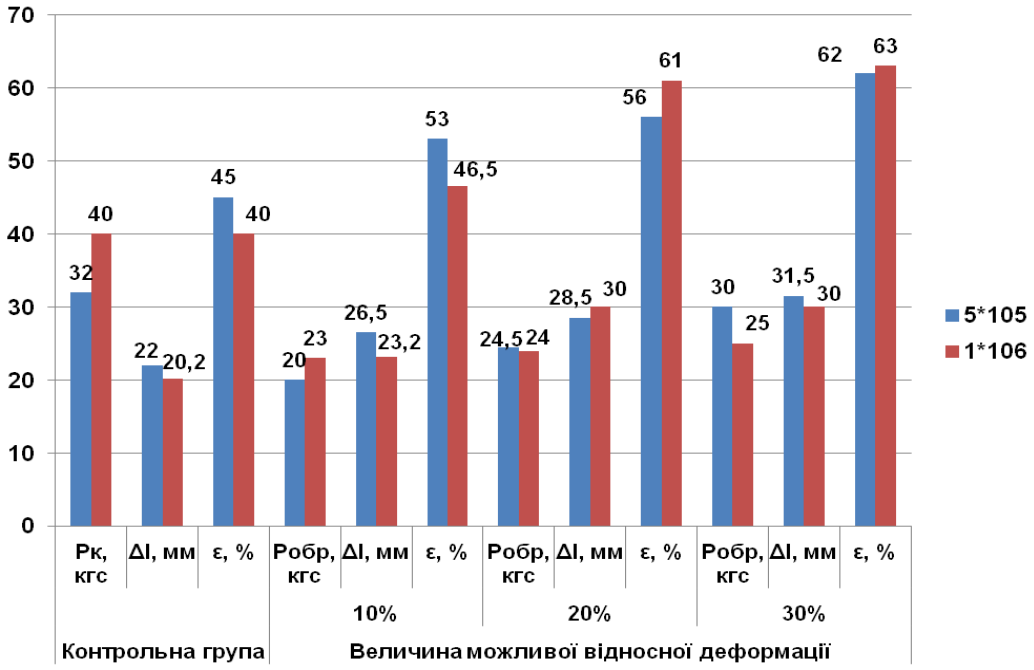


Рис. 5. Показники міцності та подовжень (абсолютного та відносного) кінської шкіри після випробувань на багаторазовий згин

Визначення стійкості до згину – $К_{зг}$:

$$К_{зг} = \frac{P_к - P_{обр}}{P_к} * 100\%$$

Таблиця 5

Стійкість до згину, $К_{зг}$, % для шкіри ВРХ (ялівка легка) та для кінської шкіри

Кількість циклів випробувань		Стійкість до згину, $К_{зг}$, %		
		10%	20%	30%
$5*10^5$	Шкіра ВРХ	30,4	21,5	2,5
	Кінська шкіра	37,2	23,4	6,3
$1*10^6$	Шкіра ВРХ	40	38	30
	Кінська шкіра	42,5	40	37,5

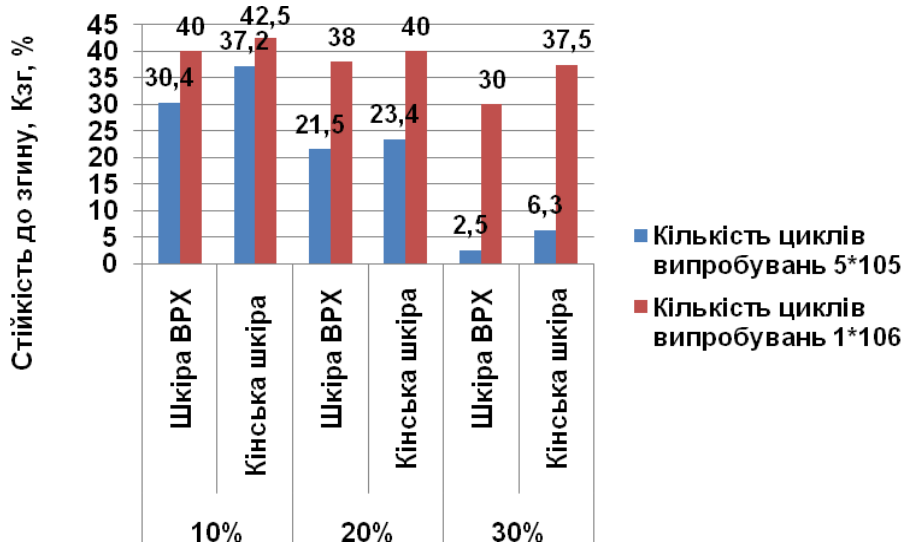


Рис. 6. Стійкість до згину, $К_{зг}$, % для шкіри ВРХ (ялівка легка) та для кінської шкіри

Як підтверджують результати досліджень натуральних шкір хромового методу дублення щодо стійкості до згину, їх міцність шкіри зменшується за рахунок змін у структурі і властивостях шкіри під дією попереднього впливу деформації розтягуванням. Основна причина цього явища полягає в тому, що попереднє розтягнення шкір, залишаючи відповідно 10%, 20%, 30% можливості деформації, впливає на структуру шкіри, змінюючи кут нахилу пучків волокон, послаблюючи при цьому молекулярні зв'язки, і як результат – попередня деформація погіршує фізико-механічні властивості шкіри, зменшуючи її міцність та стійкість до багаторазового згину. Особливо це важливо для виробників спеціального взуття для військовослужбовців, та вказує на необхідність врахування при виборі матеріалів та технологій виготовлення.

Висновки

В процесі досліджень натуральних шкір хромового методу дублення було встановлено, що міцність шкіри при її попередній деформації знижується.

Чим більше відбирається у зразка здатності до деформації, тим менша стійкість до багаторазового згину, тобто менша міцність.

Початкове збільшення міцності зразків зі збільшенням кількості циклів згину зумовлено ущільненням структури зразків, після чого структурно матеріал зразків слабшає і втрачає міцність. Зміцнення структури спостерігається до моменту випробувань $1*10^6$ циклів.

В результаті досліджень впливу деформаційних властивостей натуральної шкіри на її стійкість до багаторазового згину, можна зробити висновок, що:

- попереднє розтягування матеріалів змінює стійкість натуральної шкіри до багаторазового згину;
- зі збільшенням попереднього витягування шкіри стійкість до багаторазового згину знижується;
- при навантаженнях, менших за розривні, натуральна шкіра довгий час (до $1*10^6$ циклів згину) працює пружно.

Література

1. Олійникова В. В. Вимоги до матеріалів верху, низу, конструкції та технології виготовлення спеціального взуття / В. В. Олійникова, А. І. Бабич, Я. С. Луканюк, О. В. Марущенко // Легка пром-сть. – 2010. – № 3. – С. 14-15.

2. Рибальченко В. В. Матеріалознавство виробів легкої промисловості. Методи випробувань : навчальний посібник / Рибальченко В. В., Коновал В. П., Дрегуляс Е. П. – К. : КНУТД, 2010. – 395 с.

3. Шкіра. Фізико-механічні випробування : ДСТУ ISO 5404:2007.

4. Гаркавенко С.С. Дослідження фізико-механічних характеристик шкіряних матеріалів при виготовленні і експлуатації виробів [Електронний ресурс] / С.С. Гаркавенко, А.І. Бабич, М.В. Долженко // Технології та дизайн. – 2017. – № 1. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJR N/td 2017.

5. Козарь О. П. Оцінка показників формостійкості шкір, модифікованих органічно-мінеральними композиціями / О. П. Козарь, О. Р. Мокроусова, Т. М. Віктор // Наукові нотатки. – Луцьк : ЛНТУ, 2013. – Вип. 41. – С. 135-137.

6. Козарь О. П. Оцінка релаксаційно-деформаційних характеристик шкір для верху взуття, наповнених природними мінералами / О. П. Козарь, О. Р. Мокроусова, В. П. Коновал // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2013. – № 4. – С. 107–115.

7. Мокроусова О. Р. Формування експлуатаційних властивостей шкіряних матеріалів мінеральними наповнювачами / О. Р. Мокроусова, С. А. Карван, О. П. Козарь // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2014. – № 2. – С. 82-88.

8. 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.

References

1. Oliinykova V. V. Vymohy do materialiv verkhu, nyzu, konstruktsii ta tekhnolohii vyhotovlennia spetsialnoho vzuttia / V. V. Oliinykova, A. I. Babych, Ya. S. Lukaniuk, O. V. Marushchenko // Lehka prom-st. – 2010. – № 3. – S. 14-15.

2. Rybalchenko V. V. Materialoznavstvo vyrobiv lehkoi promyslovosti. Metody vyprobuvan : navchalnyi posibnyk / Rybalchenko V. V., Konoval V. P., Drehulias E. P. – K. : KNUTD, 2010. – 395 s.

3. Shkira. Fizyko-mekhanichni vyprobuvannia : DSTU ISO 5404:2007.

4. Harkavenko S.S. Doslidzhennia fizyko-mekhanichnykh kharakterystyk shkirianykh materialiv pry vyhotovlenni i ekspluatatsii vyrobiv [Elektronnyi resurs] / S.S. Harkavenko, A.I. Babych, M.V. Dolzhenko // Tekhnolohii ta dyzain. – 2017. – № 1. – Rezhym dostupu : http://nbuv.gov.ua/UJR N/td 2017.

5. Kozar O. P. Otsinka pokaznykiv formostiikosti shkir, modyfikovanykh orhanichno-mineralnymy kompozytsiiamy / O. P. Kozar, O. R. Mokrousova, T. M. Viktor // Naukovi notatky. – Lutsk : LNTU, 2013. – Vyp. 41. – S. 135-137.

6. Kozar O. P. Otsinka relaksatsiino-deformatsiinykh kharakterystyk shkir dlia verkhu vzuttia, napovnenykh pryrodnymy mineralamy / O. P. Kozar, O. R. Mokrousova, V. P. Konoval // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. – 2013. – № 4. – S. 107–115.

7. Mokrousova O. R. Formuvannia ekspluatatsiinykh vlastyvostei shkirianykh materialiv mineralnymy napovniuvachamy / O. R. Mokrousova, S. A. Karvan, O. P. Kozar // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2014. – № 2. – S. 82-88.

8. 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.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-173-181
УДК 621. 315

НАКАШИДЗЕ ЛІЛІЯ
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
https://orcid.org/0000-0003-3990-6718
e-mail: foton_dnu@ukr.net
ГІЛЬОРМЕ ТЕТЯНА
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
https://orcid.org/0000-0002-9598-6532
e-mail: gillyorme@i.ua

ВПЛИВ СПОСОБУ ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОГЕНЕРУВАЛЬНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОНЯЧНОЇ БАТАРЕЇ

В даний час розроблено сонячні елементи різних типів, призначені для функціонування в різних умовах. При цьому важливим є зниження вартості електричної енергії, одержуваної за допомогою фотоелектричного перетворення енергії сонця. Для вирішення питання ефективності функціонування сонячних батарей і як результат, низька вартість отриманої електричної енергії, необхідно на етапі конструкторських розробок проведення оптимізації архітектури побудови сонячної батареї.

Метою роботи є визначення впливу способу оцінювання енергогенерувальної ефективності різних типів сонячних елементів на експлуатаційні характеристики сонячної батареї. Проведено аналіз аналітичної моделі способу оцінювання енергогенерувальної ефективності різних типів сонячних елементів на експлуатаційні характеристики сонячної батареї. Розглянуто підхід, який базується на отриманні експериментальних даних при натурних випробуваннях. Проведення порівняння експлуатаційних характеристик сонячних елементів, отриманих аналітичним та експериментальним методами.

Показано, що експлуатаційні характеристики мають декілька чинників. Серед них тип використаних сонячних елементів, метод попереднього оцінювання енергогенерувальної їх ефективності. Дані отримані завдяки автоматизованому вимірювальному комплексу, тобто на підставі експериментальних даних, дозволяють побудувати поліноміальні залежності. Такий комбінований підхід дозволить з більшою точністю визначити геометричні параметри сонячних батарей при різному рівні енергетичної освітленості. Використання отриманих результатів вплине на зменшення масогабаритних показників сонячних батарей та дозволить суттєво зменшити вартість отриманої електричної енергії.

Ключові слова: сонячна батарея, генерована енергія, гаряча пляма, надійність, термін експлуатації, технічна безпека.

NAKASHYDZE LILIYA, HILORME TETIANA
Oles Honchar Dnipro National University

INFLUENCE OF THE ESTIMATION METHOD OF ENERGY-GENERATING EFFICIENCY OF SOLAR CELLS ON THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF THE SOLAR PANEL

Currently, solar cells of various types have been developed to operate in different conditions. Preliminary determination of the power generating capacity of solar cells and solar panels is necessary to predict balanced power generation and meet the needs of consumers. Experimental determination of the preliminary operational characteristics of a solar power installation allows solving the problem of uneven energy production. That is, to predict the performance characteristics of solar cells, i.e. the dependence on external factors such as temperature, light level, power surges, etc. Among these factors, the level of illumination is particularly important, since it determines the amount of electricity that a solar cell can generate (the level of generation of the predicted power). It is important to confirm the theoretical calculations that are possible when forming solar panels and pre-selecting solar cells. To address the issue of the efficiency of solar cells and, as a result, the low cost of the generated electricity, it is necessary to optimize the architecture of the solar cell at the design development stage. The following approaches can be used to solve this issue: based on experimental data; based on the construction of an analytical model.

The aim of the study is to determine the influence of the method for assessing the energy-generating efficiency of different types of solar cells on the performance characteristics of a solar panel. An analysis of the analytical model of the method for assessing the energy-generating efficiency of different types of solar cells on the performance characteristics of the solar panel was carried out. The approach based on obtaining experimental data during field tests is considered.

The performance characteristics of solar cells obtained by analytical and experimental methods are compared. The results obtained on the basis of the above approaches were compared. A comparison of the performance characteristics of solar cells based on solar cells of such types as metal-dielectric-semiconductor with a thin base region, metal-dielectric-semiconductor with a thick base region, and metal-dielectric-semiconductor. It is shown that several factors influence the performance characteristics. Among them are the type of used solar cells and the method of preliminary assessment of their energy-generating efficiency.

The data obtained through an automated measuring complex, i.e. on the basis of experimental data, allow us to build polynomial dependencies. This combined approach will allow us to determine the geometric parameters of solar panels with greater accuracy at different levels of energy illumination. The obtained dependencies allow us to calculate the geometric parameters of solar cells for different levels of energy illumination. The dependencies also allow for a comparative analysis of the energy and weight and size parameters of a solar cell (taking into account the type of solar cells used), which are based on such calculations. The use of the obtained results will reduce the weight and dimensions of solar cells, and will significantly reduce the cost of electricity.

Keywords: solar panel, generated energy, hot spot, reliability, service life, technical safety.

Постановка проблеми

Використання відновлюваних джерел енергії, насамперед сонячної, є одним із багатьох шляхів

вирішення проблеми отримання екологічно чистої та, в перспективі, економічно вигідної енергії. Однак існує комплекс проблем, що перешкоджають широкомасштабному впровадженню фотоелектричного перетворення, головною з яких є досить висока вартість та технічна вразливість (залежність від природних та технічних факторів) сонячних батарей. В даний час розроблено велику кількість сонячних елементів різних типів. Розроблені сонячні елементи для різних рівнів освітленості, різних температурних режимів, все це необхідно врахувати при розробці алгоритму функціонування. Зниження вартості електричної енергії, одержуваної за допомогою фотоелектричного перетворення, намагаються досягти кількома способами: мінімізацією та здешевленням технологічних процесів при створенні сонячних елементів, зниженням вартості вихідної сировини, застосуванням концентрації сонячного випромінювання, використанням засобів захисту від електричного перенавантаження та перегріву, оптимізація вихідних параметрів та ін.

Існує безліч видів сонячних елементів, призначених працювати в різних кліматичних умовах. Також винаходять нові матеріали для створення сонячних елементів і вдосконалюються способи їх захисту від електричного та теплового навантаження. Тому автоматизація дослідження функціонування сонячних елементів протягом тривалого часу залишається актуальною.

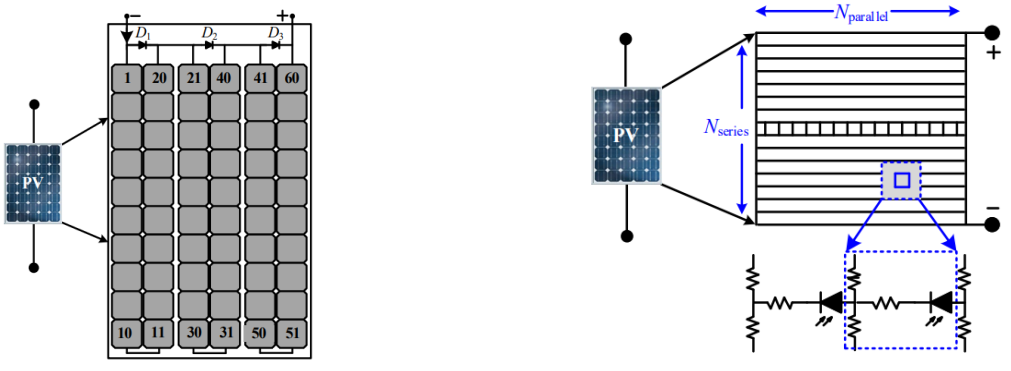
Аналіз досліджень та публікацій

Попереднє автоматизоване вимірювання сонячних елементів та сонячних батарей необхідне для прогнозування збалансований виробіток електроенергії, закриття потреб споживачів. Експериментальне визначення попередніх експлуатаційних характеристик сонячної енергоустановки дозволяє вирішити проблему в нерівномірному виробітку енергії. Тобто спрогнозувати експлуатаційні характеристики сонячних елементів, тобто залежність від зовнішніх факторів, таких як температура, рівень освітленості, перенапруг в електричній мережі тощо. Серед цих факторів особливо виділяється рівень освітленості, оскільки саме від цього залежить кількість електроенергії яку може виробити сонячний елемент(рівень генерування прогнозованої потужності) [1-7]. Важливим є підтвердження теоретичних розрахунків, які можливі при формуванні сонячних батарей та попередньому виборі сонячних елементів.

В статті [8] розглянуто принцип моделювання вольт-амперної характеристики сонячних елементів. Особливістю є те, що враховується параметри сонячних елементів у реальних умовах експлуатації за різних умов освітленості. Ці характеристики отримуються при автоматизованих вимірюваннях і можуть істотно відрізнятися від паспортних параметрів, що визначаються виробником у стандартних тестових умовах (Standard Test Conditions, STC). Цей факт повинен враховуватися при побудові адекватних моделей для компонентів фото – електронних систем, які працюють за зовнішніх умов, що змінюються, а також при вирішенні завдань прогнозування виробництва електроенергії.

Основні параметри сонячних елементів: точки максимальної потужності та опору втрат можуть досить точно визначатися з вольт-амперною характеристикою сонячних елементів, промодельованих за допомогою апроксимуючих функцій, за експериментальними даними, отриманими в польових умовах [8].

Характерні точки, для яких зазвичай наводяться виробниками паспортні дані: напруга холостого ходу, струм короткого замикання та точка максимальної потужності. Ці точки залежать від зовнішніх параметрів: інтенсивність радіації впливає на величину вихідного струму, а температура на вихідну напругу сонячного елемента [8]. В цій статі наведено базові характеристики для побудови вольт-амперної характеристики сонячних елементів, проте процес проведення експерименту майже не описаний, а важливий етап у процесі аналізу впливу затемнення на роботу сонячних батарей не розглянутий.



а) б)

Рис. 1. Внутрішня структура сонячних модулів: (а) кристалічний кремній і (б) тонка плівка, обхідні діоди D1, D2 і D3

Примітка: PV – сонячна батарея; $N_{paralel}$ – паралельно з'єднані сонячні елементи; N_{series} – послідовно з'єднані сонячні елементи. Джерело: систематизовано авторками на основі [9]

В статті [9] наведено ґрунтовний аналіз впливу ефекту затінення на роботу сонячних батарей. Ефект часткового затінення відрізняється для полікристалічних кремнієвих та тонкоплівкових сонячних елементів, через їх відмінну внутрішню структуру. Як правило, сонячні батареї з полікристалічного кремнію мають 60-72

сонячних елементів в серії, як показано на рис. 1(а). Кожна комірка веде себе як окреме джерело постійного струму. Під час часткового затінення вихідна потужність серії затемнених сонячних елементів змінюється, та знижується. Затінені комірки починають діяти як навантаження та розсіюють додаткову потужність, що генерується незатіненими, послідовно з'єднаними сонячними елементами. Щоб обмежити це, обхідні діоди підключаються до 20-24 серійних сонячних елементів, як показано на рис. 1. Зворотна напруга на затінених комірках обмежується обхідними діодами D1, D2 і D3, щоб привести її до безпечного рівня.

На відмінно від цього, тонкоплівкові сонячні батареї мають довгі, вузькі та прямокутні комірки з двовимірною структурою потоку струму. Ці комірки в тонкоплівкових сонячних батареях з'єднані послідовно, як показано на рис. 1(б).У тонкоплівковій сонячній батареї в кожній комірці присутні кілька сонячних елементів, які додатково з'єднані паралельно та представлені Nparallel, як показано на рис. 1(б) [9].

У статті [9] було досліджено вплив часткового затінення на дві технології сонячних батарей, тобто тонкоплівкову та полікристалічного кремнію. Результати показали, що розроблені сценарії часткового затінення впливають на обидві технології. Загалом сонячна батарея полікристалічного кремнію зазнає значного впливу через споживання електроенергії, виробленої незатіненими сонячними елементами. Отже, такі елементи створюють більше навантажень, що, у свою чергу, впливає на загальний термін служби та продуктивність сонячної батареї з полікристалічного кремнію, в порівняння з тонко плівковою сонячною батареєю.

Визначення оптимальних параметрів навантаження сонячних батарей, далі чітко окреслено вимоги виконання яких сприяє вимогам ефективної роботи сонячних батарей.

1. Для забезпечення поглинання максимально можливої кількості енергії випромінювання, що потрапляє на сонячні елементи, оптичний коефіцієнт поглинання фотоелектричного шару повинен бути близьким до одиниці.
2. Фотогенеровані носії повинні ефективно збиратися на контактних електродах з обох сторін фотоелектричного шару, що містить p-n-перехід.
3. Сонячний елемент повинен мати оптимальну висоту бар'єра в p-n-переході, достатню для забезпечення високого значення напруги холостого ходу Uxx, але не дуже велику. Це необхідно для того, щоб запобігати поглинанню фотонів сонячного спектра.
4. Повний опір зовнішнього кола, включеного послідовно з сонячних елементів, має відповідати критерію передачі максимальної потужності в навантаження, тобто бути рівним опору самого сонячного елементу [10].

Перші три пункти залежать від виробника конкретної сонячної батареї та не залежать від споживача. Виконання четвертого пункту цілком та повністю залежить від користувача (завдання програмно-апаратних засобів, що контролюють навантаження та характеристики роботи сонячних батарей під час їх експлуатації).

Отже при автоматизованому вимірюванні доцільно розглянути як зовнішнє навантаження сонячних батарей повинне змінюватися в залежності від умов експлуатації а саме: інтенсивності сонячного освітлення, кута нахилу панелі, температури нагріву робочої сонячної батареї панелі тощо.

Якщо досліджувані типи сонячних батарей складати в системи з відповідним послідовно-паралельним з'єднанням, то потрібно визначати внутрішній опір системи сонячних батарей. Тоді навантаження, що підключається до такої системи, повинно відповідати критерію передачі максимальної потужності й розраховуватись з урахуванням того, що одна монокристалічна сонячна батарея має внутрішній опір 3,34 Ом, а полікристалічна – 3,04 Ом [10]. Також слід зазначити, що на ефективність роботи сонячної батареї впливає її нагрівання, тобто чим вищою є температура поверхні сонячної батареї, тим меншою – її ефективність.

Величина електроенергії, що виробляється сонячними електростанціями значною мірою залежить від того, наскільки оптимальною є конфігурація розташування рядів сонячних батарей. Для підвищення рівня генерації батареї повинні встановлюватись під певними кутами нахилу та азимуту. Оптимальні нахил та азимут панелей вибираються з умови максимуму сонячної радіації, що надходить на одиницю площі приймальної поверхні за календарний період роботи станції. На сонячних електростанціях великої потужності ряди модулів мають, як правило, азимутальний напрямок приймальної поверхні на південь і розміщуються на вільній земельній ділянці, на якій відсутні великі затіняючи об'єкти. Однак залишається проблема часткового затінення сусідніми рядами модулів у години, коли кут висоти Сонця не дуже великий. При частковому затіненні змінюється розташування точки максимальної потужності на вольт – амперній характеристиці, а також з'являються додаткові максимуми на кривій «потужність-напруження-навантаження», що утруднює роботу алгоритмів MPPT (Maximum Power Point Tracking) інверторів [11]. Але основним негативним наслідком часткового затінення є падіння вихідної потужності затінених рядів батарей.

На етапі проектування СЕС обов'язково має проводитися аналіз впливу часткового затінення на добове вироблення енергії сонячною електростанцією. Такий аналіз виконується шляхом моделювання можливих змін конфігурації тіні на сонячному модулі та відповідно вихідної потужності станції [11].

Освітленість в області тіні є неоднорідною: вона вище поблизу краю тіні, на відмінно від ділянки яка знаходиться далі від краю. Цю неоднорідність слід було б враховувати при моделюванні впливу затінення на потужність сонячної батареї. Однак, значення пари величин (I, V) вольт-амперної характеристики визначається саме найменш освітленим ділянкою в області тіні. Тому при розрахунках тінь вважається однорідною, а інтенсивність радіації в області тіні, дорівнює мінімальному значенню на всій

площі затінення сонячного модуля [11]. Дослідження проводилися в НТУУ «Київський політехнічний інститут». Азимут нормалі до поверхні досліджуваних сонячних модулів був спрямований на південь, а кут нахилу модулів дорівнює 35°. Цей кут нахилу, як показано в наступному розділі статті, є оптимальним для київського регіону [11].

Профіль сонячної радіації, який необхідний для визначення кутів нахилу панелей, являє собою дані про добове надходження сонячної радіації на приймальну поверхню. Повна сонячна радіація може бути обчислена через пряму і дифузну радіацію на горизонтальній поверхні, для визначення яких використовують дані метеостанцій, які розташовані по всьому світі. Щоб отримувати такі дані для районів, які віддалені від метеостанцій, застосовують наближення, що ґрунтуються на інтерполяції. Неминучі наближення і при визначенні відбитої компоненти радіації, яка залежить від відбивної здатності земної поверхні та ландшафту, що оточує станцію. Вимірювання коефіцієнтів відображення повинні проводитися в точці розташування станції, що в більшості випадків важко реалізувати. Зазначимо, залежність ефективності сонячних модулів від спектрального складу сонячної радіації, який визначається не тільки джерелом випромінювання, але й складом атмосфери. Дані про спектр сонячного випромінювання, що пройшло, є ще менш повними, ніж дані про інтенсивність радіаційних компонентів. Таким чином, точне визначення характеристик сонячної радіації в довільно заданій точці не є можливим, мова може йти лише про наближені моделі з емпіричними параметрами [11, 12].

Ефективна робота сонячних енергоустановок залежить від багатьох факторів: куту нахилу сонячних батарей, сезону року, географічного місця розташування станції, погодних умов. Затінення сонячних елементів, значною мірою впливає на ефективність експлуатації сонячної електростанції, бо саме від фізичних процесів, які виникають при цьому залежить кількість електроенергії яку здатна виробити сонячна електростанція. При розрахунку сонячної енергоустановки важливими етапами є розрахунок кута падіння сонячного випромінювання для статичних систем, географічне місце розташування впливає на період року коли доцільно і вигідно використовувати СЕС, а також від місця розташування, а саме від навколишніх об'єктів, може утворюватися тінь, яка буде знижувати роботу СЕС. Слід зазначити, що тінь відкидають і самі сонячні батареї, тому при проектуванні СЕС слід враховувати вплив взаємного затінення рядами сонячних батарей, правильно розрахована відстань між сонячними батареями дозволить збільшити ефективність роботи сонячної станції при однакових витратах, але без розрахунку ефекту затінення. Тому доцільним є розгляд теоретичних відомостей про вплив затінення, та врахування результатів проведених експериментальних досліджень з визначення впливу різних видів затінення на ефективність монокристалічних сонячних батарей.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є визначення впливу способу оцінювання енергогенерувальної ефективності різних типів сонячних елементів на експлуатаційні характеристики сонячної батареї.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

1. Аналіз аналітичної моделі способу оцінювання енергогенерувальної ефективності різних типів сонячних елементів на експлуатаційні характеристики сонячної батареї.
2. Розглянути підхід, який базується на отриманні експериментальних даних при натурних випробуваннях.
3. Проведення порівняння експлуатаційних характеристик сонячних елементів отриманих аналітичним та експериментальним методами.

Виклад основного матеріалу

Для вирішення питання ефективності функціонування сонячних батарей і як результат, вартість отриманої електричної енергії, необхідно на етапі конструкторських розробок проведення оптимізації архітектури побудови сонячної батареї.

Для вирішення цього питання можливе використання наступних підходів: на базі експериментальних даних та на базі побудови аналітичної моделі.

Було проведено порівняння результатів отриманих на базі використаних вище вказаних підходів.

Вихідними даними для проведення порівняння є такі чинники як енергогенеруюча спроможність сонячних елементів (основа конструкції сонячної батареї) та особливості функціонування сонячних елементів. Однак споживача цікавить не тільки генерована енергія відносно окремо розглянутого сонячного елемента, а загальні параметри сонячної батареї. Тобто її енергетичні, масогабаритні, геометричні параметри, які і формують її архітектуру, склад та енергоефективність в цілому.

При цьому необхідно враховувати те, що при розгляді енергоефективності функціонування сонячної батареї не можна масштабно переносити дані про енергетичні параметри сонячних елементів. Це пов'язано з наявністю в сонячних батареях різних втрат, причини яких – комутація сонячних елементів, їх не ідентичність, нерівномірність температурного поля та освітленості та ін. Врахування цих факторів при проєктуванні сонячної батареї можливо проводити такими методами:

– введенням в модель відповідних коефіцієнтів [4]. Однак пряме введення корегуючих коефіцієнтів в значній мірі ідеалізує схему комутації сонячних елементів в сонячній батареї.

– побудовою регресійної математичної моделі, де схемні втрати враховуються інтегрально [14]. Це виконується за допомогою методу регресивного аналізу шляхом обробки результатів експериментів (широкий діапазон рівня освітленості та температур). При використанні для розрахунку енергетичних параметрів сонячних елементів регресійної математичних моделі враховуються схемні втрати потужності (комутаційні, від не ідентичності сонячних елементів, від температурних нерівномірностей, часткових затінень та ін) незалежно від реалізації тої чи іншої схеми комутації сонячних елементів в сонячній батареї.

Існують наступні підходи для визначення енергогенеруючої спроможності сонячного елемента (основа конструкції сонячної батареї).

1) Аналітичний підхід, який дозволяє отримати дані про енергетичні параметри тільки характеристичних (крайніх) точок, які характеризують струм сонячного елемента (I_{CE}) та напругу сонячного елемента (U_{CE}), за яких: потужність сонячного елемента максимальна U_{CE}=Uопт, I_{CE}=Iопт / виконується наступна умова U_{CE}=0; I_{CE}=Iкз / при U_{CE}=Uxx; I_{CE}=0.

В цьому випадку можлива побудова регресійної математичної моделі сонячної батареї, яка базується, в даному випадку, на основному рівнянні сонячного елемента:

$$I_н = I_ф - I_{о.н}\left\{ exp\left[\frac{e(V + I_н R_п)}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V}{R_ш} \cdot \tag{1}$$

Після цілого ряду математичних перетворень можливо отримати вираз, який дозволяє провести розрахунок енергетичних параметрів сонячної батареї. Це рівняння включає основні енергетичні параметри сонячної батареї, такі як струм короткого замикання, напруга холостого ходу. Відповідно з методикою, що в [4] має вигляд:

$$I_{сб} = I_{кз} - I_{кз} \frac{U}{U_{xx}} exp(k \cdot (U - U_{xx}) \cdot \tag{2}$$

З врахуванням цих залежностей розрахунок енергетичних параметрів сонячної батареї [4] проводиться виходячи з наступного математичного виразу:

$$I_{СБ} = I_{кз}^{СБ} \cdot \left\{ 1 - \frac{U_{СБ}}{U_{xx}^{СБ}} \exp\left[\frac{\ln\left(\left(1 - \frac{I_{опт}^{СБ}}{I_{кз}^{СБ}} \right) \cdot \frac{U_{xx}^{СБ}}{U_{опт}^{СБ}} \right) \cdot \left(U_{СБ} - U_{xx}^{СБ} \right)}{U_{опт}^{СБ} - U_{xx}^{СБ}} \right] \right\}, \tag{3}$$

де $I_{СБ}$ – струм, який генерується сонячною батареєю;

$I_{кз}^{СБ}$ – струм короткого замикання який генерується сонячною батареєю;

$U_{СБ}$ – напруга сонячної батареї;

$U^{СБ}_{xx}$ – напруга холостого ходу сонячної батареї;

$U^{СБ}_{опт}$ – оптимальна напруга сонячної батареї;

$I^{СБ}_{опт}$ – оптимальний струм сонячної батареї.

2) Підхід, який базується на тому, що експериментальним та комбіновано з розрахунковим шляхом може бути отримано великий масив дискретних даних, який дозволяє оцінювати енергогенеруючу спроможність сонячних елементів [15]. На базі цих даних можна скласти емпіричну залежність, яка характеризує енергетичні параметри сонячної батареї.

При виконанні даного дослідження експериментальним та розрахунковими методами було отримано великий масив даних, який дозволив з великою точністю охарактеризувати енергогенерувальну спроможність наступних сонячних елементів: структура напівпровідник-діелектрик-напівпровідник (НДН-структура) з тонкою базовою областю; НДН-структура з товстою базовою областю; структура метал-діелектрик-напівпровідник (МДН-структура).

Для виконання натурних вимірювань була створена експериментальна вимірювальна установка.

Експериментальна установка (рис. 1) складається з наступних основних частин: встановлення стеження за Сонцем, поворотної платформи із сонячними елементами, нерухомої платформи із сонячними елементами, несучої рами; блоку вимірів (комутатор груп, мультиплексор, підсилювачі-перетворювачі); каналу передачі; аналого-цифрових перетворювачів; модуля сполучення; ЕОМ. Застосування ЕОМ дозволяє суттєво розширити можливості експериментальної установки – підвищується точність стеження за Сонцем, змінювати навантаження групи сонячних елементів тощо.

Установка стеження за Сонцем складається з рами з поворотною платформою, блоку живлення та керування, апаратури що записує. Рама є звареною трубчастою конструкцією, у верхній частині якої укріплена поворотна платформа з двома ступенями свободи, що забезпечують перпендикулярність площини сонячних елементів до джерела світла (Сонцю) і стеження за ним.

Платформа складається з основи, закріпленої болтами на рамі. Основа має два підшипникові вузли з горизонтальною віссю обертання [16]. У них встановлений та обертається корпус, на якому розміщений двигун РД-09 з блоком редукторів. На вихідному валу блоку редукторів закріплений через муфту з фрикційними шайбами спеціальний тримач з сонячними елементами, що досліджуються. Привід забезпечує обертання тримача із сонячними елементами зі швидкістю один оберт за 24 години. Корпус встановлюється

та фіксується на кут відміни Сонця по конусу на основі платформи. Утримувач із сонячними елементами, до включення приводу обертання, за допомогою фотодіода або компаса та тимчасової шкали встановлюється строго перпендикулярно до світлового (сонячного) потоку і, при включенні приводу, слідує за світловим потоком. У корпусі розміщено плату індикації орієнтації для встановлення тримача сонячними елементами на джерело світла.

Вимірювальна частина експериментальної вимірювальної установки функціонує в такий спосіб. Дві групи сонячних елементів (СЕ1…СЕn) з подібними характеристиками, що мають у своєму складі фотоелементи розміщені як на поворотній так і на неповоротній платформах. По черзі через комутатор групи підключаються до мультиплексора (М). У кожній із груп частина сонячних елементів підключена до модуля змінних навантажень, решта до модуля постійних навантажень, крім того, окремі сонячні елементи оснащені концентраторами сонячного випромінювання. Мультиплексор підключає підсилювачі-перетворювачі (ПП1...ПП4) до досліджуваних сонячних елементів. Далі сигнал надходить на входи аналого-цифрових перетворювачів каналом передачі даних - несиметричної лінії сигналів постійного струму 0-5 mA довжиною близько 40 м. Роботою мультиплексора через модуль сполучення керує ЕОМ. Оскільки в описуваній експериментальній установці в якості аналого-цифрових перетворювачів використовувалися вольтметри універсальні типу В7-21 (В7-21А, В7-23 і подібні) виникла необхідність створення спеціального модуля сполучення (МС) і написання відповідного програмного забезпечення інтерфейсу.

Більш детально методологія та інструментарій вимірювання представлені в роботі [5].

В результаті проведено співставлення експериментальних та розрахункових даних про енергогенеруючу спроможність сонячних елементів. Ці дані отримані в широкому діапазоні освітленості та температури. Наявність таких показників дозволила встановити точність розрахункових показників та прогнозувати залежність параметрів сонячних батарей від умов експлуатації.

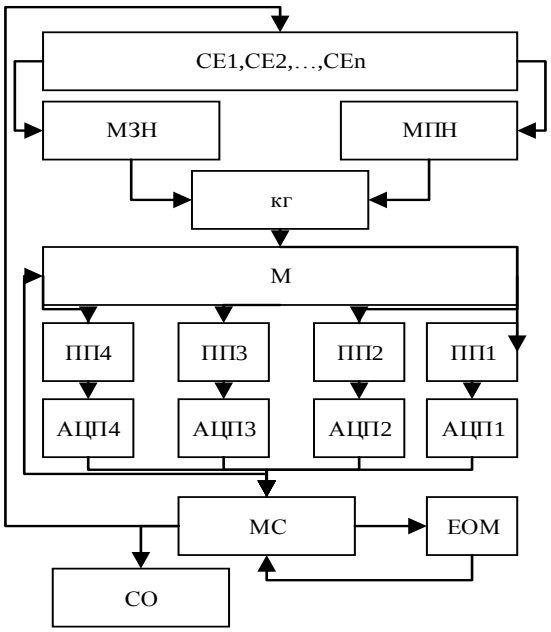


Рис. 2. Гістограма розподілу вихідних даних моделі в інтервалах частот
Джерело: систематизовано авторками на основі [16]
Примітка: АЦП – аналогово-цифровий перетворювач, ЕОМ – електронно-обчислювальна машина, МС – модуль сполучення, МПН – модуль постійних навантажень, МЗН модуль змінних навантажень, СО – система орієнтації, ПП – підсилювач-перетворювач, КГ – комутатор груп, М – мультиплексор.

Для розрахунку геометричних експлуатаційних параметрів сонячних батарей при врахуванні енергетичних характеристик сонячних елементів, використовувалися методики представлені в [6]. Відповідно даної методики розрахунок геометричних розмірів сонячних батарей проводився з розрахунку на ідентичну енергогенеруючу спроможність об’єктів дослідження. Були розраховані геометричні параметри сонячних батарей, які можуть забезпечити необхідну потужність при різному рівні освітленості. На базі отриманих даних були побудовані графічні залежності, які характеризують динаміку зміни геометричних параметрів сонячних батарей при збільшенні рівня освітленості.

При проведенні співставлення отриманих розрахункових та експериментальних показників енергогенерувальної спроможності сонячних елементів, що були проаналізовані отримані поліноміальні залежності. Побудувати такі залежності можливо на основі використання експериментальних даних. Тобто комбіноване використання аналітичного методу та експериментального автоматизованого вимірювання дозволить розширити можливості цих методів [17, 18]. Отримані математичні залежності з емпірично визначеними коефіцієнтами дозволяють розрахувати параметри сонячних батарей, що проектуються з певним типом сонячних елементів, при широкому діапазоні освітленості та температурного впливу.

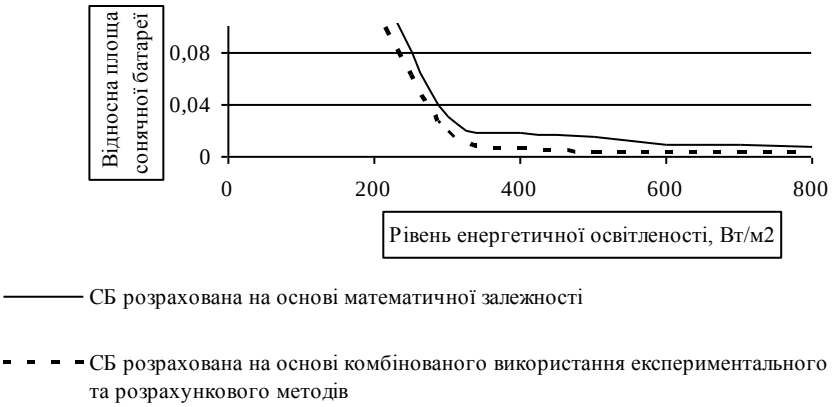


Рис. 3. Залежність, що отримана комбінованими та розрахунковими методами щодо геометричних параметрів сонячних батарей на базі сонячних елементів ПДП-структури з тонкою базовою областю
Джерело: авторська розробка

Так, наприклад, для сонячної батареї побудованої на базі сонячних елементів із структурою НДП з тонкою базовою областю отримана завдяки комбінованому підходу поліноміальна залежність площі сонячної батареї від рівня енергетичної освітленості має вигляд $S_{СБ}$=0,0071E^2-0,0731E+0,1833. При використанні розрахункового підходу (рис. 3) отримана поліноміальні залежність для розрахунку площі сонячної батареї побудованої на основі сонячних елементів НДН з тонкою базовою областю приймає вигляд $S_{СБ}$=0,0065E^2-0,0655E+0,1531.

Таким же чином було проведено порівняння отриманих геометричних параметрів сонячних батарей створених на основі сонячних елементів із НДН структурою з товстою базовою областю. Результати наведені на рис. 4

Поліноміальна залежність отримана при варіанті комбінованого розрахунку геометричних параметрів сонячною батареї має вигляд $S_{СБ}$=0,0163E^2-0,1742E+0,4449.

Для розрахункового методу така залежність має вигляд $S_{СБ}$=0,0023E^2-0,0251E+0,0698.

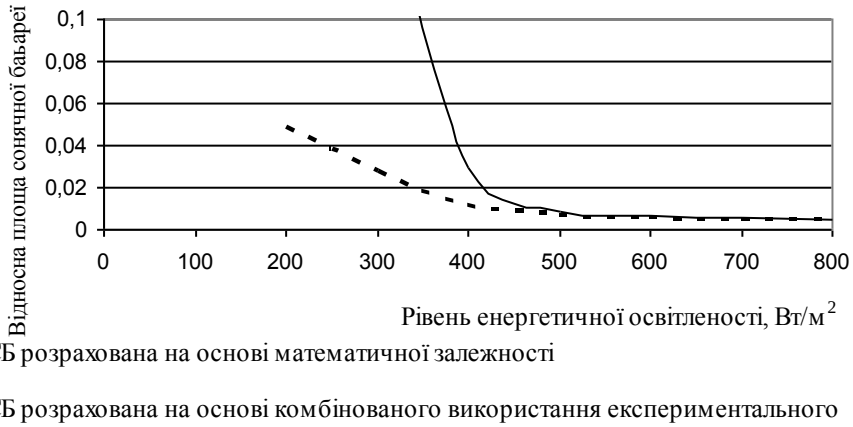


Рис. 4. Залежність, що отримана комбінованими та розрахунковими методами щодо геометричних параметрів сонячних батарей на базі сонячних елементів НДН-структури з товстою базовою областю
Джерело: авторська розробка

У випадку, коли сонячна батарея була сформована на основі сонячних елементів метал – діелектрик-напівпровідник (рис. 5) параметри на основі комбінованого використання експериментального та розрахункового методів представляє поліноміальні залежність $S_{СБ}$=0,008E^2-0,0873E+0,2358.

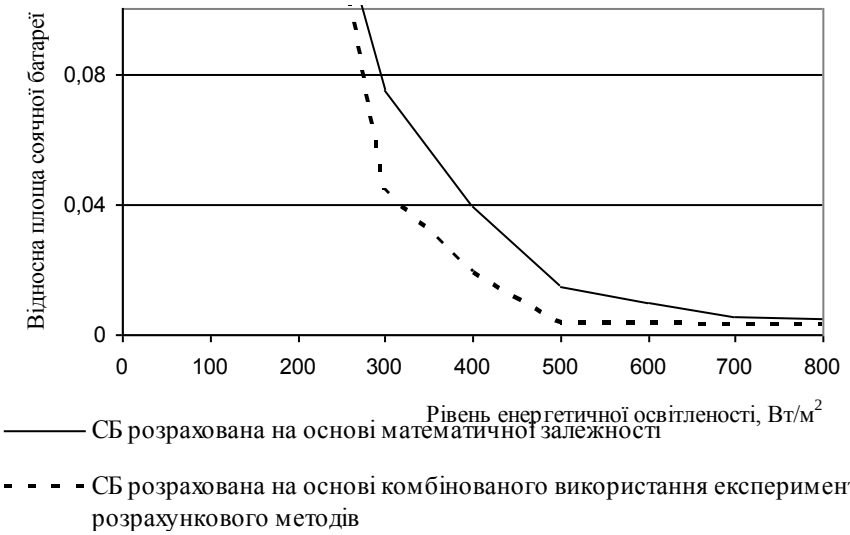


Рис. 5. Залежність, що отримана комбінованими та розрахунковими методами щодо геометричних параметрів сонячних батарей на базі сонячних елементів МДП-структури
Джерело: авторська розробка

Коли для розрахунку геометричних параметрів сонячної батареї використовувалася тільки математична залежність, то: SСБ=0,0105E2-0,1065E+0,2525.

Отримані залежності дозволяють розрахувати геометричні параметри сонячних батарей для різних рівнів енергетичної освітленості. Також отримані залежності дозволяють провести порівняльний аналіз енергетичних та масогабаритних параметрів сонячної батареї (з урахуванням типу використаних сонячних елементів), які створені на основі таких розрахунків.

Висновки

Аналіз триманих результатів показав, що площа сонячної батареї створеної на основі НДН-структури з товстою базової областю розрахована на основі комбінованого методу менша в 2,25 разів за відповідну площу сонячної батареї, яка розрахована за математичною залежністю. Це суттєво впливає на масогабаритні показники. Також таке збільшення суттєво впливає на кількість використаних сонячних белемнів і як результат, на вартості отриманої електричної енергії.

Розраховані геометричні параметри сонячних батарей на основі сонячних елементів метал-діелектрик-напівпровідник відрізняються в 1,24 рази. Тобто відповідно і кількість сонячних елементів в батареї, яка розрахована за комбінованими результатами менша на 30%.

За однакової енергоефективності сонячних батарей побудованих з сонячних елементів НДН-структури з тонкою базовою областю кількість використаних сонячних елементів теж змінюється. При розрахунку за комбінованим методом їх кількість менша на 35%.

При проектуванні сонячних батарей з різними видами сонячних елементів доцільним є використання комбінованого методу попереднього оцінювання енергогенеруючої спроможності сонячних елементів.

Такий підхід призведе до суттєвого зменшення масогабаритних показників пристрою. Відповідно це відобразиться на вартості генерованої електричної енергії.

Література

1. Pillai S., Green M. 1.29 – Plasmonics for Photovoltaics. Comprehensive Renewable Energy. 2022. № 1. С. 627–643.

2. Germany’s electricity generation mix 2015. STROM-Report Renewable energy Germany. 2015. http://strom-report.de/renewable-energy/.

3. Atmospheric Science Data Center. NASA Surface meteorology and Solar Energy, 2016. URL: https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi

4. Research cell record efficiency chart. The National Center for Photovoltaics (NCPV) at the National Renewable Energy Laboratory (NREL). 2015. http://www.nrel.gov/ncpv/.

5. Олійник Ю. С. Використання сонячних батарей у сучасних умовах / Ю. С. Олійник // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. – 2018. – № 29. – С. 220–224.

6. Брич В. Я. Проблеми застосування сонячної енергії в сфері житлово – комунального господарства / В. Я. Брич, Б. Р. Гевко // Інноваційна економіка. – 2016. – № 1. – С. 152–157.

7. Будько В. І. Перекриття небалансів згенерованої та прогнозованої електроенергії сонячною електростанцією за рахунок системи акумулювання електричної енергії / В. І. Будько, Я. В. Вайнштейн // Відновлювана енергетика. – 2021. – № 4. – С. 25–31.

8. Гаєвськая А. Н. Алгоритм аппроксимации вольт-амперных характеристик фотомодулей в условиях частичного затенения / А. Н. Гаєвськая // Відновлювана енергетика. – 2019. – № 3. – С. 21–29.

9. Гнатов А. В. Визначення оптимальних параметрів навантаження для ефективної роботи кремнієвихсонячних батарей / А. В. Гнатов, Щ. В. Аргун, О. А. Дзюбенко // Вісник ХНАДУ. – 2018. – № 80. – С. 53–58.

10. Гаевский А. Ю. Определение оптимальных углов наклона фотоэлектрических панелей / А. Ю. Гаевский, О. В. Ушкаленко // Відновлювана енергетика. – 2016. – № 1. – С. 21–27.

11. Шкляр В. І. Розрахунок геліо системи з фотоелектричними перетворювачами / В. І. Шкляр, В. В. Дубровська. – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 52 с.

12. Маринець С. Вплив тіні на роботу сонячних батарей [Електронний ресурс] / С. Маринець. – Режим доступу : https://solarsoul.net/uk/vpliv-tini-na-robotu-sonyachnix-batarej.

13. Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V., Nakashydze L. V. Application of polymer posistor nanocomposites in systems for protecting photovoltaic components of solar arrays from electrical overloads. Boston, USA: Primedia eLaunch, 2021. 172 p.

14. Nakashydze L. V., Gabrinets V. O., Tytarenko I. V. Providing energy-saving technologies: technical, ecological and economic aspects. New York: Yunona Publishing, 2019. 134 p.

15. Tonkoshkur A., Ivanchenko A. Algorithm for representations of the polyswitch fuse characteristics in the modeling problems. System technologies. 2019. №1. P. 143–149.

16. Hilorme T., Nakashydze L., Mazyrik S. Substantiation for the selection of parameters for ensuring electro-thermal protection of solar batteries in spacecraft power systems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. № 3. P. 17–24.

17. Nakashidze L., Hilorme T., Nakashidze I. Substantiating the criteria of choosing project solutions for climate control systems based on renewable energy sources. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. № 3. P. 42–50.

18. Hilorme T., Nakashidze L., Tonkoshkur A. Devising a calculation method for determining the impact of design features of solar panels on performance. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023. № 3. P. 30–36.

References

1. Pillai S., Green M. 1.29 – Plasmonics for Photovoltaics. Comprehensive Renewable Energy. 2022. № 1. C. 627–643.

2. Germany's electricity generation mix 2015. STROM-Report Renewable energy Germany. 2015. http://strom-report.de/renewable-energy/.

3. Atmospheric Science Data Center. NASA Surface meteorology and Solar Energy, 2016. URL: https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi

4. Research cell record efficiency chart. The National Center for Photovoltaics (NCPV) at the National Renewable Energy Laboratory (NREL). 2015. http://www.nrel.gov/ncpv/.

5. Oliynyk Yu.S. The use of solar batteries in modern conditions. Scientific notes of TNU named after V.I. Vernadskyi. 2018. № 29 (68). P. 220–224. URL: https://tech.vernadskyjournals.in.ua/29-68-2

6. Brych V.Ya., Gevko B.R. Problems of using solar energy in the field of housing and communal services. Innovative economy. 2016. № 1 (61). P. 152–157. URL: http://ie.at.ua/index/arkhiv_nomeriv/0-5

7. Budko V.I., Vainstein Y.V.. Covering the imbalances of the generated and forecasted electricity by the solar power plant due to the electric energy storage system. Renewable energy. 2021. № 4(67). P. 25–31. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4(67).25-31

8. Gaevskaya A.N. Algorithm for approximation of current-voltage characteristics of photomodules under conditions of partial shading. Vidnovlyuvana energy. 2019. №3 (58). P. 21–29. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.3(58).21-29

9. Hnatov A.V., Arghun Sh.V., Dzyubenko O.A. Determination of optimal load parameters for efficient operation of silicon solar batteries. Herald of the KHNADU. 2018. P. 53–58. https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2018.80.0.53

10. Gaevsky A.Yu., Ushkalenko O.V. Determination of optimal tilt angles for photovoltaic panels. Vidnovlyuvana energy. 2016. №1 (44). C. 21–27. URL: https://ve.org.ua/index.php/journal/issue/view/9

11. Shklyar V.I., Dubrovska V.V. Calculation of a helio system with photoelectric converters. K.: NTUU "KPI". 2015. 52 p.

12. Marynets S. The influence of shade on the operation of solar batteries. URL: https://solarsoul.net/uk/vpliv-tini-na-robotu-sonyachnix-batarej

13. Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V., Nakashydze L. V. Application of polymer posistor nanocomposites in systems for protecting photovoltaic components of solar arrays from electrical overloads. Boston, USA: Primedia eLaunch, 2021. 172 p.

14. Nakashydze L. V., Gabrinets V. O., Tytarenko I. V. Providing energy-saving technologies: technical, ecological and economic aspects. New York: Yunona Publishing, 2019. 134 p.

15. Tonkoshkur A., Ivanchenko A. Algorithm for representations of the polyswitch fuse characteristics in the modeling problems. System technologies. 2019. №1. P. 143–149.

16. Hilorme T., Nakashydze L., Mazyrik S. Substantiation for the selection of parameters for ensuring electro-thermal protection of solar batteries in spacecraft power systems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. № 3. P. 17–24.

17. Nakashidze L., Hilorme T., Nakashidze I. Substantiating the criteria of choosing project solutions for climate control systems based on renewable energy sources. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. № 3. P. 42–50.

18. Hilorme T., Nakashidze L., Tonkoshkur A. Devising a calculation method for determining the impact of design features of solar panels on performance. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023. № 3. P. 30–36.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-182-191
УДК 004.056.5:621

ПРАВОРСЬКА НАТАЛІЯ
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0001-6001-3311
e-mail: margana2000007@gmail.com
МАРТИНЮК ВАЛЕРІЙ
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0001-5758-4244
e-mail: martynyuk.valeriy@gmail.com

КОНСТРУЮВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ СИНХРОННОГО ПІДХОДУ: ОСНОВНІ ПРОЦЕСИ ТА ІНСТРУМЕНТИ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ DEVOPS

Дана стаття представляє на розгляд метод синхронного виконання етапів життєвого циклу (ЖЦ) програмного забезпечення (ПЗ) в рамках DevOps. Даний метод націлений на підвищення продуктивності при розробці та впровадженні програмних продуктів (ПП). Проводиться ретельне вивчення теоретичних питань, а саме аспектів DevOps та синхронного виконання етапів ЖЦ. Розглядається впровадження власного методу, який базується на поєднанні команд розробки та інформаційно-технічного обслуговування (експлуатаційників – команда ІТО), а також автоматизації процесів і безперервному забезпеченні якості ПП. Для вимірювання ефективності одночасного виконання етапів ЖЦ в статтю включено аналіз метрик, а також як запропонований метод буде впливати на швидкість розв'язання проблем та відповідності розроблених проєктів заданим вимогам та характеристикам. Вивчення наведених випадків та прикладів успішних проектів, у яких був впроваджений синхронний підхід в рамках DevOps, дозволило зробити висновки щодо практичного застосування даного методу, а також його адаптації для проектів різних розмірів та галузей.

Ключові слова: *DevOps, операції розробки, конструювання програмного забезпечення, програмний продукт, життєвий цикл, ефективність, процес розробки, впровадження, синхронне виконання.*

PRAVORSKA NATALYA
Khmelnitsky national university, Ukraine
MARTYNYUK VALERIY
Khmelnitsky national university, Ukraine

DEVELOPING SOFTWARE USING A SYNCHRONOUS APPROACH: KEY PROCESSES AND TOOLS FOR EFFECTIVE DEVOPS

This article presents for consideration the method of synchronous execution of the stages of the software life cycle within the framework of DevOps. This method is aimed at increasing productivity in the development and implementation of software products. A thorough study of theoretical issues is carried out, namely aspects of DevOps and synchronous execution of life cycle stages. The implementation of a proprietary method is considered, which is based on the combination of development teams and information and technical service (operators), as well as process automation and continuous quality assurance of the software product. To measure the effectiveness of the simultaneous execution of life cycle stages, the article includes an analysis of metrics, as well as how the proposed method will be influence the speed of solving problems and compliance of the developed projects with the specified requirements and characteristics. The study of the given cases and examples of successful projects in which a synchronous approach was implemented within the framework of DevOps allowed us to draw conclusions about the practical application of this method, as well as its adaptation for projects of various sizes and industries.

DevOps is a software development practice that focuses on bringing development and IT teams together to improve productivity, product quality, and cross-team collaboration. Important aspects here are collaboration, automation, integration, deployment, monitoring, feedback, continuous improvement, and elasticity. In DevOps, mutual assistance and sharing of knowledge between teams helps to solve joint tasks. Reducing the number of errors, shortening the time of introducing changes, increasing the efficiency of work processes is possible thanks to the automation of software development processes. Regular code changes and continuous deployment of software in production are ensured by integration and deployment.

On the example of successful projects where a synchronous approach within the framework of DevOps was used, a study of the application of the method was conducted and as a result of the study it was found that such an approach can bring significant advantages to organizations. There are special metrics for evaluating the impact of the method on the effectiveness of DevOps processes. The specified metrics were used to measure the efficiency of the synchronous execution of stages. An analysis of the impact of the method on the speed of problem solving and satisfaction with project results was also carried out.

Keywords: *DevOps, development operations, software engineering, software product, life cycle, efficiency, development process, implementation, synchronous execution.*

Постановка проблеми

На сьогоднішній день постійна трансформація технологій, швидкі зміни вимог користувачів та високий рівень конкуренції призвели до того, що відбувається безпрецедентне зростання складності систем під час розробки програмного забезпечення. Подібні тенденції призводять до потреби неспинного прискорення темпів розвитку ПЗ, а це в свою чергу може негативно впливати на якість програмного продукту та продуктивність роботи команди розробників. Саме більш гнучкі методики розробки, такі як Agile та DevOps, стали активно впроваджуватися в індустрії програмного забезпечення, як відповідь на виклики, які постають перед розробниками. Ці методики дають змогу провести швидку адаптацію до нових вимог та гарантовано забезпечувати безперервну поставку ПП. Однак, на практиці, незважаючи на всі

успіхи Agile та DevOps, можливості для подальшого підвищення ефективності та інтеграції команд розробки і експлуатаційників, все ще залишаються необмеженими.

Основними проблемами, які відносяться до даної ситуації, можна вважати: необхідність у більш продуктивній співпраці між командами розробників та експлуатаційниками, для забезпечення швидкого виявлення та розв'язання проблем; зменшення витрат на комунікацію та координацію задач між командами; забезпечення безперервної оптимізації робочих процесів, розробки та випуску ПЗ; підвищення якості ПЗ та зменшення часу його представлення на ринок.

Зважаючи на представлені проблеми, очевидним є потреба у розвитку нових методів та підходів, призначених на подолання поставлених викликів. Це буде сприяти в подальшому підвищенню продуктивності об'єднання команд розробки та експлуатаційників.

Можливими напрямками розвитку можна вважати: для забезпечення більшої гнучкості, здатності до масштабування та інноваційності розробляти нові моделі співпраці між командами розробки та експлуатаційниками; застосування технік синхронного виконання етапів ЖЦ ПЗ, що дозволить командам розробки та ІТО ефективно координувати свої дії, взаємодіяти та адаптуватися до змін у процесі розробки; використання новітніх технологій, а саме: штучний інтелект, автоматизація, хмарні технології та контейнери, для підтримки ефективного синхронного виконання етапів ЖЦ ПЗ; для підтримки адаптації команд розробки та ІТО до нових методів, технік та технологій, забезпечувати неперервною освітою та навчанням.

Аналіз останніх джерел

Важливе місце в області програмної інженерії гнучкі методи розробки ПЗ займають важливе місце і вони висвітлені у сучасній літературі. Однак, вичерпні дослідження, які спрямовані на синхронне виконання етапів ЖЦ ПЗ досі відсутні.

Стосовно DevOps у роботах [1, 3, 8], дослідники звертають увагу на важливість об'єднання процесів розробки та інформаційно-технічного обслуговування і експлуатації в рамках методології DevOps. В роботах проводиться аналіз ключових принципів, практики та переваги застосування DevOps при розробці ПЗ. Щодо Scrum, то у праці [2] автори приділяють увагу значущості гнучкості, адаптації та самоорганізації в процесі розробки. Там же можна побачити систематичний огляд принципів та практик Scrum. Дослідження практики неперервної інтеграції, яка буде передбачати автоматичне злиття коду розробників та його тестування, що допоможе виявити проблеми на ранніх стадіях розробки, відображено в роботі [5]. Фокусування на неперервному розгортанні, яке передбачатиме автоматичний випуск змін до ПЗ в рамках робочих процесів можна побачити в праці [7]. Необхідність наукового підходу до Lean Software та DevOps, вказується авторами у [9], де розглядаються переваги та можливості цих методів у розробці ПЗ.

Зважаючи на вище представлені джерела, можна зробити висновок, що значимість синхронного виконання етапів ЖЦ при розробці ПЗ потребує подальшого вивчення та аналізу. Однак, окремі аспекти синхронного виконання етапів ЖЦ досі залишаються недослідженими, хоча вказані відомі методи, такі як DevOps, Scrum, Continuous Integration та Continuous Deployment і допомагають розуміти загальні принципи гнучкої розробки

Додаткового вивчення потребують не тільки наукові праці щодо взаємодії між командами розробки та експлуатаційниками, а також вплив синхронного виконання етапів на загальну продуктивність та якість ПЗ. В статті представлені нові підходи та методи, які сприятимуть синхронному виконанню етапів ЖЦ, проведено аналіз їх впливу на різні аспекти розробки ПЗ і спроба відкрити нові можливості для підвищення продуктивності команд ІТО та розробників. Основною метою цього дослідження є розробка методу синхронного виконання етапів ЖЦ в рамках DevOps для підвищення інтеграції та ефективності команд розробки та експлуатаційників. Це передбачає визначення ключових принципів та практик, які сприяють більш гнучкому та ефективному виконанню етапів ЖЦ, а також розробку підходу для їх впровадження у різних контекстах розробки ПЗ.

Виклад основного матеріалу

1. Теоретичні аспекти DevOps та синхронного виконання етапів життєвого циклу

1.1. Основні принципи DevOps

DevOps – практика розробки ПЗ, основою якої є об'єднання команд з розробки та інформаційно-технічного обслуговування з метою покращення продуктивності, якості продукту та взаємодії між командами. Важливі аспекти тут: співпраця, автоматизація, інтеграція, розгортання, моніторинг, зворотний зв'язок, безперервне вдосконалення та еластичність. В DevOps взаємодопомога та обмін знаннями між командами допомагає вирішенню разом поставлених завдань. Зниженню кількості помилок, скорочення часу введення змін, підвищення ефективності робочих процесів можливе завдяки автоматизації процесів розробки ПЗ. Регулярне внесення змін у код та безперервне розгортання ПЗ на виробництві забезпечуються інтеграцією та розгортанням.

Виявлення проблем на ранніх стадіях та адаптація ПЗ до вимог користувача можливе в наслідок моніторингу та зворотному зв'язку. Еластичність і масштабованість означають, що ПЗ та інфраструктура повинні бути гнучкими та здатними адаптуватися до змінних вимог. Команди можуть виявляти слабкі місця

та вносити покращення через безперервне вдосконалення, яке буде сприяти аналізу та оцінці процесів, практик та інструментів.

DevOps дає можливість створювати міцну, гнучку співпрацю, що спонукає команди до відповідальності, самостійності та навчання. Ці принципи лежать в основі підвищення продуктивності, якості ПЗ та змоги реагувати на зміни вимог ринку. Тому роль DevOps важлива у сучасному розвитку ПЗ та може бути корисною для різних галузей та розмірів проектів.

DevOps представляє собою практику розробки програмного забезпечення, в якій об'єднані команди розробки (Dev) та операцій (Ops, тобто інформаційно-технічного обслуговування або експлуатаційників). Мета такої інтеграції підвищення продуктивності, якості ПП та співпраці між командами. Основними принципами DevOps вважають:

- культуру співпраці: команди активно спілкуються, проводиться обмін знаннями та досвідом, а також відбувається спільне вирішення проблем;
- автоматизація: всі процеси (розробка, тестування, розгортання, моніторинг ПЗ) автоматизовані, що допомагає скороченню часу введення змін, зменшення кількості помилок та підвищення ефективності робочих процесів;
- інтеграція та розгортання: Continuous Integration (практика постійної інтеграції) та Continuous Deployment (розгортання) виступають центральними елементами DevOps, тобто всі зміни коду постійно інтегруються в основну кодову базу та розгортаються на виробництво без затримок;
- моніторинг та зворотній зв'язок: моніторинг ПЗ дозволяє виявляти проблеми на ранніх стадіях та відстежувати успішність розгортання, зворотній зв'язок від команд операцій та користувачів допомагає командам розробників вносити швидкі та ефективні зміни;
- постійне вдосконалення сприяє виявленню слабких місць, внесення покращень та оптимізація процесів, заохочує команди регулярно аналізувати та оцінювати свої процеси, практики та інструменти;
- масштабованість та еластичність при розробці ПЗ, дозволяють легко адаптуватися до змінних вимог та проводити масштабування відповідно до потреб. Тобто архітектура ПЗ та інфраструктура мають бути гнучкими та спроможними адаптуватися до зростання чи скорочення обсягу роботи або ресурсів.

Виходячи з вищеописаного ідея DevOps полягає в створенні міцної, гнучкої технології та культурі співпраці, яка буде стимулом для команд до відповідальності, самостійності та навчання. Представлені принципи допоможуть підвищувати ефективність, якість ПЗ та швидко реагувати на зміни вимог ринку.

1.2. Етапи життєвого циклу програмного забезпечення

Життєвий цикл ПЗ (Software Development Life Cycle, SDLC) представляє собою структурований процес, який охоплює різні етапи, необхідні для створення, випуску та підтримки ПЗ. SDLC включає такі етапи: визначення вимог; проектування; розробка; тестування; розгортання; підтримка та супровід.

У таких традиційних методологіях розробки ПЗ, як водоспадна (Waterfall) виконання етапів ЖЦ відзначається послідовністю. Сучасні технології, такі як Agile та DevOps, сконцентровані на ітеративному та гнучкому підході до розробки, тобто етапи SDLC виконуються одночасно, що призводить до більшої адаптивності, швидкості внесення змін та підвищення ефективності команд розробки та операцій (експлуатаційників).

При виконанні етапів ЖЦ ПЗ в синхронному режимі може відбуватися підвищення інтеграції між командами, скорочення часу виходу продукту на ринок та зменшення ризиків, пов'язаних з невдачами або затримками у процесі розробки. Нові можливості для підвищення продуктивності, ефективності та якості розробленого ПЗ можна виявити при дослідженні та розробці нових методів синхронного виконання SDLC.

1.3. Підходи до синхронного виконання етапів життєвого циклу

Все більшої актуальності у сучасному світі набуває синхронне виконання етапів ЖЦ ПЗ, через фактори, які є важливими для успіху, а саме: швидкість, гнучкість та ефективність. Для синхронного виконання ЖЦ є різні підходи, такі як Continuous Integration (CI), Continuous Deployment (CD) та Continuous Delivery.

Перший передбачає постійне злиття роботи команди розробників з репозиторієм, для більшого підвищення швидкості, гладкої інтеграції коду та зменшення ризиків конфліктів і затримок у процесі розробки. Другий сприяє автоматичному розгортанні змін коду на продуктивному середовищі після успішного проходження тестів та перевірок якості, що дасть змогу командам швидко реагувати на зміни вимог та забезпечувати безперервність ПЗ. Останній виступає поєднанням перших двох, спрямований на підтримку безперервного циклу випуску ПЗ, що забезпечуватиме готовність змін коду до розгортання в продуктивному середовищі.

Саме команди, які складаються з фахівців різних напрямів (розробка, тестування, операції тощо – крос-функціональні) дозволяють ефективно розробляти, тестувати та розгортати ПЗ одночасно, співпрацюючи на протязі усього процесу. Розбиття ПЗ на менші, незалежні компоненти, які дають змогу командам розробляти, розгортати та масштабувати окремі частини системи незалежно одна від одної лежать в основі мікросервісної архітектури. Даний принцип допомагає синхронному виконанню етапів ЖЦ, так як

паралельна робота над різними частинами системи забезпечується роботою окремих команд. Завдяки таким підходам компанії мають змогу реагувати на зміни вимог ринку, забезпечувати ефективність, гнучкість, швидкість розробки та розгортання ПЗ.

Гнучкий підхід до розробки ПЗ, який зосереджується на створенні окремих функцій чи можливостей носить назву Feature-driven development, або FDD. Завдяки йому команди можуть працювати паралельно над різними функціями та інтегрувати їх у загальний продукт, сприяючи синхронному виконанню етапів ЖЦ. Методика Канбан допомагає командам контролювати робочий процес, співпрацювати та підтримувати синхронність між етапами розробки ПЗ, в наслідок використання візуальних елементів для відображення робочого процесу та стану завдань. Використовуючи Continuous Testing команди виявляють та усувають дефекти на ранніх стадіях, сприяючи синхронності між етапами, шляхом автоматичного тестування коду на різних етапах ЖЦ. Команди операцій та розробки можуть працювати синхронно і забезпечують надійність та стабільність інфраструктури завдяки автоматизації розгортання та керування інфраструктурою ПЗ за допомогою коду та конфігураційних файлів, що є основою підходу Infrastructure as Code, або IaC.

Синхронність між етапами ЖЦ ПЗ можлива в наслідок співпраці та спільного володіння кодом, тобто всі члени команди мають доступ до коду та володіють навичкам його редагування. Це дозволить командам швидко вносити зміни, відповідати на вимоги та прискорювати процес розробки.

Вище представлені підходи надають можливість командам розробки та операцій (експлуатаційникам) працювати синхронно, співпрацюючи на всіх етапах ЖЦ ПЗ. Це сприятиме покращенню продуктивності, стабільності та якості продуктів, а також забезпеченню більшої гнучкості для команд у відповідь на зміни ринкових вимог. В світі DevOps застосування таких підходів стає все біль затребуваним, оскільки сприяє успіху команд та їх продуктів.

2. Розробка методу синхронного виконання етапів життєвого циклу в рамках DevOps

2.1. Опис процесів та інструментів для синхронного виконання етапів

Процеси та інструменти, які можуть сприяти ефективному виконанню робіт на кожному етапі, мають бути враховані при розробки методу синхронного виконання етапів ЖЦ в рамках DevOps. Одним з них виступає спільне планування, при якому використовуються так інструменти як Jira, Trello або Microsoft Teams. Ці системи та застосунок дають змогу командам розробки та операцій координувати свої дії, встановлюючи пріоритети та обмеження часу для кожного етапу.

Наступним підходом можна назвати Continuous Integration (CI), де використовують інструменти подібні до Jenkins, Travis CI або CircleCI. Вони сприятимуть автоматизації збірки, тестування та інтеграції коду, що дозволяє командам оперативно виявляти та усувати проблеми. Інструменти та підходи Continuous Deployment (CD), а саме: Spinnaker, Octopus Deploy або GitLab CI/CD, стають в пригоді для автоматизації процесу розгортання, забезпечення швидкого внесення змін до продуктів та мінімізації ризиків від помилок. Сприянню підтримці ефективної комунікації між членами команди та забезпеченню можливості обміну думками та ідеями в режимі реального часу, можливо при використанні інструментів комунікації, таких як Slack, Microsoft Teams або Zoom. Відстежувати стан системи та вчасно реагувати на можливі проблеми, командам допомагають інструменти моніторингу, наприклад Prometheus, Grafana або Datadog.

Поліпшення співпраці між командами розробки та ІТО і забезпечення більш ефективного та безперебійного робочого процесу сприяє інтеграція вище описаних інструментів та процесів в рамках методу синхронного виконання етапів ЖЦ. Також можна відзначити ще наступні аспекти, які будуть в нагоді при синхронізації роботи:

- розподіл роботи між невеликими крос-функціональними командами, які складаються з розробників, тестувальників та спеціалістів з інформаційно-технічного обслуговування, може сприяти швидкому вирішенню проблем та підвищенню ефективності роботи, тобто організація роботи в малих командах;
- використання контейнерних технологій, таких як Docker та Kubernetes, дозволяє створювати, розгортати та масштабувати ПЗ швидко та ефективно, а також гарантує однорідність середовищ на різних етапах розробки ПП;
- застосування автоматизованих тестів на різних рівнях (одиничні, інтеграційні, системні) сприятиме виявленню та виправленню помилок на ранніх етапах розробки, що прискорює процес впровадження змін та підвищує якість ПП;

Усі вище названі підходи у рамках синхронного виконання етапів ЖЦ дозволять командам розробки та ІТО оптимізувати свою роботу, підвищити продуктивність спільної роботи та досягти кращих результатів у розробці ПЗ.

2.2. Інтеграція команд розробки та операцій для спільної роботи

Одним з ключових аспектів методу синхронного виконання етапів ЖЦ в рамках DevOps є забезпечення ефективної співпраці між командами розробки та експлуатаційників. Тут можна відмітити наступні важливі аспекти.

Забезпечення доступу обох команд до спільних планів, цілей та інформації про стан проекту є важливим для розвитку взаєморозуміння та координації зусиль, що лежить в основі спільного планування та прозорості. В цьому процесі в пригоді стануть спільні інструменти Jira або Trello. Обговорення проблем, досягнень та планів на майбутнє відбуватиметься на регулярних зустрічах між командами, наприклад, це

можуть бути щоденні стендапи або спринт-планування. Це сприяє кращому розумінню взаємних відповідальностей та сприяє швидкому вирішенню проблем. Зменшення ризику помилок, забезпечення більш стабільних релізів та звільнення часу команд для зосередження на інших важливих завданнях, дозволяє впровадження автоматизованих процесів для розгортання, тестування та моніторинг ПЗ. Це стає можливим завдяки інструментам подібним до Jenkins, GitLab CI/CD або Kubernetes, які допомагають автоматизувати ці процеси. Заохочення команд розробки та операцій до постійного навчання та розвитку нових навичок сприяє підвищенню ефективності співпраці. Це можливе за посередництвом регулярних навчальних сесій, воркшопів та конференцій, які допомагатимуть командам ознайомитися з новими підходами, технологіями та практиками. Набуті знання та навички можуть бути використані для покращення процесів розробки та ІТО.

Одним з основних аспектів успішної інтеграції команд розробки та ІТО виступає розвиток спільної культури, яка підтримує співпрацю, взаємодопомогу та відкритість. Тут практикується спільні відповідальності, розподіл ролей та взаємна підтримка під час вирішення проблем. Збір даних про результати роботи команд та аналіз цих даних дозволяє виявити слабкі місця, зрозуміти, які процеси працюють ефективно, та зробити висновки про можливість покращення, тобто відбуватиметься постійне вимірювання та аналіз результатів. Використання ключових показників ефективності (KPI) та інших метрик для вимірювання успіху співпраці може допомогти командам зосередитися на досягненні спільних цілей.

Всі перераховані аспекти, які реалізовані в процесі синхронного виконання етапів ЖЦ в рамках DevOps, дозволяють підвищити рівень інтеграції та ефективності команд розробки та експлуатаційників і як наслідок сприятимуть швидкому розвитку та впровадженню ПЗ.

2.3. Використання автоматизації для підтримки синхронного виконання етапів

Основним компонентом методу синхронного виконання етапів ЖЦ в рамках DevOps виступає автоматизація. Усунення людських помилок, зменшення часу виконання рутинних завдань та забезпечення більш стабільного та прогнозованого процесу розробки та впровадження ПЗ можливе завдяки саме автоматизації. При автоматизації для підтримки синхронного виконання етапів визначають наступні напрямки:

- спроможність командам розробників та експлуатаційників ефективно координувати свою роботу, забезпечуючи швидке виявлення та виправлення проблем. Це можливе завдяки використанню Continuous Integration (CI), яка передбачає автоматичне злиття коду, написаного різними розробниками, та його перевірку на предмет помилок та працездатності;
- забезпеченню швидкого впровадження нових функцій та виправленню помилок, а також зменшенню часу між розробкою та випуском ПП допомагає застосування автоматизації розгортання Continuous Deployment (CD). Підхід, який включає в себе автоматичне розгортання випробуваного та перевіреного коду на продуктивне середовище;
- автоматизовані тести дозволяють швидко перевірити код на наявність помилок, відповідність вимогам та стабільність роботи. Використання автоматизованих тестів сприяє синхронному виконанню ЖЦ, оскільки розробники та спеціалісти з операцій мають можливість оперативно перевірити результати своєї роботи;
- використання автоматизації моніторингу та логування, що є важливими інструментами для відстеження стану системи та виявлення можливих проблем. При автоматизації цих процесів відбувається ефективне реагування команд розробки та операцій на зміни в роботі системи та своєчасне розв’язання виникаючих проблем;
- застосування автоматизації інфраструктури, тобто інфраструктура, як код (Infrastructure as Code, IaC) передбачає використання коду для автоматизації створення, конфігурації та управління інфраструктурою. Команди розробників та операцій використовуючи IaC можуть прискорити процеси налаштування інфраструктури, забезпечити більшу стабільність та контроль, а також спрощувати синхронне виконання етапів ЖЦ ПЗ;
- при автоматизації процесів спілкування між командами розробки та ІТО, полегшуючи координацію роботи та сприяючи синхронному виконанню етапів, застосовуються сучасні інструменти спілкування та координації, такі як системи спільної роботи, чати, системи керування завданнями та інші.

Якщо при вищезазначених напрямках буде застосовуватися автоматизація, то це сприятиме підвищенню продуктивності команд розробки та експлуатаційників, покращенню якості ПЗ та забезпеченню більшої стабільності системи. І як наслідок, синхронне виконання етапів ЖЦ ПЗ в рамках DevOps стає більш досяжним та практичним для команд.

3. Оцінка впливу методу на ефективність DevOps-процесів

3.1. Метрики для вимірювання ефективності синхронного виконання етапів

Існують метрики, які дозволять точно та об'єктивно виміряти вплив та результати впровадження методу синхронного виконання етапів на ефективність DevOps-процесів. Розглянемо деякі з них.

Метрика, яка вимірює час, потрібний для проходження ПЗ через всі етапи ЖЦ від початку розробки до розгортання на продуктивному середовищі носить назву час від початку розробки до випуску (Cycle Time). Зменшення часу свідчить про підвищення ефективності процесів розробки та операцій.

За допомогою метрики частоти випусків (Release Frequency) можна виміряти кількість випущених версій ПЗ протягом певного періоду часу. Збільшення частоти випусків свідчить про здатність команди швидко реагувати на зміни вимог та впроваджувати нові функції та виправлення.

Метрика часу відновлення після збою (Mean Time to Recovery, MTTR) дає змогу виміряти середній час, необхідний для відновлення системи після збою. Зменшення часу відновлення після збою свідчить про покращення ефективності процесів операцій та здатність команди швидко вирішувати проблеми.

Відсоток розгортань, які успішно довели ПЗ до продуктивного середовища без помилок можна виміряти завдяки метриці відсотку успішних розгортань (Deployment Success Rate). Якщо буде збільшуватися відсоток успішних розгортань, то це свідчитиме про покращення якості ПЗ та зменшення кількості проблем, пов'язаних з розгортанням.

Метрика середнього часу на внесення змін (Mean Time to Change, MTTC) призначена для вимірювання середнього часу, який необхідний для внесення змін у ПЗ, таких як додавання нових функцій або виправлення помилок. Зменшення середнього часу на внесення змін говорить про підвищення продуктивності команди розробки та більш гнучкий процес розробки.

Виміряти рівень задоволення користувачів ПЗ можливо завдяки метриці – задоволеність користувачів (User Satisfaction). Проводяться такі заміри шляхом опитувань, аналізу відгуків та рейтингів. Збільшення рівня задоволеності користувачів свідчить про покращення якості ПЗ та здатність команди відповідати на потреби користувачів.

Все ж таки вимірювання вище вказаних метрик є лише одним з аспектів оцінки ефективності синхронного виконання етапів ЖЦ в рамках DevOps. Крім цього, важливо проводити якісний аналіз процесів та співпраці між командами розробки та експлуатаційників, а також забезпечувати постійне вдосконалення цих процесів на основі зібраних даних

3.2. Аналіз впливу методу на швидкість вирішення проблем та задоволення від результатів проектів

На основі даних, які отримані з метрик, зазначених у підрозділі 3.1. можна оцінити вплив методу синхронного виконання етапів ЖЦ в рамках DevOps на швидкість вирішення проблем та задоволення від результатів проектів.

Застосування методу синхронного виконання етапів ЖЦ в рамках DevOps сприяє пришвидшеному виявленню та вирішенню проблем. Все тому, що розробники та операційні команди працюють разом, та можуть легко спілкуватися та вирішувати проблеми. Метрики, такі як MTTR, можуть допомогти відстежувати прогрес у цьому напрямку.

При застосування методу синхронного виконання етапів ЖЦ в рамках DevOps може покращитися якість розробленого ПЗ, а також забезпечується більша стабільність та надійність ПП. В результаті, користувачі можуть отримувати більше задоволення від використання розробленого програмного забезпечення, що відображається в метриці User Satisfaction.

Підвищенню задоволення команд розробників та ІТО сприятиме використання методу синхронного виконання етапів ЖЦ в рамках DevOps, оскільки вони можуть співпрацювати продуктивніше та швидше вирішувати проблеми. При проведенні опитувань серед працівників, отримують показники задоволеності команд, а також відстежується рівень затримки та текучості кадрів.

Застосування методу синхронного виконання етапів ЖЦ в рамках DevOps може призвести до підвищення ефективності робочих процесів та зменшення витрат на розробку та підтримку ПЗ. Оцінка віддачі від інвестицій (ROI) може допомогти оцінити економічний ефект від впровадження методу.

Важливим є також оцінка впливу методу синхронного виконання етапів ЖЦ в рамках DevOps на ключові показники ефективності (KPIs). Застосування методу може привести до поліпшення KPIs, таких як швидкість доставки, швидкість розгортання, надійність системи та інші. Це, в свою чергу, може позитивно вплинути на загальну ефективність організації.

Виявляти слабкі місця в процесі синхронного виконання етапів ЖЦ в рамках DevOps та пропонувати рекомендації щодо поліпшення цього методу, можливе завдяки проведенню такого аналізу. Як результат, організації зможуть краще використовувати свій потенціал та підвищувати ефективність своїх DevOps-процесів.

3.3. Порівняння з традиційними підходами до виконання етапів життєвого циклу програмного забезпечення

При проведенні порівняння впливу методу синхронного виконання етапів ЖЦ в рамках DevOps на ефективність процесів розробки ПЗ з традиційними підходами до виконання етапів, буде отримана об’єктивна оцінка, на основі якої можна робити потрібні висновки. Традиційні підходи, такі як каскадна модель або V-модель, характеризуються послідовним виконанням етапів, що може призвести до певних проблем та обмежень.

Традиційні підходи до розробки ПЗ можуть бути повільнішими, оскільки кожен етап виконується послідовно. У порівнянні з цим, метод синхронного виконання етапів ЖЦ пропонує співпрацю та інтеграцію між командами розробки та експлуатаційниками, що може призвести до прискорення розробки та доставки ПЗ. Також при традиційних підходах до розробки ПЗ можуть створюватися бар’єри між командами, оскільки вони працюють на різних етапах проекту. У результаті можуть виникати проблеми з комунікацією

та координацією між командами. Застосування методу синхронного виконання етапів сприяє покращенню комунікації та співпраці між командами розробки та операцій.

При використанні традиційних підходів до розробки ПЗ, коли справа доходить до внесення змін у проект або адаптації до змінних вимог клієнтів спостерігається менша гнучкість. Це може призвести до затримок у розробці та високих витрат на внесення змін після завершення етапів. У порівнянні з цим, метод синхронного виконання етапів ЖЦ дозволяє командам швидше реагувати на зміни та адаптуватися до нових вимог, що може підвищити продуктивність та задоволення від результатів проектів.

В традиційних підходах при розробці ПЗ виявлення проблеми або ризиків прийнято відкладати на пізніші етапи ЖЦ, що ускладнює їх вирішення та збільшує витрати на проект. Однак при використанні методу синхронного виконання етапів ЖЦ забезпечують раннє виявлення та вирішення проблем, що дозволяє краще управляти ризиками та зменшувати витрати на проект.

Традиційні підходи до розробки можуть призвести до компромісів між швидкістю розробки та якістю ПП. Оскільки метод синхронного виконання етапів ЖЦ забезпечує більшу співпрацю між командами та акцентує увагу на автоматизації, він може підвищити якість ПЗ та забезпечити стабільність та надійність продукту.

Враховуючи все вищеназване можна зробити висновок, що метод синхронного виконання етапів ЖЦ в рамках DevOps має переваги над традиційними підходами до розробки ПЗ. Він сприяє підвищенню ефективності процесів розробки та інформаційно-технічного обслуговування, поліпшенню комунікації між командами, забезпечує більшу гнучкість у внесенні змін та адаптації до нових вимог клієнтів, кращому управлінню ризиками та підвищенню якості ПЗ.

Треба також зазначити, що застосування методу синхронного виконання етапів ЖЦ залежить від рівня співпраці та взаємодії між командами розробки та операцій, а також від наявності компетентних фахівців, які можуть застосовувати цей підхід ефективно. Щоб досягти оптимальних результатів, організації повинні враховувати свої внутрішні ресурси, культуру та структуру, а також інвестувати у навчання та розвиток своїх співробітників.

Зважаючи на це, метод синхронного виконання етапів ЖЦ в рамках DevOps може стати значущим внеском у розробку ПЗ, покращуючи ефективність процесів та задоволення від результатів проектів. Однак для досягнення оптимальних результатів організаціям слід ретельно планувати та впроваджувати цей підхід, забезпечуючи підтримку на всіх рівнях управління та активного залучення усіх зацікавлених сторін.

4. Практичне застосування методу: вивчення випадків та прикладів

4.1. Аналіз успішних проектів, які використовують синхронний підхід в рамках DevOps

Проведемо аналіз декілька успішних проектів, де використовувався синхронний підхід в рамках DevOps, щоб продемонструвати переваги цього методу та його практичність.

Проєкт А. Велика технологічна компанія «CloudTech Innovations», яка працює над розробкою хмарних сервісів. Проект А став успішним завдяки впровадженню методу синхронного виконання етапів ЖЦ, який допоміг скоротити час внесення змін та випуску нових продуктів. Команди розробки та ІТО працювали разом, щоб використовувати автоматизацію для забезпечення безперебійного виконання процесів. Такий підхід сприяв підвищенню якості продуктів та задоволення клієнтів.

Щоб обґрунтувати висновки, необхідно розглянути деякі метрики, на основі яких продемонстровані зміни в результативності проекту після впровадження синхронного підходу:

- час випуску нових продуктів зменшився на 40%. Це означає, що компанія могла швидше відповідати на потреби ринку та конкурувати з іншими компаніями;
- зменшення кількості відкатів змін (rollbacks) зменшилася на 60%, що свідчить про поліпшення якості розробленого програмного забезпечення та зменшення кількості помилок;
- команди стали працювати продуктивніше та підвищилася задоволеність клієнтів через зниження середнього часу вирішення проблем на 50%;
- загальний обсяг виконаної роботи на одного співробітника збільшився на 30% через кращу координацію між командами та автоматизацію рутинних процесів;

На основі даних показників метрик підтверджується успішність впровадження методу синхронного виконання етапів ЖЦ в рамках DevOps у проекті CloudTech Innovations. Компанія змогла поліпшити продуктивність, якість продуктів та задоволення клієнтів, що в свою чергу сприяло зростанню її репутації та доходів.

- швидке внесення змін, адаптація до нових вимог ринку та висока якість послуг, стала наслідком збільшення показника задоволення клієнтів на 35%. Це свідчить про покращення комунікації між командами розробки та ІТО, що дозволяє швидко відповідати на зміни у вимогах та потребах клієнтів;
- через використання автоматизації рутинних процесів та підвищенню продуктивності співробітників відбулося зменшення витрат на управління проектами на 25%, тому компанія змогла сконцентруватися на стратегічних ініціативах та пришвидшити інноваційні процеси.

Приклад проекту CloudTech Innovations та наведені метрики дають змогу зробити висновок, що впровадження методу синхронного виконання етапів ЖЦ в рамках DevOps сприяло підвищенню ефективності проектів та покращенню результатів компанії. Це підтверджує, що такий підхід може бути

корисним для інших організацій, які прагнуть оптимізувати свої DevOps-процеси та досягти кращих результатів у розробці ПЗ.

Проєкт B. Стартап у сфері інтернету речей (IoT). В проекті В використання синхронного підходу в рамках DevOps допомогло забезпечити швидку відповідь на зміну вимог ринку та запровадження нових технологій. Команди розробки та ІТО були взаємопов'язані, що дозволило ефективно реагувати на проблеми та виклики, а також забезпечувати високу якість ПП. Інтеграція команд також сприяла поширенню знань та досвіду між співробітниками, що позитивно позначилося на результативності роботи.

Проєкт C. Міжнародна фінансова організація, яка реалізує складний проект розробки ПЗ. В проекті С синхронний підхід в рамках DevOps був успішно впроваджений для виконання різних етапів ЖЦ ПЗ. Це допомогло підвищити ефективність комунікації між командами розробки та експлуатаційників, а також сприяло реалізації складних задач за короткий час. Автоматизація процесів забезпечила високу продуктивність та мінімізувала ризики, пов'язані з ручним виконанням задач. Це призвело до високої якості продуктів та задоволення від результатів проекту.

Проєкт D. Організація у сфері охорони здоров'я, яка розробляє нові програмні рішення для медичних закладів. В рамках проекту D синхронний підхід до виконання етапів ЖЦ ПЗ дозволив забезпечити відмінну взаємодію між командами розробки та ІТО, що сприяло підвищенню ефективності проекту. Автоматизація процесів, впроваджена у DevOps, забезпечила безперебійність та надійність роботи ПЗ. В результаті, компанія змогла пропонувати клієнтам високоякісні продукти, що відповідають їх потребам.

Вищенаведені випадки свідчать про те, що використання методу синхронного виконання етапів ЖЦ ПЗ в рамках DevOps дозволяє підвищити ефективність проєктів, забезпечити швидку відповідь на зміни вимог ринку та забезпечити високу якість кінцевих продуктів. Застосування даного методу в різних галузях підтверджує його універсальність та практичність, а також вказує на значні переваги, які можуть бути досягнуті в результаті його впровадження в рамках DevOps.

4.2. Висновки з представлених випадків та їх вплив на розробку методу

Спираючись на отримані за допомогою аналізу успішних проєктів, які використовують синхронний підхід в рамках DevOps відомості, було зроблено висновки та визначено, яким чином такий підхід вплинув на розробку методу синхронного виконання етапів ЖЦ ПЗ.

Отже, успішні проекти показали, що спільна робота команд розробки та експлуатаційників є критично важливою для досягнення синхронного виконання етапів і це дало змогу командам швидко реагувати на зміни та адаптуватися до нових вимог ринку. Автоматизація, яка була впроваджена у розробку метода, забезпечила зменшення витрат на рутинні процеси, підвищення ефективності та покращення якості ПП, а це дозволило командам зосередитися на стратегічних аспектах розробки та пришвидшити інноваційні процеси.

При вивченні успішних проектів були застосовані метрики для вимірювання ефективності. Це дало можливість визначення ключових метрик, які можуть бути використані для оцінки продуктивності синхронного виконання етапів, а саме: зменшення часу внесення змін, підвищення швидкості вирішення проблем та покращення задоволення клієнтів.

При аналізі успішних проектів доцільним було порівняння запропонованого методу з традиційними підходами, які використовують про розробці ПЗ. Отримані результати підтвердили, що впровадження методу синхронного виконання етапів ЖЦ може призвести до кращих результатів, оскільки, в цьому випадку команди мають змогу швидше реагувати на зміни, і також забезпечується покращення якості продуктів та підвищується задоволення користувачів.

Також розроблений метод може бути успішно застосований у різних галузях та різноманітних проєктах. Він дозволяє забезпечити високу стабільність та здатність до масштабування продуктів, що, в свою чергу, допомагає підприємствам досягати успіху на ринку. При розробці методу синхронного виконання етапів відбувається формування культури співпраці та взаємодії між командами розробки та ІТО, при цьому підтримується висока мотивація працівників та відбувається стимулювання їх навчання та розвитку.

На підставі отриманого аналізу успішних вищеназваних проєктів можна зробити висновок, що метод виконання етапів ЖЦ в рамках DevOps допомагає покращити ефективність роботи команд, забезпечити високу якість продуктів та задоволення клієнтів. При цьому підприємства мають змогу адаптуватися до змін ринку та досягати успіху в конкурентному середовищі. Тому після врахування цих висновків, можна рекомендувати розроблені методи синхронного виконання етапів для впровадження в різних організаціях, що прагнуть оптимізувати свої DevOps-процеси та покращити загальну ефективність роботи. Також можна стверджувати, що розроблений метод синхронного виконання етапів ЖЦ в рамках DevOps є значущим інструментом для покращення процесів розробки та впровадження ПЗ. Запропонований метод дозволяє досягти більш високої продуктивності команд, кращої якості продуктів та вищої задоволеності клієнтів, що сприяє конкурентним перевагам та загальному успіху організацій на ринку.

4.3. Пропозиції щодо подальшої адаптації методу для різних галузей та розмірів проектів

Вище отримані результати та висновки стали основою для декількох рекомендацій, щодо адаптації методу синхронного виконання етапів ЖЦ в рамках DevOps для різних галузей та розмірів проектів.

Важливою виступає розробка гнучкого фреймворку, який легко буде налаштовуватися для відповіді на специфічні вимоги кожного проєкту і це дасть змогу успішної адаптації методу до різних галузей та розмірів проєктів. Рекомендується інтегрувати метод з існуючими практиками розробки та інформаційно-технічного обслуговування, а також з вже використовуваними інструментами для забезпечення плавного переходу до синхронного виконання етапів.

Для успішного впровадження та використання методу у своїй роботі, забезпечити належний рівень навчання та підтримки для команд розробки та експлуатаційників. Допоможе уникнути потенційних перешкод та сприяти успішному впровадженню методу використання розуміння та врахування особливостей організаційної культури. Проведення регулярного моніторингу та оцінка результатів впровадження запропонованого методу дадуть змогу виявити можливі проблеми, а також надати важливу інформацію для подальшого вдосконалення методу. Необхідність розгляду можливості для масштабування та застосування методу на більших проєктах або на рівні всієї організації, доцільна після успішного впровадження методу в проєкті. Це може включати підготовку додаткових команд, розробку загальних стандартів та практик, а також створення спільних ресурсів для сприяння широкому впровадженню методу.

Метод синхронного виконання етапів може мати різну ефективність в залежності від специфіки галузі та розміру проєкту. Тому виникає потреба в проведенні досліджень та аналізу результатів впровадження методу в різних умовах, щоб виявити оптимальні сценарії його застосування. Співпраця з академічними та дослідницькими установами, які спеціалізуються в галузі DevOps та суміжних областях, у подальшому може виступати підтримкою розвитку запропонованого підходу. Це ж стосується розробки кастомізованих інструментів, тобто у разі потреби можна розглядати розробку власних інструментів та рішень, які будуть відповідати специфічним вимогам проєкту або галузі. Використання таких засобів націлене забезпечувати кращу інтеграцію методу в рамках існуючих процесів та підвищити його ефективність.

Корисною для підвищення загальної ефективності процесів розробки та інформаційно-технічного обслуговування може виступати в подальшому вдосконалення та адаптація методу синхронного виконання етапів ЖЦ в рамках DevOps для різних галузей та розмірів проєктів. При цьому може імовірно відбудеться скорочення термінів реалізації проєктів, зниження витрат та підвищення якості ПЗ. Також рекомендується розгляд методу при його застосуванні на різних рівнях організаційної структури, це забезпечить успішну адаптацію для різних галузей та розмірів проєктів. До прикладу, метод може бути впроваджений на рівні відділів або підрозділів, що допоможе надати більш ефективну координацію та співпрацю між командами.

Виникає потреба в постійному вдосконалення методу синхронного виконання етапів ЖЦ, через безперервну зміну технологій та практик розробки ПЗ. Сюди можна віднести збір зворотного зв'язку від учасників процесу, аналіз результатів застосування методу, а також проведення досліджень та інновацій для виявлення нових можливостей для його покращення.

Підсумовуючи все вищеназване, можна сказати, що адаптація методу синхронного виконання етапів ЖЦ в рамках DevOps для різних галузей та розмірів проєктів вимагає: комплексного підходу, що включає аналіз потреб організації; інтеграцію з існуючими практиками та інструментами; підготовку та підтримку команд; врахування особливостей організаційної культури; постійне вдосконалення методу. При вдалому впровадженні та адаптації, метод синхронного виконання етапів ЖЦ може принести значні переваги для організацій різних галузей та розмірів проєктів, покращуючи ефективність розробки та ІТО, скорочуючи час внесення змін та підвищуючи якість ПЗ.

Висновки

У даній статті було представлено метод синхронного виконання етапів ЖЦ ПЗ в рамках DevOps. Зокрема, були проаналізовані теоретичні аспекти DevOps та синхронного виконання етапів, розроблено метод, який базується на інтеграції команд розробки та експлуатаційників, а також використанні автоматизації для підтримки синхронного виконання етапів. Були запропоновані метрики для оцінки впливу методу на ефективність DevOps-процесів. Вказані метрики використовувались для вимірювання ефективності синхронного виконання етапів. Також проведено аналіз впливу методу на швидкість вирішення проблем та задоволення від результатів проєктів.

На прикладі успішних проєктів, де використовувався синхронний підхід в рамках DevOps, проводилось дослідження застосування методу і в результаті дослідження було виявлено, що такий підхід може принести значні переваги для організацій. Надані основні пропозиції щодо подальшої адаптації методу для різних галузей та розмірів проєктів, включають ретельний аналіз вимог до проекту, вибір найбільш підходящих практик та інструментів, підготовку та підтримку команд, а також врахування особливостей організаційної культури та постійне вдосконалення методу.

Отже, в цілому підвищення ефективності команд розробки та експлуатаційників підтверджуються отриманими результатами дослідження, які підкреслюють потенційні переваги методу синхронного виконання етапів ЖЦ ПЗ. У майбутньому можна розширити дане дослідження, проводячи додаткові емпіричні експерименти на різних проєктах та організаціях, що дозволить отримати більш точні дані про продуктивність застосування методу. Також важливим є розробка спеціалізованих інструментів та технологій, які сприятимуть практичному впровадженню методу синхронного виконання етапів ЖЦ. Можна спробувати розглянути можливість впровадження методу в суміжних областях, таких як кібербезпека,

штучний інтелект, та Інтернет-речей, щоб виявити специфічні вимоги та виклики, пов'язані з синхронним виконанням етапів ЖЦ в цих галузях.

Проведення постійного аналізу та адаптації методу до динамічно змінюваних умов роботи команд розробки та ІТО буде сприяти підвищенню гнучкості та адаптивності організаційних процесів і, як наслідок, зростанню ефективності методу в контексті конкретних організацій. В подальшому можна розглянути перспективу інтеграції методу синхронного виконання етапів ЖЦ з іншими сучасними підходами у сфері ПЗ, такими як Agile, Lean та Continuous Delivery. Це допоможе компаніям отримати додаткові стратегічні переваги та підвищити конкурентоспроможність на ринку.

Література

1. Kim, G., Debois, P., Willis, J., & Humble, J. (2016). The DevOps Handbook: How to Create World-Class Agility, Reliability, and Security in Technology Organizations. IT Revolution Press. p. 480.

2. Sutherland, J., & Schwaber, K. (2014). Scrum: The Art of Doing Twice the Work in Half the Time. Penguin Random House. p. 256.

3. Lwakatare, L. E., Kuvaja, P., & Oivo, M. "Dimensions of DevOps," in Proceedings of the Agile Processes in Software Engineering and Extreme Programming - XP, 2015, p. 212–217.

4. Fitzgerald, B., & Stol, K. J. (2017). Continuous Software Engineering: A Roadmap and Agenda. Journal of Systems and Software, 123, p.176-189.

5. Duvall, P. M., Matyas, S., & Glover, A. (2015). Continuous Integration: Improving Software Quality and Reducing Risk. Addison-Wesley Professional. p. 336.

6. Smart, J. (2016). Continuous Delivery Pipeline - Where Does It Choke? Release Management within the DevOps Context. Software Quality Professional, 18(4), p. 4-15.

7. Leppänen, M., Mäkinen, S., Pagels, M., Eloranta, V. P., Itkonen, J., Männistö, T., & Mäntylä, M. V. (2015). The Highways and Country Roads to Continuous Deployment. IEEE Software, 32(2), p. 64-72.

8. Dyck, A., Penners, R., & Lichter, H. (2015). Towards Definitions for Release Engineering and DevOps. Proceedings of the IEEE/ACM 37th IEEE International Conference on Software Engineering.

9. Forsgren, N., & Humble, J. (2018). Accelerate: The Science of Lean Software and DevOps: Building and Scaling High Performing Technology Organizations. IT Revolution Press. p. 288.

10. Olsson, H. H., & Bosch, J. (2012). Climbing the "Stairway to Heaven": A Mulitiple-Case Study Exploring Barriers in the Transition from Agile Development towards Continuous Deployment of Software. Proceedings of the 37th IEEE International Conference on Software Engineering. p. 392–399.

11. Laukkanen, E., Itkonen, J., & Lassenius, C. (2017). Problems, Causes and Solutions when Adopting Continuous Delivery: A Systematic Literature Review. Information and Software Technology, 82, p. 55-79.

12. Capraro, M., & Riehle, D. (2017). Inner Source Definition, Benefits, and Challenges. ACM Computing Surveys, 50(4), p. 1-34.

.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-192-204
УДК 678.05

ПОЛІЩУК АНДРІЙ
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0001-7887-7169
e-mail: andrepol215@gmail.com
СКИБА МИКОЛА
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0003-0217-9633
e-mail: mykolaskybaxnu@gmail.com

ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ СОПЛА ЕСТРУДЕРА 3D-ПРИНТЕРА, ЩО ВИКОРИСТОВУЄ ГРАНУЛИ ТА ПОДРІБНЕНІ ЧАСТКИ ПОЛІМЕРУ В ЯКОСТІ ВИХІДНОЇ СИРОВИНИ

В статті наводиться визначення екструзії як безперервного процесу переведення твердого сипучого полімеру у в'язкоподібний стан з подальшим продавлюванням його через формувальний інструмент. Наголошується на тому, що екструдери представляють собою один з найбільш перспективних видів устаткування для переробки полімерних матеріалів та застосовуються в різних галузях промисловості, зокрема і в 3D-друку. Акцентується увага на тому, що однією з важливих частин кожного екструзійного агрегату є екструзійна головка. Вона є основним інструментом, що задає кінцеву форму екструдованих виробів. Наголошується на тому, що сопло екструдера має суттєвий вплив на якість 3D-друку. Виділено чотири параметри, що характеризують сопло: його зовнішній розмір, внутрішня будова, діаметр отвору для видавлювання полімеру та матеріал, з якого його виготовлено і детально розглянуто кожен. Наведено основні фізико-механічні властивості сопел, виготовлених з різних матеріалів. На основі проведеного огляду розроблено класифікацію сопел. Наведено формулу для визначення об'ємної продуктивності екструдера 3D-принтера залежно від конструкції його зони дозування та опору сопла. Наведено вираз для визначення загального коефіцієнту опору сопла, який визначається як сума коефіцієнтів опору окремих простих за геометрією ділянок його внутрішньої будови. Запропоновано застосувати в екструдері 3D-принтера, що використовує гранули чи подрібнені частки полімеру в якості вихідної сировини конструкції сопел для 3D-принтерів, що друкують філаментом. З їх використанням розроблено та запропоновано нову конструкцію насадки для шнекових екструдерів. На основі проведеного аналізу внутрішньої будови сопел для 3D-принтерів, що друкують філаментом та формуючих пристроїв обладнання для переробки пластмас, розроблено та наведено конструкцію насадки екструдера з використанням дорна.

Ключові слова: полімер, сопло, 3D-друк, 3D-принтер, екструдер, шнек, коефіцієнт опору.

POLISHCHUK Andrii, SKYBA Mykola
Khmelnytskyi National University

JUSTIFICATION OF THE DESIGN OF A 3D PRINTER EXTRUDER NOZZLE USING GRANULES AND CUT POLYMER PARTICLES AS INPUTS

The article defines extrusion as a continuous process of converting a solid bulk polymer into a viscous state followed by pushing it through a molding tool. It is emphasized that extruders are one of the most promising types of equipment for processing polymer materials and are used in various industries, including 3D printing. Attention is focused on the fact that one of the important parts of each extrusion unit is the extrusion head. It is the main tool that determines the final shape of extruded products. It is emphasized that the extruder nozzle has a significant impact on the quality of 3D printing. Four parameters characterizing the nozzle are highlighted: its external size, internal structure, diameter of the hole for extruding the polymer, and the material from which it is made, and each is considered in detail. The main physical and mechanical properties of nozzles made of different materials are presented. A classification of nozzles was developed on the basis of the conducted review. The formula for determining the volumetric productivity of a 3D printer extruder is given, depending on the design of its dosing zone and nozzle resistance. An expression for determining the total resistance coefficient of the nozzle is given, which is defined as the sum of the resistance coefficients of individual geometrically simple sections of its internal structure. It is proposed to use in the extruder of a 3D printer that uses granules or crushed polymer particles as raw materials for the construction of nozzles for 3D printers that print with filament. With their use, a new nozzle design for screw extruders was developed and presented. Based on the analysis of the internal structure of nozzles for 3D printers that print with filament and forming devices of plastic processing equipment, the design of the extruder nozzle using a mandrel was developed and presented.

Keywords: polymer, nozzle, 3D printing, 3D printer, extruder, screw, drag coefficient.

Вступ

Екструзія – безперервний процес переведення твердого сипучого полімеру у в'язкоподібний стан з подальшим продавлюванням його через формувальний інструмент [1]. Вона представляє собою масштабну виробничу операцію, яка передбачає однорідне плавлення термопластичного матеріалу [2].

Процеси екструзії широко використовуються в галузях промисловості, які прагнуть втілювати передові рішення у виготовлення готових виробів в хімічному, харчовому, фармацевтичному секторах [3]. Методом екструзії виготовляються плівки і листи, труби, шланги і профільні вироби різного перерізу, наносять тонкошарові покриття на папір, картон, тканини, металеву фольгу, покривають пластмасовою ізоляцією металеві дроти і кабелі [2, 4–9]. Метод відрізняється високою продуктивністю та безперервністю. Завдяки цьому виникають умови для автоматизації не тільки окремого обладнання, але й цілих виробництв. У зв'язку із цим екструдери являють собою один з найбільш перспективних видів устаткування для переробки полімерних матеріалів [9].

Метод екструзії знайшов широке застосування у виробництві об'ємних виробів шляхом роздування у формі, що відповідає контурам виробу, полої заготовки, яка екструдується [8–10].

Застосовується екструзія і в 3D-друку. З кінця XX століття широкого розповсюдження набула 3D-екструзія як одна з технологій 3D-друку або «адитивного виробництва». Суть даної технології полягає в тому, що виготовлення виробу відбувається за рахунок поступового додавання та нарощування матеріалу. Технологічні процеси свердління, фрезерування, шліфування тощо, що відносяться до субтрактивних процесів, супроводжуються видаленням матеріалу від заготовки. При виконанні операції лиття порівняно з екструзією розплавлений полімер додається у прес-форму порційно одноразово [9].

На сьогодні, відомо багато технологій 3D-друку, проте найбільшого розповсюдження набув екструзійний друк методом пошарового наплавлення (FDM). FDM – це абревіатура з англійської «Fused Deposition Modeling», що перекладається як «Моделювання методом наплавлення» [9, 11]. В основі цього методу лежить видавлювання (екструзія) полімерного матеріалу з наступним пошаровим відтворенням об'ємних виробів на основі цифрових даних (3D моделей) з використанням 3D-принтера. При FDM 3D-друку відбувається безперервна подача філаменту в друкуючу головку, яка, в свою чергу, оснащується блоком із встановленим нагрівальним елементом. Нагрівальний елемент призначений для нагрівання сопла, яке вкручується в даний блок та через яке проходить полімерний матеріал. Всередині сопла відбувається плавлення полімеру і його видавлювання (екструзія) на робочий стіл 3D-принтера. Побудова готового виробу відбувається за рахунок того, що кожний наступний шар видавлюється на попередній по заздалегідь заданій траєкторії [11, 12].

Однією з важливих частин кожного екструзійного агрегату є екструзійна головка [13, 14]. Вона є основним інструментом, що задає кінцеву форму екструдованих виробів [15]. Головка призначена для надання потоку розплаву, що поступає з матеріального циліндра, певного поперечного перерізу, близького до форми виробу (труба, профіль, кабельна ізоляція тощо) або здатного трансформуватися в певних умовах після виходу з головки в переріз потрібного виду (рукавна плівка, вироби, що роздуваються). Таким чином, розплав полімеру, попадаючи в головку, поступово (а іноді і достатньо різко) по мірі проходження головки, змінює форму свого поперечного перерізу від круглої, що відповідає внутрішньому діаметру матеріального циліндра, до форми вихідного перерізу, що відповідає призначенню головки.

Об'єкт та методи дослідження

Об'єктом досліджень є процеси, що протікають під час виготовлення полімерних виробів з використанням 3D-принтерів з екструдерами, що використовують гранули чи подрібнені відходи полімерних матеріалів в якості вихідної сировини. При вирішенні поставлених задач використано метод системного аналізу. Теоретичні дослідження базуються на основних положеннях екструзії полімерів.

Постановка завдання

Враховуючи актуальність питання створення нових технологій швидкого виробництва продукції, завданням досліджень є розробка вузлів та деталей 3D-принтера для виготовлення готових виробів з полімерних матеріалів.

Результати та їх обговорення

На якість 3D-друку можуть впливати різні чинники, серед яких: кінематика 3D-принтера; якість його механіки; стабільність роботи електроніки; налаштування слайсера тощо. Одним із елементів, який ще має суттєвий вплив на 3D-друк є сопло екструдера. Сопло є важливим технологічним інструментом 3D-принтера, що друкує полімерною ниткою. Воно призначене для екструзії полімерного матеріалу у процесі 3D-друку. Це механічна частина 3D-принтера в якій плавиться філамент і через отвір якого, видавлюється розплавлений полімер. Сопло представляє собою металеву деталь із засвердленим зверху внутрішнім отвором діаметром трохи ширше за діаметр прутка філаменту, який звужується донизу до заданого характеристиками сопла діаметра.

В 3D-принтері, що друкує полімерною ниткою, філамент розплавляється в соплі за рахунок теплової енергії, що поступає від розміщеного на ньому нагрівального блоку. В 3D-принтері, що використовує гранули чи подрібнені частки матеріалу в якості вихідної сировини нагрівальний елемент знаходиться на матеріальному циліндрі. Плавлення полімерного матеріалу відбувається в зонах пластифікації і дозування шнека. В сопло полімер попадає в розплавленому вигляді. Тому його конструкція може бути іншою в порівнянні з існуючими насадками для 3D-принтерів.

Провівши аналіз технічної літератури можна виділити, що чотири характеристики, які є невід'ємною частиною конструкції сопла: його зовнішній розмір, внутрішня будова, діаметр отвору для видавлювання полімеру та матеріал з якого його виготовлено [16]. Хоча насадка є дуже малим знімним елементом, вона суттєво може впливати на швидкість і якість друку.

Чим габаритніше сопло, тим більшою є маса та площа поверхні для передачі тепла полімерному матеріалу. Це робить процес ефективнішим і забезпечує більшу швидкість екструзії. Теплопровідність залежить від властивостей матеріалу з якого виготовлено насадку, оскільки кожен метал чи сплав металів по-різному проводить теплову енергію.

Діаметр отвору для видавлювання полімеру сопла впливає на кількість екструдованого пластику за секунду (подачу), яка також визначає максимальну швидкість екструзії. Діаметр отвору, в свою чергу, залежить від точності його механічного виготовлення. Менші діаметри дозволяють друкувати тонші шари та

стінки. Чим менший отвір, тим точнішим буде друк по осях X-Y, але нижчим потік пластику, а значить і швидкість друку.

Підсумовуючи, усі зазначені характеристики можна зробити висновок, що розміри сопла можуть мати великий вплив на тривалість друку деталі, а також на якість кінцевого об'єкта. Зазвичай, потрібно досягати компромісу між цими двома факторами.

Конструкція сопла для екструдера 3D-принтера, що використовує гранули чи подрібнені частки матеріалу в якості вихідної сировини буде також впливати на подачу розплавленого полімеру із зони дозування шнека у сопло. Тому, чим меншим буде опір насадки, тим більшою швидкість друку.

Розглянемо більш детально кожен з цих аспектів.

Конструкція сопла та його масогабаритні розміри. Найчастіше, сопло є монолітною деталлю, рідше трапляються складальні вироби, що призначені для особливо складних умов роботи. Як здається простота цієї деталі оманлива, від точності її геометрії, якості обробки і матеріалу дуже залежить сильно результат у вигляді кінцевого друку. Найменший дефект насадки може різко зіпсувати виріб аж до непридатності.

На сьогоднішні, існує багато конструкцій сопел. Найпопулярнішим видом є сопло типу E3D V6. Його відмінністю від інших насадок є висока функціональність і сумісність з багатьма видами пластика. Існує більше сотні різних модифікацій даного сопла. Дана насадка підходить для переробки практично всіх видів пластику завдяки своїй довжині. Її достатньо, щоб встигнути розплавити необхідну кількість полімерного матеріалу і видавити його на не дуже високій швидкості.

Розглянемо дві найбільш поширені конструкції сопла, які використовуються в 3D-принтерах MakerBot та Ultimaker (рис. 1, а, б, рис. 2, а, б). Обидва досить довгі, але при цьому сопло до принтера MakerBot має ширшу площину навколо вихідного отвору [17, 18].

Дана особливість сопла має набагато більше значення ніж його довжина. Насадка з вузькою площиною навколо вихідного отвору зменшує небажану передачу тепла на вже створений шар полімеру з якого друкується виріб. Це пов'язано з тим, що поверхня контакту між соплом і надрукованим шаром менше. Однак, вузька площина є більш крихкою і при непередбаченому зіткненні з надрукованим шаром може виникнути її деформація. Це, в свою чергу, в подальшому може відобразитися на якості друку.

а б

Рис. 1. Загальний вигляд латунного сопла для 3D-принтера: а – MakerBot; б – Ultimaker

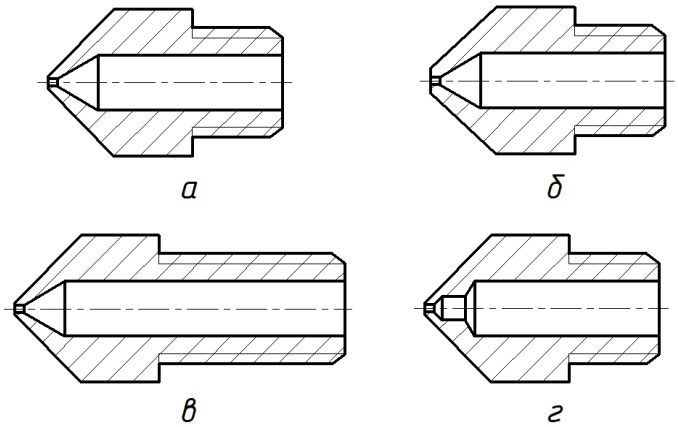


Рис. 2. Конструкція сопел: а – з вузькою площиною навколо вихідного отвору; б – з широкою площиною навколо вихідного отвору; в – з подовженою різьбовою частиною; г – з додатковим циліндричним каналом

Як зазначалось вище, головний недолік насадки з ширшою площиною навколо вихідного отвору полягає в тому, що вона передає тепло на вже надрукований шар. Без належного, достатнього охолодження це може негативно вплинути на весь виріб 3D-друку. Таким чином, для використання зазначеного сопла необхідні чіткі налаштування 3D-принтера і точності позиціонування. Незначна похибка в налаштуванні процесу екструзії може призвести до наявності дефектів у надрукованій деталі.

Довжина сопла також впливає на процес екструзії. Довгі сопла найбільш зручні при чищенні, але швидше відбувається охолодження їхньої поверхні зовнішнім повітрям, ніж поверхні коротких (рис. 2, в). Тобто використання короткого сопла несуттєво, але дозволяє трохи зменшити тепловтрати. Це, в свою чергу, дає змогу більш точно визначати температуру при знятті показань з датчика, який знаходиться в нагрівальному блоці [17].

Внутрішня частина сопла дуже важлива, завдячуючи тому, що з нею стикається пластик під час друку. Існує небагато варіантів внутрішньої форми сопла екструдера 3D-принтера. На рис. 3, а, б показано в розрізі дві найбільш поширені конструкції сопла до 3D-принтерів. Іноді зустрічаються насадки спеціального призначення.

Одним з найпростіших за внутрішньою будою є сопло, що приведене на рис. 3, а. Насадка всередині має три проточки, основна під товщину пластику, конічне звуження ближче до отвору виходу пластику, а також отвір. Філамент, що плавиться в циліндричній частині, проходячи через конічну, попадає у вихідний отвір та пошарово наноситься на робочу платформу. Від якості проточки залежатиме як часто забиватиметься сопло, адже при проточці поганої якості пластик постійно буде зачіплюватись за внутрішні стінки сопла і заважатиме потоку.

Недоліком такого сопла є можливість появи «павутини» з тонких ниток полімеру при друку деталі.

Вирішити цю проблему можуть сопла E3D з іншою внутрішньою будовою та діаметром отвору від 0,2 до 1,2 мм (рис. 3, б) [17, 18].

Насадка всередині має три проточки, основна під товщину пластику, вихідний отвір, а між ними розміщено додатковий циліндричний канал. Основне його призначення направляти розплавлений полімер. Завдяки такій конструкції пластик рівномірно видавлюється, а не витискається в різні сторони. Таким чином вирішується питання «павутини» при переміщенні сопла на робочій платформі. Якість 3D-друку підвищується.

а б

Рис. 3. Сопло в розрізі: а – з циліндричним та конічним каналом; б – з додатковим циліндричним каналом

Різновидністю сопел E3D є насадки Volcano [18, 19] та Super Volcano [20], які відрізняються за властивостями та мають подовжену різьбову частину і потребують спеціального нагрівального блоку. За рахунок збільшеної довжини в них швидше прогрівається пластик, що в свою чергу, дозволяє друкувати з більшою швидкістю. З використанням Super Volcano можна досягти максимальних швидкостей без втрати якості виробу.

Сопло зі знімним наконечником використовується в тому випадку, коли необхідно часто змінювати пластик та режими роботи [21].

Сопло із власним термобар'єром – це латунна або сталева загартована насадка Volcano. Вона укомплектовується термобар'єром з нержавіючої сталі або титану. Після доробок отримується складна біметалева насадка з щільним з'єднанням. Відсутність щілин виключає витікання пластику між соплом і бар'єром та унеможливлює утворення пробок. Така насадка більш довговічна та не потребує регулярної заміни стандартної трубки [22].

Двох і трьохканальні сопла призначені для принтерів, що друкують двома або трьома пластиками одночасно без зупинки та заміни друкуючої головки. Вони потребують спеціального нагрівального блоку, відповідної кількості механізмів подачі, а також необхідного доповнення в програмному забезпеченні. Така конструкція насадок можливо є самим економічним варіантом за рахунок простоти конструкції [23].

Сопла також розділяються в залежності від товщини філамента на 1,75 мм та 3,0 мм. За внутрішньою будовою вони нічим не відрізняються. Відмінністю є тільки кількість пластику, що буде видавлюватися через отвір. Це, в свою чергу, буде впливати на продуктивність 3D-принтера.

На нашу думку, сопла з вузькою, тонкою і при цьому довгою порожниною не рекомендується використовувати. Насадки з такою внутрішньою будовою через в'язкість матеріалу збільшують тертя, а відповідно зростає опір переміщення розплавленого матеріалу у ньому. Коротка горловина вихідного отвору також не приводить до якісного друку. Перед виходом з сопла пластикова нитка повинна знаходитися в «прямому» стані. Довжина такого стану, відповідно до рекомендацій наведених в роботі [24], повинна мінімум в два рази більшою за діаметр вихідного отвору.

Насадки для 3D-принтерів, що друкують полімерними філаментами доступні з різними діаметрами сопла $d_{от.}$. В більшості випадків діаметр у них змінюється від 0,1 до 1,2 мм (рис. 4). Використання такого

діапазону насадок обумовлено діаметрами стандартної полімерної 3D-нитки, які становлять 1,75 мм, або 3,00 мм.

Діаметр сопла також визначає можливу висоту шару і, отже, опосередковано швидкість друку. Як правило, максимальне значення висоти шару $h_{ш.}$ не повинно перевищувати $(0,75...0,8)d_{от.}$ діаметра сопла. Наприклад, сопло 0,4 мм має рекомендовану максимальну висоту шару 0,32 мм. Мінімальна висота шару – $0,25d_{от.}$.

Для більшості 3D-принтерів сопло 0,4 мм стало стандартом, оскільки воно, зазвичай, встановлюється як стандарт і забезпечує хороший баланс між роздільною здатністю, точністю та швидкістю друку [26].

Рис. 4. Загальний вигляд сопел з різними діаметрами [25]

Насадки з діаметром $< 0,4d_{от.}$ ідеально підходять для виготовлення виробів з дуже тонкими, точними деталями та ледве помітними слідами шару

Композиційні матеріали, наприклад, полімери з частками, не рекомендується обробляти насадками діаметром $< 0,4d_{от.}$. Ризик засмічення сопла також значно вищий, ніж у випадку з більшими соплами.

Сопла з діаметром $> 0,4d_{от.}$ забезпечують більший потік матеріалу, більшу висоту шару та скорочення часу друку. Більша ширина полімерної нитки екструзії та вищі шари надають друкованим моделям кращої стабільності. Сопла з діаметром $> 0,4d_{от.}$ практично не забиваються та їх можна використовувати для друку полімерними матеріалами з різними наповнювачами. Завдяки можливості швидкого друку, їх рекомендується використовувати для прототипування виробів. При друку висотою шару 0,4 мм час друку скорочується майже вдвічі порівняно з висотою шару 0,2 мм [26].

Сопло з великим отвором дозволяє створювати на платформі 3D-принтера ширшу лінію з розплавленого полімеру та розвивати більшу швидкість друку. Теоретично надрукована деталь з меншою кількістю широких шарів буде міцнішою, ніж з більшою кількістю вузьких. Це пов'язано з тим, що широкі шари залишають менше порожнин у виробі. Висоту шару також можна зробити більшою, що значно прискорить швидкість друку. Тобто деталі, надруковані з допомогою сопла більшого діаметра є міцнішими та масивнішими.

В екструдері 3D-принтера, що використовує гранули чи подрібнені відходи полімерів в якості вихідної сировини, при малих діаметрах шнека (до 10 мм) можуть використовуватися сопла із зазначеним діапазоном. В екструдерах 3D-принтерів з великою областю побудови деталей потрібно застосовувати екструдери з діаметром шнека більше 10 мм. В такому випадку для прискорення процесу виготовлення виробів великих розмірів слід використати сопла з вихідним отвором більшого діаметру ніж 1,2 мм.

Латунь є матеріалом, що найбільш часто використовується для сопел 3D-принтерів (рис. 5, а). Даний матеріал забезпечує добру теплопередачу. Вартість сопел, виготовлених з даного матеріалу є відносно невисокою. Однак при переробці матеріалів з абразивними добавками, наприклад вуглецевими чи металевими волокнами, латунна насадка дуже швидко зношується і стає неточною [26, 27].

Насадку виготовлену з латуні рекомендується використовувати при температурі не більше 300 ^{0}C.

Основними перевагами латунних насадок є: низька вартість; висока теплопровідність. Недоліками – низька зносостійкість; неможливість використовувати при переробці високоабразивних матеріалів.

Щоб захистити відносно м'який матеріал сопла від надмірного стирання та зменшити тертя між полімерним матеріалом та соплом, його можна покрити нікелем або хромом (рис. 5, б) [26]. Окрім покращеної стійкості до подряпин, нанесене покриття також значно підвищує температурну стійкість насадки.

Сопла з покриттям рекомендується застосовувати при температурі не більше 500 ^{0}C.

а б в

г д е

Рис. 5. Загальний вигляд сопел діаметра 0,4 мм: а – латунне; б – зі спеціальним покриттям; в – з нержавіючої сталі; г – із високоміцної загартованої сталі; д – з карбід-вольфрамовим наконечником; е – з рубіновим наконечником

Основними перевагами насадок з покриттями є висока теплопровідність; вища зносостійкість, ніж звичайних, виготовлених з латуні або міді. Недоліки: не рекомендується для постійного використання з абразивними матеріалами; поступається по твердості соплу, виготовленому із загартованої сталі.

Сталь є ще одним із популярних матеріалів для насадок, оскільки вона забезпечує трохи кращу зносостійкість порівняно з латунню [26, 27]. Вона також певною мірою запобігає прилипанню розплавленого пластику до її поверхні і забрудненню друку свинцем, що часто трапляється з латунними соплами.

Основними перевагами насадок з нержавіючої сталі (рис.5, в) є: краща зносостійкість порівняно з латунною; можливість обробляти більш широкий діапазон розплавлених полімерних матеріалів. Недоліки: нижча теплопровідність, ніж у латунного сопла; менша зносостійкість, ніж у загартованої сталі; не рекомендується для постійного використання з абразивними матеріалами.

Насадку виготовлену з нержавіючої сталі рекомендується використовувати при температурі не більше 500 ^{0}C [26, 27].

Сопла із загартованої сталі (рис. 5, г) можуть протягом тривалого періоду часу використовуватися у екструдері 3D-принтера, оскільки вони достатньо міцні для частого використання абразивних матеріалів (у 10 разів стійкіші ніж насадки з латуні) [26, 27]. Однак цей матеріал має ще нижчу теплопровідність, ніж два попередніх матеріали. Оскільки внутрішня поверхня сопла не така гладка, як інші «м'якші» матеріали насадки, це може призвести до низької якості друку.

Основними перевагами насадок із загартованої сталі є: висока зносостійкість та міцність; можливість використання при роботі з абразивними матеріалами. Недоліки: більша вартість; нижча теплопровідність та якість друку.

Насадки із загартованої сталі рекомендується застосовувати при температурі не більше 500 ^{0}C.

Карбід вольфраму являє собою хімічну сполуку, кристал. Твердість у нього складає дев'ять одиниць за шкалою Мооса [28]. У соплі використовується тільки наконечник з карбіду вольфраму, а корпус та різьба виготовлені з мідного сплаву з покриттям (рис. 5, д). Така насадка поєднує в собі найкращі якості латунних та загартованих сталевих сопел – твердість, зносостійкість та високу теплопровідність. Основним недоліком є її вартість [25].

Таким чином це насадка, яка може використовуватися практично для всіх видів філаментів – від найбільш поширеного PLA до високотемпературних ниток, таких як PEEK, і навіть ниток з вуглецевого волокна [28].

Насадку виготовлену з карбід вольфраму рекомендується використовувати при температурі не більше 550 ^{0}C [28].

Сопла з рубіновими або сапфіровими наконечниками відносяться до найкращого класу насадок для 3D-принтерів (рис.5, е) [25, 27]. Як правило, рубінові насадки - це латунні насадки з покриттям або без нього, які мають рубін на наконечнику. Оскільки отвір в рубіні можна виготовити дуже точно, можуть бути лише невеликі допуски на діаметр (наприклад при діаметрі 0,4 мм допуск може складати ± 0,01 мм).

Основними перевагами насадок з рубіновими (сапфіровими) наконечниками є: висока теплопровідність завдяки латунному корпусу; висока зносостійкість завдяки рубіновому наконечнику; стійкість до високих температур. Недоліки: складність виготовлення; висока вартість.

Насадку виготовлену з рубіновим (сапфіровим) наконечником рекомендується використовувати при температурі не більше 550 ^{0}C.

Основні фізико-механічні властивості сопел, виготовлених з різних матеріалів представлені в таблиці 1 [28].

Таблиця 1

Фізико-механічні властивості сопел, виготовлених з різних матеріалів

№ п/п	Матеріал	Теплопровідність, Вт/м·К	Твердість, Mohs	Макс. температура друку, ^{0}C	Коефіцієнт температурного розширення	Матеріал друку
1	Латунь	105	3,0	300	18,0	PLA, ABS, TPU, PETG тощо
2	Нержавіюча сталь	17	5,0	500	6,0	PEEK, PEI, POC, Carbon, metal тощо
3	Загартована сталь	22	7,8	500	8,0	
4	Карбід вольфраму	29	9,0	550	3,9	
5	Рубін	45	9,0	550	5,3	Всі матеріали

На основі проведеного огляду зовнішньої та внутрішньої конструкції сопел, діаметру вихідного отвору та матеріалів з яких вони виготовляються було розроблено їх класифікацію, що представлена на рис.6.

В даній класифікації за внутрішньою будовою виділено сопло для екструдера 3D-принтера, що використовує гранули чи частки полімерного матеріалу в якості вихідної сировини та збільшено для нього діаметр вихідного отвору до 5 мм.

Проведений аналіз насадок показав, що сопло є важливим елементом зокрема хотенда (екструдера) та 3D-принтера в цілому. Розуміння переваг та недоліків різних конструкцій насадок і полімерних матеріалів, що переробляються може значно покращити його продуктивність [16]. Від правильності вибору сопла залежить якісний та безперебійний друк протягом тривалого періоду часу.

Об'ємна продуктивність екструдера 3D-принтера в залежності від конструкції зони дозування та опору сопла може бути визначена за наступною формулою [14]:

$$Q_{о.п.е.} = \frac{A_{п.п.} \cdot K_{о.с.}}{K_{оп.с.} + B_{з.п.} + C_{в.п.}} \cdot n_{ш.}, \quad (1)$$

де $Q_{о.п.е.}$ – об'ємна продуктивність екструдера, см^3/хв;

$A_{п.п.}$ – постійна прямого потоку, см^3;

$K_{оп.с.}$ – коефіцієнт опору сопла екструдера, см^3;

$n_{ш.}$ – частота обертання шнека, хв$^{-1}$;

$B_{з.п.}$ – постійна зворотного потоку, см^3;

$C_{в.п.}$ – постійна потоку матеріалу, що витікає, см^3.

Загальний коефіцієнт опору $K_{о.с.}$ є основною геометричною величиною, що характеризує насадку. Він визначається як сума коефіцієнтів опору окремих простих за геометрією ділянок внутрішньої будови сопла за наступною формулою [14]:

$$K_{оп.с.} = \frac{1}{\frac{1}{K_{оп.1}} + \frac{1}{K_{оп.2}} + \ldots + \frac{1}{K_{оп.i}}} \quad (2)$$

де $K_{оп.1}$, $K_{оп.2}+\ldots+K_{оп.i}$ – часткові коефіцієнти опору ділянок із простою геометричною формою внутрішнього каналу сопла.

При розрахунку коефіцієнта опору сопло умовно розбивається на ділянки, які відрізняються між собою конфігурацією. В подальшому для кожної ділянки визначають частковий коефіцієнт опору.

Аналіз внутрішньої будови двох найбільш поширених сопел, що використовуються в 3D-принтерах (рис. 3) показав, що у них простими геометричними ділянками є циліндричні та конічні круглі канали.

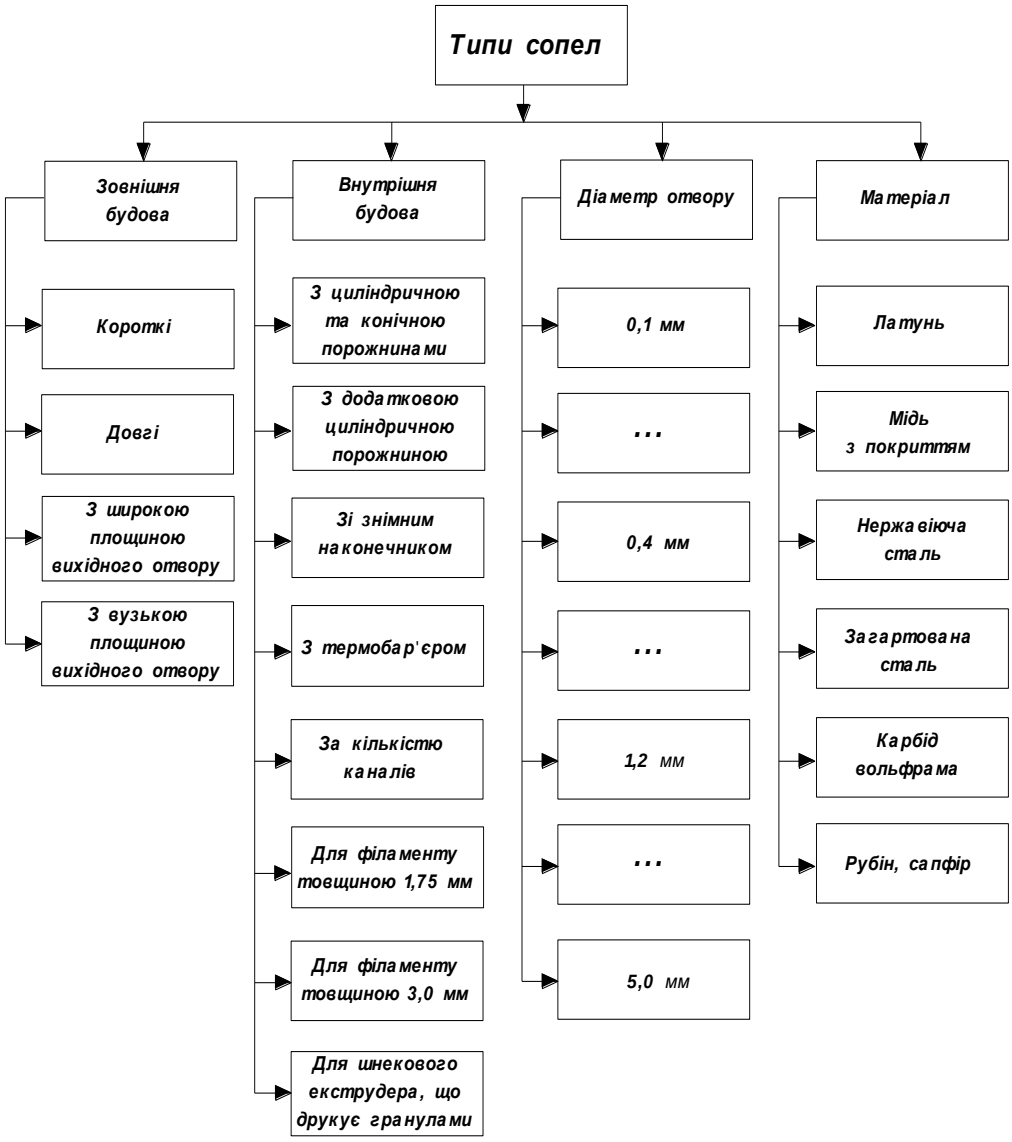
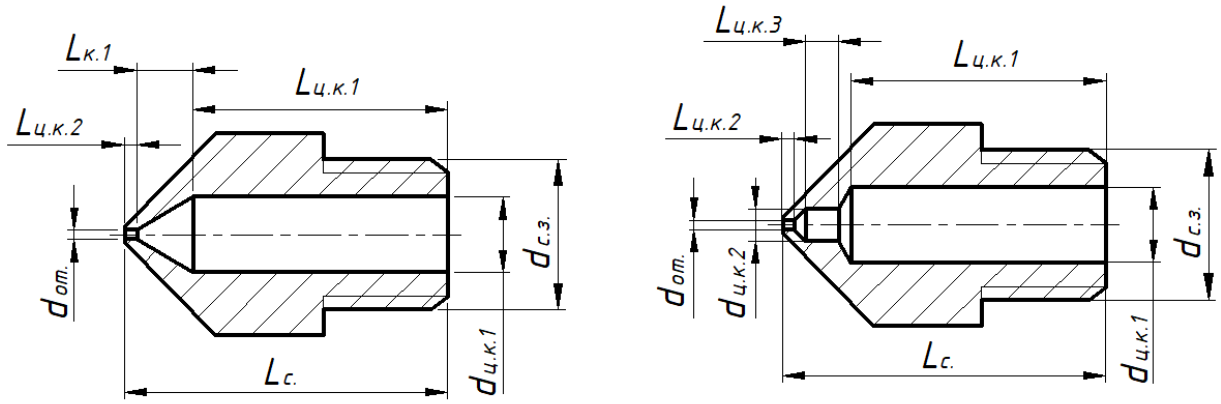


Рис. 6. Класифікація сопел для 3D-друку

Насадки, що приведені на рис. 7,а та рис. 7,б умовно можна розбити на три ділянки. В першому випадку це буде два циліндричних та один конічний круглий канали, а в другому – три циліндричних круглих канали. Конічними фасками, які утворюються при виготовленні внутрішнього каналу через малі розміри можна знехтувати.



а б

Рис. 7. Геометричні розміри сопел: а – з циліндричним та конічним каналом; б – з додатковим циліндричним каналом; $d_{от.}$ - діаметр вихідного отвору; $L_{с.}$ - довжина; $d_{с.з.}$ - зовнішній діаметр; $d_{ц.к.}$ - діаметр циліндричного каналу; $L_{ц.к.}$ - довжина циліндричного каналу; $L_{к.}$ - довжина конічного каналу

В роботі [14] наводяться формули для визначення коефіцієнтів геометричної форми для ділянок каналів. Виходячи з геометричних розмірів сопел, що приведені на рис.7, необхідно визначити коефіцієнт опору для циліндричних та конічного каналів.

Коефіцієнт опору циліндричного круглого каналу визначається за формулою:

$$K_{оп.1} = \frac{\pi \cdot d_{ц.к.}^{4}}{128 \cdot L_{ц.к.}}. \quad (3)$$

Коефіцієнт опору конічного круглого каналу визначається за формулою:

$$K_{оп.2} = \frac{3 \cdot \pi \cdot d_{ц.к.}^{3} \cdot d_{от.}^{3}}{128 \cdot L_{ц.к.} \cdot (d_{ц.к.}^{2} + d_{ц.к.} \cdot d_{от.} + d_{от.}^{2})}. \quad (4)$$

Процес 3D-друку можна розглядати як протікання розплавленого полімеру в осесиметричному каналі. Прикладом подібних процесів може бути виробництво циліндричних стержнів, синтетичних волокон тощо. Подібні канали використовуються в соплах литтєвих машин, решітчастих фільтрах, що встановлюються перед формуючими пристроями.

Фільєрні канали можуть бути циліндричними, конічними або складовими конічно-циліндричними.

Як правило, в сучасному литтєвому обладнанні перед циліндричною частиною розміщується конфузор, завдячуючи якому в робочому діапазоні параметрів переробки вдається уникнути застійних зон біля входу в канал, що зменшує спотворення екструдату на виході з фільєри.

Розплави полімерів, як правило, являються високов'язкими рідинами з сильною залежністю в'язкості від температури і при їх перебігу важливу роль відіграють теплообмінні і дисипативні ефекти. Градієнти температур тут можуть досягати декількох десятків градусів на міліметр, і при протіканні в каналах це приводить до суттєвої зміни профілю швидкості, який може набути характерного стержнеподібного вигляду. Таке стержневе протікання зменшує спотворення форми екструдату, що видавлюється, але надмірне підвищення температури може призвести до деструкції полімеру. Тому, при конструюванні сопла екструдера 3D-принтера необхідний підбір його оптимальних конструкторських і технологічних параметрів.

Екструзійна головка в литтєвій машині призначена для розподілу розплаву полімеру в каналі таким чином, щоб екструдат виходив з однаковою швидкістю. Розподіл швидкості потоку буде залежати від наступних чинників: реологічних властивостей полімеру, геометрії каналу, швидкості течії через філь'єру, а також температурного поля головки. Якщо геометрія каналу оптимальна для конкретного полімерного матеріалу за даних умов, то навіть незначна зміна температури або швидкості можуть зробити передбачувану геометрію неоптимальною. За винятком круглих філь'єр, принципово неможливо реалізувати таку геометрію каналу, яка однаково добре підходила б для широкого ряду полімерів за різних умов переробки. Для полегшення вирішення проблем, що виникають, всередину головки вводять регулюючі механізми, за допомогою яких розподіл швидкості в процесі роботи екструдера можна змінювати примусово [30].

Розподіл швидкості можна змінювати двома способами:

1. Зміною геометрії каналу за допомогою заслінок, обмежувачів, клапанів тощо.
2. Зміною температури всередині головки.

В соплі 3D-принтера з діаметром шнека до 10 мм через його невеликі геометричні розміри введення регулюючих механізмів є неможливим. Тому розподіл швидкості можна забезпечити тільки зміною температури всередині головки за рахунок регулювання температури нагрівального елементу, що кріпиться ззовні насадки.

При конструюванні сопла для 3D-принтера слід врахувати наступні рекомендації:

- відсутність зон застою у каналі;
- поступове збільшення швидкості вздовж каналу;
- простота монтажу та демонтажу;
- геометрична форма каналу не повинна мати різких змін тощо.

У багатьох випадках навіть невеликі зміни конструкції можуть суттєво покращити умови екструзії [30].

Було запропоновано використати в екструдері 3D-принтера, що використовує гранули чи подрібнені частки полімеру в якості вихідної сировини конструкції сопел наведені на рис. 3. На основі її конструкції та з врахуванням зазначених вище рекомендацій було розроблено конструкцію насадки, яка представлена на рис.8. Дана насадка має три ділянки: одну конічну та дві циліндричних круглих ділянки (рис.9).

Наявність конічної частини зменшить тертя матеріалу об стінки сопла, а це, в свою чергу, приведе до зменшення його загального коефіцієнту опору.

Задана орієнтація макромолекул полімеру може бути забезпечена цілеспрямованою течією потоку розплаву. При литві під тиском це досягається місцем розміщення впускного литникового каналу, а при екструзії – конструкцією формуючої головки. Тому наявність в запропонованій конструкції сопла додаткового циліндричного каналу буде також сприяти тому, що макромолекули будуть орієнтуватися

вздовж напрямку течії (вздовж вісі каналу) полімерного матеріалу і надрукований виріб буде мати більшу міцність в цьому напрямку.

Використовуючи формули (3) і (4) можна розрахувати коефіцієнти опору циліндричних та конічної ділянок сопла. Підставивши отримані значення у формулу (2) отримується загальний коефіцієнт опору сопла $K_{o.c.}$ запропонованої конструкції.

При використанні шнека з діаметром більше 10 мм збільшуються габаритні розміри матеріального циліндра. Таким чином з'являється можливість змінити геометрію каналу, використовуючи дорн.

Типи каналів в формуючих головках екструдера з діаметром шнека більше 10 мм 3D-принтера можуть бути конічними кільцевими, круглими кільцевими [14].

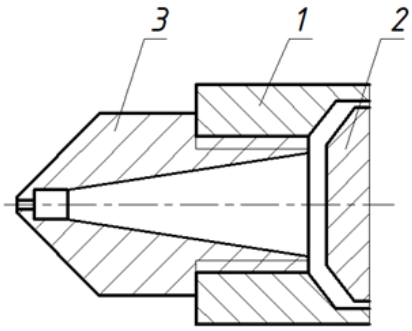


Рис. 8. Конструкція сопла:
1 – матеріальний циліндр; 2 – шнек;
3 – сопло

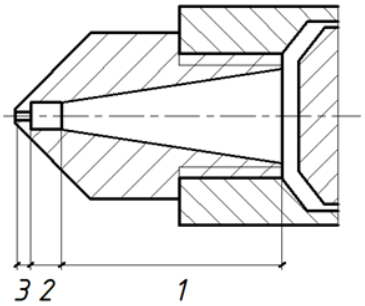


Рис. 9. Схематичне зображення сопла шнекового екструдера:
1 – конічна ділянка; 2, 3 – циліндрична ділянка

Сопло може комплектуватися елементом фільтрації, який призначений для очищення розплаву від різноманітних твердих включень, які можуть потрапити у полімерний матеріал на різних стадіях його виготовлення та транспортування. Причиною забивання фільтра також може бути неповне розплавлення полімеру у каналі шнека. Частки матеріалу можуть з'явитися на виході із зони дозування екструдера. Для вловлювання твердих включень використовують сито-змінні фільтруючі системи, що складаються із сіток і підтримуючих решіток. Такий фільтрувальний пристрій встановлюється між матеріальним циліндром і соплом та використовується для спрямування потоку розплаву, який видавлюється з останнього витка шнека. При розрахунку загального коефіцієнту опору формуючої головки необхідно враховувати опір фільтра та решітки [29].

Замість сито-змінної фільтруючої системи можна встановити визначеної товщини вкладиш у вигляді перфорованої перегородки з проникаючими мікропорами (рис. 10, а), які розміщені на певній відстані одна від одної (рис. 10). Перфорована перегородка з однієї сторони буде виконувати роль фільтра, з іншої сторони буде сприяти тому, що макромолекули будуть орієнтуватися вздовж напрямку течії (вздовж вісі мікропор) полімерного матеріалу і надрукований виріб буде мати більшу міцність.

При використанні традиційних насадок (рис. 7, 8) вкладиш з пористої металокераміки (рис. 10, б) можна вмонтувати у саме сопло.

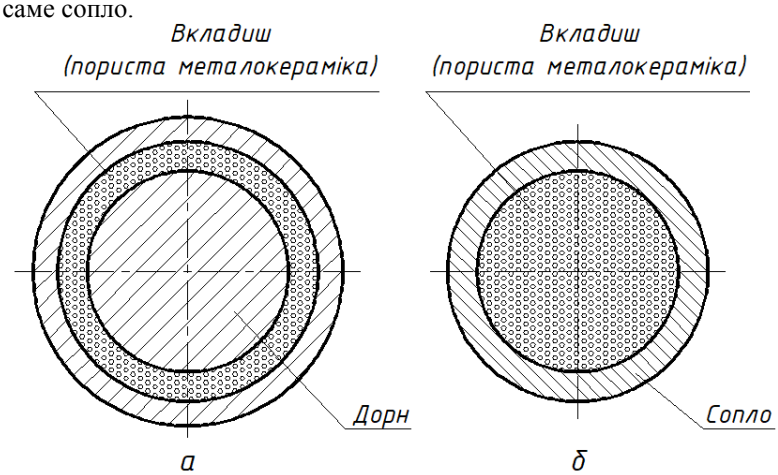


Рис. 10. Конструкція формуючої головки з вмонтованим металокерамічним пористим вкладишем:
а – у дорн; б – у сопло

На основі проведеного аналізу внутрішньої будови сопел для 3D-принтерів, що друкують філаментом та формуючих пристроїв обладнання для переробки пластмас [14], було розроблено конструкцію насадки з вихідним отвором більше 1,2 мм та використанням дорна для екструдера зі діаметром шнека більше 10 мм (рис. 11). Дана насадка має п'ять ділянок (рис. 12).

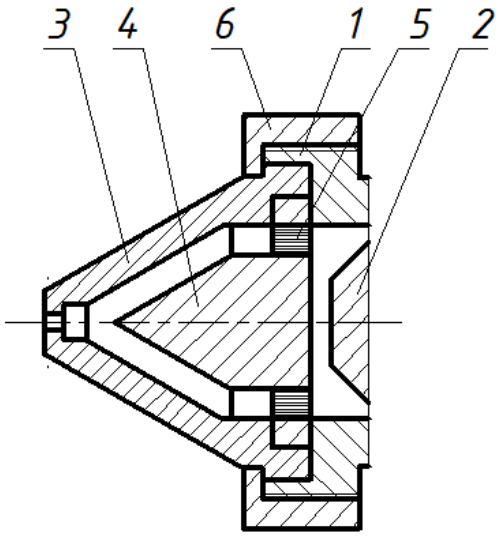


Рис. 11. Конструкція сопла:
1 – матеріальний циліндр; 2 – шнек;
3 – сопло; 4 – дори; 5 – елемент фільтрації;
6 – фіксуюча кришка

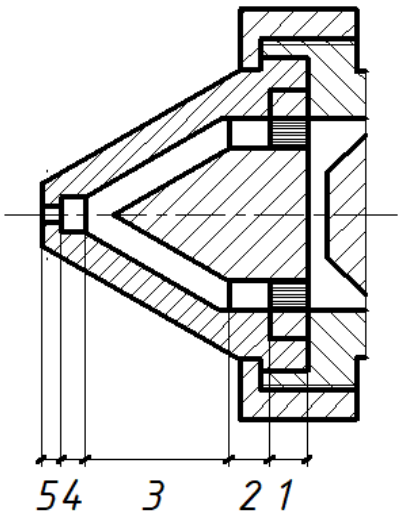


Рис. 12. Схематичне зображення сопла шнекового екструдера:
1 – ділянка елемента фільтрації;
2 – циліндрична кільцева ділянка; 3 – конічна кільцева ділянка; 4, 5 – циліндричний круглий канал

Для зазначених типів каналів коефіцієнти опору розраховуються за іншими формулами, що наведені в роботі [14]. Геометричні розміри розробленого сопла з дорном приведено на рис. 13.

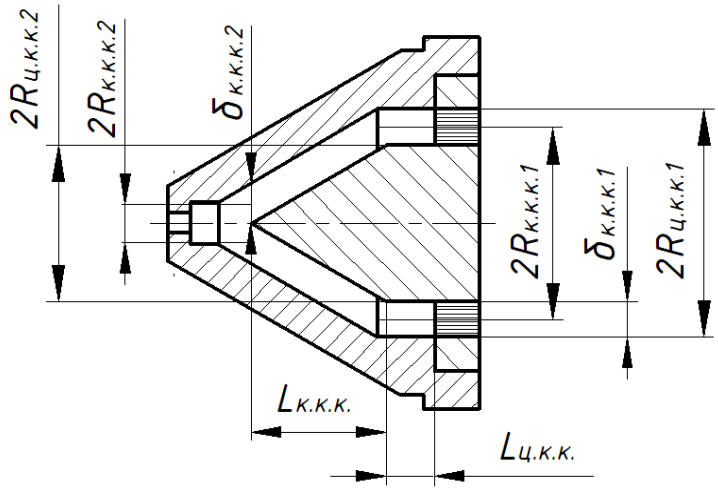


Рис. 13. Геометричні розміри сопла з дорном: $R_{ц.к.к.1}$ **- зовнішній радіус циліндричного кільцевого каналу, см;** $R_{ц.к.к.2}$ **- внутрішній радіус циліндричного кільцевого каналу, см;** $L_{ц.к.к.}$ **- довжина циліндричної кільцевого каналу, см;** $R_{к.к.к.1}$ **- середній радіус конуса на вході, см;** $R_{к.к.к.2}$ **- середній радіус конуса на виході, см;** $\delta_{к.к.к.1}$ **- зазор конічного кільцевого каналу на вході, см;** $\delta_{к.к.к.1}$ **- зазор конічного кільцевого каналу на виході, см;** $L_{к.к.к.}$ **- довжина конічного кільцевого каналу, см**

Коефіцієнт опору циліндричного кільцевого каналу визначається за формулою:

$$K_{оп.3} = \frac{\pi}{8 \cdot L_{ц..к.к.}} \cdot \left[R^4_{ц.к.к.1} - R^4_{ц.к.к.2} - \frac{(R^2_{ц.к.к.1} - R^2_{ц.к.к.2})^2}{\ln \frac{R^2_{ц.к.к.1}}{R^2_{ц.к.к.2}}} \right] \quad (5)$$

Коефіцієнт опору конічного кільцевого каналу визначається за формулою:

$$K_{оп.4} = \frac{\pi (R_{к.к.к.1} \cdot \delta_{к.к.к.1} - R_{к.к.к.2} \cdot \delta_{к.к.к.2})}{6 \cdot L_{к.к.к.} \cdot m_{г.п.}} \quad (6)$$

де $m_{г.п.}$ – коефіцієнт, що враховує геометричні параметри, см$^{-2}$.

Даний коефіцієнт визначається за наступною формулою:

$$m_{г.п.} = \frac{2,3 \cdot (R_{к.к.к.1} - R_{к.к.к.2})^2}{(R_{к.к.к.1} \cdot \delta_{к.к.к.2} - R_{к.к.к.2} \cdot \delta_{к.к.к.1})} \cdot \lg \frac{R_{к.к.к.1} \cdot \delta_{к.к.к.2}}{R_{к.к.к.2} \cdot \delta_{к.к.к.1}} - \\ - \frac{(R_{к.к.к.1} - R_{к.к.к.2}) \cdot (\delta_{к.к.к.1} - \delta_{к.к.к.2})}{(R_{к.к.к.1} \cdot \delta_{к.к.к.2} - R_{к.к.к.2} \cdot \delta_{к.к.к.1}) \cdot \delta_{к.к.к.1} \cdot \delta_{к.к.к.2}} - \frac{\delta^2_{к.к.к.1} - \delta^2_{к.к.к.2}}{2 \cdot \delta^2_{к.к.к.1} \cdot \delta^2_{к.к.к.2}} \quad (7)$$

В залежності від вихідних даних значення $m_{г.п.}$ може мати від'ємне значення.

Визначивши коефіцієнти опорів ділянок за формулою (2) можна розрахувати загальний коефіцієнт опору певної конструкції сопла.

В подальшому необхідно провести експериментальні дослідження з метою підтвердження працездатності запропонованих конструкцій сопел в екструдері 3D-принтера, що використовує гранули чи подрібненні відходи полімерних матеріалів в якості вихідної сировини при виготовленні готових виробів.

Висновки

В результаті проведеного аналізу технічної літератури було здійснено обґрунтування вибору конструкцій сопел для екструдера 3D-принтера, що використовує гранули чи подрібнені частки полімерів в якості вихідної сировини.

Рекомендовано при використанні шнека діаметром до 10 мм в екструдері застосовувати стандартні сопла, що використовуються в 3D-принтері, що друкує філаментом, зокрема насадку, що має додаткову камеру. На основі стандартного сопла розроблено конструкцію насадки з конічною камерою.

З метою прискорення виготовлення деталей великих розмірів для екструдерів, в яких використовується шнек діаметру більше 10 мм, розроблено формуючий пристрій з елементом у вигляді дорна та збільшеним вихідним отвором.

Встановлення вкладиша у вигляді перфорованої перегородки з проникаючими мікропорами дасть змогу орієнтувати макромолекули вздовж напрямку течії (вздовж вісі мікропор) полімерного матеріалу і збільшити міцність надрукованого виробу.

Література

1. Швед М.П., Швед Д.М., Великоіваненко С.П. Новий ресурсоенергоощадний процес екструзії полімерів. Молодий вчений. № 1. 2018. С. 447-449.

2. Plastic Extrusion: A Complete Guide To Know Its Process. https://waykenrm.com/blogs/plastic-extrusion-process/.

3. Hyvärinen M., Jabeen R., Kärk T. The Modelling of Extrusion Processes for Polymers. Polymers 2020, 12, 1306; doi: 10.3390/polym12061306.

4. Martins J. De N., Hemadipour H. Applications and Market of PVC for Piping Industry. Polímeros: Ciência e Tecnologia, 2009, vol. 19, № 1. P. 58-62.

5. Koutelieris A., Kioupi K., Haralampous O., Kitsakis K., Vaxevanidis N., Kechagias J. Simulation of extrusion of high density polyethylene tubes. MATEC Web of Conferences 112, 04004 (2017). DOI: 10.1051/matecconf/20171120400.

6. Osswald T.A., Hernández-Ortiz J.P. Polymer Processing. Modeling and Simulation. Munich: Carl Hanser Verlag, 2006. 651 p.

7. Курта С.А. Хімічні технології переробки полімерів. Івано-Франківськ : Вид-во Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, 2018. 136 с.

8. Авраменко В.Л., Підгорна Л.П., Черкашина Г.М., Близнюк О.В. Технологія виробництва та переробки полімерів медико-біологічного призначення : навч. посіб. Харків : Вид-во та друкарня «Технологічний Центр», 2018. 356 с.

9. Мікульонок І.О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра . 2-е вид., переробл. та доповн. К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 292 с.

10. Blow molding process. https://geminigroup.net/plastics/blow-molding-regency/processes/extrusion-blow-molding-process/.

11. 3D друк методом наплавлення (FDM). http://surl.li/magft.

12. Polishchuk O., Zozulia P., Polishchuk A. Development and research of equipment for processing of granulated polymeric materials via 3d printing for the needs of light industry. Fibres and Textiles (4) 2020, P. 70-80.

13. Design of Extrusion Heads. http://surl.li/mageh.

14. Сокольський О.Л., Сівецький В.І., Мікульонок І.О. Проектування формуючих пристроїв обладнання для переробки пластмас: навч. посіб. К. : НТУУ «КПІ», 2014. 148 с.

15. Коваленко К.Г., Сокольський О.Л., Сівецький В.І. Екструзійне формування полімерних погонажних виробів з урахуванням в'язкопружних властивостей : монографія. К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 108 с.

16. 3D Printer Nozzle Guide: All You Need to Know. https://printermods.co.uk/blogs/news/3d-printer-nozzle-guide-all-you-need-to-know.

17. 3D printer improvements. http://www.tridimake.com/2016/06/3d-printing-nozzles-characteristics.html.

18. Сопла. http://surl.li/lzhxj.
19. Сопло Volcano. http://surl.li/lziqx.
20. SuperVolcano Nozzles. https://e3d-online.com/products/supervolcano-nozzles.
21. Сопло з подовженим наконечником з нержавіючої сталі 3D принтера. http://surl.li/lzitz.
22. Trianglelab Unity Nozzle. http://surl.li/lzjju.
23. V6 CHT Clone Tri Flow Nozzle. https://www.ebay.com/itm/185809769234
24. Cyclops & Chimera Documentation. http://surl.li/lzruk.
25. Understanding the 3D printer nozzle. https://top3dshop.com/blog/3d-printer-nozzle-guide.
26. 3D Printer Nozzle Guide. https://www.3djake.com/info/guide/3d-printer-nozzle-guide.
27. Best 3D Printer Nozzle: Types, Sizes & Materials. https://all3dp.com/2/3d-printer-nozzle-size-material-what-to-know-which-to-buy/
28. Сопло TUNGSTEN від Phaetus® з карбід вольфраму. https://www.a7lab.in.ua/home/extruders-and-hotends/phaetus-tungsten/
29. Разумов-Фризюк Є.А., Гурін Д.В., Нікітін Д.О., Стрілець Р.Є., Близнюк Д.С. Моделювання шнекового екструдера для FFF 3D друку. Radiotekhnika. 2022. № 209. С. 206-214.
30. Rauwendaal C. Polymer Extrusion. 4th ed. Munich: Hanser, 2001. 781 p.

References

1. Shved M.P., Shved D.M., Velykoivanenko S.P. Novyi resursoenerhooshchadnyi protses ekstruzii polimeriv. Molodyi vchenyi. № 1. 2018. S. 447-449.
2. Plastic Extrusion: A Complete Guide To Know Its Process. https://waykenrm.com/blogs/plastic-extrusion-process/.
3. Hyvärinen M., Jabeen R., Kärk T. The Modelling of Extrusion Processes for Polymers. Polymers 2020, 12, 1306; doi: 10.3390/polym12061306.
4. Martins J. De N., Hemadipour H. Applications and Market of PVC for Piping Industry. Polímeros: Ciência e Tecnologia, 2009, vol. 19, № 1. R. 58-62.
5. Koutelieris A., Kioupi K., Haralampous O., Kitsakis K., Vaxevanidis N., Kechagias J. Simulation of extrusion of high density polyethylene tubes. MATEC Web of Conferences 112, 04004 (2017). DOI: 10.1051/matecconf/20171120400.
6. Osswald T.A., Hernández-Ortiz J.P. Polymer Processing. Modeling and Simulation. Munich: Carl Hanser Verlag, 2006. 651 r.
7. Kurta S.A. Khimichni tekhnolohii pererobky polimeriv. Ivano-Frankivsk : Vyd-vo Prykarpatskoho natsionalnoho universytetu imeni Vasylia Stefanyka, 2018. 136 s.
8. Avramenko V.L., Pidhorna L.P., Cherkashyna H.M., Blyzniuk O.V. Tekhnolohiia vyrobnytstva ta pererobky polimeriv medyko-biolohichnoho pryznachennia : navch. posib. Kharkiv : Vyd-vo ta drukarnia «Tekhnolohichnyi Tsentr», 2018. 356 s.
9. Mikulonok I.O. Tekhnolohichni osnovy pereroblennia polimernykh materialiv : navch. posib. dlia zdobuvachiv stupenia bakalavra . 2-e vyd., pererobl. ta dopovn. K. : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2020. 292 s.
10. Blow molding process. https://geminigroup.net/plastics/blow-molding-regency/processes/extrusion-blow-molding-process/.
11. 3D druk metodom naplavlennia (FDM). http://surl.li/magft.
12. Polishchuk O., Zozulia P., Polishchuk A. Development and research of equipment for processing of granulated polymeric materials via 3d printing for the needs of light industry. Fibres and Textiles (4) 2020, R. 70-80.
13. Design of Extrusion Heads. http://surl.li/mageh.
14. Sokolskyi O.L., Sivetskyi V.I., Mikulonok I.O. Proektuvannia formuiuchykh prystroiv obladnannia dlia pererobky plastmas: navch. posib. K. : NTUU «KPI», 2014. 148 c.
15. Kovalenko K.H., Sokolskyi O.L., Sivetskyi V.I. Ekstruziine formuvannia polimernykh pohonazhnykh vyrobiv z urakhuvanniam viazkopruzhnykh vlastyvostei : monohrafiia. K. : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2018. 108 c.
16. 3D Printer Nozzle Guide: All You Need to Know. https://printermods.co.uk/blogs/news/3d-printer-nozzle-guide-all-you-need-to-know.
17. 3D printer improvements. http://www.tridimake.com/2016/06/3d-printing-nozzles-characteristics.html.
18. Sopla. http://surl.li/lzhxj.
19. Soplo Volcano. http://surl.li/lziqx.
20. SuperVolcano Nozzles. https://e3d-online.com/products/supervolcano-nozzles.
21. Soplo z podovzhenym nakonechnykom z nerzhaviiuchoi stali 3D pryntera. http://surl.li/lzitz.
22. Trianglelab Unity Nozzle. http://surl.li/lzjju.
23. V6 CHT Clone Tri Flow Nozzle. https://www.ebay.com/itm/185809769234
24. Cyclops & Chimera Documentation. http://surl.li/lzruk.
25. Understanding the 3D printer nozzle. https://top3dshop.com/blog/3d-printer-nozzle-guide.
26. 3D Printer Nozzle Guide. https://www.3djake.com/info/guide/3d-printer-nozzle-guide.
27. Best 3D Printer Nozzle: Types, Sizes & Materials. https://all3dp.com/2/3d-printer-nozzle-size-material-what-to-know-which-to-buy/
28. Soplo TUNGSTEN vid Phaetus® z karbid volframu. https://www.a7lab.in.ua/home/extruders-and-hotends/phaetus-tungsten/
29. Razumov-Fryziuk Ye.A., Hurin D.V., Nikitin D.O., Strilets R.Ie., Blyzniuk D.S. Modeliuvannia shnekovoho ekstrudera dlia FFF 3D druku. Radiotekhnika. 2022. № 209. S. 206-214.
30. Rauwendaal C. Polymer Extrusion. 4th ed. Munich: Hanser, 2001. 781 p.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-205-211
УДК 637.146.1

СЕРЕНКО АНТОН
Державний торговельно-економічний університет
https://orcid.org/0000-0002-0390-369X
e-mail: antonserenko27@gmail.com
ЮДІНА ТЕТЯНА
Державний торговельно-економічний університет
https://orcid.org/0000-0002-7407-4534
e-mail: yudina2902@gmail.com

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СКВАШУВАННЯ МОЛОЧНИХ СУМІШЕЙ ДЛЯ НИЗЬКОЛАКТОЗНИХ ЙОГУРТІВ

На сьогодні доцільність створення нових рецептур та технологій молочних продуктів зі зниженим вмістом лактози зумовлена, насамперед, їх високим попитом та вузьким асортиментом вітчизняного виробництва. Перспективним напрямом у розробленні нових технологій молочних продуктів із регульованим вуглеводним складом, зокрема низьколактозних йогуртів, є раціональне використання харчового потенціалу вторинної молочної сировини. Метою роботи є обґрунтування параметрів сквашування молочних сумішей із підвищеним вмістом сухих речовин та гідролізованою лактозою для виробництва низьколактозних йогуртів на основі сколотин. Предмет досліджень – молочні суміші на основі сколотин нормалізовані за вмістом сухих речовин та гідролізованою лактозою; заквашувальний препарат прямого внесення для виробництва йогурту.

Вміст лактози визначено хроматографічним методом на рідинному хроматографі LC-20 (Shimadzu) з рефрактометричним детектором. Фізико-хімічні показники зразків встановлено за загальноприйнятими стандартизованими методами досліджень.

Досліджено процес утворення кисломолочних згустків у молочних сумішах із підвищеним вмістом сухих речовин та гідролізованою лактозою. Визначено параметри процесу заквашування молочних сумішей для виробництва низьколактозних кисломолочних напоїв. Для сквашування молочних сумішей використовували закваску прямого внесення YC-X11 (Chr. Hansen, Данія), до складу якої входять культури молочнокислих бактерій Streptococcus thermophilus та Lactobacillus delbrueckii ssp. Bulgaricus. Встановлено, що молокозгортальна активність заквашувального препарату та швидкість утворення кисломолочного згустку збільшується на 15…20% у зразках із гідролізованою лактозою. Обґрунтовано раціональні параметри сквашування молочних сумішей на основі сколотин з підвищеним вмістом сухих речовин та гідролізованою лактозою: доза внесення закваски YC-X11 – 2,3…2,6 мг, температура заквашування 40±2 °С, тривалість процесу – 210….240 хв.

Ключові слова: кисломолочний згусток, заквашувальний препарат, молокозгортальна активність, гідроліз лактози, низьколактозний йогурт.

SERENKO ANTON, YUDINA TETIANA
State University of Trade and Economics

JUSTIFICATION OF PARAMETERS OF FERMENTATION OF MILK MIXTURES FOR LOW LACTOSE YOGURTS

Today, the expediency of creating new formulations and technologies of dairy products with reduced lactose content is due primarily to their high demand and narrow range of domestic production. A promising direction in the development of new technologies for dairy products with regulated carbohydrate composition is the rational use of the nutritional potential of secondary dairy raw materials. It applies particularly to low-lactose yogurts. The aim of the work is to substantiate the fermentation parameters of milk mixtures with an increased content of dry substances and hydrolyzed lactose for the production of low-lactose yogurts based on crumb. The subject of the research is milk mixtures based on buttermilk normalized by the content of dry substances and hydrolyzed lactose; directly applied leavening agent for yogurt production.

Lactose content was determined by the chromatographic method on an LC-20 liquid chromatograph (Shimadzu) with a refractometric detector. Physic-chemical indicators of the samples were determined according to generally accepted standardized research methods.

The process of formation of sour-milk clots in milk mixtures with an increased content of dry substances and hydrolyzed lactose was studied. The parameters of the process of fermentation of milk mixtures for the production of low-lactose fermented milk drinks have been determined. For the fermentation of milk mixtures, we used YC-X11 direct starter (Chr. Hansen, Denmark), which includes cultures of lactic acid bacteria Streptococcus thermophilus and Lactobacillus delbrueckii ssp. Bulgaricus. It was established that the lactic-coagulant activity of the leavening preparation and the rate of formation of a sour-milk clot was 15-20% higher in samples with hydrolyzed lactose. The rational parameters of fermentation of milk mixtures based on crumbs with an increased content of dry substances and hydrolyzed lactose are substantiated: the dose of adding YC-X11 sourdough starter is 2.3…2.6 mg, the fermentation temperature is 40±2oC, the duration of the process is 210…240 minutes.

Key words: sour milk curd, leavening agent, milk coagulant activity, lactose hydrolysis, low-lactose yogurt.

Постановка проблеми

Щороку, за даними ВООЗ, серед населення збільшується кількість осіб, як мають проблеми зі здоров'ям, що пов'язані з лактазною недостатністю, тобто неможливістю засвоєння лактози, яка міститься в молочних продуктах. Основним методом лікування лактазної недостатності є дієтотерапія, яка передбачає повне виключення або обмежене споживання молочних продуктів [1, 2]. Проте, молоко та молочні продукти є цінним джерелом повноцінних білків, вітамінів, мінеральних речовин, зокрема кальцію. Виключення їх з раціону харчування призведе до споживання недостатньої кількості есенціальних нутрієнтів і, як наслідок,

до зниження рівня працездатності й опірності організму захворюванням та іншим негативним факторам навколишнього середовища [3, 4].

При обмеженому споживанні молочних продуктів, люди із лактазною недостатністю включають до свого раціону ферментовані молочні продукти: сметану, кисломолочний сир, кефір, ряжанку, йогурти, в яких лактоза частково ферментована до молочної кислоти. В молоці вміст лактози складає 4,5-5,2%; в сирі кисломолочну лактози міститься від 1,8 до 2,0%, в сметані – 2,7-3,2%, в кефірі – близько 4,0%, в ряжанці та йогуртах питних – близько 3,5% [5]. Таким чином при ферментації молочної сировини закваскими молочнокислих бактерій можна утилізувати 25-30% початкового вмісту лактози [5]. Проте концентрація лактози в таких продуктах залишається досить високою, що не дозволяє використовувати їх на постійній основі в раціонах харчування людей, які страждають лактазною недостатністю. Саме тому, перспективним напрямом розв'язання цієї проблеми є створення технологій молочних продуктів, зокрема кисломолочних напоїв, вільних від лактози або зі зниженим її вмістом

Аналіз останніх джерел

На ринку молочних продуктів високий попит серед споживачів займають йогурти (27%) [6], що обумовлено їх високими органолептичними показниками та поживною цінністю. Споживання йогуртів забезпечує організм корисними біологічно активними речовинами, продуктами метаболізму кисломолочних і біфідобактерій, сприяє кращому засвоєнню кальцію, зниженню рівня холестерину в крові, забезпечує нормалізацію мікрофлори кишківника [7].

Процес ферментації (заквашування) є найважливішим етапом при виробництві йогурту. На цьому етапі утворюється кисломолочний згусток, формуються структурно-механічні властивості та характерні для йогуртів органолептичні показники. Ключовим фактором процесу сквашування є використання заквашувальних препаратів, які діють шляхом біохімічних реакцій та викликають утворення згустку, а також формування заданих органолептичних показників.

Відповідно ДСТУ 4343:2004, щоб ферментований молочний продукт був позначений як «йогурт», ферментних препарат для його виробництва повинен містити культури молочнокислих бактерій Streptococcus thermophilus та Lactobacillus delbrueckii ssp. Bulgaricus [8]. Культуру Str. thermophilus доцільно застосовувати разом з термофільними молочнокислими паличками, які мають кислотоутворюючу здатність. Молочнокислі палички включать термо-, стрепто- і β-бактерії. L. Bulgaricus и L. Acidophilus належать до гомоферментних молочнокислих паличок [9].

Доведено, що штами Str. thermophilus та L. Bulgaricus використовуються як вихідний матеріал при створенні симбіотичних заквасок для йогурту. Основною умовою для підбору штамів Str. thermophilus и L. Bulgaricus – симбіотичний зв'язок між ними. Симбіотична дія між Str. thermophilus та L. Bulgaricus пояснюється, особливостями їх обміну речовин, необхідністю в живлені і умовами розвитку. L. Bulgaricus має виражену протеолітичну активність, накопичуючи при своєму розвитку в продуктів амінокислоти (від 50 до 80 мг%). Str. thermophilus із амінокислот продукує лише пролін та розщеплює решту амінокислот, що утворюються [9]. За результатами досліджень [9] визначено, що продукти обміну L. Bulgaricus, зокрема валін, стимулює розвиток Str. Thermophilus. В свою чергу, Str. Thermophilus сприяє активному розвитку L. Bulgaricus за рахунок мурашиної кислоти, яка утворюється у процесі кисломолочного бродіння. Використання заквашувальних препаратів на основі штамів молочнокислих бактерій Streptococcus thermophilus та Lactobacillus delbrueckii ssp. Bulgaricus при виробництві йогуртів обумовлює отримання продукту із високими органолептичними показниками та пробіотичними властивостями.

При виробництві кисломолочних продуктів, зокрема йогуртів, для людей, які страждають на лактазну недостатність, особливе значення має характеристика мікроорганізмів, що застосовуються, за β-галактозидазною активністю [10]. Більшість штамів мікроорганізмів, які входять до складу заквашувальних препаратів, володіють вибірковою ферментативною активністю по відношенню до лактози. У процесі життєдіяльності мікроорганізмів відбувається незначне розчеплення лактози (0,4-0,8%). За рахунок використання молочнокислих бактерій можливо гідролізувати до 30% початкового вмісту лактози [10, 11].

При використанні заквашувальних препаратів у виробництві йогуртів, окрім молочнокислого бродіння протікають біохімічні процеси, в результаті яких відбувається накопичення продуктів розпаду лактози - леткі кислоти, органічні кислоти, спирти, діацетил. Бродіння припиняється коли частина лактози (до 20%) зброджується ферментами мікроорганізмів, оскільки молочна кислота, яка утворюється, інактивує їх діяльність [11].

Молочнокислі культури характеризуються досить високою β-галактозидазною активністю [12] порівняно з іншими мікроорганізмами. У мезофільних молочнокислих паличок і пропіоновокислих бактерій β-галактозидазна активність низька, оскільки фермент лактаза синтезується цими мікроорганізмами у незначних кількостях. Найбільшу β-галактозидазну активність проявляє болгарська паличка, яка перевищує даний показник на 15% і 64% відповідно термофільного стрептокока та біфідобактерій [12, 13].

Серед молочнокислих бактерій найбільшою активністю до зброджування лактози володіють термофільні молочнокислі стрептококи. Фермент β-галактозидаза термофільного стрептокока більш активно здійснює гідроліз лактози, проявляючи при цьому високу активність і стабільність, причому катіони молочної сировини проявляють стимулюючу дію на активність цього ферменту [13].

Враховуючи вищеозначені властивості та високу β-галактозидазну активність штамів молочнокислих бактерій Str. thermophilus та L. Bulgaricus доцільним, на наш погляд, є використання

заквасок на основі їх консорціуму у виробництві низьколактозних йогуртів.

Дані досліджень властивостей молочнокислих бактерій [13] свідчать про те, що вони є джерелом фолієвої кислоти, ніацину, вітаміну B_{12}, B_6 та ферментів, які є необхідними для організму людини. Молочнокислі бактерії підвищують ступінь засвоєння білків та жирів, сприяють утворенню коротколанцюгових жирних кислот, які є незамінним джерелом енергії для організму. Застосування даних заквашувальних на основі штамів молочнокислих бактерій Streptococcus thermophilus та Lactobacillus delbrueckii ssp. Bulgaricus при виробництві йогурту дозволяє забезпечити пробіотичні властивості готового продукту за рахунок вмісту корисних для мікрофлори кишківника мікроорганізмів.

Ці властивості є ключовими для використання заквашувального препарату на основі штамів мікроорганізмів болгарської палички (L. Bulgaricus) та термофільного стрептокока (Str. thermophilus) у виробництві низьколактозного йогурту для харчування осіб, які страждають лактазною недостатністю.

Метою роботи є обґрунтування параметрів сквашування молочних сумішей із підвищеним вмістом сухих речовин та гідролізованою лактозою для виробництва низьколактозних йогуртів на основі сколотин.

Предмет досліджень – молочні суміші на основі сколотин нормалізовані за вмістом сухих речовин та гідролізованою лактозою; заквашувальний препарат прямого внесення YC-X11 (Chr. Hansen, Данія), що містить культури молочнокислих бактерій Streptococcus thermophilus та Lactobacillus delbrueckii ssp. Bulgaricus.

Вміст лактози у досліджуваних зразках визначено хроматографічним методом на рідинному хроматографі LC-20 (фірми Shimadzu) з рефрактометричним детектором (колонка HC-75-Ca++ (250×4.7 мм). Ефективність гідролізу лактози – за [14]. Фізико-хімічні показники зразків встановлено за загальноприйнятими стандартизованими методами досліджень: вміст сухих речовин та золи – за ДСТУ 8522:2015 [15]; титрованої кислотності – за ДСТУ 8551:2015 [16].

Виклад основного матеріалу

На основі результатів попередніх досліджень розроблено молочні суміші на основі сколотин з підвищеним вмістом сухих речовин [17]. За рекомендаціями дослідників для нормалізації сколотин за вмістом сухих речовин використано сироватку суху демінералізовану (ССД) та концентрат молочних білків (КМБ) [17, 18].

Фізико-хімічні показники розроблених молочних сумішей із підвищеним вмістом сухих речовин наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Фізико-хімічні показники молочних сумішей

Дослідний зразок	Кислотність		Масова частка золи, %	Масова частка сухих речовин, %	Масова частка жиру, %	Масова частка лактози, %
	титрована, °Т	активна, од. pH				
Молочна основа нормалізована КМБ						
Суміш №1	30,0	6,53	0,8	14,3	0,63	4,66
Суміш №2	32,0	6,52	0,9	16,7	0,71	5,18
Молочна основа нормалізована ССД						
Суміш №3	26,0	6,48	0,6	14,8	0,7	9,66
Суміш №4	28,0	6,47	0,6	15,5	0,7	10,63

Ферментативний гідроліз лактози препаратом β-галактозидази проводили з попередньо визначеними параметрами та режимами [14, 17], що забезпечували ступінь гідролізу лактози не менше 70%, враховуючи що в подальшому молочні суміші піддають заквашуванню за допомогою штамів молочнокислих бактерій з високою β-галактозидазною активністю.

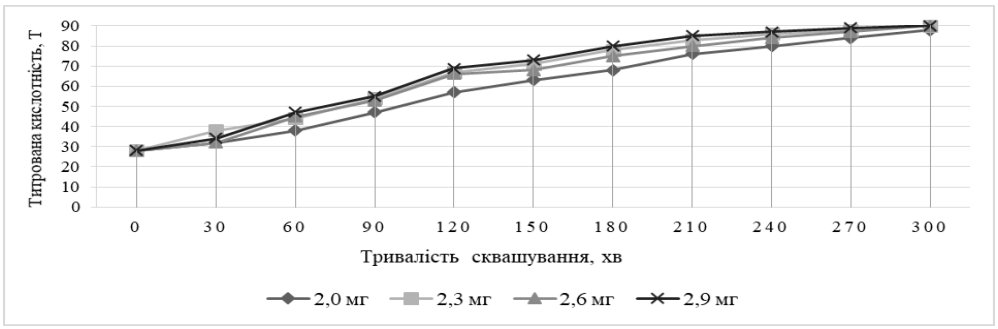
Для сквашування молочних сумішей використовували заквашувальний препарат (ЗП) прямого внесення YC-X11 (виробник Chr. Hansen, Данія), до складу якої входять культури молочнокислих бактерій Streptococcus thermophilus та Lactobacillus delbrueckii ssp. Bulgaricus. Рекомендована виробником доза внесення заквашувального препарату 2,8-3,0 мг/100 г молока, температура заквашування - 40±2°С, тривалість 4-5 год.

Зазначені виробником параметри заквашування рекомендовані для молока, як вихідної сировини при виробництві йогурту. Тому, на першому етапі досліджень з метою корегування технологічних параметрів заквашування молочних сумішей з підвищеним вмістом сухих речовин на основі сколотин, було визначено раціональні дози внесення заквашувального препарату для зазначеної вихідної сировини.

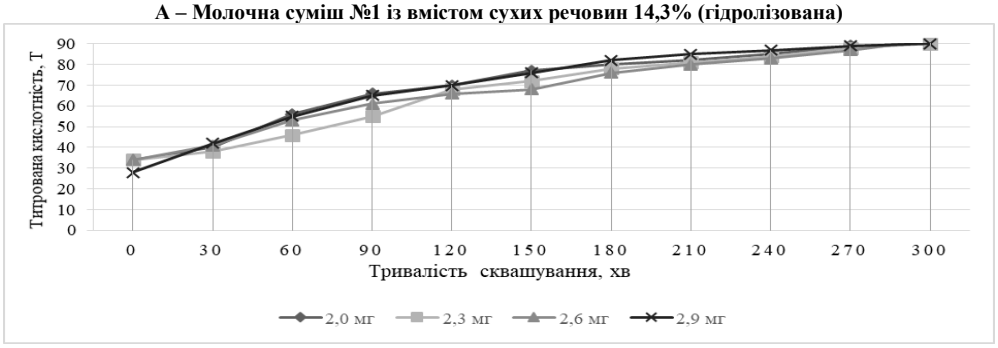
Відповідно до ДСТУ 4343:2004 титрована кислотність при виробництві йогуртів повинна бути не менше 80°Т. Тому ефективність заквашувального препарату оцінювали за титрованою кислотністю утворених кисломолочних згустків та органолептичними показниками.

В розроблених молочних сумішах (табл. 1) з підвищеним вмістом сухих речовин та гідролізованою лактозою, досліджували дозу внесення заквашувального препарату 2,0 мг, 2,3 мг, 2,6 мг, 2,9 мг. Тривалість заквашування становила від 30 до 300 хв, періодичність відбору проб 30 хв. Заквашування проводили при

температурі 40±2°С. Результати досліджень наведені на рис. 1, 2.

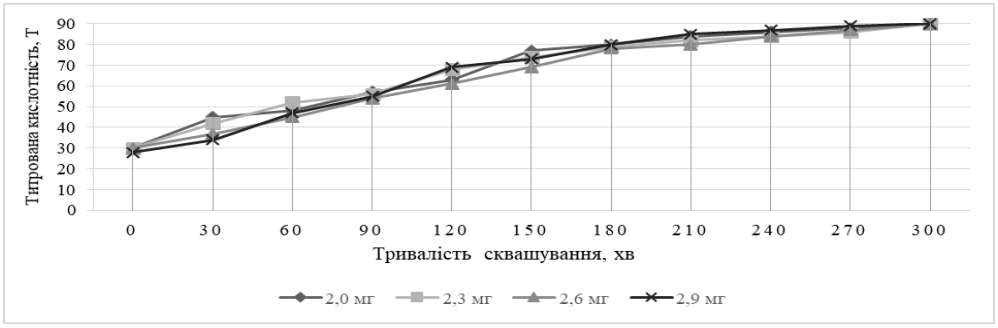


А – Молочна суміш №1 із вмістом сухих речовин 14,3% (гідролізована)

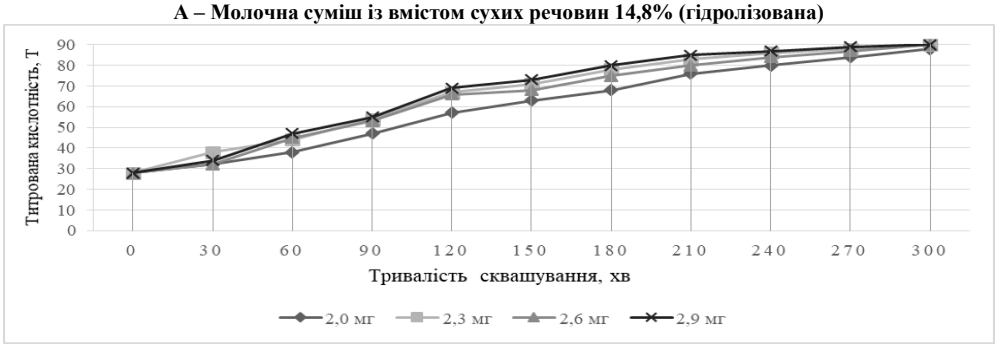


Б – Молочна суміш №2 із вмістом сухих речовин 16,7% (гідролізована)

Рис. 1. Вплив дози заквашувального препарату на тривалість заквашування молочних сумішей із КМБ та гідролізованою лактозою



А – Молочна суміш із вмістом сухих речовин 14,8% (гідролізована)



Б – Молочна суміш із вмістом сухих речовин 15,5% (гідролізована)

Рис. 2. Вплив дози заквашувального препарату на тривалість заквашування молочних сумішей із ССД та гідролізованою лактозою

В низьколактозних молочних продуктах вміст лактози повинен становити не більше 1% [19]. Тому для визначення відповідності продуктів, отриманих після сквашування молочних сумішей, вимогам до низьколактозних молочних продуктів було проведено дослідження зміни їх вуглеводного складу. Результати досліджень наведено в табл. 2.

За результатами отриманих даних (табл. 2) видно, що у сумішах №3 і №4 залишковий вміст лактози знаходиться на досить високому рівні (1,18% та 1,73 % відповідно), що пояснюється використанням для нормалізації сироватки сухої демінералізованої, яка характеризується високим вмістом лактози (65%). Тому для подальших досліджень обрано продукти, отримані на основі молочних сумішей №1 та №2 нормалізованих концентратом молочних білків із вмістом залишкової лактози 0,75% та 0,82% відповідно.

Таблиця 2

Характеристика вуглеводного складу молочних сумішей

Дослідний зразок	Масова частка, %		
	Лактози	Глюкози	Галактози
Суміш №1	4,92	-	-
Суміш №1 гідролізована	1,25	3,46	3,25
Суміш №1 гідролізована сквашена	0,75	2,74	2,57
Суміш №2	5,18	-	-
Суміш №2 гідролізована	1,38	3,48	3,27
Суміш №2 гідролізована сквашена	0,82	3,51	3,33
Суміш №3	9,68	-	0,028
Суміш №3 гідролізована	1,96	3,44	3,28
Суміш №3 гідролізована сквашена	1,18	3,82	2,99
Суміш №4	10,63	-	0,039
Суміш №4 гідролізована	2,81	4,29	3,08
Суміш №4 гідролізована сквашена	1,73	4,72	3,51

Встановлено (рис. 1), що для утворення згустку та досягнення необхідного рівня кислотності (80°Т) у молочних сумішах із різни вмістом сухих речовин, доза внесення ферментного препарату має становити 2,3…2,6 мг, а тривалість процесу сквашування 210…240 хв. При внесенні дози заквашувального препарату у кількості 2,0 мг в дослідних зразках молочних сумішей згусток утворювався неоднорідної консистенції, спостерігалося виділення сироватки. В результаті внесення заквашувального препарату у кількості 2,9 мг та зазначеної тривалості сквашування утворювалися однорідні згустки, проте більш щільної консистенції, яка не характерна для питних йогуртів (табл. 3).

Таблиця 3

Показники якості молочних сумішей з гідролізованою лактозою після сквашування

Показники	Молочні суміші на основі сколотин нормалізовані КМБ							
	Суміш №1				Суміш №2			
Доза ЗП, мг	2,0	2,3	2,6	2,9	2,0	2,3	2,6	2,9
Титрована кислотність, °Т	80,0	82,0	83,0	84,0	80,0	81,0	83,0	85,0
Вміст лактози, %	0,78	0,75	0,75	0,73	0,84	0,82	0,82	0,81
Консистенція	Не однорідна, згусток не щільний; незначне виділення сироватки	Згусток щільний, однорідний по всій масі; без виділення сироватки		Густа; щільний згусток однорідний по всій масі	Неоднорідний згусток; незначне виділення сироватки	Однорідна по всій масі; згусток щільний, без виділення сироватки		Густа; щільний згусток однорідний по всій масі
Колір	Молочно-білий з легким жовтим відтінком							
Запах	Чистий, характерний для кисломолочних напоїв; без сторонніх ароматів та запахів							
Смак	Характерний кисломолочний, з приємних солодкуватим присмаком; без сторонніх присмаків;							

Також було встановлено, що молокозгортальна активність закваски на основі термофільних культур молочнокислих бактерій збільшилась на 15…20% у молочних сумішах із гідролізованою лактозою. Так, час сквашування молочних сумішей при температурі 41±1°С становив – 240…300 хв., у зразках із гідролізованою лактозою – 210…240 хв. Це пояснюється тим, що під час гідролізу лактози відбувається накопичення моноцукрів – глюкози і галактози, що слугують субстратом для молочнокислих бактерій. Таким чином, сквашування попередньо гідролізованих молочних сумішей дозволяє скоротити час процесу заквашування на 20%.

Фермент β-галактозидаза гідролізує лактозу з утворенням моноцукрів – глюкози і галактози. Ферментативний гідроліз лактози забезпечує накопичення моноцукрів в молочних сумішах, що позитивно впливає на процес заквашування. Оскільки моноцукри глюкоза і галактоза слугують поживним середовищем для молочнокислих бактерій, що містяться у заквашувальному препараті, це дозволяє скоротити час проведення процесу заквашування.

Лактоза займає одне з останніх місць по відносній шкалі солодкості, порівняно з цукрозою, вона у 5-6 разів менш солодка (16 ум. од). Індекси солодкості глюкози та галактози у декілька разів більші ніж лактози. Завдяки накопиченню глюкози і галактози в результаті гідролізу лактози та подальшим сквашуванням продукт має виражений солодкий присмак, що дає можливість не використовувати цукор при виробництві низьколактозного йогурту.

Висновки

На підставі проведених досліджень та опрацьованих технологічних рішень обґрунтовано раціональні параметри сквашування молочних сумішей на основі сколотин з підвищеним вмістом сухих речовин та гідролізованою лактозою: доза внесення закваски YC-X11 – 2,3…2,6 мг, температура заквашування 40±2°С, тривалість процесу – 210….240 хв.

Поєднання ферментативного гідролізу лактози у молочних сумішах із підвищеним вмістом сухих речовин та подальшого ферментування гідролізованих сумішей заквашувальним препаратом на основі штамів молочнокислих бактерій Streptococcus thermophilus та Lactobacillus delbrueckii ssp. Bulgaricus дозволяє отримати кінцевий продукт із вмістом лактози меншим 1%. Такий продукт може бути рекомендований для харчування осіб із лактазною недостатністю. Накопичення моноцукрів глюкози і галактози в результаті гідролізу та сквашування обумовлюють солодкість готового продукту, що виключає необхідність використання цукру у рецептурі низьколактозних йогуртів.

Література

1. Corgneau M., Scher J., Ritie-Pertusa L., Le D. T., Petit J., Nikolova Y., Gaiani C. Recent advances on lactose intolerance: Tolerance thresholds and currently available answers. Critical reviews in food science and nutrition. 2017. Vol. 57. № 15. P. 3344-3356.

2. Heyman M. B. Lactose intolerance in infants, children, and adolescents. Pediatrics. 2006. Vol. 118. No 3. P. 1279-1286.

3. Lomer M. C. E., Parkes G. C., Sanderson J. D. Lactose intolerance in clinical prac-tice-myths and realities. Alimentary pharmacology & therapeutics. 2008. Vol. 27. P. 93-103.

4. Misselwitz B., Pohl D., Frühauf H., Fried M., Vavricka S. R., Fox M. Lactose mala-bsorption and intolerance: pathogenesis, diagnosis and treatment. United European gastroenterology journal. 2013. Vol. 1. P. 151-159.

5. Романчук І.О. Закономірності формування кисломолочних згустків в молочних сумішах з гідролізованою лактозою та підвищеним вмістом сухих речовин / І.О. Романчук, Л.О. Моісеєва, О.П. Гондар, Т.В. Рудакова // Продовольчі ресурси. – 2014. – № 6. – С. 107–112.

6. Юдіна Т. Формування вітчизняного ринку безлактозних і низьколактозних молочних продуктів / Т. Юдіна, А. Серенко // Товари і ринки : міжнародний науково-практичний журнал. – 2021. – № 2. – С. 33–43.

7. Dennis A., Robert W. Yogurt, cultured fermented milk, and health: a systematic Review. Nutrition Reviews. 2020. Vol. 79. P. 599-614.

8. Йогурти. Загальні технічні умови : ДСТУ 4343:2004. [Чинний від 2004-09-20]. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 11 с. (Національні стандарти України).

9. Hill D., Ross R.P., Arendt E. Microbiology of yogurt and bio-yogurts containing probiotics and prebiotics. In: hah NP, ed. Yogurt in Health and Disease Prevention. Elsevier, London: Academic Press. 2017. Vol. 17. P. 69-85.

10. Solomon A., Bondar M., Dyakonova A. Substantiation of the technology for fermented sour-milk desserts with bifidogenic properties. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 1. P. 6-16.

11. Мінорова А. Підбір та дослідження ефективності заквашувальних препаратів з підвищеною β-галактозидазною активністю / А. Мінорова, І. Ромачук, С. Даниленко // Продовольчі ресурси. – 2022. – № 10. – С. 88–98.

12. β-галактозидазна активність бактерій як критерій відбору штамів до складу бактеріальних препаратів / О.І. Потемська, Н.Ф. Кігель, С.Г. Даниленко, С.Г. Копилова // Харчова наука та технологія. – 2017. – № 11. – С. 35–40.

13. Мінорова А.В. Біотехнологічні аспекти застосування штамів з β-галактозидазною активністю у виробництві ферментованих молочних продуктів / А.В. Мінорова, С.Г. Даниленко, Т.В. Рудакова // Продовольчі ресурси. – 2021. – С. 117–134.

14. Романчук І.О. Ефективність гідролізу лактози у вторинній молочній сировині / І.О. Романчук, Т.І. Юдіна, А.В. Мінорова // Продовольчі ресурси. – 2021. – № 17. – С. 129–136.

15. Молоко та молочні продукти. Методи визначення вологи та сухої речовини : ДСТУ 8552:2015. [Чинний від 2015-12-18]. Київ : ДП "УкрНДНЦ", 2015. 17 с. (Національні стандарти України).

16. Консерви молочні згущені та продукти молочні сухі. Визначання кислотності потенціометричним та титрометричним методами : ДСТУ 8551:2015. [Чинний від 2017-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2015. 20 с.

17. Юдіна Т. Технологія низьколактозних молочних сумішей для йогуртів / Т. Юдіна, А. Серенко //

Товари і ринки : міжнародний науково-практичний журнал. – 2022. – № 3. – С. 108–116.

18. Серенко А.А. Використання вторинної молочної сировини у виробництві низьколактозних йогуртів / А.А. Серенко, Л.О. Моісеєва, Т.І. Юдіна // Обладнання та технології харчових виробництв: збірник наукових праць. – 2021. – № 2. – С. 2021.

19. Гончар Ю. М. Технологія напівфабрикату на основі низьколактозної молочної сироватки : дис. … доктора філософії: 181 «Харчові технології» / Гончар Юлія Миколаївна – Київ, 2021. – 255 с.

References

1. Corgneau M., Scher J., Ritie-Pertusa L., Le D. T., Petit J., Nikolova Y., Gaiani C. Recent advances on lactose intolerance: Tolerance thresholds and currently available answers. Critical reviews in food science and nutrition. 2017. Vol. 57. № 15. R. 3344-3356.

2. Heyman M. B. Lactose intolerance in infants, children, and adolescents. Pediatrics. 2006. Vol. 118. No 3. R. 1279-1286.

3. Lomer M. C. E., Parkes G. C., Sanderson J. D. Lactose intolerance in clinical prac-tice-myths and realities. Alimentary pharmacology & therapeutics. 2008. Vol. 27. R. 93-103.

4. Misselwitz B., Pohl D., Frühauf H., Fried M., Vavricka S. R., Fox M. Lactose mala-bsorption and intolerance: pathogenesis, diagnosis and treatment. United European gastroenterology journal. 2013. Vol. 1. R. 151-159.

5. Romanchuk I.O. Zakonomirnosti formuvannia kyslomolochnykh zghustkiv v molochnykh sumishakh z hidrolizovanoiu laktozoiu ta pidvyshchenym vmistom sukhykh rechovyn / I.O. Romanchuk, L.O. Moiseieva, O.P. Hondar, T.V. Rudakova // Prodovolchi resursy. – 2014. – № 6. – S. 107–112.

6. Iudina T. Formuvannia vitchyznianoho rynku bezlaktoznykh i nyzkolaktoznykh molochnykh produktiv / T. Yudina, A. Serenko // Tovary i rynky : mizhnarodnyi naukovo-praktychnyi zhurnal. – 2021. – № 2. – S. 33–43.

7. Dennis A., Robert W. Yogurt, cultured fermented milk, and health: a systematic Review. Nutrition Reviews. 2020. Vol. 79. R. 599-614.

8. Iohurty. Zahalni tekhnichni umovy : DSTU 4343:2004. [Chynnyi vid 2004-09-20]. Kyiv : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2005. 11 s. (Natsionalni standarty Ukrainy).

9. Hill D., Ross R.P., Arendt E. Microbiology of yogurt and bio-yogurts containing probiotics and prebiotics. In: hah NP, ed. Yogurt in Health and Disease Prevention. Elsevier, London: Academic Press. 2017. Vol. 17. R. 69-85.

10. Solomon A., Bondar M., Dyakonova A. Substantiation of the technology for fermented sour-milk desserts with bifidogenic properties. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 1. P. 6-16.

11. Minorova A. Pidbir ta doslidzhennia efektyvnosti zakvashuvalnykh preparativ z pidvyshchenoiu β-halaktozydaznoiu aktyvnistiu / A. Minorova, I. Romachuk, S. Danylenko // Prodovolchi resursy. – 2022. – № 10. – S. 88–98.

12. β-halaktozydazna aktyvnist bakterii yak kryterii vidboru shtamiv do skladu bakterialnykh preparativ / O.I. Potemska, N.F. Kihel, S.H. Danylenko, S.H. Kopylova // Kharchova nauka ta tekhnolohiia. – 2017. – № 11. – S. 35–40.

13. Minorova A.V. Biotekhnolohichni aspekty zastosuvannia shtamiv z β-halaktozydaznoiu aktyvnistiu u vyrobnytstvi fermentovanykh molochnykh produktiv / A.V. Minorova, S.H. Danylenko, T.V. Rudakova // Prodovolchi resursy. – 2021. – S. 117–134.

14. Romanchuk I.O. Efektyvnist hidrolizu laktozy u vtorynnii molochnii syrovyni / I.O. Romanchuk, T.I. Yudina, A.V. Minorova // Prodovolchi resursy. – 2021. – № 17. – S. 129–136.

15. Moloko ta molochni produkty. Metody vyznachennia volohy ta sukhoi rechovyny : DSTU 8552:2015. [Chynnyi vid 2015-12-18]. Kyiv : DP "UkrNDNTs", 2015. 17 s. (Natsionalni standarty Ukrainy).

16. Konservy molochni zghushcheni ta produkty molochni sukhi. Vyznachannia kyslotnosti potentsiometrychnym ta tytrometrychnym metodamy : DSTU 8551:2015. [Chynnyi vid 2017-01-01]. Kyiv : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2015. 20 s.

17. Iudina T. Tekhnolohiia nyzkolaktoznykh molochnykh sumishei dlia yohurtiv / T. Yudina, A. Serenko // Tovary i rynky : mizhnarodnyi naukovo-praktychnyi zhurnal. – 2022. – № 3. – S. 108–116.

18. Serenko A.A. Vykorystannia vtorynnoi molochnoi syrovyny u vyrobnytstvi nyzkolaktoznykh yohurtiv / A.A. Serenko, L.O. Moiseieva, T.I. Yudina // Obladnannia ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv: zbirnyk naukovykh prats. – 2021. – № 2. – S. 2021.

19. Honchar Yu. M. Tekhnolohiia napivfabrykatu na osnovi nyzkolaktoznoi molochnoi syrovatky : dys. … doktora filosofii: 181 «Kharchovi tekhnolohii» / Honchar Yuliia Mykolaivna – Kyiv, 2021. – 255 s.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-212-219
УДК 621.7:681.5

СОКОЛАН ЮЛІЯ
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0002-0273-5719
e-mail: sokolan.julia@gmail.com
ЛАРІОНОВ ІВАН
Хмельницький національний університет
e-mail: Larionov674@gmail.com
МАЙДАН ПАВЛО
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0003-3319-8730
e-mail: maidanps@gmail.com
СОКОЛАН КАТЕРИНА
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0002-3513-8312
e-mail: sokolan.kateryna@gmail.com

АВТОМАТИЗОВАНЕ ГЕНЕРУВАННЯ КОДІВ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ НА ВЕРСТАТАХ З ЧИСЛОВИМ ПРОГРАМНИМ КЕРУВАННЯМ

В сучасних реаліях процес генерації кодів для верстатів з ЧПК проводиться вручну, або ж оператор верстату пише код для CAD-моделі, яка була запроєктована на попередньому етапі. На наступному етапі код верстату з ЧПК симулюється для подальшої перевірки на наявність помилок, тобто проводиться процес компіляції коду. Цей етап є обов'язковим перед початком роботи та проведення оброблення деталей на верстатах з ЧПК. Написання та подальше калібрування коду для верстату з ЧПК є достатньо трудомісткою процедурою. При цьому слід відзначити, що більша частина часу витрачається на етап роботи із CAD/CAM моделями та операціями з ЧПК, що виконуються вручну. Така проблематика значно сповільнює процес оброблення деталей на верстатах з ЧПК. Ключем вирішення цієї проблеми є автоматизація процесу генерації коду для верстату з ЧПК.

У роботі запропоновано використання розробленого скрипта, результатом роботи якого є автоматична генерація кодів обробки деталей. Такі скрипти в подальшому можна використовувати для проведення обробки деталей на верстатах різних виробників. Крім того, проведено порівняння кодів обробки деталей, які були згенеровані у програмному забезпеченні Catia V5 та кодів, згенерованих автоматично. В результаті встановлено, що використання автоматичного підходу більш гнучке, оскільки зміна геометричних параметрів деталей викликає автоматичну зміну коду обробки такої деталі, на відміну від кодів, створених у Catia V5, в яких при мінімальній зміні розмірів деталі необхідно повторювати весь процес створення коду обробки.

Ключові слова: моделювання, коди обробки деталі, підпрограма, Catia V5, HAAS VM3, автоматизоване проєктування, траєкторія руху інструменту, верстат з числовим програмним керуванням.

IULIIA SOKOLAN
Khmelnytskyi National University
https://orcid.org/0000-0002-0273-5719
e-mail: sokolan.julia@gmail.com
IVAN LARIONOV
Khmelnytskyi National University
e-mail: Larionov674@gmail.com
PAVLO MAIDAN
Khmelnytskyi National University
https://orcid.org/0000-0003-3319-8730
e-mail: maidanps@gmail.com
KATERYNA SOKOLAN
Khmelnytskyi National University
https://orcid.org/0000-0002-3513-8312
e-mail: sokolan.kateryna@gmail.com

AUTOMATED GENERATION OF PART PROCESSING CODES ON CNC MACHINES

In modern realities, the process of generating codes for CNC machines is carried out manually, or the machine operator writes the code for the CAD model that was designed at the previous stage. At the next stage, the CNC machine code is simulated for further checking for errors, i.e., the code is compiled. This stage is mandatory before starting work and machining parts on CNC machines. Writing and subsequent calibration of the code for a CNC machine is a rather laborious procedure. It should be noted that most of the time is spent on the stage of working with CAD/CAM models and CNC operations performed manually. This problem significantly slows down the process of machining parts on CNC machines. The key to solving this problem is to automate the process of generating code for a CNC machine.

The paper proposes the use of a developed script, the result of which is the automatic generation of part processing codes. Such scripts can be used in the future to process parts on machines from different manufacturers. In addition, a comparison of the part processing codes generated in the Catia V5 software and the codes generated automatically is carried out. As a result, it was found that the use of an automatic approach is more flexible, since a change in the geometric parameters of parts causes an automatic change in the machining code of such a part, in contrast to the codes created in Catia V5, in which, with a minimal change in the dimensions of the part, it is necessary to repeat the entire process of creating a machining code.

Keywords: modeling, part machining codes, subroutine, Catia V5, HAAS VM3, computer-aided design, tool path, computer numerical control machine.

Постановка проблеми

Для генерації кодів з ЧПК використовуються дані, які в подальшому завантажуються в систему автоматизованого виробництва (CAM). Внаслідок цього можна досягти скорочення часу виконання замовлення, підвищення продуктивності та якості, а також покращення життєвого циклу розробки продукції. В роботі розглядається можливість запровадження систем автоматизованого планування проєктів (CAPP) в якості ланку зв'язку між CAM та CAD системами.

Слід враховувати, що в результаті автоматизації процесу генерації кодів для верстатів з ЧПК знано зменшується участь людини в процесі обробки, оскільки більшість завдань виконуються обчислювальною технікою. В результаті такої автоматизації можна досягнути двох протилежних наслідків. Першим наслідком стане мінімізація людського фактору та можливості виникнення помилок. Другий фактор призводить до усунення потреби у висококваліфікованих працівниках на етапі генерації коду.

Метою статті є процес автоматизації генерації кодів для верстатів з числовим програмним керування (ЧПК) на основі геометричних моделей автоматизованого проєктування (САПР), а також визначення потенціалу генерації таких кодів.

Виклад основного матеріалу

Основні етапи написання коду обробки деталі на верстаті з ЧПК наведені на рис. 1. Кожна із програм оброблення складається з певної кількості рядків, які, в свою чергу, називають кадрами керуючої програми (ККП). Кадри керуючої програми – це складові керуючої програми, які відпрацьовуються та вводяться як єдине ціле, при цьому містять не менше однієї команди. Зчитування програми відбувається покадрово. Кожному кадру прийнято призначати свій власний номер, який позначається літерою N та розташовується на початку кадру. Підготовчі коди позначаються адресою, яка позначається літерою G та вони визначають налаштування системи ЧПК на виконання роботи. Допоміжні кадри позначаються M, які призначені для керування режимами роботи.

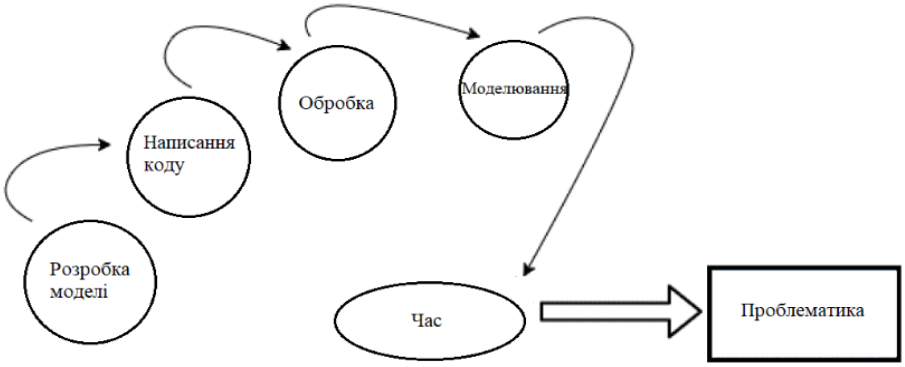


Рис. 1. Проблематика, що розглядається

В роботі досліджується процес автоматизованої генерації кодів для двох верстатів. Перший верстат виробництва Roland (Німеччина) моделі MDX-40A (рис. 2) представляє собою універсальний фрезерно-гравіювальний верстат з ЧПК [1]. Цей верстат може підтримувати установку як 3D-скануючої головки, так і поворотної осі. Оцифрування тривимірних об'єктів можна виконувати на 3D сканері, після чого можна виконувати кругову та чотирьох сторонню обробку за допомогою поворотної осі. Оператору достатньо легко освоїти управління верстатом MDX-40A, оскільки в ньому наявна можливість автоматичного визначення нульової точки по осі Z, а також в нього просте програмне забезпечення та USB інтерфейс. На цьому верстаті можна створювати майстер-моделі, готові вироби та прототипи.

Другий досліджуваний верстат – HAAS VM-3 (рис. 3). Верстати HAAS серії VM представляю собою високопродуктивні вертикальні оброблювальні центри, які здатні забезпечувати не тільки жорсткість та точність обробки, але й температурну стабільність для виготовлення штампів та прес-форм. Кожна модель відрізняється розміром робочого простору, швидкість обертання шпинделя сягає 12000 об/хв, стіл розрахований на різні пристрої. До стандартних функцій належать пристрій заміни інструменту бокової установки, автоматичний пневматичний пістолет, мають в наявності сопло подачі змащувально-охолоджувальної рідини із можливістю його програмування, а також функцію повного попереднього перегляду [2].

Робота виконується на двох різних верстатах. Для автоматичної генерації G-кодів запуску верстату MDX 40A і подальшого створення будь-якої заданої CAD-моделі створюється відповідний фреймворк. Робота із фреймворком поетапна, на першому етапі розробляється та імпортується модель у програмне забезпечення фрезерного верстату MDX 40A SRP pro, яке використовує відповідні формати файлів. Генерування коду для програмного забезпечення SRP pro на цьому етапі виконується вручну.

Наступний фреймворк створюється для автоматичної генерації кодів в програмному забезпечення SRP засобами автоматизації для обробки на верстатах з ЧПК. В результаті порівнюються результати по часу виконання ручного та автоматично згенерованого коду, а також аналізуються дані стосовно точності проведених обробок.

Рис. 2. Верстат Roland MDX 40A

Рис. 3. Верстат HAAS VM-3

В автоматизованому режимі проєктується параметрична модель в програмі Catia V5. Код моделі повинен бути написаний на основі аналізу траєкторії руху інструменту, його положення, розміру, аналізу розмірів моделі, тощо. Цей набір параметрів буде першим для моделі.

Після аналізу коду в програмі Catia V5 буде створено другий набір параметрів. Такий набір створюється для присутніх у коді змінних, до яких можна віднести глибину різання, координати положення по осям X та Y, тощо. На цьому етапі відбувається зв'язок наборів параметрів за допомогою формул, в результаті чого будується взаємозв'язок геометрії із кодом. У випадку, якщо використовується автоматизований метод генерації NC-кодів, то вони генеруються автоматично.

Таким чином після проведеного аналізу коду для будь-якого із вимірів виробу та/або деталі у оператора є можливість згенерувати нові коди у випадку зміни розмірності моделі. Змінити розмірність моделі можна шляхом зміни основних її параметрів.

Генерування коду відбувається автоматично в текстовому форматі, після чого його можна змінити на формат файлу «.NC» для подальшого запуску на верстаті з ЧПК. Такий підхід буде також використовуватись для верстату з ЧПК HAAS VM 3. Використання цього коду призводить до моделювання на панелі дисплея верстату з ЧПК відповідної симуляції та перевірки точності написаного коду. Поки триває симуляція відповідно до стандартів верстата та вимог проєктування можна ввести необхідні зміни, наприклад, розмір інструменту, встановити інший початок координат, змінити інструмент, тощо.

На рис. 4 наведено покрокова методика процесу автоматизованої генерації кодів для обробки деталей на верстатах з ЧПК, який починається із створення тривимірної CAD-моделі. Ця модель на наступному етапі експортується в CAM інтерфейс з метою визначення параметрів та послідовності операцій. На етапі подальшої обробки відбувається пов'язування визначених для моделі параметрів із сценарієм роботи ЧПК, тобто будується взаємний зв'язок геометрії та коду. На наступному етапі код експортується у верстат з ЧПК для оброблення. Такий скрипт дозволяє визначати такі параметри оброблення деталі, як швидкість подачі, швидкість обертання шпинделя, глибину різання, тощо.

Робочі рухи органів у верстатах з ЧПК, а також здійснення їх переміщень, програмуються в межах системи координат (рис. 5). В основу системи координат покладена стандартна права система координат з осями x, z, y, які вказують напрями руху інструменту (додатні) відносні нерухомої заготовки. У випадку, якщо сам інструмент нерухомий, при цьому відбувається рух заготовки, то систему координат позначають x', z', y' [3].

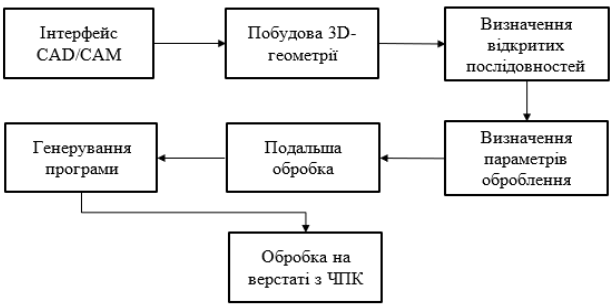


Рис. 4. Методика проведення досліджень

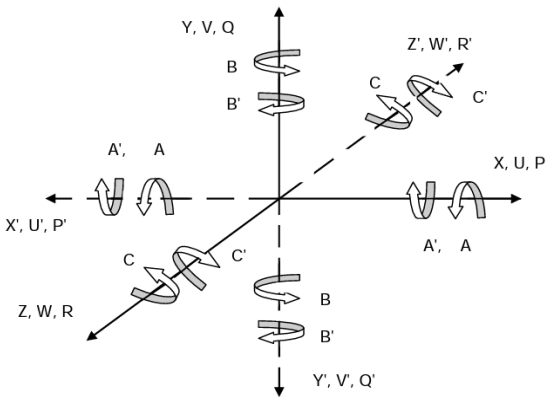
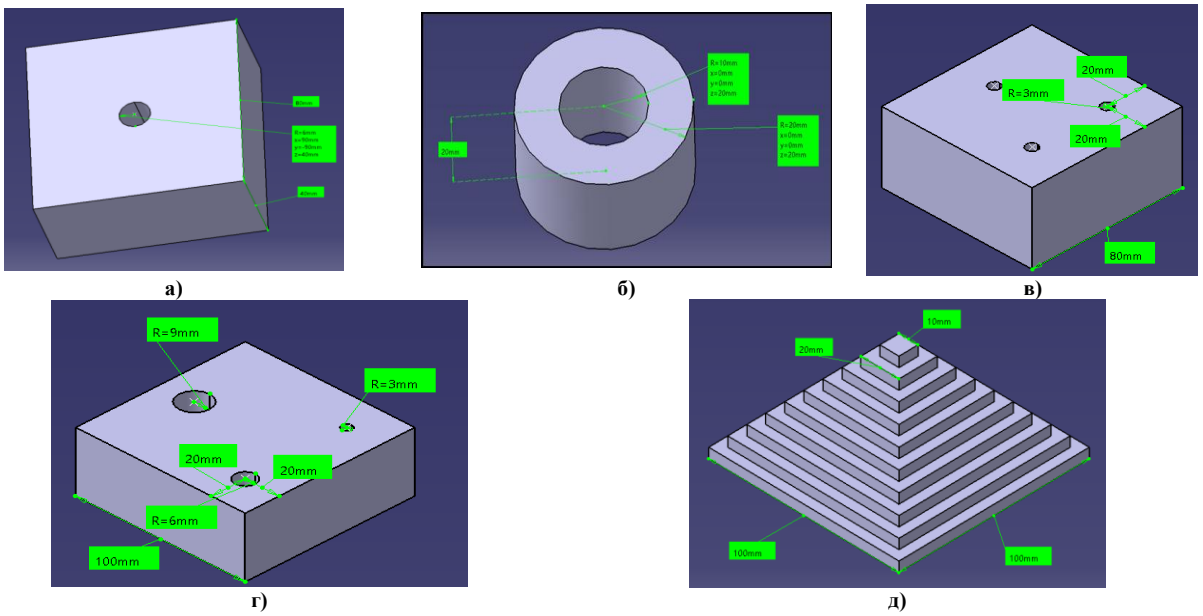


Рис. 5. Системи координат верстатів з ЧПК

Програмне забезпечення CATIA V5 відноситься до важких систем автоматизованого проєктування. В CATIA V5 реалізовано всебічний комплексний інтегрований підхід, що дозволяє успішно здійснювати в межах однієї системи весь цикл створення нового виробку – від етапу розробки концептуальних моделей до етапу підготовки керуючих програм для обробки на верстатах з ЧПК. У ПЗ CATIA V5 наявні модулі для створення програм на верстатах з ЧПК. Використання таких модулів дають можливість створювати програми обробки для 2,5-, 3-, 4-, 5-осьової токарної та фрезерної обробки. Ряд науковців проводили дослідження точності та ефективності використання автоматично створених у CATIA V5 кодів для проведення обробки деталей на верстатах з ЧПК [4–7].

Для порівняння результатів автоматичної генерації кодів обробки деталей використовувалось два методи. Перший, ручний метод, полягав у тому, що на основі побудованої в CATIA V5 геометричної моделі, генерувався код обробки такої деталі самим програмним забезпеченням. У другому, автоматизованому методі генерації кодів, на першому етапі також використовувалась геометрична модель з CATIA V5. В подальшому, використовувався скрипт генерації коду, який був написаний на Visual Basic for Applications [8].

Коди обробки деталей, написані ручним методом та автоматизованим, перевірялись для моделей, які наведені на рис. 6.



а) **б)** **в)**

г) **д)**

Рис. 6. Моделі деталей, процес обробки яких розглядається в роботі:
а - корпус з отвором; б - порожнистий циліндр; в - корпус з отворами однакового радіусу;
г - корпус з отворами різного радіусу; д - піраміда

Основним недоліком генерації кодів ручним методом за допомогою CATIA V5 є те, що у випадку зміни будь-яких параметрів моделі або її розмірів, процес створення коду необхідно повністю проводити з першого до останнього етапу, тобто вибір поверхонь і площин, процес обробки, тощо. Іншим недоліком при генерації кодів з CATIA V5 є те, що ці коди достатньо довгі і містять від 300 до 2500 рядків.

Для порівняння згенерованих кодів для корпусу із отвором, який показаний на рис. 6, а, спочатку виконувалась генерація коду обробки ручним методом у CATIA V5. В результаті код обробки деталі, сформований у CATIA V5 формує 388 рядків коду.

У випадку застосування автоматизованого методу, першим кроком автоматичної генерації коду обробку деталі є створення параметрів та прив'язка параметрів, які використовуються в Catia V5 і VB скрипті до геометрії деталі. Параметри профілю корпусу – це X1, Y1, X2, Y2, а параметри профілю отвору - X3 та Y3 (рис. 7).

а) **б)**

Рис. 7. Параметри деталі:
а – параметри у Catia V5, б – параметри обробки деталі у скрипті

Розглядається корпус із габаритними розмірами 80 мм (ширина і довжина). Оскільки центром координат при обробці деталей на верстатах з ЧПК є центр деталі, то координати зовнішніх граней корпусу мають відповідно значення 40 та -40 (рис. 8). Другим етапом обробки деталі є створення отвору. Для цього необхідно задати правило для визначення параметрів X3 та Y3 (рис. 9).

Третім етапом обробки деталі є встановлення інструменту та заготовки. Параметри "XW" і "yw" створюються за допомогою формули, яка в свою чергу створює прив'язку довжини і ширини заготовки відповідно. Ці параметри для позиціонування інструмента в певній точці. Параметри yw_val і xw_val – це параметри, що викликаються VB скриптом для отримання відповідних значень параметрів yw та XW. В результаті роботи написаного скрипта було автоматично згенеровано код обробки деталі, який представлено у таблиці 1.

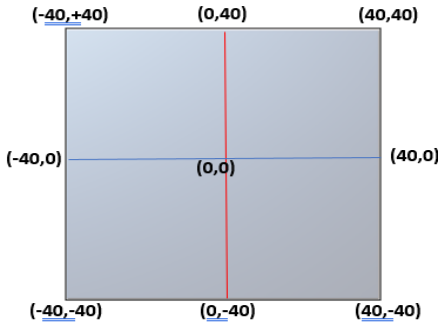


Рис. 8. Координати точок обробки корпусу без отвору

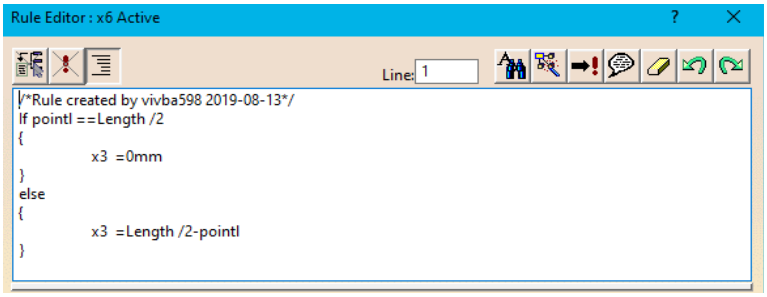


Рис. 9. Правило для параметрів отвору

Команда Print #1 використовується для автоматичної генерації коду під час запуску програми. Розглянемо більш детально кожен із рядків.

1. Знак % використовується на початку та в кінці програми обробки, оскільки він є обов'язковим елементом синтаксису програми обробки на верстаті з ЧПК. Відсутність цього знаку призведе до помилки.

2. Назва програми, яка починається з літери O, після якої вказуються цифри і назва моделі деталі.

3-4. Ініціалізація програми обробки за допомогою стандартних кодів, що є обов'язковими на всіх верстатах з ЧПК.

5. За конкретно обраний інструмент відповідає команда T14, а за зміну інструменту – команда M6.

6. G54 означає зміщення робочих координат, що при обробці деталі використовується встановлення початкової/опорної точки ріжучого інструменту на заготовці. Напрямки і значення параметрів X і Y обираються на основі бажаного положення початку траєкторії руху інструменту. Швидкість обертання шпинделя – S, запуск шпинделя – команда M3.

7. В цьому рядку вказується відстань інструменту від заготовки та подача ЗОР. Команда M88 відповідає за потік ЗОР через інструмент або всередині самого інструменту.

8. Запуск роботи інструменту.

9. Виклик підпрограми, позначення L16 відповідає за кількість циклів роботи інструменту для отримання спроєктованого профілю корпусу. У випадку виклику підпрограми, процес обробки деталі переходить до рядка 23.

Посилання на підпрограму, яка викликається рядком 9.

Значення Z задається як -2,5 мм, що означає рух вглибину. Кількість циклів обробки деталі вказується при виклику підпрограми (16 разів). Це означає, що під час кожного циклу обробки деталі проводиться різання на глибину 2,5 мм.

На цьому етапі дуже важливо обрати оптимальне значення глибини різання, тобто значення Z з метою зменшення ризику пошкодження інструменту. Виробники інструменту рекомендують використовувати значення, яке лежить в межах від 2 до 3 мм. Враховуючи, що необхідна висота корпусу становить 40 мм, кількість циклів виконання підпрограми обиралась значенням, яке буде кратне Z (16 × 2,5 = 40 мм). Рядки коду з 26 по 30 застосовуються для виконання операцій над заготовкою для отримання корпусу і видалення зайвого матеріалу в заготовці.

Значення D застосовується для визначення діаметру інструменту. На початку обробки інструмент позиціонується в точці із координатами Y=+80 та X= -80 на відстані від заготовки (рис. 10). Після обробки корпусу рядок коду під номером 32 відповідає за закінчення підпрограми і програма переходить до зчитування рядку під номером 10. Цей рядок застосовується для зупинки виконання підпрограми після завершення циклу зазначених в ній операцій по обробці деталі. Рядок 11, в свою чергу, вимикає подачу ЗОР через ріжучий інструмент.

У 14 рядку для обробки отвору у корпусі обирається інструмент. 15 рядок відповідає за установку інструменту в центрі. За сам процес свердлування отвору відповідають команди у 18 рядку. В цьому рядку коду зазначається, що радіус отвору становить 3 мм, а глибина – 30 мм. Показник Q застосовується для зазначення кількості циклів свердлування. Зупинка процесу свердлування забезпечується командами, які вказані у рядку 19.

Таблиця 1

Автоматично згенерований код обробки корпусу із отвором

Номер рядка коду	Код у скрипті	Кінцевий код обробки деталі	Номер рядка коду	Код у скрипті	Кінцевий код обробки деталі
1	Print #1, "%"	%	2	Print #1, "O00004 (CubeWithSingleHole)"	O00004 (CubeWithSingleHole)
3	Print #1, "G28 G91 Z0"	G28 G91 Z0	4	Print #1, "G0 G40 G80 G90"	G0 G40 G80 G90
5	Print #1, "T14 M6"	T14 M06	6	Print #1, "G54 X" & -xw_val; "Y" & yw_val; "S" & s_1val; "M3"	G54 X-80 Y80 S1200 M3
7	Print #1, "G43 Z3 H14 M88"	G43 Z3 H14 M88	8	Print #1, "G01 Z0. F" & f_1val; ""	G01 Z0. F120
9	Print #1, "M97 P901 L16"	M97 P901 L16	10	Print #1, "M01"	M01
11	Print #1, "M89"	M89	12	Print #1, "G28 G91 Z0"	G28 G91 Z0
13	Print #1, "G0 G40 G80 G90"	G00 G40 G80 G90	14	Print #1, "T6 M6"	T6 M6
15	Print #1, "G54 X" & x_3val; " Y" & y_3val; " S" & s_2val; " M3"	G54 X0. Y0. S1100 M03	16	Print #1, "G43 Z3 H6 "	G43 Z3. H06
17	Print #1, "M08"	M08	18	Print #1, "G83 Z" & -D_val; " R" & h_rad; " Q5"; " F" & f_2val; ""	G83 Z-30. R3. Q5. F100.
19	Print #1, "G80 M9"	G80 M9	20	Print #1, "G28 G91 Z0"	G28 G91 Z0
21	Print #1, "G28 G91 Y0"	G28 G91 Y0	22	Print #1, "M30"	M30
23	Print #1, "N901"	N901	24	Print #1, "G91 Z-2.5 F" & f_1val; " M08"	G91 Z-2.5 F120 M08
25	Print #1, "G90"	G90	26	Print #1, "G01 G41 X" & -xw_val; " Y" & y_1val; " D14"	G01 G41 X-80 Y40 D14
27	Print #1, "G01 X" & x_1val; ""	G01 X40	28	Print #1, "G01 Y" & -y_1val; ""	G01 Y-40
29	Print #1, "G01 X" & -x_2val; ""	G01 X-40	30	Print #1, "G01 Y" & y_2val; "	G01 Y57
31	Print #1, "G01 G40 X" & -xw_val; " Y" & yw_val;	G01 G40 X-80 Y80	32	Print #1, "M99"	M99

За сам процес свердлування отвору відповідають команди у 18 рядку. В цьому рядку коду зазначається, що радіус отвору становить 3 мм, а глибина – 30 мм. Показник Q застосовується для зазначення кількості циклів свердлування. Зупинка процесу свердлування забезпечується командами, які вказані у рядку 19. Рядки 20 і 21 застосовуються наприкінці програми для відведення інструменту від заготовки після завершення процесу обробки деталі. Кінець програми зазначений у рядку 22.

Аналогічним чином було проведено дослідження та порівняння кодів ручним та автоматизованим методом для деталей, зображених на рис. 6, б-д. Траєкторія руху інструменту та її відповідність автоматично згенерованим кодам обробки порожнистого циліндру наведена на рис. 11.

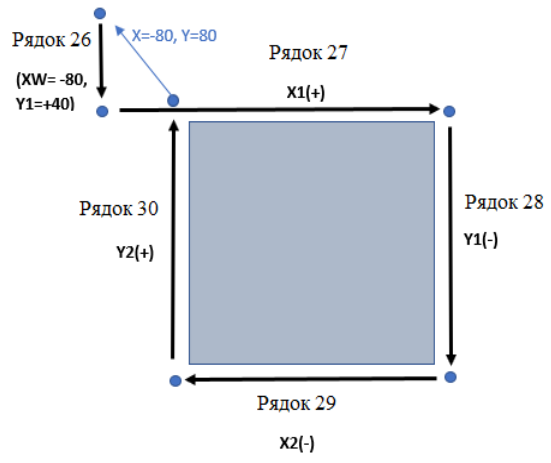


Рис. 10. Траєкторія руху інструменту при обробці корпусу

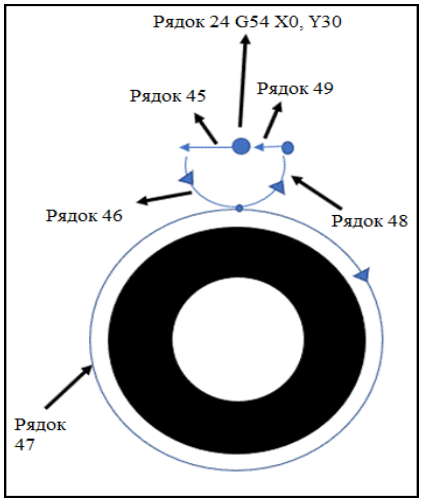


Рис. 11. Траєкторія руху інструменту при обробці порожнистого циліндру

При розгляді деталей типу корпус із отворами (рис. 6 в, г) використовувались два різні підходи. В першому підході розміщення отворів привласнювалось значення, яке не мало математичного зв'язку із габаритними розмірами корпусу (умовно фіксований отвір). В другому підході створювалась математична залежність між розмірами корпусу і розміщенням отворів на площині корпусу (умовно рухомий отвір). Основні відмінності у згенерованих кодах обробки отворів показані у таблиці 2 та на рис. 12.

При аналізі відмінностей у коді обробки корпусу із отворами різного діаметру (рис. 6, г) у порівнянні із корпусом із отворами однакового діаметру було встановлено, що відмінність у кодах стосується лише рядків зміни інструменту.

Основна відмінність моделей, зображених на рис. 6, а-г у порівнянні із граною пірамідою (рис. 6, д) з точки зору формування кодів обробки деталі на верстаті з ЧПК полягає в тому, що при обробці піраміди ріжучий інструмент на кожному етапі обробки змінює своє положення відносно центру заготовки та відбувається збільшення глибини різання.

Аналогічно до попередніх моделей, перший етап роботи із пірамідою полягає у створення відповідних параметрів та їх подальша прив'язка в Catia V5 і скрипті VB до геометрії деталі. Для проведення такої обробки в скрипті автоматичної генерації кодів буде використовуватись цикл For.

Таблиця 2

Відмінності при обробці отворів

Номер рядку обробки деталі	Модель із математичною залежністю між отворами та зовнішніми розмірами корпусу	Модель із фіксованим положенням отворів по відношенню до корпусу
23	T6 M6	T6 M6
24	G54 **X25 Y25** S1100 M3	G54 **X30 Y30** S1100 M3
25	G43 Z3 H6 M8	G43 Z3 H6 M8
26	G83 Z-40 Q5 R3 F120	G83 Z-40 Q5 R3 F120
27	**X-25 Y25**	**X-30 Y30**
28	**X0 Y-25**	**X0 Y-30**
29	G80 M9	G80 M9

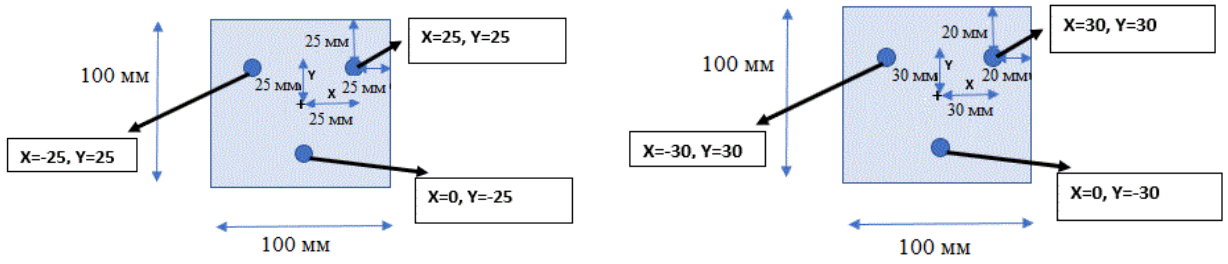


Рис. 12. Відмінності при обробці отворів у корпусі:
а – умовно фіксований отвір; б – умовно рухомий отвір

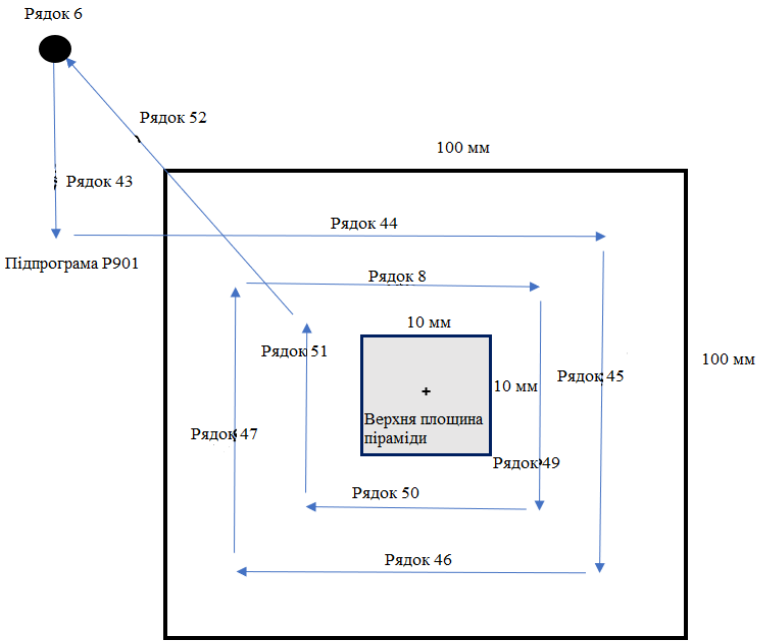


Рис. 13. Траєкторія руху інструменту при обробці піраміди

Після обробки верхньої площини піраміди в другій підпрограмі вже буде вирізана глибина 5 мм. Отже, при проведенні наступної операції ріжучий інструмент повинен в напрямку Z рухатись ще на 5 мм. По цій причині в рядку значення становить Z-5. Ця значення для кожної підпрограми отримуються на основі параметрів, створених в Catia V5, які в подальшому викликаються у скрипті. Далі викликається наступна підпрограма. Такі підпрограми викликаються до тих пір, поки ріжучий інструмент не проведе обробку основи піраміди. На рис. 13 наведено траєкторію руху інструменту при обробці піраміди та її відповідність рядкам автоматично згенерованого коду обробки деталі.

Порівняння кількості рядків коду обробку деталі ручним та автоматизованим методом наведено у таблиці 3.

Таблиця 3

Порівняння кількості рядків коду різними методами

Деталь	Кількість рядків коду		Кількість підпрограм
	Ручний метод	Автоматизований метод	
Корпус із отвором	388	32	1
Порожнистий циліндр	267	50	1
Корпус із отворами однакового радіусу	418	45	3
Корпус із отворами різного радіусу	432	53	3
Піраміда	1206	142	9

Висновки

Після проведення аналізу щодо генерації кодів для деталей ручним та автоматизованим методом, можна відмітити, що такий метод є більш оптимальним для обробки деталей, оскільки код обробки деталі автоматизованим методом зменшується в декілька разів у порівнянні із кодом, який формується в програмному забезпеченні Catia V5. Крім того, використання такого методу має більший рівень гнучкості програм обробки деталей, оскільки при зміні параметрів моделі у програмі, в якій створювалась геометрія деталі, згенерований автоматично код обробки деталі буде змінюватись без втручання оператора верстату з ЧПК. Внаслідок використання скриптів автоматизації кодів обробки деталей, такі коди можна використовувати на різних верстатах, наприклад, Roland MDX 40A та HAAS VM3.

Література

1. Фрезерно-гравіювальний верстат MDX-40A [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://rdm24.ua/products/frezernye-stanki/mdx-40a/

2. VM3 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.haascnc.com/ps/machines/vertical-mills/mold-machines/models/vm-3.html

3. Міранцов С.Л. Системи автоматизованого проектування верстатів з ЧПК : навчальний посібник / С.Л. Міранцов, В.І. Тулупов, С.Г. Онищук, Ю.Б. Борисенко, Є.В. Мішура, О.С. Ковалевська. – Краматорськ : ДДМА, 2011. – 152 с.

4. Konig O., Wintermantel M. CAD-based Evolutionary Design Optimization with CATIA V5. https://www.researchgate.net/publication/228713225_CAD-based_Evolutionary_ Design_Optimization_with_CATIA_V5

5. Dubovska R., Jambor J., Majerik J. Implementation of CAD/CAM system CATIA V5 in Simulation of CNC Machining Process. Procedia Engineering 69. 2014. p. 638-645

6. Kowalski M., Zawadzki P. Intelligent manufacturing templates for CNC machine programming. 15th Global Congress on Manufacturing and Management (GCMM 2021). 20198 (2022). p. 1-7.

7. Крищук М.Г. Робота в програмному продукті CATIA. Загальні відомості. Частина 1 : методичні вказівки до виконання комп'ютерного практикуму / М.Г. Крищук, А.В. Трубін, Н.Ф. Тертишна, В.О. Єщенко. – К. : НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського", 2017. – 78 с.

8. Visual Basic for Applications. https://ru.wikipedia.org/wiki/Visual_Basic_for_Applications

References

1. Milling and engraving machine MDX-40A. https://rdm24.ua/products/frezernye-stanki/mdx-40a/.

2. VM3. https://www.haascnc.com/ps/machines/vertical-mills/mold-machines/models/vm-3.html

3. Mirantsov S.L., Tulupov V.I., Onyshchuk S.G., Borisenko Y.B., Mishura E.V., Kovalevska O.S. Systems of computer-aided design of CNC machine tools: a textbook. Kramatorsk: DGMA, 2011. 152 p.

4. Konig O., Wintermantel M. CAD-based Evolutionary Design Optimization with CATIA V5. https://www.researchgate.net/publication/228713225_CAD-based_Evolutionary_ Design_Optimization_with_CATIA_V5

5. Dubovska R., Jambor J., Majerik J. Implementation of CAD/CAM system CATIA V5 in Simulation of CNC Machining Process. Procedia Engineering 69. 2014. p. 638-645

6. Kowalski M., Zawadzki P. Intelligent manufacturing templates for CNC machine programming. 15th Global Congress on Manufacturing and Management (GCMM 2021). 20198 (2022). p. 1-7.

7. Kryshchuk M.G., Trubin A.V., Tertyshna N.F., Yeshchenko V.O. Work in the CATIA software product. General information. Part 1: methodical instructions for the implementation of a computer workshop. K.: NTUU "KPI", 2017. 78 p.

8. Visual Basic for Applications. https://ru.wikipedia.org/wiki/Visual_Basic_for_Applications.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-220-225
УДК 622.236.9, 622.271.2

СОЛОВЕЙ АНДРІЙ
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
https://orcid.org/0000-0002-4593-702X
e-mail: andre37gv8@gmail.com
ЩІПАНОВ ІГОР
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
https://orcid.org/0000-0001-7404-7264
e-mail: igorshipanov2904@gmail.com

ПАРАМЕТРИ НАПРАВЛЕНОГО РОЗКОЛУ ГІРСЬКИХ ПОРІД ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НЕВИБУХОВИХ РУЙНУЮЧИХ СУМІШЕЙ (НРС)

В роботі досліджені та описані параметри направленого розколу гірських порід при статичних навантаженнях породи за допомогою невибухових руйнуючих сумішей. Досліджений вплив параметрів невибухових речовин, технологічних показників та характеристик самої породи.

Ключові слова: направлений розкол, тріщиноутворення, невибухові руйнуючі суміші, НРС, тиск НРС, температура породи, діаметршпурів, анізотропія, ортотропія, ізотропія, пластини-вставки.

SOLOVEI ANDRII, SCHIPANOV IGOR
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

PARAMETERS OF DIRECTED SPLITTING OF ROCKS USING NON-EXPLOSIVE DESTRUCTIVE MIXTURES (NEDM)

Efficient extraction of stone products at enterprises is possible under the condition of high-quality separation of monoliths with less loss of raw materials. Stone blocks should be divided into more or less structural levels. It is worth specifying the specific direction of division. For this, non-explosive destructive mixtures (NeDM) are used in mining practice. It is essential to understand what influence the massif characteristics have on the rock. The article states at which temperatures of the mountain massif non-explosive mixtures can be used, and when it is inappropriate. The material considers why it is necessary to take into account the anisotropic and orthotropic properties of the stone and, ultimately, what should be the optimal diameter of the holes and the time of chemical reactions in them. In addition, questions regarding the parameters of the non-explosive mixtures themselves are highlighted. Namely, what temperature of water to use for preparing NeDM and mixing it with other components. We are talking about what the pressure of the working mixture in the holes should be. During this time, the mixture will develop the greatest pressure, and directed splitting will occur. The article examines the dependence of the force of expansion of a non-explosive mixture on the diameter of the hole. The dependence of the expansion force on exposure time and temperature was also considered. We are talking about the pre-compression of the mixture and what is the fluidity of destructive mixtures. Issues of the optimal distance between the holes, and the use of insert plates in the holes, which help to carry out accurate splitting, are highlighted. The ratio of uniform forces that load the walls of the hole is taken into account. It is shown under which conditions the formation of cracks is more likely and along which axes. The paper considers the influence of the anisotropic and orthotropic properties of rocks.

Keywords: directional splitting, cracking, non-explosive destructive mixtures, NeDM, mixtures pressure, rock temperature, hole diameters, anisotropy, orthotropy, isotropy, and insert plates.

Постановка проблеми

Отримання блочного каменю на сучасних видобувних підприємствах ще доволі часто відбувається завдяки вибуховим методам руйнування. Руйнування гірських порід вибухом відбувається зі значним негативним впливом на екологію, а також створює великі вібрації та шум, що в сучасних воєнних умовах України є гостро відчутним для громадян. Окрім того, вибухові відділення монолітів від масиву не дозволяють керувати напрямом розколу породи та задавати такий напрям. Саме тому вже понад 30 років промислові підприємства використовують невибухові руйнуючі суміші (надалі «НРС»), які вирішують наступні цілі: гарантують кероване та направлене тріщиноутворення, а також забезпечують попереднє стиснення суміші у шпурах, що підвищує ефективність роботи НРС.

Проте перед початкоv бурових робіт важливо вичерпно дослідити ряд параметрів, які безпосередньо впливають на якість направленого розколу. При цьому потрібно враховувати як параметри самих невибухових сумішей, так і характеристики породного масиву, а також параметри технологічного процесу розділення гірської породи.

Аналіз останніх джерел

В роботах [4, 5] досліджується процес керування напрямом розколу і теоретично висвітлюються питання використання вставних пластин з НРС для підвищення точності розколу. Розглядаються методи керування утворенням тріщин в шпурах. При цьому в дослідженні [4] процес направленого розколу з використанням пластин-вставок вдосконалений поворотом пластини навколо осі шпура. Завдяки цьому відстань між шпурами збільшується, що дозволяє зменшити тривалість і обсяг буріння.

Більш пізні дослідження [6, 7] приймають до уваги анізотропні та ортотропні властивості гірської породи, напрямок розміщення пластини у шпурі, а також показують як в необхідному напрямку зароджується тріщина при дії статичних навантажень.

Проте ці та інші матеріали не відображають комплексно більшість параметрів, що мають вплив на направлений розкол, зокрема, такі як час розвитку максимального тиску НРС у шпурах, оптимальна температура води для приготування НРС та температура породного масиву.

Метою роботи є комплексне визначення основних та найбільш впливових параметрів на направлений розкол породи як з боку невибухових руйнуючих сумішей, так і породного масиву разом з технологічними показниками.

Виклад основного матеріалу

В надрах України зосереджені родовища природного каменю, яке видобувається в промислових цілях. Важливо зменшувати втрати кам'яної продукції при відділенні монолітів від масиву. У гірських порід спостерігається природна тріщинуватість. Однак для збереження цілісності монолітів важливо проводити їх керований розкол. В цьому допомагають статичні методи, одним з яких є використання невибухових руйнуючих сумішей (надалі «НРС»). Вивчаючи питання направленого розколу, важливо виконати теоретичні дослідження параметрів керування розколом.

До параметрів невибухових сумішей, що впливають на направлений розкол в гірських породах, відносяться:

1. Тиск робочої суміші НРС.
2. Час розвитку максимального тиску НРС у шпурах.
3. Температура води для приготування НРС.
4. Попереднє стискання НРС перед початком кристалізації.

До параметрів породного масиву віднесемо:

1) температуру породного масиву.
2) діаметр шпурів та оптимальна відстань між ними.
3) анізотропні та ортотропні властивості каменю.

До інших технологічних параметрів входять використання шпурових пластин-вставок та їх оптимальна товщина, співвідношення рівнодіючих сил в шпурі від товщини пластини-вставки та утворення тріщин в породі в заданому напрямку, на що безпосередньо можна вплинути.

Важливим показником використання НРС є те, що порода розколюється не викидаючи тверді чи газоподібні продукти, що є екологічно безпечним, а також те, що НРС працює безшумно. Процедура видобутку полягає в наступному – в об'єкті, який розколюють, бурять шпури. Потім шпури заповнюють невибуховою робочою сумішшю, яку готують завчасно.

Розкол породи відбувається внаслідок хімічних реакцій гірської породи із сумішшю та створюваного НРС тиску. Експерименти показали [1], що максимальний тиск всередині шпура P_{max} напряму залежить від його діаметра і описується функцією параболи (рис. 1).

P_{max} також залежить і від температури породного масиву, а також властивостей НРС та якості її приготування. Наступний рисунок (рис. 2) показує час розвитку P_{max} у шпурах, що складає від 35 до 40 годин [1].

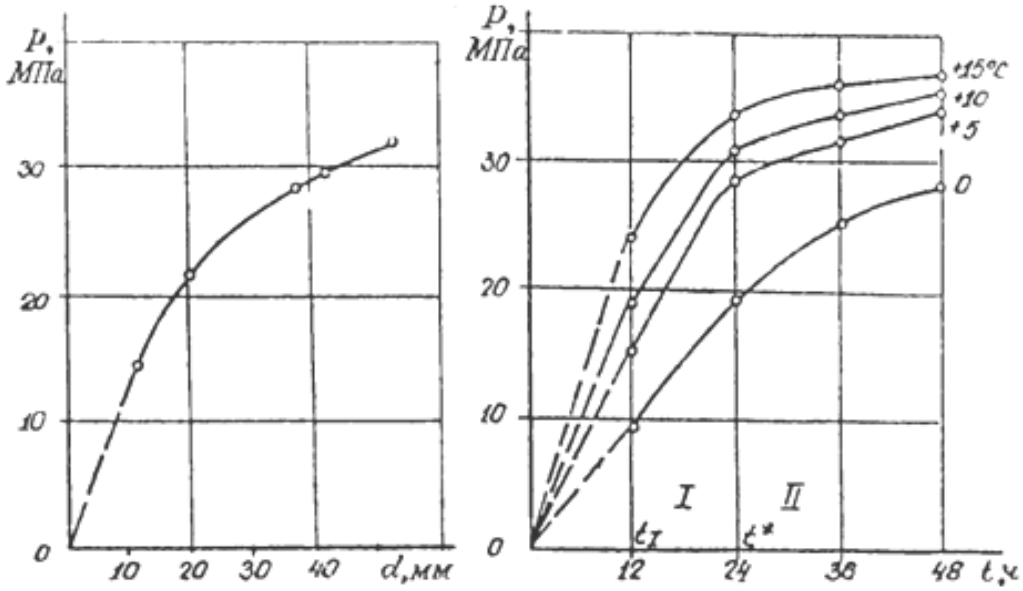


Рис. 1. Залежність розширюючого зусилля НРС від діаметра шпуру (зліва); залежність розширюючого зусилля НРС від часу витримки й температури (справа)

Зазначимо, що температура води, яка використовується для приготування НРС та надалі змішування з робочою сумішшю, має складати на більше 25°C. Чим холоднішою буде вода, тим довше робоча суміш буде текучою. Суміш води з НРС має бути добре текучою. Текучість НРС – це ще один її параметр. Відхилення по витраті води від допустимих меж зменшує розширююче зусилля НРС і знижує його ефективність. Отже, додатковим параметром сумішей в роботі є розширюваність.

Попереднє стискання НРС перед початком кристалізації необхідне для підвищення тиску, який

може розвивати суміш, що дозволяє прискорити технологічний процес руйнування породи.

Варто відзначити, що застосування НРС обмежено показниками температури породного масиву в інтервалі 0- +25℃. Використовувати НРС за температури вище +25℃ є небезпечним, оскільки може мати місце самовільний викид суміші зі шпурів. Якщо використовувати НРС в породних масивах за температури нижче +5℃, час його хімічних реакцій і спрацьовування сягне до 2 діб і навіть більше. Тому оптимальними температурними умовами роботи НРС з часом його спрацьовування є 10 годин в межах температурних зон 20±5℃.

Діаметр і глибина шпурів залежать від фізико-технічних характеристик породи, що руйнується. Варто зазначити, що зі збільшенням діаметра шпуру збільшується руйнуюче зусилля, і, відповідно, ймовірність холостого вистрілу в шпурі вгору без досягнення необхідного ефекту.

Поширеним і оптимальним діаметром шпурів на гранітних кар'єрах є 40 мм. При цьому для порід середньої міцності рекомендують бурити шпури діаметром 27–42 мм, а краще 32–36 мм.

Відстань між шпурами розрахуємо за формулою:

$$a = \frac{\sigma_p r_0^2 E_m}{2(K_{TC}^2) E_{HPC}} \quad (1)$$

де σ_p – межа міцності породи на розтягування, МПа (дорівнює напрузі сталого розвитку тріщин);

E_m – пружний модуль матеріалу, що руйнується, МПа;

E_{HPC} – пружний модуль НРС, що рівний 10^4 МПа;

r_0 – радіус шпура, м;

K_{TC} – коефіцієнт тріщиностійкості (інтенсивності напружень), що складає від 0,4 до 1,0 в залежності від типу породи.

Шпурові агрегати із пластинами-вставками використовуються для підвищення ефективності невибухових руйнуючих сумішей (НРС) при видобутку монолітів. Їхнє призначення – забезпечити тріщиноутворення в заданому напрямку. Це відбувається завдяки певному розміщенню пластини-вставки та її конкретній товщині за рахунок перерозподілу напруженого стану на стінки шпура.

В роботі [2] приведений спосіб руйнування гірських порід за допомогою НРС. Суть способу в наступному. Для розміщення складу буряться шпури, суміш НРС готується з водою, а далі розміщується у порожнини патрона НРС. Патрон, в свою чергу, розміщується у шпурі, на стінках якого створюють концентратори розтягуючих напружень, щонайменше в одному з діаметральних напрямків шпуру.

Реалізація даного способу з пристроєм дозволяє керувати розподілом напружень навколо шпуру з моменту розширення НРС. Це дозволяє одержати гарантоване спрямоване руйнування об'єктів і підвищує якість руйнування гірських порід.

Однак у даному винаході [2] є й недоліки, а саме:

1. В конструкції патрона можуть відбуватися «вистріли» НРС зі шпурів, що є неприйнятним.

2. Така конструкція унеможливлює попереднє стискання НРС до початку кристалізації, що обмежує P_{max}.

В корисній моделі [3] наведена шпурова вставка для направленого розколу монолітів за допомогою невибухових сумішей. Ця вставка з металевою пластиною, до одного торця якої приварена шайба, діаметр однаковий діаметру шпура. З іншого торця пластини приварена шпилька з різьбою, куди може накручуватися друга шайба. ЇЇ діаметр також дорівнює діаметру шпура, а на торці виконані два глухих отвори, щоб встановити спеціальний гайковий ключ.

Завдяки вказаним конструктивним елементам в корисній моделі НРС попередньо стискається до початку кристалізації.

Щодо оптимальної товщини пластин-вставок. В роботі [4] запропоновано технологію керування напрямом розколу блочного каменю з використанням пластин-вставок у шпурах з НРС. Діапазон зміни товщини пластин-вставок для шпурів діаметром 40 мм складає 5…10 мм. При цьому враховуються співвідношення σ_x/σ_y, де σ_x – напруження на розтяг вздовж осі *x* і що виникає на осі *y*, σ_y – максимально допустиме напруження на розтяг вздовж осі *y* і що виникає по осі *x*.

Для порід без природної тріщинуватості пластини-вставки рекомендуються товщиною 5…6 мм, що забезпечать σ_x/σ_y в межах 0,58…0,73. При розколі породи з середньою природною тріщинуватістю рекомендується використання пластин-вставок товщиною 8 мм із $\sigma_x/\sigma_y = 0{,}49$. Натомість для порід великої тріщинуватості товщина пластини-вставки складає 10 мм, де $\sigma_x/\sigma_y = 0{,}42$.

Також в даній праці [4] розраховані епюри розподілення напруг у перетині шпура в момент утворення тріщин для гірських порід, що мають різні механічні властивості. В якості механічних властивостей взяті модуль пружності, межа міцності (МПа) та коефіцієнт Пуассона. А в якості природного каменю брали кварцовий порфір, діабаз та чорний мармур.

Завдяки цим розрахованим епюрам побудований графік залежності співвідношення σ_x/σ_y від товщини пластини-вставки *h:*

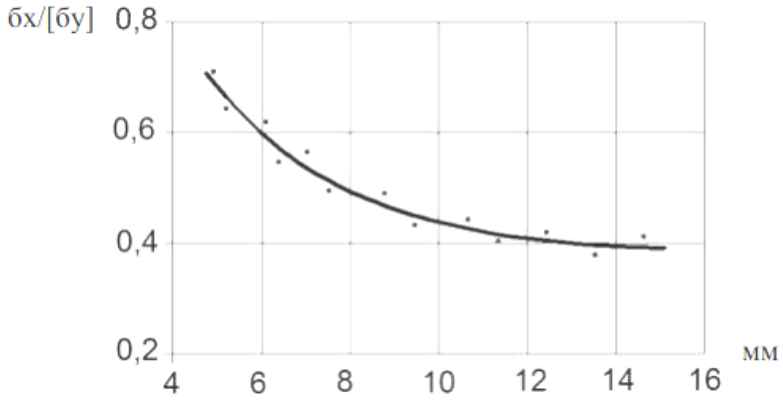


Рис. 2. Залежність співвідношення σ_x/σ_y від товщини пластини-вставки *h*

Згідно з рисунком, мінімальна товщина пластини-вставки складає 5 мм, що зумовлено P_{max}, який НРС створить у шпурі. Максимальна товщина пластини-вставки складає понад 10 мм. Важливим є те, що пластини-вставки товщиною 12–15 мм значно не змінюють співвідношення σ_x/σ_y, проте зменшують об'єм НРС у шпурах. Останнє погано впливає на ширину тріщини. Механічні властивості породи на співвідношення σ_x/σ_y є несуттєвими.

Функція $\sigma_x/\sigma_y = f(h)$ подібна для всіх порід за умови плоского напруженого стану. Вона має аналітичний вигляд:

$$\sigma_x / \sigma_y = \frac{\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y}{\nu\varepsilon_x + \varepsilon_y} \quad (2)$$

За більших значень σ_x/σ_y вірогідність утворення тріщин менша, а за менших значень – більша.

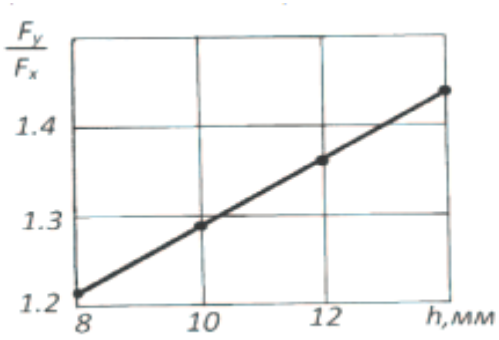


Рис. 3. Залежність співвідношення рівнодіючих сил в шпурі від товщини пластини-вставки

Використовуючи пластини-вставки, насамперед важливо проаналізувати співвідношення рівнодіючих сил, що навантажують стінки шпура. Це важливо робити, враховуючи товщину пластини-вставки. Провівши аналіз для пластин-вставок товщиною *h* від 8 до 14 мм, таке співвідношення встановлено [5]. Діапазон даного співвідношення 1.22 (товщина пластини 8 мм) до 1,44 (пластина товщиною 14 мм). При цьому F_x – місце прикладення рівнодіючої сили по осі *x*, F_y – місце прикладення рівнодіючої сили по осі *y*.

Більше співвідношення рівнодіючих сил підвищує утворення тріщин в породі в заданому напрямку. На противагу, менше співвідношення сил зменшує вірогідність тріщиноутворення.

Важливим фактором при видобутку природного каменю за допомогою НРС є урахування анізотропії породи, тобто залежності властивостей гірських порід (деформаційні, теплові, електричні) від напряму їх вимірювання. Анізотропія разом із нерівномірним навантаженням стінок шпура диктує технологічні прийоми керування напрямом тріщиноутворення в породі.

Разом із цим зазначимо, що у природних каменів структура кристалічна й тому у них більш чи менш виражені ортотропні властивості, які проявляють себе по осях розташованих під кутом 90°. Ортотропні матеріали мають механічні і теплові властивості, що різняться уздовж трьох перпендикулярних напрямках.

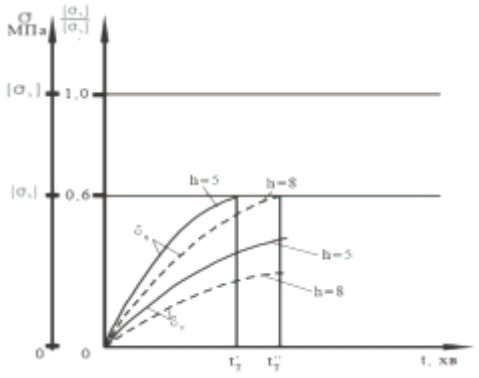


Рис. 4. Зростання розтягуючих напруг на осях ортотропії *x* та *y* при кристалізації НРС
Де $[\sigma_x]$ – мінімальна межа міцності з точки зору тріщиноутворення; $[\sigma_y]$ – максимальна межа міцності з точки зору тріщиноутворення; $t'_т$ або $t''_т$ – розтягуючі напруження σ_y по осі y в момент часу; δ – відхилення в утворенні тріщини в залежності від осі та товщини пластини.

В досліджуваному процесі керування напрямом тріщиноутворення по осях ортотропії *x* чи *y* зростаючі розтягуючі напруження змінюються в часі по цих осях [6]. Враховується заданий діапазон зміни ортотропії породи, що складає 0,6 і вище, розміщення пластини-вставки по осях шпура (вертикально чи горизонтально) та заданий діапазон товщини пластини від 5 до 8 мм.

Розглянемо випадок навантаження стінок шпура по осях ортотропії *x* та *y* при розміщенні пластини-вставки товщиною 5 та 8 мм по осі *x* та ортотропії породи 0,6.

Отже, пластини-вставки завтовшки 5–8 мм розміщені на осі ортотропії з мінімальною міцністю забезпечують тріщиноутворення вздовж цієї осі (в даному випадку по осі х) в установленому значенні зміни ортотропії від 0,6 та вище.

Утворення тріщини відколу залежить від величини тиску самонапруженого НРС. Моноліт відколеться, якщо виконається рівність:

$$[\sigma_p] \leq \sum R \tag{3}$$

де $[\sigma_p]$ – сумарна величина статистичної межі міцності породи на розтяг з урахуванням ослаблення площини відколу шпурами та опору зрушенню моноліту, Па;

$\sum R$ – сумарні сили самонапруженого НРС, що викликають відколювання моноліту від масиву, Па.

В роботі [7] для плоскої задачі теорії пружності використовували третю умову міцності. Досліджено процес зародження тріщиноутворення в необхідному напрямку вздовж лінії шпурів при статичних навантаженнях. Одержані результати технологічних параметрів, а саме: тиску, що залежить від радіуса шпуру, товщини пластини-вставки і властивостей породи.

При цьому для дослідження напружено-деформованого стану навколо шпурів використовували модель ізотропного суцільного середовища, а тобто однаковості фізичних властивостей (теплопровідність, електропровідність, пружність тощо) у всіх напрямках.

Напружений і деформований стан за межею пружності визначимо співвідношеннями теорії пластичності. Пластичні матеріали не сприймають напруження, що перевищують певну межу плинності.

Дослідивши вплив пластини-вставки в шпурі з НРС на напружений стан навколо шпуру змогли визначити напрямок розколу каменю. Наявність пластини-вставки відчутно змінює навантаження на крайку шпуру. Змінюється і закон розподілення тиску Р по дугах контуру шпуру над пластиною-вставкою. Наближено виразимо його формулою:

$$P = A\left(\pi R^2/_2\right) - {}^{h}/_{2}\sqrt{R_2 - {}^{h^2}/_4}\,\sin\alpha\left(0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}\right) \tag{1.4}$$

де А – коефіцієнт тиску НРС, МПа/мм^2;

R – радіус шпуру, мм;

h – товщина пластини-вставки, мм.

Визначаючи залежність величини тиску Р від товщини пластин-вставок h=5–8 мм для шпурів діаметром 40 мм встановлено, що пластини з більшою товщиною (8 мм), забезпечують більшу вірогідність утворення тріщини в заданому напрямку. Проте вони значно зменшують тиск від НРС. Це негативно впливає на ширину отриманої тріщини в розколотій породі. При h>8 мм зусилля НРС може бути недостатнім, щоб розколоти природний камінь.

Висновки

Отже, дослідивши основні параметри, які впливають на направлений розкол тієї чи іншої гірської породи, можна здійснювати більш ефективний, економний та швидкий видобуток кам’яної сировини. Це дозволить кар’єрам якісніше виконувати технологічні завдання, підвищить обсяги якісно видобутої кам’яної продукції, а також зменшить негативний екологічний та шумовий вплив на атмосферу. Відповідно до сучасних воєнних умов в Україні використання невибухових руйнуючих сумішей рекомендується в більшому обсязі на підприємствах та має пріоритетну перспективу застосування або впровадження в технологічний процес розділення гірських масивів.

Література

1. Карасев Ю.Г., Бакка Н.Т. Природный камень. Добыча блочного и стенового камня : учебное пособие. Санкт-Петербургский горный ин-т, 1997. 428 с.

2. Патент на винахід № 100062, МПК Е21С 37/06 (2006.01). Спосіб руйнування гірських порід невибуховими руйнуючими складами й патрон для його реалізації / Сахно І.Г., Касьян М.М. – а 2011 00476, 2012, 7 с.

3. Патент на корисну модель № 92446, МПК Е21С 27/14 (2006.01). Шпурова вставка для направленого розколу монолітних об’єктів невибуховими розширюючими сумішами / Фоменко І.О., Фоменко О.І., Ковтун А.І. – u 2014 04049, 2014, 4 с.

4. Фоменко І.О., Ковтун А.І. Дослідження технологічних параметрів процесу керування напрямком розколу блочного каменю під час використання невибухових руйнуючих сумішей. Національний технічний університет «КПІ». 2014. Випуск 26. 7 с.

5. Фоменко І.О., Фоменко О.І., Ковтун І.М., Ковтун А.І. Розробка та дослідження процесу керування напрямом розколу блочного каменю при використанні невибухових руйнуючих сумішей. Національний технічний університет «КПІ». 2013. Випуск 2 (12). 8 с.

6. Фоменко І.О., Фоменко О.І., Ковтун І.М., Ковтун А.І. Керування напрямом тріщиноутворення по осях ортотропії гранітів при використанні невибухових руйнуючих сумішей та агрегатів з пластинами-вставками. Національний технічний університет «КПІ». 2015. Випуск 2 (16). 8 с.

7. Кравець В.Г., Стовпнік С.М., Ковтун А.І. Теоретичне визначення технологічних параметрів керованого розколу гірської породи невибуховими руйнуючими сумішами. Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського». 2017. Випуск 2 (20).

References

1. Karasev Yu.G., Bakka N.T. Prirodnii kamen. Dobicha blochnogo i stenovogo kamnya : uchebnoe posobie. Sankt-Peterburgskii gornii in-t, 1997. 428 s.

2. Patent na vynakhid № 100062, MPK E21S 37/06 (2006.01). Sposib ruinuvannia hirskykh porid nevybukhovymy ruinuiuchymy skladamy y patron dlia yoho realizatsii / Sakhno I.H., Kasian M.M. – a 2011 00476, 2012, 7 s.

3. Patent na korysnu model № 92446, MPK E21S 27/14 (2006.01). Shpurova vstavka dlia napravlenoho rozkolu monolitnykh obiektiv nevybukhovymy rozshyriuiuchymy sumishamy / Fomenko I.O., Fomenko O.I., Kovtun A.I. – u 2014 04049, 2014, 4 s.

4. Fomenko I.O., Kovtun A.I. Doslidzhennia tekhnolohichnykh parametriv protsesu keruvannia napriamkom rozkolu blochnoho kameniu pid chas vykorystannia nevybukhovykh ruinuiuchykh sumishei. Natsionalnyi tekhnichnyi universytet «KPI». 2014. Vypusk 26. 7 s.

5. Fomenko I.O., Fomenko O.I., Kovtun I.M., Kovtun A.I. Rozrobka ta doslidzhennia protsesu keruvannia napriamom rozkolu blochnoho kameniu pry vykorystanni nevybukhovykh ruinuiuchykh sumishei. Natsionalnyi tekhnichnyi universytet «KPI». 2013. Vypusk 2 (12). 8 s.

6. Fomenko I.O., Fomenko O.I., Kovtun I.M., Kovtun A.I. Keruvannia napriamom trishchynoutvorennia po osiakh ortotropii hranitiv pry vykorystanni nevybukhovykh ruinuiuchykh sumishei ta ahrehativ z plastynamy-vstavkamy. Natsionalnyi tekhnichnyi universytet «KPI». 2015. Vypusk 2 (16). 8 s.

7. Kravets V.H., Stovpnik S.M., Kovtun A.I. Teoretychne vyznachennia tekhnolohichnykh parametriv kerovanoho rozkolu hirskoi porody nevybukhovymy ruinuiuchymy sumishamy. Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy «KPI im. Ihoria Sikorskoho». 2017. Vypusk 2 (20).

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-226-226
УДК 621.873

СТРЕЛЬБІЦЬКИЙ ВІКТОР
Одеський національний морський університет
ORCID ID: 0000-0001-7027-9498
e-mail: vict141174@gmail.com
КІБАКОВ ОЛЕКСАНДР
Одеський національний морський університет
ORCID ID: 0000-0001-8339-345X
e-mail: kibakov60@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ У МЕХАНІЗМІ ПІДЙОМУ ПОРТАЛЬНИХ КРАНІВ «СОКІЛ»

У роботі наведено експериментальні дослідження динамічних зусиль у механізмі підйому грейферних портальних кранів «СОКІЛ», які відпрацювали свій нормативний термін. Об'єкт досліджень використовують для перевантажень сипких матеріалів у морському порту. Для визначення динамічних зусиль використано електротензометричний метод. За отриманими даними розраховано коефіцієнти динамічності. Аналіз результатів показав, що при роботі з вантажами вагою від 10т до 15 т коефіцієнти динамічності у замикаючомих канатах змінюються від 1,35 до 1,9. Розраховані значення коефіцієнтів динамічності перевищують рекомендовані для портальних кранів, що вказує на перевантаження механізмів підйому. Як показали записи журналів у механізмах підйому кранів електродвигуни вже було заміно.

Ключові слова: портальний кран, грейфер, механізм підйому, динамічні зусилля, коефіцієнт динамічності..

STRELBITSKIY VIKTOR
Odessa National Maritime University, Odessa
KIBAKOV OLEXANDER
Odessa National Maritime University, Odessa

RESEARCH OF DYNAMIC LOADS IN THE LIFTING MECHANISM OF THE « SOKOL» PORTAL CRANES

Portal grappling cranes are widely used for transshipment of bulk cargo in sea and river ports. The economic state of the country over the past 25 years has led to the fact that more than 90% of portal cranes that are currently operated in ports have fulfilled the standard period. Their further operation is due to the fact that new equipment arrives at ports in small Volumes.

As practical experience shows, a considerable number of mechanism failures and accidents are associated with lifting equipment that has served its time and continues to be intensively operated in a cyclic mode. Today, an extremely important scientific and applied task is to determine the level of dynamic loads in the lifting mechanisms of Grab cranes.

The analysis of works showed that the dynamic loads in the lifting drive of a portal grab crane, which were soldered for more than 40 years, have not been sufficiently studied. It should be noted that each crane requires a separate study, since the dynamic characteristics of mechanisms depend on the operating conditions, geometric, physical and mechanical parameters of its

The object of research is used for transshipment of bulk materials to a ship in a seaport. The elktrotensometric method was used to determine dynamic forces. The maximum measured load values in the rope branches were observed at the moment of separation of the Grab with the load from the base. Changes in loads over time are fluctuating, which is consistent with known studies. Based on the obtained data, the dynamism coefficients are calculated. Analysis of the results showed that when working with loads weighing from 10 tons to 15 tons, the dynamism coefficient varies from 1.35 to 1.95, and the dependence on the weight of the load is nonlinear. The calculated values of the dynamism coefficients exceed the standard values, which indicates an overload of the lifting drive, and also leads to periodic replacement of its components.

Keywords: portal crane, grab, lifting mechanism, dynamic forces, dynamism coefficient.

Постановка проблеми

Портальні грейферні крани широко використовуються для перевалки сипких вантажів в морських і річкових портах [1-6]. Економічний стан країни за останні 25 років призвів до того, що на сьогодні більше 90% портових кранів відпрацювали нормативний термін. Їх подальша експлуатація пов'язана з тим, що нова техніка надходить у порти незначних об'ємах [1-4]. Так як вони є основною ланкою технологічного процесу, тому від їх надійної і безперервної роботи залежить продуктивність портових ліній.

Як показує досвід, основною причиною виходу з ладу кранів є їх понаднормова експлуатація у режимі інтенсивного циклічного навантаження [1-9]. Тому надзвичайно важливим науково-прикладним завданням є визначення рівня динамічних навантажень у механізмах підйому грейферних кранів.

Аналіз останніх джерел

Аналіз робіт [7-11] показав що динамічні навантаження у портальних грейферних кранах з понаднормовим терміном експлуатації (більше 40 років) вивчені недостатньо. Кожен кран вимагає окремого дослідження, оскільки динамічні характеристики механізмів залежить від умов їх експлуатації, геометричних, фізичних і механічних параметрів складових [7-11].

Метою дослідження є дослідження та аналіз динамічних навантажень в приводі підйому грейферних портальних кранів «СОКІЛ» котрі відпрацювали нормативні термінами.

Виклад основного матеріалу

Оскільки зусилля у канатах приводів підйому залежать від багатьох факторів, які неможливо врахувати при моделюванні, тому їх визначали експериментальним шляхом.

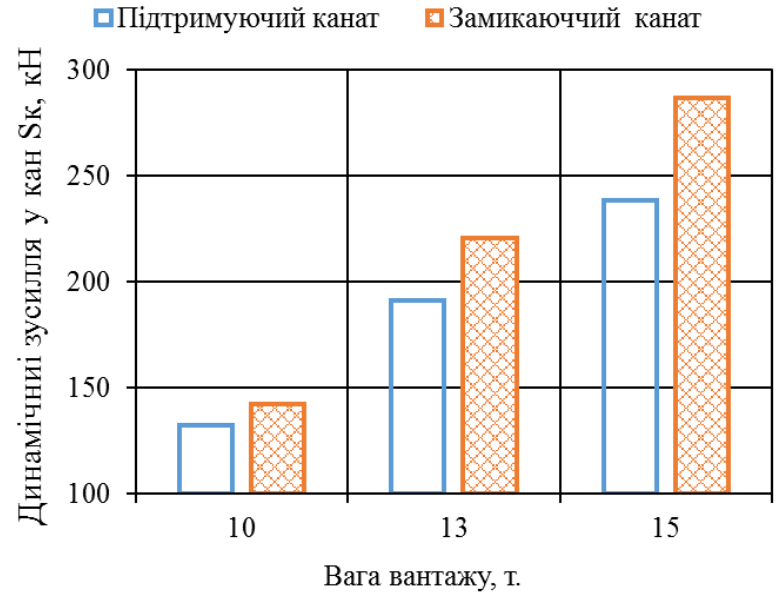
Об'єктами досліджень було обрано 4 ідентичні крани «СОКІЛ», які працюють в грейферному режимі з вантажами вагою 10т, 13т та 15 т у морських та річкових портах на вильотах стріли 16 м.

Для вимірювання динамічних зусиль у механізмі підйому використано елктротензометричний метод.

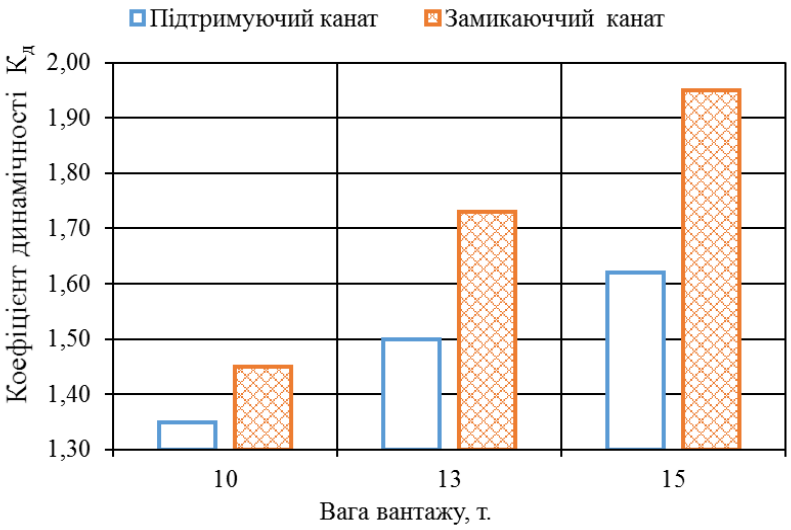
Процес підйому вантажу розпочинали лише після вмикання системи вимірювання. На підтримуючому та замикаючому кантах біли закріплені тензодатчики, сигнал з яких надходив до пристрою збору даних (АЦП), котрий під'єднано до блоку портативного комп'ютера. Отримані значення остаточно оброблялися та виводилися на монітор комп'ютера. Попередньо тензодатчики протаровані заводом виробником.

У процесі досліджень одночасно вимірювали і швидкість підйому, за допомогою тахометрів які були встановлені співвісно з валами електродвигунів.

Після опускання грейфера, вмикалися прилади і правився безперервний запис показань датчиків. Щелепи грейфера змикалися і його піднімали на висоту 2,5 м, далі грейфер розвантажували (щелепи розкривали) та припиняли запис. Процес підйому вантажу для кожної ваги повторювали 5 раз, а отримані значення осереднювали.



а)



б)

Рис. 1 - Осереднених значень динамічних зусиль Sл в підтримуючих та замикаючих канатах (а) та розраховані коефіцієнти динамічності Кд (б)

За отриманими динамічними зусиллями в канатах було розраховано коефіцієнти динамічності, за формулою:

$$К_{Д} = \frac{S_{к}}{Q}. \quad (1)$$

де Q- вага вантажу;

$S_к$ – динамічне зусилля в канаті.

Отримані значення динамічних зусиль в канатах та розраховані коефіцієнти динамічності $К_д$ наведені на рис.1.

Аналіз результатів показав, що при роботі з вантажами вагою від 10т до 15 т коефіцієнт динамічності змінюється від 1,35 до 1,95, залежність від ваги вантажу є нелінійною. Навантаження у замикаючому канаті перевищують навантаження у підтримуючому. Максимальні виміряні значення навантаження в гілках канатів спостерігались у момент відриву грейфера з вантажем від основи. Зміна навантажень з часом має коливний характер, що узгоджується з дослідженнями [7-10]. Згасання коливань з часом можна пояснити діями сил внутрішнього тертя в металевій конструкції і канатах, конструкційним демпфіруванням в з'єднаннях та втратами на згин канату [1, 7-12].

Розраховані значення коефіцієнтів динамічності перевищують нормативні [7-9], що вказує на перевантаження приводу підйому та можливий вихід з ладу його складових. Як свідчать записи у журналах в механізмах підйому кранів періодично замінювали електродвигуни.

Висновки

Аналіз отриманих результатів дослідження динамічних навантажень у механізмі підйому портального крану «Сокіл» показав, що:

1) максимальні значення динамічних навантажень у гілках канатів спостерігались у момент відриву грейфера з вантажем від основи;

2) зміна навантажень з часом має коливний характер, що узгоджується з відомими дослідженнями;

3) що при роботі з вантажами вагою від 10т до 15 т коефіцієнт динамічності складає 1,35…1,95, залежність від ваги є нелінійною;

4) зміна навантажень з часом має коливний характер, згасання коливань з часом можна пояснити діями сил внутрішнього тертя в металевій конструкції і канатах, конструкційним демпфіруванням в з'єднаннях та втратами на згин канату;

5) розраховані значення коефіцієнтів динамічності перевищують нормативні, що вказує на перевантаження приводу підйому, а також призводить до періодичної заміни його складових.

6) як свідчать записи у журналах кранів, у механізмах підйому двох кранів електродвигуни вже було заміно на нові.

Література

1. Григоров О. В., Петренко Н. О. Вантажопідйомні машини: Навч. посібник. Харків: НТУ «ХПІ», 2005. 304 с.

2. Стрельбіцький В.В. Оцінка надійності механізмів портальних кранів Альбатрос / В.В. Стрельбіцький // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки, 2022. № 5. С. 196–199.

3. Стрельбіцький В.В. Експериментальне дослідження впливу напрацювання та асиметрії циклу на тріщиностійкість сталей портальних кранів / В.В. Стрельбіцький, О.О. Немчук // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки, 2020. № 1. С. 245–248 .

4. Немчук О.О. Експериментальне дослідження впливу напрацювання на тріщиностійкість сталей портальних кранів / О.О. Немчук, В.В. Стрельбіцький // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки, 2019. № 1. С. 17–20.

5. A Report of the Crane Unit of the Division of Occupational Safety and Health. Philip Yow, 2000.

6. Luo Shengnan. Study on the Safety Assessment Method of Portal Cranes. 2015 .

7. Гохберг М.М. Металлические конструкции подъемнотранспортных машин / М.М. Гохберг. М.: Машиностроение, 1969.520 с.

8. Комаров М.С. Нелинейные задачи динамики машин / М.С. Комаров. М.: Машиностроение, 1968. 284 с.

9. Гайдамака В.Ф. Грузоподъемные машины / В.Ф. Гайдамака. К.: Выща школа, 1989. 328 с.

10. Александров М.П. Динамика грузоподъемных кранов / М.П. Александров и др. М., 1986. 400 с.

11. Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О. Динаміка машин. К.: КОМПРИНТ, 2013. 227 с.

12. Дослідження динаміки, міцності і технологічності механічних систем : монографія / Л. М. Мамаєв, О. Д. Романюк, О. В. Нікулін та ін. Кам'янське: ДДТУ, 2017. 183 с.

References

1. Hryhorov O. V., Petrenko N. O. Vantazhopidiomni mashyny: Navch. posibnyk. Kharkiv: NTU «KhPI», 2005. 304 s.
2. Strelbitskyi V.V. Otsinka nadiinosti mekhanizmiv portalnykh kraniv Albatros / V.V. Strelbitskyi // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky, 2022. № 5. S. 196–199.
3. Strelbitskyi V.V. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu napratsiuvannia ta asymetrii tsyklu na trishchynostiikist stalei portalnykh kraniv / V.V. Strelbitskyi, O.O. Nemchuk // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky, 2020. № 1. S. 245–248.
4. Nemchuk O.O. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu napratsiuvannia na trishchynostiikist stalei portalnykh kraniv / O.O. Nemchuk, V.V. Strelbitskyi // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky, 2019. № 1. S. 17–20.
5. A Report of the Crane Unit of the Division of Occupational Safety and Health. Philip Yow, 2000.
6. Luo Shengnan. Study on the Safety Assessment Method of Portal Cranes. 2015.
7. Gohberg M.M. Metallicheskie konstrukcii podemnotransportnyh mashin / M.M. Gohberg. – M.: Mashinostroenie, 1969. 520 c..
8. Komarov M.S. Nelinejnye zadachi dinamiki mashin / M.S. Komarov. M.: Mashinostroenie, 1968. 284 s.
9. Gajdamaka V.F. Gruzopodemnye mashiny / V.F. Gajdamaka. – K.: Vysha shkola, 1989. 328 s.
10. Aleksandrov, M.P. Dinamika gruzopodemnyh kranov / M.P. Aleksandrov i dr. M., 1986. 400 s..
11. Loveikin V.S., Romasevych Yu.O. Dynamika mashyn. K.: KOMPRYNT, 2013. 227 s.
12. Doslidzhennya dinamiki, micnosti i tehnologichnosti mehanichnih sistem: monografiya / L. M. Mamayev, O. D. Romanyuk, O. V. Nikulin ta in. — Kam'yanske : DDTU, 2017. 183 s.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-230- 234
УДК 687.016:004.8

СТРИЖОВА ОКСАНА
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0003-2751-1807
e-mail: stryzhovao@khnu.edu.ua

СТИЛІЗАЦІЯ ТА ТРАНСФОРМУВАННЯ ОДЯГУ У FASHION ІЛЮСТРУВАННІ ЗА ДОПОМОГОЮ СЕРВІСІВ ГЕНЕРУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

У статті висвітлено основні результати аналітичного дослідження особливостей використання інструментів генеративних сервісів нейромереж зі штучним інтелектом на етапі стилізації і трансформування художніх рішень при розробленні ескізів моделей одягу та fashion-ілюстрацій.

Ключові слова: генерація fashion-ілюстрацій, генеративний дизайн одягу, стилізація одягу, трансформація одягу.

STRYZHOVA OKSANA
Khmelnytskyi National University

STYLING AND TRANSFORMATION OF CLOTHES IN FASHION ILLUSTRATION WITH THE HELP OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IMAGE GENERATION SERVICES

The means of developing new clothing models – stylization and transformation – are informal, creative operations in clothing design that require a significant amount of time for their execution and visualization of the results. Also, the time spent at the stage of artistic design of clothes is directly affected by the linearity (graduality) of the creative strategy of the designer during the implementation of stylistic or morphological changes in the artistic solutions of the sketches. However, the modern pace of updating the model range of clothing for its production requires high-speed and productive work of the designer at the stage of artistic design. And therefore, simultaneity and multi-vector work on several ideas and artistic solutions is a way to significantly reduce development time. Such requirements require appropriate tools for visualizing design ideas, which could provide a significant reduction in time due to the simultaneous development of a large number of options and their diversity.

Generative design deals with the problems of producing a large number of ideas under given conditions. For the generation of design objects, especially graphic ones, the use of image creation capabilities with the help of artificial intelligence is actively developing, which allows to reduce the time spent on visualizing ideas. Therefore, the research of AI services and image generation tools at the stage of artistic design of model sketches in fashion design is relevant. The article highlights the main results of an analytical study of the features of using the tools of generative services of neural networks with artificial intelligence at the stage of stylization and transformation of artistic solutions and visualization of their results when developing sketches of new clothing models and fashion illustrations.

Keywords: generation of fashion illustrations, generative clothing design, clothing styling, clothing transformation.

Постановка проблеми

Різноманіття в дизайні одягу досягають завдяки модифікуванню моделей за допомогою стилізації та трансформації. Стилізація одягу – прояв візуальної зміни художньо-декоративного рішення виробів чи естетично-емоційного характеру системи «людина – одяг – образ». Часто стилізацію виконують для зміни чи змішування (еклектики, дифузії) стилів одягу, як то історичних із сучасними чи різних видів сучасних стилів, для експериментів з впровадженням в художні рішення одягу характерних ознак різних видів мистецтва. Трансформація є морфологічною перебудовою об'ємно-просторової форми одягу, за допомогою якої, при зміні просторових параметрів, можна змінити форму, розвинути певні властивості і сформувати нові функції одягу. Впровадження таких змін дизайнером одягу на етапі продукування ідей ґрунтується на власних відчуттях гармонії, доречності, інтуїції чи за допомогою різних евристичних методів, а час і результати напряму залежать від досвіду й майстерності. Тож, стилізування і трансформування художніх рішень є найменш формалізованим етапом художнього проектування одягу, який може тривати значний час. Існуючі зображувальні техніки та сучасні комп'ютеризовані інструменти і графічні редактори скорочують час на виконання ескізів, fashion-ілюстрацій, однак, суттєвим залишаються витрати часу на продукування дизайнером саме ідей для стилізацій чи трансформацій. Для того, щоб оперативно і якісно стилізувати, щоб теоретично закласти в морфологію форми одягу здатність до трансформування, потрібно мати інструменти для дуже швидкого прийняття рішень та відпрацювання візуалізації проміжних результатів ще на етапі розробки ідей цих змін – при ескізуванні.

Також, на витрати часу на етапі художнього проектування одягу напряму впливає лінійність (поступовість) творчої стратегії дизайнера під час виконання стилістичних чи морфологічних змін художніх рішень ескізів. А тому, одночасність і багатовекторність в роботі над кількома ідеями і художніми рішеннями – шлях до значного скорочення часу розробок.

Сучасні темпи оновлення модельного ряду одягу для його виробництва потребують високошвидкісної і продуктивної праці дизайнера на етапі художнього проектування. Такі вимоги в свою чергу, потребують відповідних інструментів для візуалізації дизайнерських ідей, які б могли забезпечити значне скорочення часу за рахунок одночасного опрацювання великої кількості варіантів та їх різноманіття.

Проблемами продукування великої кількості ідей при заданих умовах займається генеративний

дизайн. Для генерування дизайн-об'єктів, особливо графічних, набуває активного розвитку застосування можливостей створення зображень за допомогою штучного інтелекту (**Artificial Intelligence**), що дозволяє зменшити часові витрати на візуалізацію ідей. Тому дослідження AI-сервісів та їх інструментів генерування зображень на етапі художнього проектування ескізів моделей одягу є актуальними. Необхідно вивчити можливості інструментів таких сервісів саме для стилізації і трансформації художніх рішень та ескізів майбутніх моделей одягу.

Аналіз останніх джерел

Серед останніх робіт, в яких розглянуто особливості виконання швидких змін художніх і конструктивних рішень моделей одягу, вагомим доробком є робота [1], в якій опрацьовано комбінаторні способи проектної трансформації. Ці зміни автори пропонують виконувати за допомогою лінійно-графічних схем з деталями та елементами конструкцій, які комбінує сам дизайнер. Це дозволяє відносно швидко та ефективно виконувати проектні трансформації, проте, у варіативності ідей є обмеженість рамками бази комбінаторних елементів, а результати розроблення ідей мають вигляд лише схематичних технічних ескізів.

У статтях [2, 3] авторами досліджено аспекти модифікації та імітації історичного мистецтва в сучасних мистецьких практиках з використанням нейромереж. Мистецькі модифікації та інтерпретації можна розглядати як приклад стилізованих змін у зображеннях різних видів візуального мистецтва, що сприяє розширенню їх аудиторії. У роботі [4] наведено загальні характеристики можливостей використання сервісів із штучним інтелектом для генерацій зображень в графічному дизайні, проте, не висвітлені можливості виконання такими сервісами стилізації та інших заданих змін у зображеннях.

Мета роботи

Дослідити інструменти та графічні можливості нейромережевих сервісів на базі штучного інтелекту при застосуванні їх для трансформації і стилізації ескізів одягу у fashion-ілюструванні, для збільшення варіативності пошукових ідей та зменшення часових витрат на етапі художнього проектування.

Виклад основного матеріалу

Вивчення інструментів та особливостей створення різних типів художніх ескізів нових моделей одягу проведено із застосуванням сервісів генерування зображень Leonardo.AI (безкоштовний AI-сервіс) та MidJourney (з платними послугами). Ці сервіси зі штучним інтелектом є найбільш затребуваними дизайнерами для генерування fashion-ілюстрацій, мають специфічні підрозділі (Fashion та Fashion-Art) і алгоритми, «треновані» для створення таких зображень та виконання їх стилізації і візуального трансформування.

Визначено, що кількість ескізів, зображень, що можна одночасно генерувати, складає межі від 1 до 8 ескізів, в залежності від AI-сервісу. Зазвичай, час генерування ескізу може бути від 15 секунд (2 зображення) до 80 секунд (для 6 чи 8 зображень). На час виконання генерації ескізу впливають такі фактори:

- задана кількість зображень, але зображення генеруються усі одночасно;
- точність текстового опису-завдання (*promt* англ.);
- пріоритетність у описі головних і другорядних ознак для формування зображень;
- обраний підхід до генерації (*seed* англ.).

Найменше часу (15…20 секунд) займає генерування зображень за наданим референсом схожої моделі-аналога. Збільшує час генерування (на 20…30%) одночасне завдання опису та завантаження референсу. Значно (майже на 50%) збільшує час генерування складність і точність сформованого опису. Текст може бути обсягом від одного до кількох речень. Опис потрібно складати максимально простим, точним, чітко виставити пріоритетність для формування зображення: на початку опису/першим реченням має бути саме та візуальна ознака, риса, об'єкт, який має бути головним на ескізі; далі за зменшенням рівня вагомості в опис потрібно вписувати характеристики інших об'єктів або частин, деталей, матеріалів, середовища і фону в ескізі. Тим не менше, час одночасної генерації одразу кількох модифікованих між собою зображень у Leonardo.AI та MidJourney не перевищує 80 секунд за будь-яким алгоритмом.

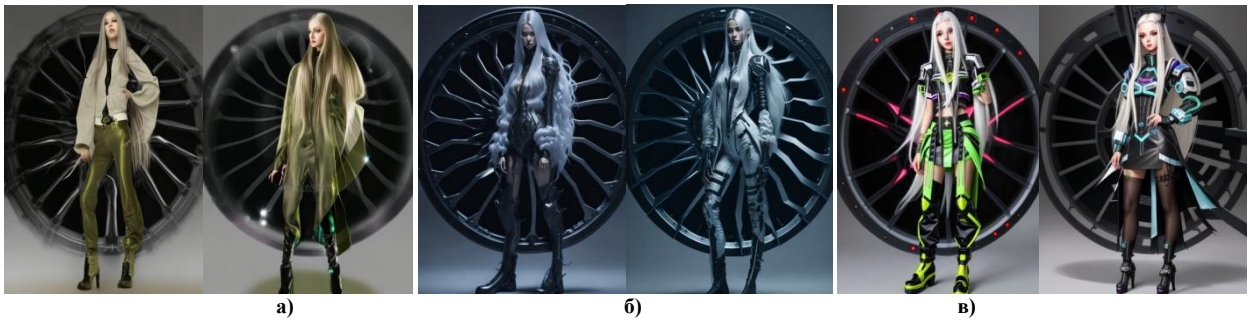
При генеруванні ескізів за стислим описом і референсами пріоритетними за замовченням є візуальні риси моделей на референсах. Кількість завантажених референсів для подальшого їх опрацювання при генеруванні ескізів залежить від AI-сервісу: одночасно можуть бути використані від 1 до 10 референсів, за замовчуванням – один. На одному зображенні можна генерувати одну і більше моделей одягу, задавати сценарій показу – на подіумі чи за інших обставин і оточення. Якість ескізів, зображень висока, з роздільною здатністю від 512×512 dpi до 1024×1024 dpi. Зображенням можна задавати формат – від квадратного до вертикального чи горизонтального прямокутного та змінювати його пропорції: 1:1, 2:3, 3:2, 3:4, 4:3, 9:16, 16:9.

Кожна генерація, при збереженні вихідного опису і референсу дозволяє отримати як задану кількість модифікацій (одночасно 1…8 варіантів), так і значно більшу кількість (з повторними регенераціями), зі стилізованими варіантами різних вирішень довжини виробу, розмірів деталей, кольорів. Сервіси дозволяють генерувати зображення як окремого виробу, без «надягання» його на фігуру, так і на fashion-фігурах у повний зріст в різних ракурсах і поворотах, при цьому, самостійно можуть догенерувати весь костюм разом із взуттям, аксесуарами, декором, змінити художнє рішення виробу (рис. 1).

Рис. 1. Приклад видів зображень та результатів виконання пошуку ідей і стилізації модельних вирішень виробу (куртка) при генеруванні і регенеруванні за спільним описом та різними референсами

Встановлено, що для генерування ескізу моделі одягу на fashion-фігурі у повний зріст потрібно обов'язково задати референс з аналогом одягу на фігурі у повний зріст, зазначення в описі «full-length figure» є недостатнім. Досягти анатомічної правильності будови фігури або пластики тіла, яка відповідає художньому образу одягу можна за допомогою регенерації зображень та інструментом *upscale*, що є тренуванням сервісу.

Встановлено, що тип заданого референсу-аналогу одягу, як то фотографія чи графічний ескіз, не впливає на результат генерування. Візуальний тип (графічний 2D-, 3D-ескіз, фотореалістичне зображення) згенерованого зображення залежить лише від обраної для генерації графічно-стилістичної моделі (*fine-tuned model*). В сервісах Leonardo.AI та MidJourney є більше двадцяти вбудованих графічно-стилістичних моделей. Для генерування fashion-зображень слід використовувати натреновані 8-9 графічно-стилістичних моделей (Stable Diffusion версій 1.5 та 2.1, Absolute Reality, Leonardo Diffusion, Default та Dream Shaper v7, 3D Animation Style, RPG 4), які дозволяють генерувати високоякісні відтворення чітко відмінних типів зображень, наприклад: зображення з ефектом реалістичності деталей, матеріалів – як fashion-фотографія, графічний художній fashion-ескіз або ескіз з ефектом схожості одягу ігрового персонажу чи аніме. Використання єдиного опису і єдиного референсу-аналогу з різними графічними моделями дозволяє виконати зміни стилю в художніх рішеннях ідей і варіантів одягу (романтичний змінити на фантазійний або на спортивний) та у стилістиці ескізу (рисунок 2).



а) б) в)

Рис. 2. Приклад стилізації ескізу виробу (куртка) при генеруванні за єдиним описом, єдиним референсом, з різними графічно-стилістичними моделями AI-сервісу:
а) на основі алгоритму для досягнення фотореалістичності (модель Stable Diffusion 2.1);
б-в) на основі алгоритмів для досягнення різних видів графічності (моделі Leonardo Diffusion, Default та Dream Shaper v7).

Важливим є те, що в різних графічно-стилістичних моделях AI-сервіс автоматично і одночасно стилізує пластику fashion-фігури та відповідно змінює її пропорції. Залежності часу генерування ескізів моделей одягу від типу графічно-стилістичної моделі AI-сервісу в даному дослідженні не виявлено.

а) б) в) г)

Рис. 3. Приклад стилізації ознак історичного одягу в ідеях художніх рішень сучасних моделей за референтами-репродукціями живописних полотен відомих художників XV-XVII ст.

За час від 15 сек. до 80 сек. сервіси здатні виконувати генерування ескізів із змінами характерних

рис одягу стилів різних історичних епох для пошуку художніх рішень сучасного моделей одягу за описом-завданням і референсом (рис. 3).

Генерувати можна також художні рішення аксесуарів, взуття у вигляді окремих виробів чи на фігурі. Для отримання зображень слід вказувати чіткі вихідні умови у тексті завдання та/або навантажувати належний референс. При подальшому відпрацюванні ідей художніх рішень в опис потрібно вносити потрібні зміни і уточнення, регенерація зображень дає суттєві трансформації морфології форми виробу (рис. 4).

а) **б)**

Рис. 4. Приклад трансформації художніх рішень в ескізах аксесуарів:
а) результат первинної генерації і трансформації;
б) регенерація з повторним трансформуванням

Встановлено, що рівень трансформації форми та деталей є більш керованим при поступовому регенеруванні зображень, створених вже за заданими параметрами та скоригованим описом, ніж при завантаженні референсів (рисунок 5).

Рис. 5. Приклад поступової трансформації форми і деталювання для моделі взуття з постійною регенерацією зображень

Сервіси, які досліджували, мають команди, інструменти для покращення деталізації зображення, для підвищення його роздільної здатності, для корекції фону – його кращого деталювання чи видалення. Сервіси виконують вдосконалення (функції інструменту *upscale*) власних генерованих зображень, вказаних оператором, дизайнером в часових межах від 15 сек. і більше, працюючи одночасно лише з одним зображенням, що дозволяє краще пропрацювати анатомію фігури, деталі, оздоблення, фактури одягу і світлотіні на самому зображенні. Інструмент видалення фону (*remove background*) та інструмент роботи із зображенням (*edit in canvas*) дозволяють редагувати самому дизайнеру зображення безпосередньо в сервісі.

Дизайнер повинен чітко відслідковувати розвиток змін та спрямовувати генерування за визначеними вимогами і завданням. Для кращого контролю результатів можна провести передпроектну підготовку до генерування: сформулювати точне і докладне завдання-опис, виконати підбір аналогів-референсів, оформити, за потреби, «дошку натхнення» з візуалізацією варіантів очікуваних результатів. Це скорочує час на досягнення мети генерації. На вибір згенерованих ескізів, який дизайнер здійснює за критерієм «відповідність завданню», прямо впливає точність їх ідеї заданому опису. Фактором, який має вирішальне значення для оцінки результатів генерування є практичний досвід в галузі дизайну одягу оператора генерації та його глибокі фахові знання з художнього і технічного проектування, технологій виготовлення й оздоблення, пластичних і формотворчих властивостей матеріалів. В результаті, часові витрати етапу ескізування в цілому тотально скорочуються – від кількох днів до кількох годин, в залежності від досвіду дизайнера і тренованості інструментів його AI-сервісу.

Перспективи використання генерованих оператором та штучним інтелектом fashion-ілюстрацій розвиваються у напрямку адаптації цих ескізів через інструменти 3D-моделювання в програми CLO 3D чи Marvelous Design, в яких зображення можна перетворити на віртуальну модель одягу та комплект лекал для її подальшого виготовлення.

Висновки

Використання нейромережевих сервісів генерування зображень за чітко сформованими вихідними даними є інноваційним рішенням для найбільш часовитратного етапу художнього проектування – опрацювання великої кількості ідей стилізації чи морфологічної зміни (трансформації) художніх рішень та візуалізації ескізів майбутніх моделей одягу. Кількість генерованих варіацій та рівень стилізації/трансформації ескізів абсолютно не обмежуються технічними можливостями AI-сервісів.

Коректність оцінки скорочення витрат часу на етапі художнього проектування нових моделей одягу залежить від великої кількості об'єктивних і суб'єктивних чинників, однак, скорочення часових витрат є значним.

Встановлено, що сервіси та інструменти генерування зображень за допомогою нейромереж зі штучним інтелектом при розроблені художніх рішень нових моделей одягу дають такі можливості для стилізування, трансформування ідей та їх швидкої візуалізації, а саме:

- виконання модифікації форм одягу або повної їх трансформації за заданим описом та/або різними видами референсів: фотографія, ескіз, репродукція, власний генерований референс;

- виконання еклектики (у різних виробах одної моделі) та дифузії (у різних деталях одного виробу) – одночасної зміни ознак одного стилю на інші;

- впровадження в ескізи нових моделей одягу упізнаваних рис, художніх прийомів, характерного «почерку» художників, митців.

Таким чином, інструменти AI-сервісів ефективними інструментами створення візуальних образів із генерованих ідей для інноваційних способів дизайну одягу.

Література

1. Остапенко Н.В. Принципи трансформації в дизайн-проектуванні одягу / Н.В. Остапенко, Т.В. Луцкер, М. Колосніченко // Дизайн одягу в полікультурному просторі : монографія / М.В. Колосніченко, К.Л. Пашкевич, Т.Ф. Кротова та ін. – Київ : КНУТД, 2020. С. 149–174. – URL: https://er.knutd.edu.ua /bitstream/123456789/16297/1/DOvPP_2020_P149-174.pdf

2. Чібалашвілі А. Штучний інтелект у мистецьких практиках / А. Чібалашвілі // Сучасне мистецтво : збірник наукових праць. – Київ, (2021). – № 17. – С. 41–50. – DOI: https://doi.org/10.31500/23098813.17.2021.248425

3. Перлман Е. ШІ досягає повноліття / Е. Перлман // PAJ: Журнал перформансу та мистецтва. – 2020. – Том 42. Вип. 3 (126). – С. 55–62. – https://doi.org/10.1162/pajj_a_00539

4. Стрижова О. Дослідження можливостей використання штучного інтелекту у візуальному та комунікативному видах генеративного дизайну / О. Стрижова, Е. Базилюк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2023. – № 4. – С. 307–309.

References

1. Ostapenko N.V. Pryntsypy transformatsii v dyzain-proektuvanni odiahu / N.V. Ostapenko, T.V. Lutsker, M. Kolosnichenko // Dyzain odiahu v polikulturnomu prostori : monohrafiia / M.V. Kolosnichenko, K.L. Pashkevych, T.F. Krotova ta in. – Kyiv : KNUTD, 2020. S. 149–174. – URL: https://er.knutd.edu.ua /bitstream/123456789/16297/1/DOvPP_2020_P149-174.pdf

2. Chibalashvili A. Shtuchnyi intelekt u mystetskykh praktykakh / A. Chibalashvili // Suchasne mystetstvo : zbirnyk naukovykh prats. – Kyiv, (2021). – № 17. – S. 41–50. – DOI: https://doi.org/10.31500/23098813.17.2021.248425

3. Perlman E. ShI dosiahaie povnolittia / E. Perlman // PAJ: Zhurnal performansu ta mystetstva. – 2020. – Tom 42. Vyp. 3 (126). – S. 55–62. – https://doi.org/10.1162/pajj_a_00539

4. Stryzhova O. Doslidzhennia mozhlyvostei vykorystannia shtuchnoho intelektu u vizualnomu ta komunikatyvnomu vydakh heneratyvnoho dyzainu / O. Stryzhova, E. Bazyliuk // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2023. – № 4. – S. 307–309.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-235-239
УДК 004.89:004.738.5:004.415.3:004.82(045)

ТИМЧУК ВОЛОДИМИР
Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного
https://orcid.org/0000-0002-3549-2813
e-mail: v_tymchuk@yahoo.co.uk

ПІДХІД ДО АНАЛІЗУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ДАНИХ ЗАЛЕЖНО ВІД ЗМІНЮВАНИХ МЕТЕОПАРАМЕТРІВ ДЛЯ МОДЕЛІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ У КОМПЛЕКСІ МЕТЕОЗОНДУВАННЯ: ЛЮДСЬКІ ПОМИЛКИ ПІД ЧАС ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ СИСТЕМ

В роботі наведено попередні результати дослідження щодо створення моделі з навчанням для аналізу метеоданих за масивами даних від комплексів метеорологічного зондування атмосфери в інтересах розвитку озброєння та військової техніки ракетних військ та артилерії, зокрема пояснено отримання незадовільної оцінки ефективності розробленої моделі для машинного навчання.

Ключові слова: система систем, проєктування систем, модернізація ОВТ, система обробки інформації, ракетно-артилерійське озброєння, метеорологічне зондування атмосфери, метеорологічна інформація, масиви даних, машинне навчання, модель, прогнозування, помилки проєктування, людський фактор.

TYMCHUK VOLODYMYR
Hetman Petro Sahajdachnyj National Army Academy

AN APPROACH TO THE METEOROLOGICAL DATA ANALYSIS AND PREDICTION FOR THE TRAINED MODEL FOR THE METEOROLOGICAL STATION: HUMAN FAILURES IN SYSTEMS OF SYSTEMS DESIGNING

Well-known approaches to solve the applied problems in Big Data System are the Deep Learning Machines. The specific Big Data Systems are the parts of real weapon systems in artillery. To improve the efficiency of such systems is an important task for Ukrainian Defence forces. The meteorological station operates with Big Data determining the parameters of the atmosphere for some artillery mission. How to use the DLM and special models that are capable to predict some meteorological information for artillery mission is our task for research and system designing.

The designing of the Systems of Systems (SoS) is a complicated process, so some kind of the decomposition is a typical approach with next control and adaptation. Obviously, the control and analysis that are qualified and done in time are the measures that could prevent from some incorrect or non-optimal solutions in the SoS, the time and some sources would be reduced too in the process of the solving the problem. It is shown in the paper the first stage of designing some part of the SoS concerning to the information processing system in the concrete sample of a meteorological station. The meteorological data were used as the reference data for the trained model that could calculate the meaning of horizontal and vertical angles of the turning antenna. This 'feed-back' task will allow to estimate the possibilities of the different trained models on the actual values of the angles. The dataset was obtained from "Radiotheodolite-UL" meteorological station. A regression model was created on Python with using such libraries as Pandas and Scikit-learn. The final result was unexpected, it allows to make an incorrect evaluation of the DLM for similar tasks. The reasons for failure were analyzed. The researches for the designing of the SoS are continued.

Keywords: systems of systems, system designing, information processing system, deep learning machine, artillery systems, meteorological station, meteorological information, Big Data, neural network, Deep Learning, model, dataset, prediction, failure designing, human factor.

Постановка проблеми

У системах з великим обсягом даних одним із способів розв'язати прикладну задачу є застосування систем машинного навчання (СМН) [1].

Системи з великим обсягом даних помітно присутні у зразках озброєння та військової техніки (ОВТ) і, насамперед, у номенклатурі ракетно-артилерійського озброєння (РАО). Підвищення ефективності зразків РАО є постійною актуальною потребою. В світлі здійснення Україною національного спротиву кожне підвищення ефективності зразків ОВТ так чи інакше впливає, по-перше, на людський потенціал, себто на живучість особового складу, а, по-друге, на критерії ефективності бойового застосування зразка ОВТ.

Тенденцією проєктування складних систем для забезпечення їх функціонування в максимально широкому спектрі вирішення проблем і задач є їх поєднання для постійної або ситуативної взаємодії, тим самим створюючи системи систем [2]. Розробка системи систем є складною організаційно-технічною науковою проблемою, яка вирішується у тому числі через декомпозицію її на простіші наукові та інженерні задачі. Звично пошук шляхів вирішення таких простіших задач може здійснюватися за конкурентним або делегувальним підходом, що, з одного боку, дозволяє найкраще використовувати сукупність ресурсів, але з іншого боку, може спричинити непередбачувані труднощі, наприклад помилковий результат. Кваліфікований і вчасний аналіз дозволяє запобігти, щонайменше, привнесенню неправильних (неоптимальних) рішень у систему систем, а також зменшити рівень невиправданих затрат на реалізацію шляху розв'язання задачі.

Аналіз останніх джерел

Під час специфічних польових досліджень нами було встановлено наявність великого обсягу гетерогенних даних у різних ланках військового управління, насамперед у структурах Ракетних військ і артилерії (РВіА) [3]. Загальною тенденцією є те, що ці дані не опрацьовуються у повній мірі з різних причин [4].

Одним із зразків ОВТ із великим обсягом даних є комплекс зондування атмосфери для визначення її метеопараметрів [5]. Споживачами результатів метеозондування є підрозділи РВіА, авіації Повітряних сил і авіації Сухопутних військ, розвідувального забезпечення. Тож розгляд потенційних задач щодо опрацювання великих обсягів даних є зрозумілим і дозволяє розробляти нові моделі та підсистеми для впровадження в такі типи зразків ОВТ, а також рекомендації щодо відповідного застосування.

Система метеорологічного забезпечення може включати різні засоби, тому логічним є застосування наявного ресурсу для інших сфер. Так, у [6] показано можливості підвищення інформаційного забезпечення користувачів метеорологічною інформацією (МІ) за рахунок використання комплексної глобальної системи отримання та обміну, поширення та використання метеорологічних даних (для застосування в авіації), а в [7] вже показано можливість використання частини МІ (температури повітря, атмосферного тиску, швидкості і напрямку вітру, вологості повітря) від цивільних засобів для потреб військових споживачів, зокрема через певний порядок її переведення (переведення значень атмосферного тиску; переведення побудованого графіку вертикального розподілу стандартних ізобаричних поверхонь до стандартних висот, прийнятих в ракетних військах і артилерії; побудова графіків залежності значень температури повітря, напряму та швидкості вітру від стандартних висот; перерахунок напряму та швидкості вітру в балістичні складові вітру по стандартних висотах; врахування прогнозованих величин метеоелементів; узагальнення метеорологічних та гідрологічних явищ).

У [8] сформульовано вимоги та запропоновано структуру спеціалізованого програмного забезпечення для збирання, обробки, відображення та реєстрації даних моніторингу локальних метеорологічних систем.

У комплексі метеозондування великим обсягом даних є МІ від зонду для розрахунку метеобюлетенів, які, в цілому, задовольняють запити підрозділів РВіА та аеророзвідки. У той же час обмеженнями є власне залежність від факту метеозондування, бо це є складним організаційно-інформаційним заходом, що має часову, просторову, тактичну прив'язку. Тож пошук, з одного боку, способів урахування інформаційної надлишковості за рахунок використання датасетів від різних систем обробки інформації (СОІ) зразків РАО, а, з іншого боку, способів прогнозування достовірних результатів для СОІ, що може ефективно здійснюватися на основі СМН, є, власне, тією сферою потенційних наукових та інженерних задач щодо опрацювання великих обсягів даних.

На сьогодні результатів, наукових або впроваджених, щодо опрацювання метеоданих за допомогою систем машинного навчання ще не достатньо у науковій площині, тож питання розробки та тренування моделі, яка здатна аналізувати метеодані, отримані від зонду, та визначати окремі параметри за ними, є перспективним напрямком наукових досліджень і практичних розробок.

Метою статті є підвищення ефективності досліджень щодо створення систем машинного навчання для обробки метеопараметрів для їх впровадження у системах обробки інформації метеорологічних комплексів.

Виклад основного матеріалу

РАО є чи не найбільш обширним сегментам у номенклатурі зразків ОВТ Збройних Сил України.

На озброєнні РВіА є низка засобів для комплексного зондування атмосфери з метою отримання її метеорологічних параметрів на різних висотах в певному просторі, що визначається радіусом відносно місця розгортання метеокомплексу. Вочевидь, що ці метеопараметри власне визначають стан метеоумов, зокрема температури, атмосферного тиску, вологості, напрямку та швидкості вітру в різних шарах атмосфери.

Окрім задачі прогнозування, а саме щодо розвитку метеоявищ, що є типовою задачею для машинного навчання, ці метеопараметри мають визначальну роль на застосування зброї в масштабі реального часу, а саме виконання вогневих завдань артилерією, пуску балістичних ракет, здійснення польотів аеродинамічними об'єктами, ведення оптичного спостереження з безпілотних літальних апаратів тощо.

На першому етапі було прийнято рішення розробити та навчити модель розрахунку кутів нахилу антени метеокомплексу за метеоданими, що дозволить опісля вирішувати інші наукові та інженерні задачі у разі, якщо модель покаже надійні результати. Іншими словами, ми мали намір перевірити модель на фактичних значеннях кутів антени, які просто фіксують у даних зондування. Для цієї «зворотної задачі» ми за допомогою обраної моделі розраховували кути антени, які мали б відповідати отриманим метеоданим.

Для виконання цього етапу ми сформували дослідну групу, видали їй завдання на курсове проєктування. Проміжний контроль не здійснювався, весь аналіз результатів етапу оцінювався за «кінцевим продуктом».

Отже, для аналізу метеоданих за допомогою тренування моделей дослідна група обрала мову програмування *Python*, яка дозволяє легко працювати з такими бібліотеками аналізу даних, як *Pandas* та *Scikit-learn* [9]. У якості статистичної техніки для знаходження залежностей між змінними з причин простоти та ефективності була використана регресія (лінійна та поліноміальна). У якості *IDE* було обрано середовище *Visual Studio Code* від *Microsoft* через зручність способів обробки даних та різноманітні типи виведення інформації для візуального сприйняття. Для оцінки ефективності моделі використовувалися цілий набір метрик, але причини їх «перебору» будуть показані нижче.

Для дослідження взяли реальний датасет з метеокомплексу «Радіотеодоліт-УЛ». Видима частина датасету відображається на моніторі «Радіотеодоліт-УЛ» [10]. До МІ належать: координати радіозонду, значення частоти метеоданих та значення метеоданих, а саме: графіки змін впродовж польоту температури

повітря, вологості, висоти радіозонду, а також графіки змін напрямку вітру та швидкості за висотою (рис. 1).

Рис. 1. МІ комплексу «Радіотеодоліт-УЛ», яка формує датасет

В загальному випадку датасет є доволі обширним, його обсяг залежить від кількості зондувань. Датасет формується автоматично комплексом «Радіотеодоліт-УЛ», розподіляючись по днях, місяцях, роках. Принагідно зауважимо, що така категоризація дозволяє проводити ретроспективний, порівняльний аналіз, що може бути корисно як для співставлення даних з даними від інших джерел (наприклад, наземних метеостанцій), так і для дослідження проблематики створення системи систем через поєднання даних від різних систем на хронометричній основі, тобто через часову синхронізацію. Отже, зміст теки з даними зондування за конкретний день (тут – 07.04.2021) показаний на рис. 2, можливими до використання в моделі були файли з різних тек днів зондування тільки з *txt*-розширенням (.mzb – вузькоспеціалізований формат із системними, конфігураційними, часовими та іншими файлами даних, потребує спеціалізованого софту, .dat – узагальнене позначення файлу даних, .sfb – вузькоспеціалізований формат, ймовірно для мультимедійних даних, отримуваних з радіозонда).

Рис. 2. Типи файлів, які в метеокомплексі формуються за результатами здійсненого зондування

Аналіз датасету показав потребу очищення та підготовки даних (відсутність деліметрів, незаповненість всіх окремих стовпчиків (тут – вологості), надмірна кількість неінформативних символів тощо). У підготовці були здійснені кроки очищення даних, їх форматування (заміна символу «,» та символ «.»), доповнення відсутніх (для вологості дані перестали надходити після досягнення температури в атмосфері –40 °С, тож вводився символ NaN). У підсумку був отриманий «зібраний» метеорологічний датасет обсягом понад $2 \cdot 10^5$ записів (див. рис. 3).

```
df = pd.read_csv('../kursach/alldata.txt', names=["Time","H
df
```
✓ 1.1s

	Time	H_Angle	V_Angle	Range	Temp	Humid	Hight
0	0,50	15-79	4-30	367	-5,6	73.0	330
1	1,00	17-24	3-97	792	-6,3	75.0	490
2	1,50	19-17	3-73	1261	-4,5	78.0	650
3	2,00	19-06	3-75	1672	-5,1	77.0	809
4	2,50	19-84	3-62	2156	-5,7	76.0	969
...	...	...	...	...	...	...	...
22259	28,50	12-41	4-76	20398	-43,6	NaN	9848
22260	29,00	12-44	4-72	20978	-44,7	NaN	10045

Рис. 3. Завантажений до моделі «зібраний» та підготовлений метеорологічний датасет

```
<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
RangeIndex: 22264 entries, 0 to 22263
Data columns (total 6 columns):
 #   Column   Non-Null Count  Dtype
---  ------   --------------  -----
 0   H_Angle  22264 non-null  object
 1   V_Angle  22264 non-null  object
 2   Range    22264 non-null  int64
 3   Temp     22264 non-null  object
 4   Humid    10868 non-null  float64
 5   Hight    22264 non-null  int64
dtypes: float64(1), int64(2), object(3)
memory usage: 1.0+ MB
```

Рис. 4. Типи даних за різними параметрами метеорологічного зондування

Як видно з даних, змінюваними параметрами в датасеті є:
- час з ітерацією у півхвилини (0,5 [хв.], 1 [хв.], 1,5 [хв.], …, 29 [хв.]);
- горизонтальний кут повороту антени (ряд значень, наприклад 15-79);
- вертикальний кут підйому антени відносно лінії горизонту (ряд значень, наприклад 4-30);
- дальність до зонда (ряд значень, наприклад 367 [м], 792 [м] і т.д.);
- температура повітря (ряд значень, наприклад –5,6 [°С], –6,3 [°С] і т.д.);
- вологість повітря (ряд значень, наприклад 73 [%], 75 [%] і т.д.);
- висота підйому зонда (ряд значень, наприклад 330 [м], 490 [м] і т.д.).

Складність наступної обробки визначалася також тим, що дані в різних стовпчиках відносилися до різних типів (див. рис. 4).

Після проведеної підготовки даних дослідна група спробувала виконати поставлене завдання щодо ставлення у відповідність фактичної просторової орієнтації антени та оціненого положення моделлю за даними метеобюлетеня, яким є згаданий датасет.

Ця задача взагалі не мала представляти жодної складності, однак, несподівано, дослідна група отримала зовсім нерелевантний результат. Цікаво є процитувати висновок у пояснювальній записці до проєкту: «*Нашій моделі не вдалось адекватно передбачити необхідні нам дані, виходячи з тих, які у нас були. Нами було застосовано всі відомі нам техніки для покращення нашого результату, але нам не вдалось наблизити його до задовільного. Виходячи з цього, можна дійти до висновку, що передбачати подібні показники, виходячи з наданих даних, є недоцільним*» (підкреслення – наше).

То що ж відбулося у процесі виконання цього етапу, що спричинило такий категоричний і дискредитаційний вирок і привнесло в проєкт надлишкову вартість (організаційну, часову, ресурсну)?

Відповідь банальна. Наявність помилки у початковій стратегії. У військовій специфіці не даремною є вимога, яка стосується взаємодії між розпорядником і виконавцем щодо задачі, яка ставиться або виникає: слід переконатися, що задача зрозуміла виконавцю і він її усвідомив. Виконавець у свою чергу формує питання, які допомагають зрозуміти йому природу частку його роботи в загальному проєкті.

Отже, помилкою виявилося незнання виконавцем одиниць вимірювання, мова про кутові значення. В датасеті обидва кути – горизонтальний і вертикальний – подаються в поділках кутоміра, що є відомою артилерійською мірою кутів. Дослідна ж група сприйняла це, як діапазон кута для кожного запису, тобто, наприклад (див. рис. 4): 15 – «початок», а 79 – «кінець», до того ж у градусній мірі.

Важливість подібних помилок полягає в тому, що інколи показує не хибність шляху, а уважність до всіх етапів системного підходу про проєктуванні систем.

Дослідження, вочевидь, будуть продовжені, в тому числі з метою «реабілітації» систем машинного навчання та знаходження відповідної моделі для задач прогнозування в системах ОВТ.

Висновки

В етапі дослідна група спробувала створити модель з навчанням для аналізу метеоданих з використанням регресійних методів Лассо, Ріджа, лінійної та поліноміальної регресії.

У зв’язку з не належною увагою на початковому кроці щодо усвідомлення задачі були допущені надлишкові організаційні, часові та ресурсні затрати. Отриманий результат уможливив хибний висновок і створив невиправдане поле обмежень для моделей із навчанням.

Виправлення окресленої помилки дозволить направду оцінити ефективність моделі для прогнозування різних параметрів під час метеозондування, що буде зроблено під час продовження досліджень.

Література

1. Литвин В. В. Бази знань інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень / В.В. Литвин. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 240 с.

2. Wang Y. Erratum to: Towards the abstract system theory of system science for cognitive and intelligent systems. Complex Intell. 2015. Syst. 1. № 23. https://doi.org/10.1007/s40747-016-0007-7.

3. Тимчук В. Типи даних від різних джерел для опрацювання у системі консолідованої обробки просторової інформації для системи систем / В. Тимчук, В. Литвин, О. Коцемир, В. Шандра, О. Попов // Тези наук.-техн. конф. «Перспективи розвитку ОВТ Сухопутних військ», м. Львів, 17–18 трав. 2023 р. – С. 228–229.

4. Тимчук В. Інформаційна робота на пункті управління артилерійською розвідкою у літній кампанії 2022 року / В. Тимчук, В. Литвин, О. Попов, Р. Коваль // Тези наук.-практ. конф. «Застосування Сухопутних військ ЗС України у конфліктах сучасності (за досвідом забезпечення національної безпеки складовими сектору безпеки і оборони у російсько-українській війні в 2022 році)», м. Львів, 17 лист. 2022 р. – С. 114.

5. Глушков А.В. Технічні засоби гідрометеорологічної служби : конспект лекцій / А.В. Глушков // Одеса: Одеський державний екологічний університет. – 2018. – 136 с. – ISBN 978-966-186-129-8.

6. Авер’янова Ю. А. Інтерактивна глобальна мережа отримання, обміну та поширення метеорологічних даних / Ю. А. Авер’янова // Вісник Національного авіаційного університету. – 2012. – № 53(4). – С. 26–30. – https://doi.org/10.18372/2306-1472.53.3481.

7. Майстренко О. Застосування методу двох функцій для вирішення завдань бойового забезпечення ракетних військ і артилерії / О. Майстренко, О. Лихольот, М. Кольченко // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – 2021. – Том 42. – № 3. – С. 5–16. – https://doi.org/10.33099/2311-7249/2021-42-3-5-16.

8. Юрчук Л.Ю. Спеціалізована система збирання та обробки інформації для метеорологічного моніторингу / Л. Ю. Юрчук, О. В. Родінін // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 1. – С. 18–22. – URL: https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1117.

9. Shanbhag S., Chimalakonda S. An Exploratory Study on Energy Consumption of Dataframe Processing

Libraries. 2023 IEEE/ACM 20th Int. Conf. on Mining Software Repositories (MSR), Melbourne, Australia. 2023. pp. 284–295. doi: 10.1109/MSR59073.2023.00048. https://arxiv.org/pdf/2209.05258.pdf.

10. Комплекс радіозондування багатофункціональний Радіотеодоліт-УЛ. Техприлад : веб-сайт. URL: http://techprulad.lviv.ua/index.php/ua/vyhotovliaiem/aerolog-pril/%D1%80%D0%B0%D0%B4%D1%96%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%B4%D0%BE%D0%BB%D1%96%D1%82%D0%B8 (дата звернення: 30.07.2023).

References

1. Lytvyn V. V. Bazy znan intelektualnykh system pidtrymky pryiniattia rishen / V.V. Lytvyn. – Lviv : Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniky, 2011. – 240 s.

2. Wang Y. Erratum to: Towards the abstract system theory of system science for cognitive and intelligent systems. Complex Intell. 2015. Syst. 1. № 23. https://doi.org/10.1007/s40747-016-0007-7.

3. Tymchuk V. Typy danykh vid riznykh dzherel dlia opratsiuvannia u systemi konsolidovanoi obrobky prostorovoi informatsii dlia systemy system / V. Tymchuk, V. Lytvyn, O. Kotsemyr, V. Shandra, O. Popov // Tezy nauk.-tekhn. konf. «Perspektyvy rozvytku OVT Sukhoputnykh viisk», m. Lviv, 17–18 trav. 2023 r. – S. 228–229.

4. Tymchuk V. Informatsiina robota na punkti upravlinnia artyleriiskoiu rozvidkoiu u litnii kampanii 2022 roku / V. Tymchuk, V. Lytvyn, O. Popov, R. Koval // Tezy nauk.-prakt. konf. «Zastosuvannia Sukhoputnykh viisk ZS Ukrainy u konfliktakh suchasnosti (za dosvidom zabezpechennia natsionalnoi bezpeky skladovymy sektoru bezpeky i oborony u rosiisko-ukrainskii viini v 2022 rotsi)», m. Lviv, 17 lyst. 2022 r. – S. 114.

5. Hlushkov A.V. Tekhnichni zasoby hidrometeorolohichnoi sluzhby : konspekt lektsii / A.V. Hlushkov // Odesa: Odeskyi derzhavnyi ekolohichnyi universytet. – 2018. – 136 s. – ISBN 978-966-186-129-8.

6. Averianova Yu. A. Interaktyvna hlobalna merezha otrymannia, obminu ta poshyrennia meteorolohichnykh danykh / Yu. A. Averianova // Visnyk Natsionalnoho aviatsiinoho universytetu. – 2012. – № 53(4). – S. 26–30. – https://doi.org/10.18372/2306-1472.53.3481.

7. Maistrenko O. Zastosuvannia metodu dvokh funktsii dlia vyrishennia zavdan boiovoho zabezpechennia raketnykh viisk i artylerii / O. Maistrenko, O. Lykholot, M. Kolchenko // Suchasni informatsiini tekhnolohii u sferi bezpeky ta oborony. – 2021. – Tom 42. – № 3. – S. 5–16. – https://doi.org/10.33099/2311-7249/2021-42-3-5-16.

8. Yurchuk L.Iu. Spetsializovana systema zbyrannia ta obrobky informatsii dlia meteorolohichnoho monitorynhu / L. Yu. Yurchuk, O. V. Rodinin // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2013. – № 1. – S. 18–22. – URL: https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1117.

9. Shanbhag S., Chimalakonda S. An Exploratory Study on Energy Consumption of Dataframe Processing Libraries. 2023 IEEE/ACM 20th Int. Conf. on Mining Software Repositories (MSR), Melbourne, Australia. 2023. pp. 284–295. doi: 10.1109/MSR59073.2023.00048. https://arxiv.org/pdf/2209.05258.pdf.

10. Kompleks radiozonduvannia bahatofunktsionalnyi Radioteodolit-UL. Tekhprylad : veb-sait. URL: http://techprulad.lviv.ua/index.php/ua/vyhotovliaiem/aerolog-pril/%D1%80%D0%B0%D0%B4%D1%96%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%B4%D0%BE%D0%BB%D1%96%D1%82%D0%B8 (data zvernennia: 30.07.2023).

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-240-245
УДК 621.396: 551.508

ЧИГІНЬ ВАСИЛЬ
Національний університет «Львівська політехніка»
https://orcid.org/0000 -0003-1593-6832
e-mail: vchygin@gmail.com
ПАЗИНЮК МИХАЙЛО
Національний університет «Львівська політехніка»
e-mail: pazyniuk.m@gmail.com

АВТОНОМНА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА СИСТЕМА І ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ЗВУКОВОГО ВИЯВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ТА ON-LINE СПОВІЩЕННЯ

Створили експериментальну автономну систему і програмне забезпечення для звукового виявлення об'єктів з надсиланням on-line сповіщення при їх виявленні. Використали міні-комп'ютер ASUS TS-10 і мікрофон типу SyncoMic-M3. Програмне забезпечення для аналізу звуку в реальному часі сформували на основі власної програми, написаної мовою C++ з використанням застосунку відкритого вихідного коду FrequencyAnalyzer. Використали розклад звукової хвилі у ряд Фур'є за алгоритмом швидкого перетворення (FFT). При цьому вперше ввели такі функції, як граничне значення сумарної інтенсивності звуку, при якому надсилається сповіщення, та значення тривалості сигналу для відсікання випадкових звуків. Склали програму мовою Python для надсилання сповіщення при виявленні об'єкта з використанням бібліотеки Flask для отримання запитів від програми аналізу звуку. При цьому використали бібліотеку python-telegram-bot для автоматизації надсилання сповіщень у телеграм-чат. Python-застосунок розгорнули у хмарному середовищі Heroku, що дозволяє зручно керувати застосунком, його версією та запитами на відправлення повідомлення. В основі програмного забезпечення для аналізу звуку лежить застосування алгоритму швидкого перетворення Фур'є (FFT). Цей алгоритм діє як математичний наріжний камінь, ефективно перетворюючи складні звукові хвилі на зрозумілі представлення рядів Фур'є. Це перетворення дозволяє глибше зрозуміти вхідне аудіо, дозволяючи системі розпізнавати ключові моделі та аномалії. Створена експериментальна система та програмне забезпечення є свідченням інновацій у виявленні об'єктів за допомогою звукового аналізу. Використовуючи необхідне апаратне забезпечення, ретельне програмування та інтеграцію, система забезпечує надійне та ефективне рішення. Паралельно з програмним забезпеченням для аналізу звуку було розроблено додаткову програму Python для миттєвого сповіщення про виявлення об'єкта. Використовуючи бібліотеку Flask, ця програма організовує безперебійний зв'язок між програмним забезпеченням аналізу звуку та зовнішніми системами. Ця інтеграція гарантує, що події виявлення викликають негайне сповіщення, уможливлюючи реагування у реальному часі.

Ключові слова: експериментальна установка, програмне забезпечення, звукове виявлення об'єкта, Flask бібліотека, хмарне середовище Heroku, Python-застосунок.

CHYHIN VASYL, PAZYNIUK MYHAILO
Lviv Polytechnic National University

AUTONOMOUS EXPERIMENTAL SYSTEM AND SOFTWARE FOR SOUND OBJECT DETECTION AND NOTIFICATION

An experimental system and software have been created to detect the object with sending the notification about its detection. ASUS TS-10 Mini PC and Synco Mic-M3 type microphone were used. A real-time sound analysis software was created using a C++ programming language with a usage of open-source application named 'Frequency Analyzer' was developed. Fast Fourier Transform algorithm was used to expand a sound wave to Fourier series. Herewith such functions as entering threshold sound intensity value, with a notification sending, and signal duration value to cut off unnecessary sounds were introduced. A python-application was created to send notification when the object is detected using Flask library to receive the requests from Sound Analysis application. Herewith a python-telegram-bot library was used to automate sending messages to the telegram chat. Python-application was deployed on the Heroku cloud environment, which allows to comfortably manage the application, its version, and requests to send the message. At the heart of the sound analysis software lies the ingenious application of the Fast Fourier Transform (FFT) algorithm. This algorithm acts as a mathematical cornerstone, effectively converting intricate sound waves into comprehensible Fourier series representations. This transformation allows for a deeper understanding of the audio input, enabling the system to discern key patterns and anomalies. The created experimental system and software stand as a testament to innovation in object detection through sound analysis. By leveraging cutting-edge hardware, meticulous programming, and strategic integrations, the system provides a robust and efficient solution. In parallel to the sound analysis software, a complementary Python application was ingeniously devised to facilitate instant notifications upon object detection. Leveraging the Flask library, this application orchestrates seamless communication between the sound analysis software and external systems. This integration ensures that detection events trigger immediate notifications, enabling real-time awareness and response.

Keywords: computer control model, software, object sound detection, Flask library, Heroku cloud environment, Python application.

Вступ

На даний час особливо актуальною є задача звукового виявлення об'єктів та формування on-line сповіщень при цьому. Зокрема, створення такої системи є необхідним для попередження про появу несанкціонованих літальних чи наземних апаратів різного типу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В українській літературі та інтернет сайтах не виявлено описання систем і програмних забезпечень,

які дозволяють виявляти об'єкти за допомогою їх звукових характеристик та надсилати сповіщення. Аналіз іноземних публікацій свідчить про те, що на сьогоднішній день приділяється особлива увага до автоматизованих систем виявлення та розпізнавання об'єктів [1, 2]. В таких системах застосовуються різні фізичні принципи виявлення – електромагнітні, акустичні, оптичні і т.п. Основним недоліком активних систем виявлення та розпізнавання об'єктів є їх вразливість до зовнішнього виявлення. В той же час, пасивні системи можуть приховано і тривало працювати в режимі реального часу.

Окремі дослідження проводилися в області аналізу звуку, зокрема, при створенні застосунку FrequencyAnalyzer для швидкого розкладу звукової хвилі у ряд Фур'є [3]. Цей застосунок потребує подальшої модернізації для можливості виявлення об'єктів в реальному часі. Перевагою застосунку FrequencyAnalyzer є відкритий вихідний код алгоритму швидкого перетворення Фур'є і можливість введення оптимальних параметрів опрацювання звуку об'єктів. При аналізі публікації, зв'язаних з цим алгоритмом, виявлено, що існує декілька методів його програмної реалізації. Зокрема, вони досліджуються в роботі [4], де описані методи їх програмної реалізації (Cooley-Tukey algorithm, Prime-Factor algorithm, Rader's FFT algorithm). При складання програми звукового аналізу і виявлення об'єктів обрали метод Кулі-Тьюкі (Cooley-Tukey) [5] через його легкість в реалізації і відносно невеликій швидкості обчислення. Зокрема, такий алгоритм дозволяє виразити дискретне перетворення Фур'є довжини, рівній довільному складеному числу N, через певну кількість перетворень меншої довжини за допомогою рекурсії, понижуючи таким чином швидкість обчислення до O (N log N).

У публікації [6] описуються та порівнюються популярні на даний момент бібліотеки (фреймворки) для мови Python, які призначені для роботи з веб-сервісами. Зокрема, вони поділяються на три типи: фул-стек, мікросервісні та асинхронні. Кожен з типів має свої переваги та недоліки та свою сферу застосування. Оскільки мета фул-стек програм – створення повноцінних великих за обсягом додатків, а мета асинхронних – швидке опрацювання великої кількості інформації, обрали мікросервісний тип. Метою мікросервісного типу є створення невеликих застосунків, які можуть швидко опрацьовувати певну кількість інформації для відповідних потреб. Серед наведених в публікації мікросервісних фреймворків (Bottle, CherryPy, Dash, Flask , MorePath тощо), слід відзначити такі переваги бібліотеки Flask, як гнучкість, швидкодія, легкість у використанні. Крім того, для створення веб-застосунку він дозволяє використати лише один файл, в якому написана вся логіка згідно з документацією Flask [7]. Враховуючи ці переваги фреймворку Flask, обрали його в роботі як основу для створення застосунку.

У публікації [8] порівнюють сервіси, які дозволяють розгорнути веб-застосунки на одному з них для безперешкодного виконання запитів на застосунок. Зокрема, порівнюється сервіс Heroku та платформа PythonAnywhere. Проаналізувавши переваги та недоліки кожного з сервісів, обрали хмарне середовище Heroku. Серед переваг PythonAnywhere можна відзначити легке розгортання Python-застосунка, оскільки цей сервіс працює лише з застосунками, що написані мовою Python. Проте, недоліками PythonAnywhere є відсутність багатьох додаткових можливостей, що полегшують роботу із застосунками, які наявні в Heroku. Серед переваг Heroku можна відзначити легкість у налаштуванні та користуванні сервером, адже весь процес розгортання веб-застосунку здійснюється в декілька кліків без необхідності написання коду. При цьому процеси керування додатком, його модифікацією і версіями є швидкими і простими. Аналіз публікації [9] показав, що процес встановлення python-додатку на хмарне середовище Heroku є простим та інтуїтивно зрозумілим. Для цього слід створити новий проект на власній сторінці сайту Heroku, обравши ім'я проекту та сайту, на якому буде розташовуватись застосунок. Після створення проекту, необхідно розгорнути Flask-застосунок на новоствореному проекті. Завдяки легкості Flask-застосунку для повноцінного функціонування веб-додатку достатньо розгорнути лише один файл, в якому написана вся логіка веб-додатку. Тому при складання програми передавання сповіщень використали хмарне середовище Heroku.

У публікації [10] порівнюються бібліотеки для мови Python, які дозволяють робити інтеграцію з сервісами Telegram-месенджера. Серед бібліотек, що порівнювались (python-telegram-bot, pyTelegramBotApi, Telethon, aiogram), звернули увагу на python-telegram-bot. До переваг цієї бібліотеки слід віднести легкість у налаштуванні і надсиланні сповіщень, швидкодію роботи та простоту документації, що дозволяє створювати застосунки різної складності з використанням Telegram-месенджера. Саме тому у роботі для надсилання сповіщень обрали python-telegram-bot.

Метою роботи є створення експериментальної системи і програмного забезпечення для виявлення об'єктів за їх звуковими сигналами з можливістю надсилання сповіщень про його наявність і мінімізація її розмірів.

Методика дослідження та експериментальна система

Основою для створення експериментальної системи і програмного забезпечення дослідження процесів виявлення об'єкта за його звуковими характеристиками з надсиланням сповіщення служили звуковловлювач з кардіоїдним мікрофоном і концентратором параболоїдного типу, міні-комп'ютер типу ASUSTS-10, а також відкритий код FrequencyAnalyzer [4]. Генератором звуку гармонічного типу служив безпілотний літальний апарат (БПЛА) типу Фантом 3. Відкритий вихідний код FrequencyAnalyzer удосконалили з метою порівняння сумарної інтенсивності звуків віддалених об'єктів з наперед заданим рівнем звукового сигналу порядку фонового у певному діапазоні частот і надсилання сповіщення у

Telegram-месенджер при її перевищенні протягом наперед заданого часу.

Фотографія на рисунку 1 відображає основні елементи запропонованої експериментальної системи: 1 – комп'ютер ASUS TS-10, 2 – мікрофон SyncoMic-M3, 3 – розгалужувач для навушників і мікрофона, 4 – вихід HDMI для під'єднання до монітора і відлагодження системи, 5 – вхід живлення Micro-USB, 6 – 2 USB входи для мишки і клавіатури. Завдяки мінімальній кількості основних елементів системи досягається мінімізація розмірів експериментальної установки в цілому.

Комп'ютер ASUS TS-10 – це сучасний персональний комп'ютер, що працює з операційною системою Windows 10. Завдяки його характеристикам, а саме 4-ядерному процесору Intel, що працює на частоті 1.44 Гц, має 2 Гб оперативної пам'яті та 32 Гбайт постійної пам'яті, він має значну перевагу над іншими комп'ютерами такого типу. У порівнянні з комп'ютером Raspberry PI, ASUSTS-10 є більш гнучким у налаштуванні і користуванні завдяки операційній системі, дозволяє запускати програми, написані різними мовами програмування, проводити швидкі обчислення в реальному часі завдяки високій швидкодії та потужності, не потребує додаткових вкладень у систему у вигляді допоміжних модулів. Комп'ютер ASUS TS-10 має USB 2.0 та USB 3.0 порти, HDMI порт, 3.5 мм лінійний вхід для навушників та Micro-USB порт для живлення. Він працює від блоку живлення із потужністю 18 Ватт. Завдяки своїй енергоефективності, ASUS TS-10 може працювати від зовнішнього пристрою живлення (Powerbank) із напругою 5-9 В та струмом 2А. Незначні розміри цього міні-комп'ютера дозволили мінімізувати розміри кінцевої установки. Його структура дозволила обійтися без додаткової зовнішньої звукової карти.

Оскільки комп'ютер не має вбудованого мікрофона, використали кардіоїдний зовнішній мікрофон типу Synco Mic-M3. Мікрофон такого типу дозволяє якісно зчитувати і опрацьовувати звукові сигнали завдяки своїм характеристикам і функціям підсилення та фільтру низьких частот, що дозволяє також усувати шкідливі сигнали (шум, вітер). Для під'єднання мікрофона до комп'ютера використали розгалужувач 3, що дозволяє під'єднати навушники і мікрофон одночасно.

Рис. 1. Фотографія комплексу «Комп'ютер-мікрофон»: 1 – комп'ютер ASUSTS-10, 2 – мікрофон SyncoMic-M3, 3 – розгалужувач лінійного входу, 4 – вихід HDMI, 5 – вхід живлення Micro-USB, 6 – 2 USB входи

Програмне забезпечення системи звуковловлення і надсилання сповіщення

Склали програму для аналізу звуку мовою програмування C++ і використали комп'ютер ASUS TS-10 для відлагодження програми. Основою програмного забезпечення став проєкт з відкритим вихідним кодом під назвою "FrequencyAnalyzer" [4]. Ця програма працює за алгоритмом швидкого перетворення Фур'є і дозволяє опрацьовувати та аналізувати звукові характеристики вхідного сигналу у реальному часі. Наявність вихідного коду дозволяє модифікувати програму, розширюючи її функціонал. У програму додали додаткові функції аналізу звукового сигналу та його опрацювання, зокрема, поля для введення граничної тривалості звуку і граничного значення інтенсивності сигналу, при досягненні яких відправляється сповіщення. Для зручності надсилання запитів на веб-сервер встановили бібліотеку, яка опрацьовує надсилання таких запитів. Для цього використали бібліотеку з відкритим вихідним кодом "HttpRequest.hpp".

Якщо виміряна сумарна інтенсивність сигналу у певному діапазоні частот є більшою, ніж задана у вікні вводу даних, що зображене 7 на рис.2, починається відлік таймера. При виконанні такої умови програма на кожному кроці ітерації 10 перевіряє, чи сумарна інтенсивність є більшою, ніж задана гранична інтенсивність. Якщо така умова виконується, то таймер продовжує виконувати відлік. Якщо значення таймера є більшим, ніж значення, що вказане у вікні вводу даних 10, виконується функція надсилання запиту на Flask веб-сервер. Останній, в свою чергу, опрацьовує запит і надсилає сповіщення в телеграм-месенджер, яке повідомляє користувача про наявність об'єкта.

Користувацький інтерфейс програми складається з трьох вікон (рис. 2):

а) вікно введення даних, до якого додали власні функції

б) вікно з представленням звуку у вигляді залежності його інтенсивності від частоти,
в) вікно із сумарною інтенсивністю звуку в реальному часі, як критерію для посилання сповіщення.

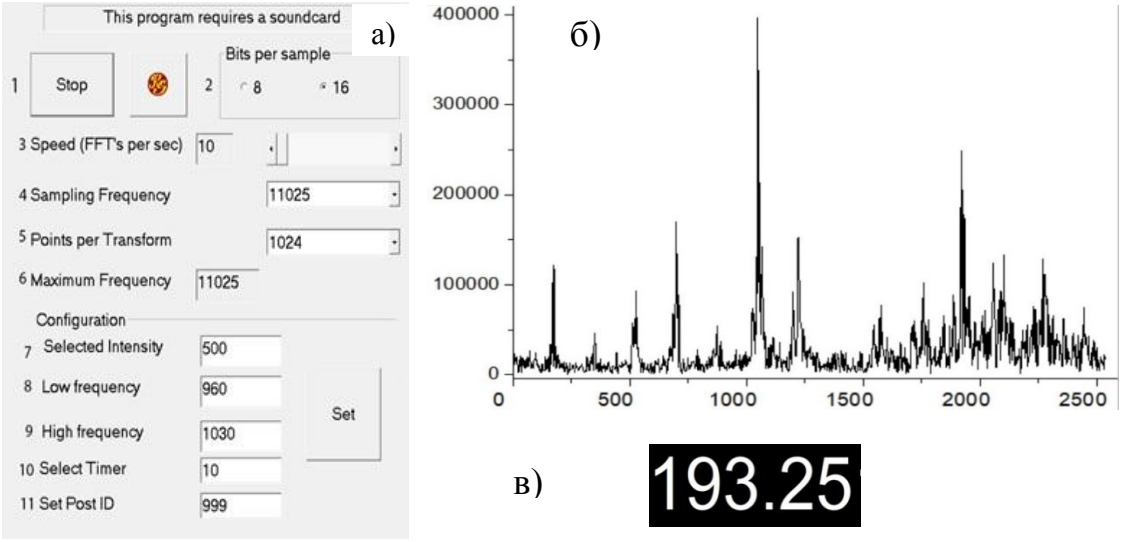


Рис. 2. Користувацький інтерфейс програми:
а) вікно введення даних, б) вікно з представленням звуку у вигляді залежності його інтенсивності від частоти, в) вікно із сумарною інтенсивністю звуку в реальному часі.

1 – кнопка пуску/припинення роботи програми, 2 – розрядність розкладу звуку у ряд Фур'є, 3 – швидкість алгоритму перетворення Фур'є, 4 – частота дискретизації, 5 – кількість точок на одиничне перетворення звукового ряду, 6 – максимальна частота звуку для опрацювання програмою, 7 – граничне значення інтенсивності сигналу, 8 – мінімальна частота захопленого звуку, 9 – максимальна частота звуку, що приймається мікрофоном, 10 – кількість ітерацій, що задають час тривання сигналу до моменту передавання сповіщення, 11 – номер поста, на якому розташована установка звуковловлення.

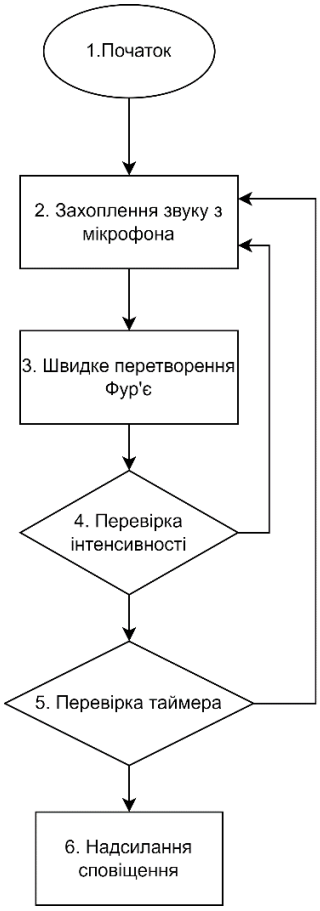


Рис. 3. Алгоритм програми для аналізу звукового сигналу:
1 - початок роботи програми, 2 - процес зчитування звуку з мікрофона і підготовка до його опрацювання алгоритмом Швидкого Перетворення Фур'є.

1. Процес швидкого перетворення Фур'є, обчислення суми інтенсивностей в заданому користувачем діапазоні частот.

2. Перевірка суми інтенсивностей, опрацьовані в кроці 3. Якщо таке значення є більшим ніж вказане

користувачем в вікні вводу, перехід до кроку 5.

3. Початок відліку таймера; якщо значення суми інтенсивностей на кожній ітерації залишається більшим, ніж введене користувачем значення у вікні вводу, таймер продовжує свою роботу. Якщо кількість ітерацій є більшою, ніж значення, введене користувачем у вікні вводу, перехід до кроку 6.

4. Надсилання запиту на Flask-веб сервер, запуск python-застосунку, що надсилає сповіщення в telegram-чат.

Алгоритм програми зображено на рис. 3. Для оптимізації програми і надсилання сповіщень, створили застосунок мовою програмування Python. Використовуючи фреймворк під назвою “Flask”, створили веб-сервер, який може отримувати запити від програми для аналізу звуку і в подальшому надсилати сповіщення користувачу. Для надсилання сповіщення обрали месенджер Telegram і бібліотеку для Python програми, що дозволяє надсилати сповіщення в чат. Надсилання запитів на сервер розгорнули на хмарній платформі Heroku, яка дозволяє зберігати сервер, налаштовувати його і користуватися ним. Обрали безкоштовну ліцензію, що покриває потреби експериментальної системи. У момент часу, коли виникає необхідність у сповіщенні користувача про виявлення об’єкта, надсилається запит на відповідну адресу, яка вказується при створенні проекту на Heroku сторінці. При отриманні запиту, Flask-застосунок зчитує параметри, передані на адресу, опрацьовує їх та надсилає сповіщення у телеграм-чат.

Перевагою надсилання сповіщень на месенджер є можливість отримувати сповіщення на будь-якому пристрої у довільний час при наявності якісного сигналу для виходу в інтернет. Також надсилання сповіщень у месенджер дозволяє надсилати їх відповідній групі людей, використовуючи можливість чату або групи у месенджері.

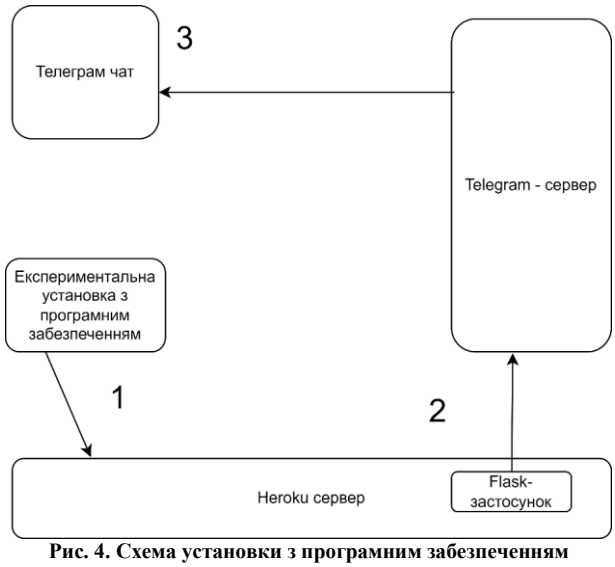


Рис. 4. Схема установки з програмним забезпеченням

1. Надсилання запиту при виявленні об’єкта програмою для аналізу частот на Flask-веб-сервер, що розгорнутий на хмарному середовищі Heroku.
2. Опрацювання Flask-застосунком отриманих параметрів, створення повідомлення і створення запиту на Telegram-сервер про відправку сповіщення.
3. Опрацювання запиту, надісланого Flask-застосунком та надсилання сповіщення в чат.

Результати дослідження та їх аналіз

При дослідженнях запускали програму, яка працює відповідно до алгоритму на рис. 3 і відправляє сповіщення за схемою на рис. 4. Попередньо встановили відповідне значення граничної інтенсивності сигналу та вибрали бажане значення таймера, при якому відсилається сповіщення, щоб уникнути небажаних та випадкових звуків. Підписались на відповідний канал в telegram-месенджері, на якому встановлений користувач-бот, через якого надсилаються сповіщення для кінцевих користувачів.

Як видно з рис. 4, для тестування експериментальної установки не потрібно встановлення ніяких додаткових програм або бібліотек, оскільки вся логіка опрацювання звукового сигналу знаходиться в exe-файлі програми, а надсилання сповіщень – на сервері, що знаходиться у хмарному середовищі.

При забезпеченні якісного під’єднання до мережі Wi-Fi, протестували програму, використовуючи генерацію звуків з різною частотою та різною тривалістю сигналу. З рис. 5 можна побачити, що сповіщення надсилаються успішно, інформуючи користувача про інтенсивність сигналу, яка була у момент надсилання сигналу та час надсилання, що свідчить про коректну роботу програми.

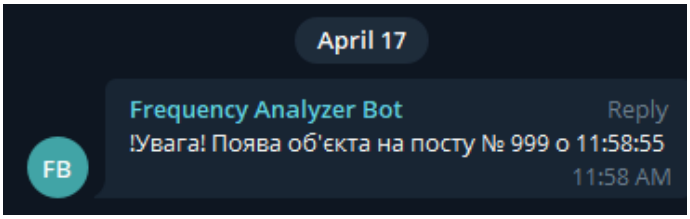


Рис. 5. Скріншот Telegram-чату з надсиланням сповіщення про виявлення об'єкта

Висновки

Підсумовуючи результати експериментального випробування системи і програми виявлення об'єкта з надсиланням сповіщень, можна стверджувати про те, що запропонована система і програмне забезпечення є достатніми для виявлення об'єкта у просторі за звуком, опрацюванням звукової інформації про нього та сповіщенням користувача, надаючи швидку і достатню інформацію. Отримані результати виявлення об'єкта за допомогою програми FrequencyAnalyzer, разом з аналізом та обробкою звукового сигналу та відправленням сповіщення при відповідних значеннях свідчать про можливість продовження роботи у напрямку дослідження звукових характеристик об'єктів, зокрема, при більш детальному аналізі гармонік звукових коливань для встановлення типу об'єкта.

References

1. Vrba M., Saska M. Marker-Less Micro Aerial Vehicle Detection and Localization Using Convolutional Neural Networks. IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 5, no. 2. 2020. doi: 10.1109/LRA.2020.2972819.

2. Bouguettaya A., Zarzour H., Kechida A., Taberkit A. Vehicle Detection From UAV Imagery With Deep Learning: A Review. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, vol. 33, no. 11. 2022. doi: 10.1109/TNNLS.2021.3080276.

3. Fourier Transform. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Перетворення_Фур%27є.

4. The Real Time Frequency Analyzer. http://www.icodeguru.com/CPP/CppInAction/freq.html.

5. Алгоритм Кулі-Тьюкі. https://uk.wikipedia.org/wiki/Алгоритм_Кулі_—_Тьюкі.

6. Top Python Frameworks. https://www.monocubed.com/blog/top-python-frameworks/.

7. Flask Documentation. https://flask.palletsprojects.com/en/2.0.x/.

8. Heroku vs PythonAnywhere. https://stackshare.io/stackups/heroku-vs-pythonanywhere.

9. How to Deploy Python App on Heroku. https://www.geeksforgeeks.org/deploy-python-flask-app-on-heroku/.

10. Python Telegram Bot Usage. https://kandi.openweaver.com/collections/python/python-telegram-bot.

11. Heroku Documentation. https://www.heroku.com/.

12. Python Telegram Bot Documentation. https://github.com/python-telegram-bot/python-telegram-bot.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-246-251
УДК 004.9+81'32

ШІЛІНГ АННА
Національний університет «Львівська політехніка»
https://orcid.org/0000-0003-1063-3437
e-mail: anna.y.shilinh@lpnu.ua
ПАСЬКО АНАСТАСІЯ
Національний університет «Львівська політехніка»
e-mail: anastasiia.pasko.dk.2020@lpnu.ua

ЛІНГВІСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ФОРМУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО НАПОВНЕННЯ ВІРТУАЛЬНИХ СПІЛЬНОТ ПОПИТУ ТА ПРОПОЗИЦІЇ ОСВІТНІХ ПОСЛУГ

У роботі міститься лінгвістичний аналіз формування інформаційного наповнення віртуальних спільнот попиту та пропозиції освітніх послуг на основі мотиваційних намірів її учасників. Проведено лінгвістичний аналіз мотиваційних намірів користувачів віртуальної спільноти попиту та пропозиції освітніх послуг. Використано лінгвістичний метод аналізу змісту допису за допомогою маркерів для виявлення мотиваційних потреб автора. Запропоновано формальний опис мотиваційних намірів користувачів віртуальної спільноти попиту та пропозиції освітніх послуг на основі їх потреб. Результати дослідження використовуються і можуть бути використані для розробки та просування відповідних віртуальних спільнот та дають можливість прогнозувати поведінку та інформаційних контент її учасників.

Ключові слова: лінгвістичний аналіз, мотиваційні наміри, мотиваційні маркери, освітні послуги, віртуальна спільнота.

SHILINH ANNA
Lviv Polytechnic National University
PASKO ANASTASIIA
Lviv Polytechnic National University

LINGUISTIC ANALYSIS OF THE INFORMATION CONTENT FORMATION FOR VIRTUAL COMMUNITIES OF DEMAND AND SUPPLY OF EDUCATIONAL SERVICES

Specialized virtual communities are an effective platform for fulfilling the information needs of participants in educational activities. The information content of the virtual community of supply and demand of educational services is formed on the basis of the motivational intentions of its members who post messages in this community. The publication of thematic posts in the relevant section of the virtual community reflects the motivational intentions of its members. Users of the virtual community of supply and demand of educational services can both search for information about the course they need and offer their educational services. That is why the study distinguishes such participants of the virtual community as a Student and a Teacher. The article identifies the main motivation of the author of the post by means of lexical, syntactic and stylistic characteristics of the content. The study proposes a formal description of the motivational intentions of the users as Student and Teacher based on their motivational needs.

Based on the linguistic analysis, the motivational needs of the user as Student are identified as the need for information search and the need to share experiences. And for the user as Teacher, the motivational needs are the need to offer their own educational services and the need for recognition of their skills. Identification of motivational intentions in the posts of participants in the web community of supply and demand of educational services is also the subject of this paper. Thus, the current task is to conduct a computer-linguistic analysis of the peculiarities of forming the information content of the virtual community of supply and demand of educational services, which is created by its motivated users. The results of the study are applied and can be used to predict the behavior and information content of its participants.

Keywords: linguistic analysis, motivational intentions, motivational markers, educational services, virtual community.

Постановка проблеми

Спеціалізована віртуальна спільнота – це зручний та ефективний інструмент для залучення користувачів зі спільними інтересами. Виклики сучасного світу, такі як Covid-19 повномасштабне вторгнення росії в Україну, вимушено перенесли частину діяльності суспільства у віртуальний простір. Зокрема, це стосується і освітньої діяльності. Основну пропозицію освітніх послуг формують державні заклади освіти. Але здобуття конкретних навичок і певний момент часу ці заклади освіти забезпечити не можуть, оскільки їхній процес чітко налаштований, розрахований та не може бути змінений у будь-який момент навчального року, та адаптуватися під конкретні потреби його учасників.

Аналіз запитів на ресурсі https://trends.google.com.ua/ за 2022-2023 рр. (рис. 1) показує, що крім терміну «освітні послуги» набув популярність термін «навчальні курси». Це свідчить про попит серед споживачів освітніх послуг в отриманні додаткових знань, вмінь та навичок.

Якщо частота появи терміну «освітні послуги» у пошукових запитах переважно залежить від ходу вступної кампанії у закладах вищої освіти (середній показник пошуку – 15), то пошукові запити із терміном «навчальні курси» відзначаються своєю популярністю впродовж усього досліджуваного періоду (середній показник пошуку – 23) (рис. 2).

Саме, тому, на ринку освітніх послуг набули популярності спеціалізовані віртуальні спільноти, учасники яких можуть пропонувати свої послуги в сфері освіти, або ж знайти необхідного викладача, який допоможе здобути їм необхідні на цей момент знання, вміння та навички. Така співпраця є корисною для обох учасників віртуальної спільноти.

Рис. 1. Інтерес із часом пошукових термінів «освітні послуги» та «навчальні курси» за даними ресурсу https://trends.google.com.ua/

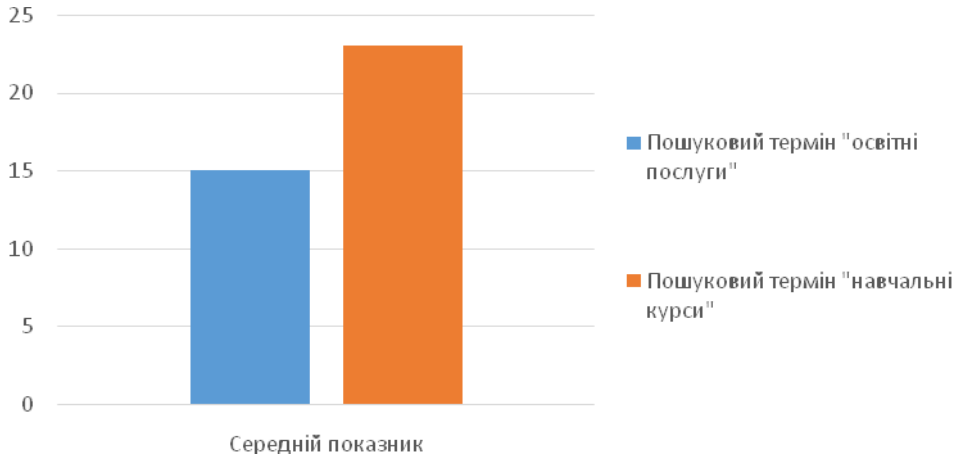


Рис. 2. Середній показник пошуку для термінів «освітні послуги» та «навчальні курси» за даними ресурсу https://trends.google.com.ua/

Аналіз останніх джерел

Спеціалізовані віртуальні спільноти є актуальним предметом дослідження на сьогодні. Зокрема, побудова віртуальної моделі спільноти на основі веб-форуму є предметом досліджень [1, 2]. Актуальність вивчення віртуальних спільнот в мережі Інтернет, їх типологія та моделі використання проаналізовано у дослідженнях [3, 4]. У роботі [5] досліджується роль соціальної згуртованості освітніх віртуальних спільнот як соціального феномена, та її вплив на розвиток суспільства.

У роботах [6, 7] досліджується дизайн для віртуальних спільнот, які використовують для навчання.

Зарубіжний досвід застосування віртуальних спільноти як інноваційні освітні середовища в системах освіти досліджуються у роботах [8, 9]. Роль веб-спільноти в дистанційній освіті є метою роботи [10]. Формування віртуального середовища для підвищення професійної компетентності за допомогою спеціалізованих веб-спільнот розглядається у роботі [11]. Лінгвістичний аналіз профілів та інформаційної діяльності користувачів он-лайн форумів є метою досліджень [12, 13].

Але жоден з напрямів дослідження не фокусується на можливості формування віртуального середовища спеціалізованих веб-спільнот на основі лінгвістичного аналізу особливостей його інформаційного контенту для ефективного прогнозування поведінки учасників.

Метою дослідження є проведення лінгвістичного аналіз формування інформаційного наповнення віртуальних спільнот попиту та пропозиції освітніх послуг.

Виклад основного матеріалу

Основними користувачами віртуальних спільнот попиту та пропозиції освітніх послуг можуть бути як потенційні учні (користувач – Учень), які шукають необхідні освітні послуги, так і потенційні викладачі (користувач – Вчитель), які безпосередньо надаватимуть ці послуги. Дописи користувачів Учнів формуватимуть множину попиту на освітні послуги, а дописи користувачів Вчителів – множину пропозиції освітніх послуг цієї веб-спільноти.

При чому, кожен користувач віртуальної спільноти має власну мету. Саме тому формування інформаційного наповнення веб-спільноти попиту та пропозиції освітніх послуг залежить від мотиваційних намірів його учасників.

За допомогою лексичних, синтаксичних та стилістичних характеристик допису можна визначити основну мотивацію його автора та скоригувати його дії відповідно до попиту та пропозиції освітніх послуг у віртуальній спільноті. Наміри автора безпосередньо впливають на характер змісту інформації. Для виявлення мотиваційних потреб автора використано лінгвістичний метод аналізу змісту допису за допомогою маркерів.

Мотиваційні маркери – це словосполучення, слова, частини речення, які характеризують вербальне відображення мотиваційних намірів автора публікації [12], а саме:

$$EduMMarker = \left\{ EduMarker_i \right\}_{i=1}^{N(M)}, \quad (1)$$

де $N(M)$ – кількість маркерів у тексті допису.

Типи мотиваційних маркерів користувачів віртуальної спільноти пропозиції та попиту освітніх послуг змінюються залежно від тематичних розділів, які містять інформацію про доступні освітні послуги, і часових періодів активності користувачів спільноти. До одного тематичного розділу можуть відноситися кілька маркерів, які можна виділити у дописі. Отже, мотивація дописів являє собою кортеж елементів:

$$EduMInt_i = StudentM_i, TeacherM_i, \quad (2)$$

де $StudentM_i$ – мотиваційних намір користувача веб-спільноти, який потребує освітні послуги, $TeacherM_i$ – мотиваційних намір користувача веб-спільноти, який пропонує освітніх послуги.

Аналіз мотиваційних намірів користувача веб-спільноти, який потребує освітні послуги

Мотиваційний намір користувача веб-спільноти, який потребує освітні послуги (Учень) можна представити як наступний кортеж:

$$StudentM_i = InfomationSearch_i, Feedback_i, \quad (3)$$

де $InfomationSearch_i = \left\{ EduMarker_j^{(InformationSearch_i)} \right\}_{j=1}^{N(InformationSearch_i)} \subset EduMMarker$ – інформаційна потреба *i*-го користувача Учень, який шукає необхідну освітню послугу, $Feedback_i \subset EduMMarker$ – потреба *i*-го користувача Учень поділитися досвідом.

Потреба інформаційного пошуку – це сукупність мотиваційних маркерів щодо потреби знайти необхідну освітню послугу. Вона характеризує зацікавленість користувача в отриманні необхідної інформації про пропозицію освітніх послуг для прийняття рішення в отриманні цієї послуги («необхідно вивчити», «закріпити рівень», «підготовка для навчання» тощо). Для кожного типу маркерів з (3) індикатор визначаємо у вигляді нечіткої множини:

$$InformationSearchIndicaror\left(InformationSearch_i\right) = \left\{ EduMarker_j^{(InformationSearch_i)}, \omega\left(InformationSearch_i\right)_j \right\}_{j=1}^{N(Inf}, \quad (4)$$

де $\omega\left(InformationSearch_i\right) \in [0;1]$ – міра відповідності *j*-го маркера мотиваційному наміру *i*-го користувача Учня.

Потреба поділитися досвідом – це сукупність мотиваційних маркерів щодо потреби користувача Учень рекомендувати конкретні освітні послуги, якими він скористався або конкретного користувача Вчитель («рекомендую», «не раджу», «отримав навички» тощо).

Формальні визначення індикатора потреби поділитися досвідом побудовані за типом (4).

Аналіз мотиваційної діяльності користувача веб-спільноти, який пропонує освітніх послуги

Мотиваційний намір користувача веб-спільноти, який пропонує освітніх послуги (Вчитель) можна представити як наступний кортеж:

$$TeacherM_i = OfferInformation_i, Skill_i, \quad (5)$$

де $OfferInformation_i = \left\{ EduMarker_j^{(OfferInformation_i)} \right\}_{j=1}^{N(OfferInformation_i)} \subset EduMMarker$ – пропозиція власних освітніх послуг *i*-го користувача Вчитель веб-спільноти пропозиції та попиту освітніх послуг, $Skill_i \subset EduMMarker$ – потреба у визнанні майстерності пропонованих освітніх послуг *i*-го користувача Вчитель.

Потреба пропозиції власних освітніх послуг – це сукупність мотиваційних маркерів користувача Вчитель щодо інформування інших користувачів віртуальної спільноти про ті освітні послуги, які він може надати («освітні послуги», «знання», «вміння», «навички» тощо).

Для кожного типу маркерів з (5) індикатор визначаємо у вигляді нечіткої множини:

$$OfferInformationIndicaror\left(OfferInformation_i\right) = \left\{ EduMarker_j^{(OfferInformation_i)}, \omega\left(OfferInformation_i\right)_j \right\}_{j=1}^{N(OfferInformation_i)}, \quad (6)$$

де $\omega\left(OfferInformation_i\right) \in [0;1]$ – міра відповідності *j*-го маркера мотиваційному наміру *i*-го користувача Вчитель.

Потреба у визнанні майстерності – це сукупність мотиваційних маркерів користувача Вчитель щодо визнання його майстерності та актуальності відповідних освітніх послуг. Вона відображається у

розділах блогу користувачів Вчителів у віртуальній спільноті («майстерність», «як вдало», тощо). Блоги користувача Вчитель містять різноманітну інформацію і мають на меті зацікавити потенційного користувача Учень.

Формальні визначення індикатора потреби у визнанні майстерності побудовані за типом (6).

Виявлення мотиваційних намірів у дописах учасників веб-спільноти пропозиції та попиту освітніх послуг

Інформаційна активність користувачів віртуальної спільноти попиту та пропозиції освітніх послуг, що виникає з їх мотиваційних намірів, приносить користь або одному з учасників або обом. Цінність кожного допису для усіх учасників платформи є різною і має різну вагу в конкретний момент часу, а також по-різному впливає на процес прийняття рішень кожним учасником окремо. Кожний тематичний допис можна представити як кортеж:

$$EduServicePost_k = \begin{matrix} EduServiceSection_k, Creator, \\ EduContent, Date, EduPostMarker_k \end{matrix}, \quad (7)$$

де $EduServiceSection_k$ – заголовок *k*-го тематичного розділу веб-спільноти пропозиції та попиту освітніх послуг, $Creator$ – автор допису, який розміщений у веб-спільноті, $EduContent$ – інформація про освітню послугу у відповідності до *k*-го тематичного розділу он-лайн спільноти, $Date$ – дата створення допису $EduPostMarker_k$ – множина виявлених маркерів.

Для визначення змісту тематичного допису для мотивації інформаційних потреб користувачів Учень чи Вчитель необхідно задати функціонал, який враховує ступінь відповідності *j*-го маркера мотиваційному наміру *i*-го користувача. У загальному випадку функціонал з результатом від 0 до 1 має вигляд:

$$Compliance^{MInformation_i}(EduServicePost_k) \geq \gamma, \quad (8)$$

де $\gamma \in (0,1]$ – мінімально допустиме значення відповідності маркера інформаційним потребам учасника віртуальної спільноти, коли можна припустити, що така мотивація присутня і формують пропозицію відповідно до попиту. В іншому випадку можна стверджувати, що така мотивація відсутня.

Аналіз результатів

Аналіз результатів проведемо на прикладі віртуального середовища для попиту та пропозиції освітніх послуг BUKI (https://buki.com.ua/) (рис. 3)

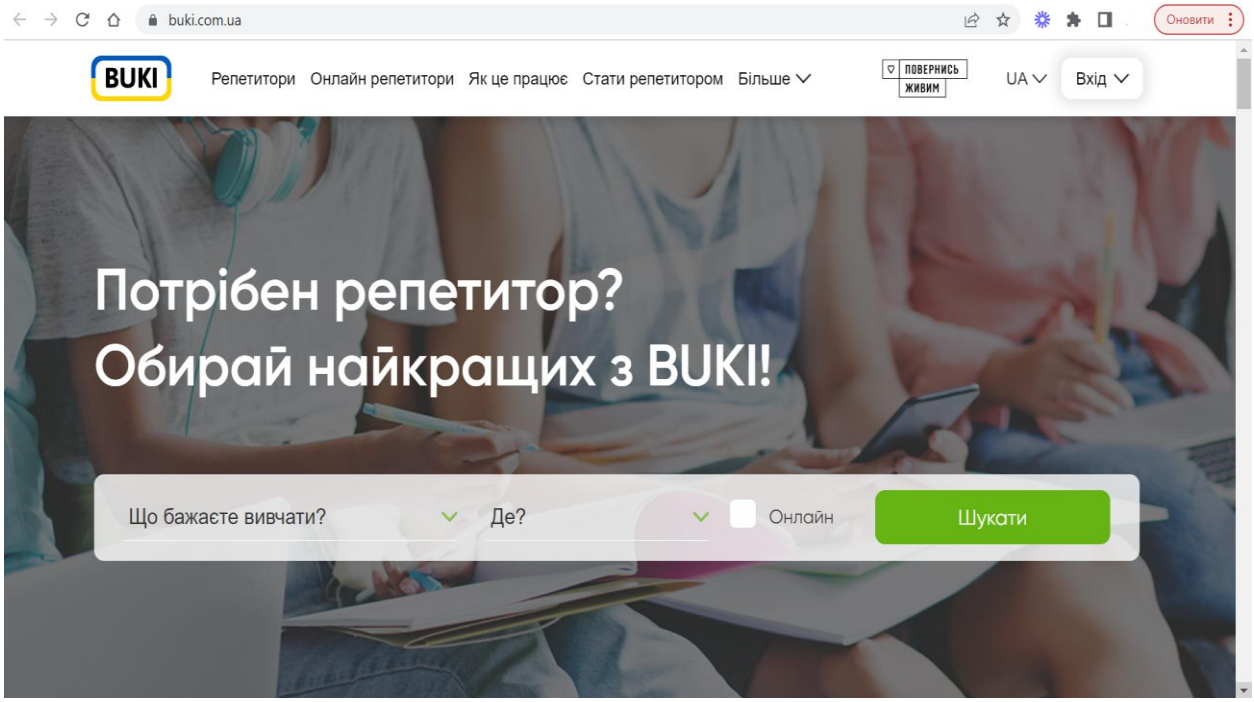


Рис. 3. Стартова сторінка віртуального середовища для попиту та пропозиції освітніх послуг BUKI (https://buki.com.ua/)

Аналітика цього веб-середовища за даними сайту Similarweb (https://www.similarweb.com/website/buki.com.ua/#overview) показує, що цей ресурс є популярним та має достатньо високий рейтинг у категорії «Освіта та наука України».

Розподіл активності формування інформаційного наповнення веб-спільноти попиту та пропозиції освітніх послуг BUKI наведено на рис. 5.

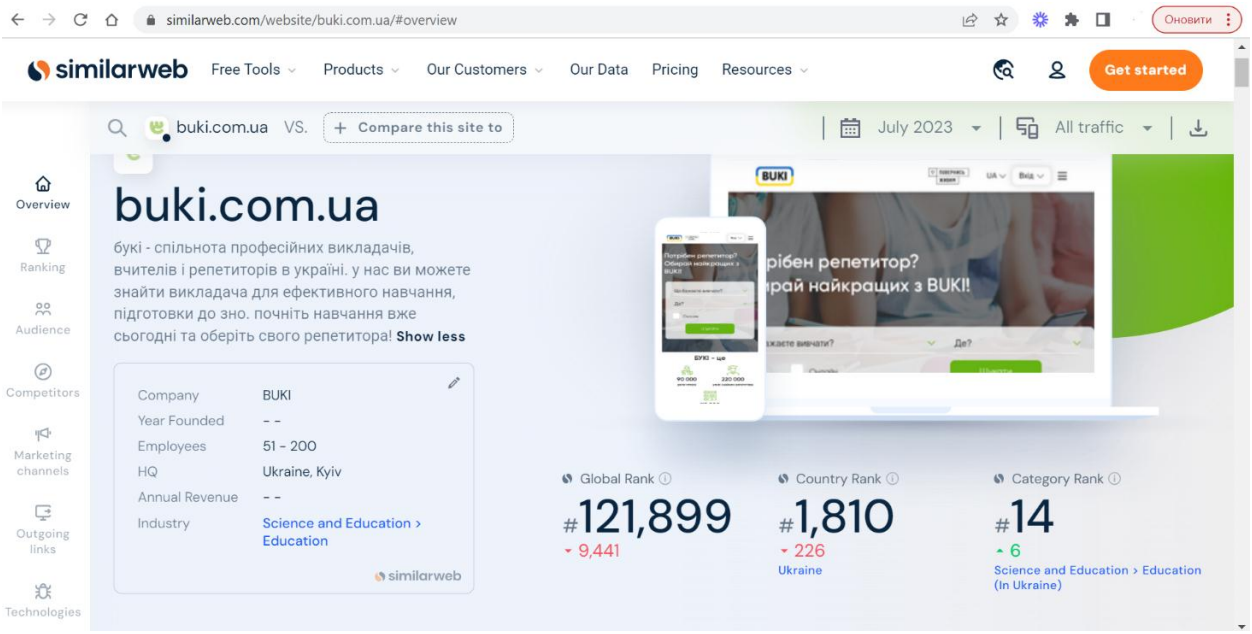


Рис. 4. Аналітика веб-спільноти BUKI за даними сайту Similarweb (https://www.similarweb.com/website/buki.com.ua/#overview)

Розподіл активності формування інформаційного наповнення веб-спільноти попиту та пропозиції освітніх послуг BUKI наведено на рис. 5.

Отже, основу частину інформаційного наповнення цієї веб-спільноти становлять пропозиції освітніх послуг вчителів – 55194 дописи (%). 2995 дописів – це публікації учнів, що формують попит на освітні послуги цієї спільноти. Також, інформаційне наповнення цієї веб-спільноти формують блоги вчителів – 3420 дописів та відгуки учнів – 1550. Частина інформаційного наповнення цієї віртуальної спільноти, така як новини освіти, не залежить від мотиваційних намірів її учасників, тому не була включена до проведеного аналізу.

Рис. 5. Розподіл активності формування інформаційного наповнення веб-спільноти попиту та пропозиції освітніх послуг BUKI

Висновки

Отже, використання спеціалізованих віртуальних спільнот пропозиції та попиту освітніх послуг формують ефективне середовище для співпраці його учасників. У результаті дослідження проведено лінгвістичний аналіз формування інформаційного наповнення віртуальних спільнот попиту та пропозиції освітніх послуг. У дослідженні встановлено, що інформаційне наповнення таких спеціалізованих веб-спільнот залежить від мотиваційних намірів її учасників. На основі лінгвістичного аналізу запропоновано формальний опис мотиваційних намірів користувачів віртуальної спільноти, які пропонують освітні послуги (Вчитель) та які потребують ці послуги (Учень), що формуються на основі їх потреб. Зокрема, мотиваційна діяльність користувача Вчитель включає потребу пропозиції власних освітніх послуг та потребу у визначенні актуальності пропонованих освітніх послуг. Мотиваційна діяльність користувача Студент включає потребу інформаційного пошуку та потреба поділитися досвідом. Для кожної потреби визначено відповідні індикатори. Також запропоновано формальну модель допису спеціалізованої веб-спільноти пропозиції та попиту освітніх послуг, та сформовано функціонал для визначення змісту тематичного допису до мотивації інформаційних потреб користувачів цієї спільноти. Отримані результати можуть бути використані для прогнозування поведінки учасників таких спеціалізованих спільнот.

Література

1. Пелещишин А. М. Аналіз існуючих типів віртуальних спільнот у мережі інтернет та побудова моделі віртуальної спільноти на основі веб-форуму / А. М. Пелещишин, Р. Б. Кравець, Ю.О. Сєров // Інформаційні системи та мережі: Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2011. – № 699. – С. 212–221.

2. Lipicski J., Medykowski M., Shakhovska N., Syerov Yu. Web-community model, based on dataspaces.

Proceedings of the International Conference on Intellectual Systems for Decision Making and Problems of Computational Intelligence "ISDMCI'2009", Yevpatoria, 2007. Vol. 2. P. 9–13.

3. Ярхо С.Я. Віртуальні спільноти в Інтернеті / С.Я. Ярхо // Мультимедійні технології в освіті та інших сферах діяльності : науково-практична конференція з міжнародною участю. 2 листопада 2021 р. – К. : НАУ, 2022. – С. 130–134.

4. Афанасьєв Д. Роль інтернет-мережевих спільнот у становленні інформаційного суспільства в Україні / Д. Афанасьєв // Віче. – 2010. – № 2. – С. 2–4.

5. Нестерова М. Соціальна згуртованість освітніх спільнот в умовах кризових станів суспільства / М. Нестерова, М. Дєліні, А. Заможський, В. Крючков// Вища освіта України. – 2022. – № 3. – С. 47–54.

6. Burnett G., Buerkle H. Information Exchange in Virtual Communities: A Comparative Study. Journal of Computer-Mediated Communication. Volume 9, Issue 2. http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1083-6101.2004. tb00286.x/full

7. Barab S. A., Kling R., Gray J. H. Designing for Virtual Communities in the Service of Learning (Learning in Doing: Social, Cognitive and Computational Perspectives). Cambridge University Press, 2004. 478 p.

8. Малицька І.Д. Віртуальні спільноти як інноваційні освітні середовища в системах освіти зарубіжних країн / І.Д. Малицька // Інформаційні технології і засоби навчання. – 2013. – Том 38. – № 6. – С. 29–40.

9. Малицька І.Д. Віртуальні освітні спільноти як ефективний засіб формування ІКТ-компетентностей: зарубіжний досвід / І.Д. Малицька // Information Technologies and Learning Tools. – 2013. – № 38. – С. 29–40.

10. Голощук Р.О. Веб-спільноти в дистанційній освіті / Р.О. Голощук, Н.О. Думанський, Ю.О. Сєров // Науковий вісник НЛТУ України. – 2008. – № 18 (10). – С. 286–292.

11. Тітова А. В. Розвиток інформаційно‑освітнього середовища медичних закладів вищої освіти як одна з педагогічних умов формування професійної компетентності майбутніх сімейних лікарів / А. В. Тітова // Вісник післядипломної освіти. Серія: Педагогічні науки. – 2019. – Вип. 7. – С. 98–113.

12. Fedushko S. Development of a software for computer-linguistic verification of socio-demographic profile of web-community member. Webology. 2016. Vol.11. No. 2. Article126.

13. Zhezhnych P., Shilinh A., Melnyk V. Linguistic analysis of user motivations of information content for university entrant's web-forum. International Journal of Computing. 2019. Vol. 18. No. 1. P. 67–74.

References

1.1) Peleshchyshyn A. M. Analiz isnuiuchykh typiv virtualnykh spilnot u merezhi internet ta pobudova modeli virtualnoi spilnoty na osnovi veb-forumu / A. M. Peleshchyshyn, R. B. Kravets, Yu.O. Sierov // Informatsiini systemy ta merezhi: Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika». – 2011. – № 699. – S. 212–221.

2. 2. Lipisski J., Medykowski M., Shakhovska N., Syerov Yu. Web-community model, based on dataspaces. Proceedings of the International Conference on Intellectual Systems for Decision Making and Problems of Computational Intelligence "ISDMCI2009", Yevpatoria, 2007. Vol. 2. P. 9–13.

3. Yarkho S.Ia. Virtualni spilnoty v Interneti / S.Ia. Yarkho // Multymediini tekhnolohii v osviti ta inshykh sferakh diialnosti : naukovo-praktychna konferentsiia z mizhnarodnoiu uchastiu. 2 lystopada 2021 r. – K. : NAU, 2022. – S. 130–134.

4. Afanasiev D. Rol internet-merezhevykh spilnot u stanovlenni informatsiinoho suspilstva v Ukraini / D. Afanasiev // Viche. – 2010. – № 2. – S. 2–4.

5. Nesterova M. Sotsialna zghurtovanist osvitnikh spilnot v umovakh kryzovykh staniv suspilstva / M. Nesterova, M. Dielini, A. Zamozhskyi, V. Kriuchkov// Vyshcha osvita Ukrainy. – 2022. – № 3. – S. 47–54.

6. Burnett G., Buerkle H. Information Exchange in Virtual Communities: A Comparative Study. Journal of Computer-Mediated Communication. Volume 9, Issue 2. http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1083-6101.2004. tb00286.x/full

7. Barab S. A., Kling R., Gray J. H. Designing for Virtual Communities in the Service of Learning (Learning in Doing: Social, Cognitive and Computational Perspectives). Cambridge University Press, 2004. 478 p.

8. Malytska I.D. Virtualni spilnoty yak innovatsiini osvitni seredovyshcha v systemakh osvity zarubizhnykh krain / I.D. Malytska // Informatsiini tekhnolohii i zasoby navchannia. – 2013. – Tom 38. – № 6. – S. 29–40.

9. Malytska I.D. Virtualni osvitni spilnoty yak efektyvnyi zasib formuvannia IKT-kompetentnostei: zarubizhnyi dosvid / I.D. Malytska // Information Technologies and Learning Tools. – 2013. – № 38. – S. 29–40.

10. Holoshchuk R.O. Veb-spilnoty v dystantsiinii osviti / R.O. Holoshchuk, N.O. Dumanskyi, Yu.O. Sierov // Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy. – 2008. – № 18 (10). – S. 286–292.

11. Titova A. V. Rozvytok informatsiino‑osvitnoho seredovyshcha medychnykh zakladiv vyshchoi osvity yak odna z pedahohichnykh umov formuvannia profesiinoi kompetentnosti maibutnikh simeinykh likariv / A. V. Titova // Visnyk pisliadyplomnoi osvity. Seriia: Pedahohichni nauky. – 2019. – Vyp. 7. – S. 98–113.

12. Fedushko S. Development of a software for computer-linguistic verification of socio-demographic profile of web-community member. Webology. 2016. Vol.11. No. 2. Article126.

13. Zhezhnych P., Shilinh A., Melnyk V. Linguistic analysis of user motivations of information content for university entrants web-forum. International Journal of Computing. 2019. Vol. 18. No. 1. R. 67–74.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-252-257
УДК 004.081

ШРАМ МАКСИМ
Державний університет телекомунікацій
https://orcid.org/0009-0007-0640-1349
АНТОНЕНКО АРТЕМ
Національний університет біоресурсів і природокористування України
https://orcid.org/0000-0001-9397-1209
e-mail: artem.v.antonenko@gmail.com
ЗАМКОВИЙ ОЛЕКСІЙ
Державний університет телекомунікацій
https://orcid.org/0009-0000-1019-5217
ОРЛЮК ХРИСТИНА
Державний університет телекомунікацій
https://orcid.org/0009-0004-0538-0919
ДУТКО ПАВЛО
Державний університет телекомунікацій
https://orcid.org/0009-0003-5073-9567

ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ МАСИВУ ДАНИХ НА ОСНОВІ НЕЙРОМЕРЕЖІ У СФЕРІ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ДЛЯ ГОТЕЛЬНО-РЕСТОРАННОГО БІЗНЕСУ

У статті досліджено принципи формування масиву даних на основі нейронної мережі у сфері Інтернету речей для готельно-ресторанного бізнесу. Було виявлено, що Інтернет речей генерує величезну кількість неструктурованих даних, і аналітика великих даних є ключовим аспектом. Концепція Інтернету речей представляє особливу цінність для розвитку готельно-ресторанного бізнесу завдяки даним, які можна отримати з підключених елементів і гаджетів. Сформульовано дві теореми, які сприяють розкриттю принципу обміну знаннями, які можна взяти із взаємодії людини і комп'ютера. Визначено, що присвоєння назви суб'єкта господарювання має включати слова людською мовою, а не абревіатури, коди чи двійкові відображення. Їх можуть інтерпретувати лише машини, які є технічно більш ефективними з точки зору простору для зберігання даних або пропускної здатності мережі. Розкрито принципи теорії верифікаціонізму та описано шляхи адаптації структури масиву даних. Схематично запропоновано структуру машинних знань, яка представлена стосовно формування масиву даних на основі нейронної мережі у сфері Інтернету речей для готельно-ресторанного бізнесу. Описана структура має три бази знань: гіпотезу, онтологію та параметри. Визначено, що запропонована інтелектуальна база даних масиву може бути застосована в Інтернеті речей у сфері готельно-ресторанного бізнесу щодо автономного обміну та накопичення знань, а платформа, у свою чергу, може використовувати онтології для інтеграції пристрої IoT з інтелектуальними системами. Описано переваги та недоліки моделі. Зазначається, що перевага цієї моделі полягає в тому, що датчики IoT у хмарі можуть навчатися від віддалених датчиків у фоновому режимі, незалежно від затримки мережі підключення до віддаленої програми, а недолік полягає в тому, що затримка мережі може стати вузьким місцем, коли потрібно в режимі реального часу прийняття рішень зростає. Наголошується, що реалізація описаного алгоритму формування масиву даних, а також відповідного інтелектуального середовища дозволить знизити поріг входження розробників у сферу вирішення завдань за допомогою нейронної мережі.

Ключові слова: масив даних, штучний інтелект, нейронна мережа, Інтернет речей, датчик, інтелектуальна система, готельно-ресторанний бізнес

SHRAM MAKSYM
State University of Telecommunications
ANTONENKO ARTEM
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
ZAMKOWYI OLEKSII, ORLIUK KHRYSTYNA, DUTKO PAVLO
State University of Telecommunications

FEATURES OF BUILDING A DATA ARRAY BASED ON A NEURAL NETWORK IN THE SPHERE OF THE INTERNET OF THINGS FOR THE HOTEL AND RESTAURANT BUSINESS

The article examines the principles of forming a data array based on a neural network in the field of the Internet of Things for the hotel and restaurant business. It has been identified that the Internet of Things generates a huge amount of unstructured data, and big data analytics is a key aspect. The concept of the Internet of Things represents a special value for the development of the hotel and restaurant business thanks to the data that can be obtained from connected elements and gadgets. Two theorems have been formulated that contribute to the disclosure of the principle of knowledge exchange that can be taken from human-computer interaction. It is determined that the assignment of the name of the economic entity should include words in the human language, and not abbreviations, codes or binary mapping. They can only be interpreted by machines that are technically more efficient in terms of storage space or network bandwidth. The principles of the theory of verificationism are revealed and the ways of adapting the structure of the data array are described. The structure of machine knowledge is schematically proposed, which is presented in relation to the formation of an array of data based on a neural network in the field of the Internet of Things for the hotel and restaurant business. The described structure has three knowledge bases: hypothesis, ontology, and parameters. It was determined that the proposed intelligent database of the data array can be applied to the Internet of Things in the field of hotel and restaurant business, regarding the autonomous exchange and accumulation of knowledge, and the platform, in turn, can use ontologies to integrate IoT devices with intelligent systems. The advantages and disadvantages of the model are described. It is noted that the advantage of this model is that IoT sensors in the cloud can learn from remote sensors in the background,

regardless of the network latency connecting to the remote application, and the disadvantage is that network latency can become a bottleneck when the need in real-time decision-making is growing. It is emphasized that the implementation of the described algorithm for the formation of the data array, as well as the appropriate intellectual environment, will allow to reduce the threshold for developers to enter the field of solving problems using a neural network.

Keywords: data array, artificial intelligence, neural network, Internet of Things, sensor, intelligent system, hotel and restaurant business

Formulation of the problem

Despite the prevalence of Internet of Things (IoT) devices, the lack of adaptive learning machines is becoming an obstacle to the adoption of intelligent IoT systems in the hotel and restaurant business. Currently, there is a lack of research on the principle of forming an array of IoT data that machines can autonomously share when data comes from different industries or case studies. Thus, the question of how machines can autonomously share knowledge from a dataset, create new knowledge and adaptively learn from this knowledge so that it can become applicable in the field of hotel and restaurant business or case studies is relevant.

Analysis of recent sources

Both domestic and foreign scientists pay a lot of attention to the issue of development, implementation and implementation of the Internet of Things in all spheres of life of modern humanity. In particular, A. Semenog [1] carried out an analysis of the main technologies used in the conditions of the formation of the digital economy, determined their essence, types and methods of practical application. He studied the properties, potential advantages and risks of block chain technology, gave examples of companies that use it. Defined the main elements and hierarchy of the Internet of Things.

Prospects for the development of the Internet of Things and the industrial Internet of Things were cited by I. Sotnyk and K. Zavrazhnyi. The authors proved that the deterioration of the information security of enterprises and organizations is one of the important problems accompanying the development of the industrial Internet of Things. N. Aksak disclosed the methods and models of distributed intelligent processing of big data in specialized computer systems. Describes the basic breakthrough technologies of the modern stage of society's development: artificial intelligence, the Internet of Things, additive technologies using a 3D printer, virtual and augmented reality, new materials, "cloud" technologies, etc. Possible positive and negative effects of the implementation of the mentioned breakthrough technologies are analyzed. K. Balakleets and A. Kvitka paid attention to the relevance of technological trends that have a seismic impact on the economy, values, identity and opportunities for future generations [2-5].

Among foreign authors, it is worth noting the works of such scientists as: Zhang, Weiping & Kumar, Mohit & Liu, Jingqing, Cui, Dan & Liu, Fei, Xiao, Han & Li, Yuanjiang, Changsheng Xiang, ZiYing Zhou, Han Xiao, Yuanjiang Li, Ren Fang, Ma Jian-Feng, Naveen, Dr & Raina, Rohini, Li Hinwu and others. However, in view of the described scientific achievements on the topic, the question of revealing the principles of forming a data array based on a neural network in the field of the Internet of Things remains open and needs to be worked out in detail. Setting objectives. The goal is to investigate the principles of forming a data array based on a neural network in the field of the Internet of Things. Presentation of the main research material. Research that has used big data analytics to solve IoT problems using machine learning techniques can be grouped into four areas, such as: smart city, manufacturing (i.e., agriculture and industrial production), building management, and healthcare [6-21].

Presenting main material

The domain of smart cities is interested in creating efficient and comfortable daily activities. Some examples include providing optimal traffic routing, predicting the filling pattern of garbage bins for collection, recommending products based on their location, and predicting energy consumption in smart meters. In the case of energy prediction, support vector machines were used to analyze past energy consumption and building environmental data such as temperature and humidity, resulting in predicted energy consumption with a difference of 1.7 kWh between actual and predicted consumption in the time window.

In the field of industrial agriculture, in [14] the authors proposed to identify the symptoms of lameness in dairy cows. Sick cows affect milk production, symptoms of the disease are usually manifested through inactive behavior, for example, lying down for a long time. behaviors such as active, normal and dormant in cows. Random sampling gave an accuracy of 91%, detected 1 day before some visual signs could be observed; and k-nearest neighbors gave an accuracy of 81%, detected 3 days before their symptoms were visible through visual cues. Thus, IoT sensors were placed on cows to collect data on their activity such as lying time and number of steps .

In the field of production, maintenance of machines is of great importance for minimization of production interruptions due to engine malfunctions. Thus, a study [15] proposed a mechanism where 3-axis accelerometers were placed on factory engines to collect vibration data such as the amplitude and frequency of the engines. With the help of neural networks, it was possible to identify malfunctions in normal driving conditions with a level of confidence with 100% accuracy from 80 to 99 percent.

Building management can be seen as a domain connecting the smart city and production domain, as their solutions can be applied to both domains. A study [16] predicted building occupancy levels by observing temperature, CO2, air volume and air conditioning data. Random sampling was used to classify the data and gave 95% accuracy in predicting the occupancy rate of the rooms in the building.

The health domain may be the most common application as IoT devices are attached to individuals. Applications predict sugar levels to treat diabetes, assess the level of thermal comfort in the workplace, and detect falls at home. Also, deep learning is used to detect such cases of ambulation as abnormal walking patterns, sleeping

habits and visits to the toilet. The app offers a real-time solution to detect abnormal health risks using devices such as heart rate, respiration rate, etc., and has given an accuracy of 94%. Such a solution can be considered as a smart home application, as it also helps to increase the efficiency of daily activities (for example, providing a cyber guardian for the elderly).

How humans can interact with websites can show how machines should interact with other machines. The most important property of a website is that its presentation can be understood by people. Users can semantically navigate websites to achieve the goals necessary to complete a task. Websites are made up of words in a language that users understand. In addition, website layouts are arranged in a meaningful structure that reflects their "informational slant," so users can navigate naturally to find the information they're looking for.

There are two characteristics of knowledge sharing that can be taken from human interaction – computer:

Theorem 1. Naming the entity (that is, the object, properties, relations and services) must use words that are understandable to a person.

Theorem 2. Information should be arranged semantically in such a way that so that it allows a person to derive meaning by following its structure.

The assignment of the name of the business entity must use words in human language, not abbreviations, codes or binary representation that can interpret only machines, despite the fact that the latter are technically efficient niches in terms of data storage space or network bandwidth.

In the organization of information, the semantic use of ontologies is the very model.

It allows people to get information based on semantic queries. Philosophy of knowledge, or epistemology, provides a breakdown of how a person acquires knowledge. Fundamental in this field is "a priori" and "a posteriori" knowledge. A priori is obtained through definitions such as the classification: apples are fruits. And the a posteriori is obtained thanks to experience and observations, for example, apples are red.

Deviations from the above definition are also used for description of ideas and human understanding. A priori and a posteriori description of knowledge is parallel to primary and secondary quality in human understanding. A primary quality includes properties of an object that are independent of the observer, such as an apple having weight, size, and color. A secondary quality refers to some property of the object according to the observer, for example apples are red.

Primary knowledge is embedded in ontologies, such as the definition "If the soil is moist, the crops will flourish." Secondary knowledge is derived from IoT sensors such as “soil dry”. The resulting knowledge builds upon the findings, assuming what else serves as an indicator for crop prosperity, such as sunlight and fertilizer. Secondary knowledge can become primary knowledge when the quality it describes can be generalized. Similarly, when inventive knowledge (such as a hypothesis) has been scientifically proven, the parameters it describes become secondary knowledge. This is consistent with the theory of verificationism [17], which serves as the basis for the proposed system of machine knowledge regarding the formation of a data array.

The structure is adapted from the theory of verificationism, which provides a breakdown of scientific methods. This is a school of thought where knowledge is obtained as a result of experimentally verified observations. Since society developed by of this scientific path, its framework for acquiring knowledge through observation can be borrowed for the design of autonomous machines for learning.

The framework describes how IoT sensors can autonomously exchange knowledge with other sensors. It consists of three databases, namely the Ontology, Parameters and Hypotheses databases. When sending data from IoT sensor databases, services are labeled according to primary, secondary, or invented knowledge levels. IoT sensors share knowledge through advertising and service discovery with other IoT sensors.

The Ontology database contains inference rules. It takes rules either directly from other sensors of the Internet of Things as Primary Knowledge, or from an established ontology definition, or from its parameter database.

The Parameters database contains name-value data pairs. It accepts values either from IoT devices as secondary knowledge or from its database of hypotheses. Secondary knowledge can become primary knowledge after checking the rules in the database through some inductive learning. A family of machine learning techniques such as rule learning, classification, and Bayesian inference can be used for inductive learning.

The Hypothesis database contains untested inference rules. It takes rules either directly from other IoT sensors, such as Invented Knowledge, or from any Ontology definition or from its Ontology database. Invented knowledge can become secondary knowledge after some observations of values conforming to a distribution or pattern. Statistics can be used to observe the distribution of data.

The Hypothesis database also learns from the Ontology database. The original knowledge from the Ontology database can become the invented knowledge after generating the rules using abduction techniques. For example, given the rule "apples are red," the rule attempts to infer whether an object is an "apple" when "red" is observed. In this system, abduction is triggered when the observed chewable quantity (ie red) does not yield a class result (ie apple).

When creating rules, the system implements the two theorems discussed earlier. First, it uses natural language processing to understand human speech. Natural language can find synonyms, homonyms and word categories. In "apples are red", natural language reveals that "red" is a color and "apple" is a noun. So she wants to find other nouns, so she creates a rule like "(noun) is red." The use of natural language in this process implements Theorem 1.

Second, the platform exchanges ontologies with other IoT sensors. Ontologies are built in such a way that the rules of inference are understandable to humans. Although IoT sensors are machines, the structure of ontologies must convey meaning.

The proposed intelligent database can be applied to various IoT industries (i.e., smart home, farming, smart city, and healthcare) for autonomous knowledge sharing and accumulation. However, the proposed framework does not address how IoT devices can learn adaptively in a constrained environment.

The platform can use ontologies to integrate IoT devices with intelligent systems. Choosing any model involves evaluating how critical the application is. For example, when considering the right model for a remote, mission-critical application, one can accept the availability of resources in the cloud, provided that network latency and network availability requirements are optimized for the remote application. The advantage of this model is that IoT sensors in the cloud can learn from remote sensors in the background, regardless of the latency of the network connecting to the remote application. The downside is that network latency can become a bottleneck when the need for real-time decision making increases.

The framework addresses the current gap in the reuse of ontologies across domains by requiring the use of human language to name entities and relationships. Despite the fact that the system solves the current problem of reusing ontologies, it accepts an imperfect definition of intelligent systems. The intelligent objects in the case study are aware of and respond to changes in their environment, actively make decisions and communicate with other intelligent objects, and help others. In addition to this, strong artificial intelligence includes the manifestation of emotions and desires, the formation of a personal character when it gets into different situations. However, there is little debate as to whether IoT systems should exhibit a strong AI character, or whether this could be counterproductive. Hence, holistic frameworks offer new insights into intelligent IoT systems.

The convergence of IoT and big data analytics has created enormous opportunities. Machine intelligence based on IoT data has brought the cyber and physical worlds together and greatly improved to explore real-world problems from a cyber-physical perspective. The efficiency and reliability of processes and systems have improved significantly. System operators now have better monitoring and control over their systems and processes, and business intelligence people better understand their challenges and make informed decisions. While the convergence of machine intelligence and the Internet of Things has opened up many opportunities, there are several challenges that are holding back their growth.

Machine learning algorithms rely heavily on IoT data generated and transmitted from IoT devices to improve decision-making. Within IoT, different layers of IoT, such as perception layer, transport layer, and application layer, are vulnerable to cyber attacks. For example, malicious code injection, node spoofing, impersonation, speech-in-service attacks, routing attacks, and data transit attacks are some examples of cyber attacks in the IoT system model. To protect an IoT system from these cyber threats, it is important to have a proper trust management system in place. IoT devices themselves require proper attention as most devices do not have adequate security mechanisms.

First, users can add security solutions at any time in a traditional IT scenario; however, most IoT devices do not have security solutions, while others have built-in security solutions, and most devices do not support additional security patches, solutions, or updates later after the devices are manufactured.

Second, due to low memory and processing limitations, only simplified algorithms.

Third, a wide variety of devices are used in an IoT environment. Because of this heterogeneous nature, security risk is increased by the integration of different device types, technologies, and vendors.

Fourth, the IoT application layer suffers from privacy issues. Leakage data and data eavesdropping can have potential consequences. Fifth, IoT communication protocols are also vulnerable to cyberattacks and threats, including data-in-transit attacks, routing and DoS attacks, key management issues, high computational cost, and lack of user control over privacy.

IoT applications will require faster processing and decision-making, bringing data processing closer to the consumer. Sending data to the cloud takes time and a lot of bandwidth. Analytics at the IoT edge has therefore opened up the possibility for future impacts.

One of the reasons for this trend is that the use of sensors is widespread in many areas of life and business, such as vehicles, manufacturing and healthcare, creating continuous streams of data. This large amount of data becomes the raw material for businesses and governments to gain insights and new knowledge using machine learning techniques. The motivation includes competing or creating better policies when there is enough data, which gives rise to the urgency of learning from data.

Another driver is the convergence between IoT and critical infrastructure due to their demand for mission-critical applications. Data is processed closer to the consumer when low latency is critical. The current trend is that trivial programs tend to become critical or can be redesigned to support critical programs.

The challenge against this trend is that edge devices (such as mobile devices) tend to have lower computing capabilities than the cloud data center. On the other hand, machine learning data analysis requires high computing power and storage. In this context, the proposed machine learning system in the IoT environment can solve this problem. Her future work may include exploring a federation of knowledge-sharing edge devices. An edge device equipped with the highest computing performance can handle data processing tasks. The edge device that has the most bandwidth can communicate with the cloud to offload its computing tasks.

IoT technologies have enabled the platform to communicate between a large number of connected sensors and sensors. When mission-critical applications and end users require a large number of interconnections, scalability becomes an issue that must be addressed. For example, large amounts of data need to be distributed across multiple end devices, where the devices simultaneously solve computational problems. So, distributed machine learning algorithms with edge computing are a potential solution. This enables computational decisions to be made at the edge, which is closer to IoT devices.

Advances in human language research will help improve machine learning tasks in a distributed system. Human language puts context behind data values, allowing connected IoT devices to collaboratively label their data, learn from other devices, thereby introducing distributed machine learning to solve computational problems.

In hyperconvergence, storage is shared among a large number of distributed nodes, and their combined performance helps solve the problem of resource sharing.

Conclusions

The paper examines the principles of forming a data array based on a neural network in the field of the Internet of Things. IoT devices are limited in computing and communication resources, which is a bottleneck in the development of adaptive intelligent solutions using machine learning techniques. The formation of a data array based on a neural network is based on taking into account the semantics of the tasks being solved, which makes it possible to make the solution of these tasks more structured and transparent for the user, as well as to make additional adjustments to the process of learning the neural network and solving tasks. The implementation of the described algorithm for the formation of the data array, as well as the corresponding intellectual environment, will allow to reduce the threshold for developers to enter the field of solving problems using a neural network.

References

1. Semenoh, A.Yu. (2020). Tsyfrovi tekhnolohii v umovakh formuvannia tsyfrovoi ekonomikyi [Digital technologies in the conditions of formation of digital economy]. Naukovi zapysky Natsionalnoho universytetu “Ostrozka akademiia”. Seriia “Ekonomika”, 19 (47)

2. Sotnyk, I.M., Zavrazhnyi, K.Iu. (2017). Pidkhody do zabezpechennia informatsiinoi bezpeky promyslovoho Internetu rechei na pidpryiemstvi [Approaches to information security of the industrial Internet of Things at the enterprise]. Marketynh i menedzhment innovatsii, (3)

3. Aksak, N.H. (2019). Metody ta modeli rozpodilenoi intelektualnoi obrobky velykykh danykh u spetsializovanykh kompiuternykh systemakh [Methods and models of distributed intelligent processing of large data in specialized computer systems] abstract of the dissertation of the doctor of technical sciences: 05.13.05 “Computer systems and components”. Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv. Nat. University of Radio Electronics. Kharkiv.

4. Melnik, L.G., Kovalev, B.L. ed. (2020). Proryvni tekhnolohii v ekonomitsi i biznesi (dosvid YeS ta praktyka Ukrainy u svitli III, IV i V promyslovykh revoliutsii) [Breakthrough technologies in economics and business (EU experience and practice of Ukraine in the light of III, IV and V industrial revolutions)]: textbook. Sumy: Sumy State University.

5. Balakleiets, K., Kvitka, A. (2019). Yevropeiski trendy v innovatsiinomu pidpryiemnytstvi [European trends in innovative entrepreneurship]. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/333609483_Evropejski_trendi_v_innovacijnomu_pidpriemnictvi

6. Zhang, W., Kumar, M., & Liu, J. (2019). Multi-parameter online measurement IoT system based on BP neural network algorithm. Neural Computing and Applications, 31(12).

7. Tverdokhlib A.O., Korotin D.S. Efektyvnist funktsionuvannia kompiuternykh system pry vykorystanni tekhnolohii blokchein i baz dannykh. Tavriiskyi naukovyi visnyk. Seriia: Tekhnichni nauky, 2022, (6)

8. Tsvyk O.S. Analiz i osoblyvosti prohramnoho zabezpechennia dlia kontroliu trafiku. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Ceriia: Tekhnichni nauky, 2023, (1)

9. Novichenko Ye.O. Aktualni zasady stvorennia alhorytmiv obrobky informatsii dlia lohistychnykh tsentriv. Tavriiskyi naukovyi visnyk. Seriia: Tekhnichni nauky, 2023 (1)

10. Zaitsev Ye.O. Smart zasoby vyznachennia avariinykh staniv u rozpodilnykh elektrychnykh merezhakh mist. Tavriiskyi naukovyi visnyk. Seriia: Tekhnichni nauky, 2022, (5)

11. Cui, D.D., & Liu, F. (2012). The application of BP neural network in Internet of Things. In Advanced Engineering Forum. Vol. 6, pp. 1098–1102. Trans Tech Publications Ltd.

12. Xiao, H., & Li, Y. (2011). A New Thought based on the Service Composition of Automatic Transmission Semantic Grid in Internet of Things. IJACT: International Journal of Advancements in Computing Technology, 3 (7).

13. Xiang, C., & Zhou, Z. (2011). A new music classification method based on BP neural network. International Journal of Digital Content Technology and its Applications, 5 (6)

14. Xiao, H., & Li, Y. (2011). A New Thought based on the Service Composition of Automatic Transmission Semantic Grid in Internet of Things. IJACT: International Journal of Advancements in Computing Technology, 3 (7).

15. Fang, R., Jian-feng, M., & Xuan-wcn, H. (2012). Attribute-based access control scheme for the perceptive layer of the Internet of Things. Journal of Xidian University, 39 (2)

16. Naveen Dr, Raina Rohini. Machine learning in Internet of Thing. (2018). Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/322209934_MACHINE_LEARNING_IN_INTERNET_OF_THING

17. Xinwu, L. (2011). A new color correction model for based on BP neural network. Advances in Information Sciences and Service Sciences, 3 (5)

18. Shtuchnyi intelekt zmozhe poperedzhaty khvoroby koriv [Artificial intelligence will be able to prevent diseases of cows]. 2018. Retrieved from: http://milkua.info/en/post/stucnij-intelekt-zmoze-poperedzati-hvorobi-koriv

19. Oliinyk, P.B. (2021). Rozrobka bezdrotovoho datchyka vibratsii na osnovi MEMS akselerometra [Development of a wireless vibration sensor based on the MEMS accelerometer]. Retrieved from: https://media.neliti.com/media/publications/306711-development-of-wireless-vibration-transd-e11dbf9c.pdf

20. Mokin, V.B., Sobko, B.Yu., Dratovanyi, M.V., Kryzhanovskyi, Ye.M., & Horiachev, H.V. (2017). Stvorennia informatsiinoi systemy monitorynhu zabrudnennia atmosfernoho povitria mista na osnovi tekhnolohii "Internet rechei" [Creation of an information system for monitoring the city's air pollution based on the Internet of Things technology]. Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu, (3)

21. Dobronravova, I.S. (ed.), et. al. (2018). Metodolohiia ta orhanizatsiia naukovykh doslidzhen [Methodology and organization of scientific research]. Kyiv : VPTs "Kyivskyi universytet"

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-258-262
УДК 631.81

ЩЕРБАТЮК ТЕТЯНА
Київський національний університет технологій та дизайну
https://orcid.org/0000-0003-1144-8006
e-mail: shcherbatiuk.th@knutd.edu.ua
АНДРЕЄВА ОЛЬГА
Київський національний університет технологій та дизайну
https://orcid.org/0000-0001-8374-2306
e-mail: wayfarer14@ukr.net

ЗАСТОСУВАННЯ ОЗОННИХ ТЕХНОЛОГІЙ У РОСЛИННИЦТВІ

Наведено стислий огляд опублікованих у рецензованих виданнях протягом останніх трьох років досліджень, присвячених результатам застосування озону у рослинництві. Проаналізовано три напрями використання цього реагенту: 1) зменшення концентрації фунгіциду, підвищення зростання та якості овочевих культур за допомогою фертигації; 2) збереження свіжості фруктів, ягід та овочів; 3) обробка зернової сировини під час сушіння озоноповітряною сумішшю.

Ключові слова: озон; озонні технології; рослинництво; фертигація, зберігання фруктів, ягід та овочів; сушіння зернової сировини.

SHCHERBATIUK TETIANA
Kyiv National University of Technology and Design
ANDREYEVA OLGA
Kyiv National University of Technologies and Design

APPLICATION OF OZONE TECHNOLOGIES IN CROP CULTIVATION

The agro-industrial complex is one of the most developing spheres of the economy. Growing needs for food, new ways of tilling fields, storing seeds and finished agricultural products lead to the emergence of technological industries, the success of which is largely determined by a combination of classical standardized approaches and innovative search methods. Often the sources of new methods are found in areas of knowledge or areas of practical application of parallel scientific disciplines. Wide and pervasive use of ozone technologies in general ozone therapy and also in particular preventive and clinical medicine for a hundred years has become one of the key markers of interest in the use of ozone in various spheres of the economy, including in the agro-industrial complex. The paper shows a brief overview of works published in the last three years in peer-reviewed editions, devoted to the results of the use of ozone in crop production. Three areas of use of this reagent are analyzed: first of all, reducing the concentration of fungicide, increasing the growth and quality of vegetable crops using fertigation; secondly, preserving the freshness of fruits, berries and vegetables; thirdly, processing of grain raw materials during drying with an ozone-air mixture. Despite certain successes in the use of ozone in the agro-industrial field, the mechanisms at the level of genetic, biochemical and physiological processes of plants remain poorly understood, and it is this knowledge that will make it possible to regulate plant metabolism and develop standardized regimes for the use of ozone technologies in crop production. Taking into account the expected synergy between agronomic science and post-genomic technologies, it is possible to predict qualitatively new explanations for the action of ozone through the mechanisms of regulation of the soil and plant microbiome. Ukrainian manufacturers of ozone generators, agrarian scientists and agro-industrialists have every reason to unite to significantly raise the scientific and practical level of applying ozone technologies in agriculture. Now is the time for transformation, modernization, and therefore a hopeful future.

Key words: ozone; ozone technologies; crop production, fertilization; storage of fruits, berries and vegetables; drying of grain raw materials

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Агропромисловий комплекс є однією із сфер економіки, що найбільш розвиваються. Зростаючі потреби у харчуванні, нових способах обробки полів, зберігання насіння та готових сільгосппродуктів призводять до появи технологічних виробництв, успіх яких багато в чому визначається поєднанням класичних стандартизованих підходів та інноваційних пошукових методів. До останніх, на наш погляд, належать озонні технології, огляд застосування яких у рослинництві і став метою даної роботи.

Озон (O_3) уявляє собою триатомний газ у вигляді алотропної форми кисню з характерним різким запахом. При температурі −112 °C відбувається конденсація озону з утворенням темно-синьої рідини з вибуховими властивостями. Фізичні та хімічні властивості озону ґрунтовно описані у книзі Разумовського С. Д. та Заїкова Г. Е. «Озон та його реакції з органічними сполуками» (1974 р.), а деякі підсумовані в огляді колективу авторів з Великої Британії та США [1].

Озон менш стабільний, ніж атмосферний кисень; він швидко розкладається на кисень як у повітрі, так і у воді, з окиснювальним потенціалом 2,07 В, причому швидкість розкладання озону в розчині у 5-8 разів більша, ніж у газовій фазі. Ця нестабільність свідчить про те, що озон не накопичується й повинен генеруватися на вимогу через систему генерації озону [1]. Відомо, що висока окиснювальна здатність та швидке розкладання робить його ефективним проти широкого спектру мікроорганізмів, звідси його поширене застосування для знезараження приміщень, матеріалів/поверхонь, продуктів харчування та води. Саме ці властивості ефективно застосовані німецькими фахівцями у військово-польовій хірургії під час Першої світової війни, що згодом визначило розвиток цілого напряму в окиснювальній терапії – озонотерапії. Тому й не дивно, що у 1971 р. у Німеччині було створено медичне товариство озонотерапевтів [2].

Широке всепроникне застосування озонних технологій у профілактичній та клінічній медицині

протягом ста років стало одним із ключових маркерів інтересу використання озону у різних сферах економіки, у тому числі в агропромисловому комплексі.

Формулювання цілей статті

До уваги читачів пропонується стислий огляд опублікованих за останні три роки у рецензованих виданнях робіт, присвячених результатам застосування озону у рослинництві.

Виклад основного матеріалу

У 2022 р. група вчених з Іспанії, країни, що входить до групи лідерів найбільших виробників томатів, дійшла висновку, що використання розчиненого озону за допомогою фертигації може дати кілька переваг для зростання та якості овочевої культури томату *Solanum lycopersicum L* [3]. Автори застосували безперервне зрошення та переривчасте зрошення озонованою водою у тепличних умовах. Озон генерувався з атмосферного повітря і в кінцевому підсумку вводився у фільтровану поливну воду доти, доки не було досягнуто окиснювально-відновного потенціалу 800-850 мВ. Оцінювалися дві агрономічні обробки: безперервне краплинне зрошення озонованою водою та краплинне зрошення озонованою водою, яке застосовувалося лише двічі. Проби ґрунту були взяті в три періоди, що відповідають передзбиральному періоду, початку збору врожаю та закінченню збору врожаю. Якість плодів оцінювали під час збирання врожаю. В цілому, застосовувані обробки незначно вплинули на фізико-хімічні властивості ґрунту, тільки pH ґрунту був значно знижений за рахунок безперервного зрошення озонованою водою наприкінці аналізу. Біомаси грамнегативних бактерій та грибів знижувалися при періодичному та безперервному зрошенні озонованою водою відповідно. Однак, на різноманітність, структуру та склад ґрунтової мікробної спільноти озонові обробки не вплинули, що свідчить про екологічність вибраних умов озонування. Зміни властивостей ґрунту незначно вплинули на фізіологію рослин томату, але не вплинули на врожайність та якість плодів. Устична провідність знижувалась, а власна ефективність використання води збільшувалася при безперервному зрошенні озонованою водою. На підставі одержаних результатів автори зробили висновок, що обробка озонованою водою має бути скоригованою відповідно до видів рослин та певних умов для виключення несприятливого впливу на врожай, збереження здоров'я та родючості ґрунту для стійкого управління врожайністю.

Інтернаціональний колектив з Іспанії та Еквадору у 2022 р. повідомив про результати дослідження фізіологічних та харчових реакцій розсади томатів із застосуванням озону [4]. Було встановлено, що при збільшенні концентрації озону у рослин томатів зменшується площа листя та збільшується загальна суха маса та концентрація пігментів, досягаючи максимуму при дозі 0,36 мг/л. Фертигація поживним розчином збільшує концентрацію азоту, фосфору та калію в листях, а також загальну екстракцію цих поживних речовин рослинами томатів. Автори виявили специфічну тенденцію розподілу та накопичення залежно від досліджуваного нутрієнта. Цікаво, що обробка озоном збільшила концентрацію калію в листях, не змінила загального вмісту азоту та фосфору, але зменшила загальну кількість калію. У рослин томатів, що росли при підвищенні концентрації озону, фосфору та калію, листя збільшувалося, але загальна екстракція азоту, фосфору та калію рослинами та їх розподіл між органами чіткої тенденції не мали. І хоча автори не дали змогу ознайомитися з обґрунтуванням обраних умов озонування води, проте, безперечним і обнадійливим є їхнє розуміння необхідності довгострокових експериментів із різними культурами. До того ж, у майбутніх дослідженнях важливо враховувати потенційні зміни у структурі органічної речовини за рахунок окиснювального стресу рослин.

На наш погляд, при плануванні подальших досліджень важливо оцінити динаміку антиоксидантних компонентів рослини під час її росту та розвитку при звичайному зрошувальному режимі для того, щоб на основі цих даних визначити ефективні концентрації озону.

Група китайських дослідників провела порівняння ефективності впливу зрошення та розпилення озонованої води на розсаду томатів [5] і виявила, що зрошення озоновою водою значно покращує фізіологічні характеристики цієї розсади. На тлі дії озонованої води експресія генів антиоксидантних ферментів, синтез хлорофілу та поглинання азоту суттєво збільшувалися, а максимальний рівень експресії досягався через 12 годин після дії. Цей результат показав, що обробка води озоном може значно покращити стресостійкість розсади томатів. Зрошення озонованою водою збільшує вміст азоту в листях томатів і, вірогідно, сприятиме експресії генів, пов'язаних із синтезом хлорофілу, та генів, пов'язаних із поглинанням азоту, що корисно для покращення фотосинтетичної здатності та врожайності томатів. Враховуючи економіку та ефективність виробництва, автори наполягають на необхідності застосування встановленої ними оптимальної концентрації озону для барботування води. Важливо також взяти до уваги, що ефект зрошення озоновою водою виявився набагато кращим, ніж після обприскування листя [5].

Мексиканські вчені, які вважають застосування озону в агропромисловості екотехнологічним, економічно ефективним і дуже перспективним для використання в країнах Латинської Америки, що розвиваються [6], у 2021 р. опублікували результати десятирічного досвіду використання озонних технологій для забезпечення якості деяких рослин, що широко культивуються у даному регіоні. Так, повідомляється, що озон продемонстрував свою корисність для керування післязбиральною обробкою таких фруктів, як манго та папайя [7]. Використання озону для поливу культур *Nopal opuntia* кактуса-опунції виявилося дуже ефективним для боротьби з хворобами та підвищення здоров'я рослин. Запропонована авторами система зрошення озоном запобігає зростанню кількості бактерій та жуків на цитрусових деревах. Використання озонованої води дозволило не лише підвищити врожайність цукрової тростини, а й поступово

зменшити концентрацію фунгіциду, зберігаючи виражені фунгіцидні властивості у міру того, як кількість озонованої води підвищувалася.

На практиці озон часто використовується у якості фунгіциду для збереження свіжості фруктів та овочів. Колектив китайських вчених дослідив вплив концентрації озону на післязбиральну якість столового сорту винограду Мускат гамбурзький. Було проведено оцінювання наступних показників: швидкість виробництва етилену, інтенсивність дихання, вміст розчинних сухих речовин, кислотність, твердість, швидкість обмолоту, загальна кількість дріжджів і плісняви, а також активність ферментів супероксиддисмутази, пероксидази, каталази, поліфенолоксидази та фенілаланину. На поверхні винограду визначили метагеном грибів [8]. Було встановлено, що обробка озоном (14,98 мг озону/м^3) позитивно впливає на збереження винограду. Через 80 днів зберігання вміст розчинних сухих речовин і кислотність збільшилися на 3,1 і 0,03 % відповідно. За цей же період також збільшилася жорсткість, але знизилася швидкість обмолоту. За розроблених умов зберігання інгібувалася активність поліфенолоксидази й збереглася активність супероксиддисмутази, пероксидази, каталази та фенілаланінаміакліази, що затримувало старіння винограду та зберігало його свіжість. Крім того, було виявлено, що озон може змінити структуру грибкової спільноти на поверхні винограду та зменшити різноманітність грибів, зменшуючи тим самим виникнення хвороб. Однак, на думку авторів, молекулярний механізм стійкості винограду до патогенів у присутності озону потребує вивчення.

У роботі інших китайських вчених [9] показано, що обробка озоном дині після збирання врожаю значно пригнічує вільнорадикальний стрес за рахунок підвищення рівня транскрипції всіх видів супероксиддисмутази: Cu/Zn-СОД, Fe-СОД, Mn-SOD. Було виявлено, що обробка озоном не лише уповільнює розкладання дині після збирання врожаю, а й покращує її якість під час зберігання у холодильнику. На основі транскриптомного аналізу динної шкірки та м'якоті автори встановили, що обробка озоном може підтримувати твердість дині за рахунок зміни метаболітів пектину та зниження вироблення етилену внаслідок регулювання відповідних генів, особливо у шкірці. Зміна загального вмісту флавоноїдів у шкірці та м'якоті пов'язана з регуляцією фенілаланін-аміакліази, 4-кумарат-КоА-лігази та генів родини P450, що у подальшому призводить до інгібування шляху метаболізму фенілаланіну у шкірці та сприяє стимулюванню вторинного метаболізму у м'якоті.

Наведений вище алгоритм дослідження був застосований у роботі [10], у якій вивчили вплив обробки озоном на фізіологічні характеристики, активний кисневий обмін та антиоксидантні властивості післязбиральної полуниці. Результати показали, що втрата ваги та частота дихання полуниці пригнічувалися обробкою озоном, тоді як зниження твердості та загального вмісту розчинних сухих речовин затримувалося. Озон знижував швидкість генерації супероксид-аніонів-радикалів, підвищував активність супероксиддисмутази, каталази, аскорбатпероксидази та монодегідроаскорбатредуктази, а також сприяв накопиченню аскорбінової кислоти, відновленого глутатіону та відновлювальної/антиоксидантної здатності заліза. Таким чином, автори пояснили поліпшення антиоксидантної здатності післязбиральної полуниці, обробленої озоном, за рахунок посилення активності антиоксидантних ферментів і збільшення експресії антиоксидантних білків, пов'язаних із системою «аскорбінова кислота – глутатіон».

Вчені з Жешувського університету у Польщі почали активно досліджувати вплив озону на обробку різних ягід під час їх зберігання. Kuźniar P. та ін. проаналізували вплив застосування озону в концентрації 10 ppm протягом 15 та 30 хвилин на механічні та хімічні властивості, а також мікробіологічну стабільність трьох сортів червоної смородини (*Ribes rubrum L.),* вирощених органічними методами. Плоди, зібрані в момент дозрівання врожаю, мали значно більші діаметр і вагу та менший вміст води порівняно із плодами, зібраними на сім днів раніше. При цьому процес озонування, незалежно від дати збору ягід, зменшував аналізовані фізичні параметри. Вміст аскорбінової кислоти в озонованих плодах варіював, при цьому найбільше зниження спостерігалося для фруктів, що були зібрані за 7 днів до оптимальної дати збирання врожаю і зберігалися протягом 15 днів у холодильнику (середнє зниження на 13,31 % порівняно з контрольними фруктами без озонування). Загалом процес озонування справив позитивний вплив на зміну антиоксидантної активності фруктів: найвищі середні значення були отримані для фруктів, що були зібрані за 7 днів до оптимальної дати збирання врожаю та зберігалися протягом 15 днів в умовах охолодження; крім того, озон також вплинув на зниження розвитку мікроорганізмів, у тому числі мезофільних аеробних бактерій, дріжджів та плісеневих грибів, головним чином на сорті смородини «Лосан» [11].

Gorzelany J., Kapusta I. та ін., провівши фізико-хімічні дослідження в озонованих та неозонованих зразках Ірги вільхолиістої *Amelanchier alnifolia Nutt* після безпосереднього заморожування та зберігання у морозильній камері (-18 °C), дійшли висновку, що процес озонування справив позитивний вплив на зниження мікробного навантаження плодів ягід на 7-й день холодного зберігання, включаючи значне зниження кількості аеробних мезофільних бактерій, дріжджів та плісняви, а також зниження кислотності плодів. Вміст аскорбінової кислоти та антиоксидантна активність у плодах ягід варіювали залежно від тестованого сорту та клону, а також часу впливу озону [12].

Італійський фізіолог Velio Boccі (1928–2019 рр.), якого по праву вважають лідером фундаментальної озонотерапії, довгі роки свого плідного життя працював в Університеті Сієни, де певною мірою пролив світло на механізми озону в організмі людини, багато в чому визначив розвиток озонотерпії в Європі та світі, а також поширення інформації про озонні технології. У 2021 р. вчені Тосканського університету опублікували повноважний огляд, що містив понад сто джерел і був присвячений проблемі

зберігання свіжонарізаних продуктів, вживання яких останніми роками стає все більш популярним [13].

Процеси різання, очищення та упаковки, а також біохімічні, сенсорні та мікробні зміни, що відбуваються на поверхні тканин рослин, можуть прискорити псування останніх. У цьому відношенні біологічне зараження може бути первинним. Це має місце тоді, коли інфекційні організми безпосередньо заражають сировину та/або перехресним зараженням, яке відбувається під час процесів приготування їжі, наприклад, миття. Порівнюючи низку технологій, що дозволяють продовжити термін зберігання свіжонарізаних продуктів, автори [14] приводять доводи того, що озонова технологія є високоефективною стерилізацією, а також докладно розглядають основні дослідження, присвячені впливу газоподібного озону та озонованої води на зростання мікробів та збереження якості свіжозрізаних фруктів та овочів.

На особливу увагу заслуговує робота Присяжнюка Д. В. із співробітниками [15], у якій повідомляється, що для високоякісного сушіння зернової сировини із одночасним зниженням споживаних енерговитрат спроєктовано та виготовлено дослідну модель віброозонуючого комплексу, де оброблюваний матеріал піддається вібраційному впливу, який збільшує та оновлює поверхню теплообміну. В результаті цього відбувається інтенсивне видалення вологи, прискорюється сушіння. Процес сушіння відбувається рівномірно по всьому шару, не викликаючи місцеве перегрівання матеріалу. У роботі наведено методику визначення дози обробки зернової сировини під час сушіння озоноповітряною сумішшю з використанням розробленої моделі, це забезпечуватиме ефективне виконання технологічного процесу із одночасним зниженням енерговитрат. Хімічний склад зерна різноманітних сільськогосподарських культур відрізняється незначно. З цього випливає, що дія обробки озоном для різноманітних культур описується загальними параметрами та підпорядковується загальним закономірностям. Отримані залежності дають змогу визначити дозу обробки зернової сировини озоноповітряною сумішшю, яка, наприклад, для 1 кг зерна кукурудзи становить приблизно 0,06 м^3, пшениці – 0,045 м^3; при цьому доза озону на 1 кг зерна кукурудзи складає 1,91, а пшениці – 1,44 мг. Ефективність обробки озоноповітряною сумішшю різної зернової сировини залежатиме від її морфологічних особливостей, а саме, від геометричних розмірів зернин.

Висновки з даного дослідження

На підставі огляду літератури за останні три роки встановлено переваги використання озонних технологій лише для однієї галузі агропромислового комплексу – рослинництва. Вони полягають у тому, що дають змогу підвищити врожайність культурних рослин. Ефективність цих технологій автори пояснюють, насамперед, фунгіцидними та бактерицидними властивостями озону, які дають змогу поступово зменшити концентрацію фунгіциду. Однак, враховуючи очікувану синергію між агрономічною наукою та постгеномними технологіями, можна прогнозувати якісно нові пояснення дії озону через механізми регулювання мікробіома ґрунту та рослин.

Останнім часом все більшого поширення набуває дослідження впливу озону на післязбиральну якість ягід, фруктів та овочів як підготовку до заморожування для тривалого зберігання. Великий інтерес має як технічне, так і практичне рішення обробки зернової сировини під час сушіння озоноповітряною сумішшю.

Незважаючи на певні успіхи озонних технологій в агропромисловій галузі, залишаються мало вивченими механізми на рівні молекулярно-генетичних, біохімічних та фізіологічних процесів, що відбуваються у рослинах, але ж саме ці знання дозволять регулювати метаболізм рослин та розробляти стандартизовані режими використання озону у рослинництві.

Перспективи подальших досліджень

Суворі виклики дійсності багато чому навчили: карантин – роботі он-лайн, що дозволить створити мережу зацікавлених наукових колективів, між якими можна розподілити завдання відповідно до їх науково-технічного потенціалу; війна – здатність об'єднуватись як у великому, так і малому. Українські виробники генераторів озону, вчені-аграрії та агропромисловці мають усі підстави, об’єднавшись, істотно підняти науково-практичний рівень застосування озонних технологій у сільському господарстві. Зараз час для трансформації, модернізації, а, отже, до обнадійливого майбутнього.

Література

1. Epelle E., Macfarlane A., Cusack M. Ozone application in different industries: A review of recent developments. Chemical Engineering Journal. 2023. №454.

2. Institute of ozone therapy and medical equipment. http://www.medozone.com.ua/istoria/22-istoriya-razvitiya-ozonoterapii.html.

3. Díaz-López M., Siles J. A., Ros C. The effects of ozone treatments on the agro-physiological parameters of tomato plants and the soil microbial community. Science of the Total Environment. 2022. № 812.

4. Ruiz-Espin A., Garcia-Caparros P., Llanderal A. Physiological and nutritional responses to ozone application in tomato seedling plants. Agriculture. 2023. № 13(1).

5. Xu JP., Yu YC., Zhang T. Effects of ozone water irrigation and spraying on physiological characteristics and gene expression of tomato seedlings. Hortic Res. 2021. №8 (180).

6. Enriquez-Castro C., Perez-Nafarrate M., Rodriguez J. E. G. Innovation in food products using ozone technology: impact on quality assurance. Innovation in the Food Sector Through the Valorization of Food and Agro-Food By-Products. 2021.

7. Mohanapriya R., Vijay Aravinth K. Role of ozone in food industry and agriculture. The Indian Journal of Nutrition and Dietetics. 2022. № 59. С. 232–249.

8. Cong-cong Gao, Qi Lin, Cheng-hu Dong Effects of ozone concentration on the postharvest quality and microbial diversity of Muscat Hamburg grapes. RSC Adv. 2020. №10. С. 9037-9045.

9. Zhang H., Zhang X., Dong C. Effects of ozone treatment on SOD activity and genes in postharvest cantaloupe. RSC Adv. 2020. № 5; 10(30). P. 17452-17460.

10. Zhang X., Tang N., Zhang H. Comparative transcriptomic analysis of cantaloupe melon under cold storage with ozone treatment. Food Res Int. 2021. 2 (140).

11. Zhang H., Li K., Zhang X. Effects of ozone treatment on the antioxidant capacity of postharvest strawberry. RSC Adv. 2020. № 5;10(63). P. 38142-38157.

12. Kuźniar P., Belcar J., Zardzewiały M. Effect of ozonation on the mechanical, chemical, and microbiological properties of organically grown red currant (Ribes rubrum L.). J. Fruit. Molecules. 2022. № 25;27(23). P. 8231.

13. Gorzelany J., Kapusta I., Zardzewiały M. Effects of ozone application on microbiological stability and content of sugars and bioactive compounds in the fruit of the saskatoon berry (Amelanchier alnifolia Nutt.). Molecules. 2022. № 30;27(19). P 6446.

14. Botondi R., Barone M. Review into the effectiveness of ozone technology for improving the safety and preserving the quality of fresh-cut fruits and vegetables. Foods. 2021. № 10, P. 748.

15. Prysiazhniuk D. V. Determination of the dose of progressing grain raw materials with ozone-air mixture during vibration drying. Herald of Khmelnytskyi National University. 2022. Issue 1(305). P. 224–227.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-263-268
УДК 622.236.9, 622.271.2

ЩІПАНОВ ІГОР
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
https://orcid.org/0000-0001-7404-7264
e-mail: igorshipanov2904@gmail.com
СОЛОВЕЙ АНДРІЙ
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
https://orcid.org/0000-0002-4593-702X
e-mail: andre37gv8@gmail.com

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ЗОВНІШНЬОЇ ОБОЛОНКИ ЗАРЯДУ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО НАПРАВЛЕНОГО РОЗКОЛУ ГІРСЬКИХ ПОРІД

Актуальною задачею в гірничій та будівельній промисловості є як можливо більш єфективне та безпечне проведення вибухових робіт. В статті акцентується увага на важливості оптимізації параметрів оболонки для досягнення кращого контролю над процесом розколу. В роботі описуються параметри дроблення та тріщиноутворення, що виникають під час вибуху свердловинного заряду в гірському масиві, залежать від кількох ключових факторів, таких як характеристика заряду ВР, щільність заряджання та швидкість детонації ВР, а також межі міцності гірських порід на стиснення і зсув.

Ключові слова: направлений розкол; зовнішня оболонка; вибух, вибухові речовини; зона вибухового розпушення; інтенсивне дроблення; гірський масив; тріщинуватість; вибухові роботи; радіус зони тріщиноутворення.

SCHIPANOV IGOR, SOLOVEI ANDRII
Kremenchuh Mykhailo Ostrohradskyi National University

ANALYSIS OF PARAMETERS OF THE EXTERNAL CHARGE CASING FOR EFFICIENT DIRECTIONAL ROCK SPLITTING

The article emphasizes the selection of parameters for the external casing of an extended spacing explosive material to ensure effective and safe execution of explosive operations in the mining and extraction industry. The study examines and analyzes how the effectiveness of directional rock fracturing depends on various factors, including the type of explosive material, the shape and size of the explosive charge, parameters of the external casing of the explosive, as well as the geological characteristics of the rock formations. The choice of material for the external casing is discussed as it directly impacts its strength and resistance to loads. To achieve efficient energy transmission during the explosion and reduce the risk of casing rupture, it is suggested to calculate the optimal thickness. Using the heat conduction equation, the minimum thickness that prevents overheating of the casing can be determined. Ensuring the casing's hermeticity is crucial for the stability of the explosive material and to prevent unintended detonation. The hermeticity level can be determined using the formula presented in the study. For precise rock fracturing, the use of a remote initiating mechanism is proposed, which triggers at a specified moment. To enhance uniform initiation of the explosive material, a structural solution of initiator placement within the explosive charge is suggested.

The presence of cracks and defects in the rock formation is highlighted as an important consideration in the development of casings for effective fracturing. It is known that when a cylindrical explosive charge is detonated within a homogeneous rock mass, three different zones are formed: the area of intense fracturing (fragmentation), the zone of crack formation (radial cracks), and the area of elastic deformation. Based on conducted research, the article presents a formula that takes into account both the main properties of the rock mass (strength characteristics and fissuring) and the parameters of blasting operations, namely the charge radius and explosive material properties. Using the example of the iron ore quarry's geological conditions, calculations were performed for the radii of blast-induced fracturing zones when detonating borehole charges within fractured rock masses at different distances between natural cracks.

Key words: directional fission, external stain, explosion, explosives, explosive detonation zone; intensive crushing; massif; cracking; explosive works; the radius of the cracking zone.

Розкол гірських порід відіграє важливу роль у гірничій та будівельній промисловості, а також інших галузях, де земельні ресурси відіграють ключову роль. Для забезпечення ефективного та контрольованого розколу гірських порід широко застосовують вибухові речовини, проте, для досягнення високої точності та безпеки робіт, необхідно звернути особливу увагу на параметри зовнішньої оболонки. Проблема полягає у розробці та оптимізації параметрів цієї оболонки з метою забезпечення керованого та ефективного розколу гірських порід, уникаючи при цьому негативних наслідків для навколишнього середовища та безпеки робітників.

Зв’язок із важливими науковими та практичними завданнями

Оптимізація процесу розколу: вивчення параметрів зовнішньої оболонки заряду є ключовим аспектом для досягнення кращої ефективності та контролю розколу гірських порід. Наукові дослідження в цьому напрямку спрямовані на визначення оптимальної товщини, матеріалу та форми оболонки для максимального використання енергії вибуху та мінімізації відбитків на гірській поверхні.

Моделювання та чисельні розрахунки: для аналізу впливу різних параметрів оболонки на процес розколу використовуються математичні моделі та чисельні методи. Розвиток нових моделей та алгоритмів дозволяє детальніше вивчити механізм дії оболонки та відповідні параметри.

Екологічна стійкість: важливим аспектом є мінімізація негативного впливу на довкілля під час використання вибухових речовин. Дослідження параметрів оболонки пов'язані з розробкою екологічно

стійких матеріалів та конструкцій, які зменшують шкідливий вплив на ґрунт, воду та повітря.

Безпека робітників: розробка оптимальної оболонки також пов'язана з підвищенням рівня безпеки робітників, які проводять вибухові роботи. Вивчення властивостей оболонки та її взаємодії з гірською породою може допомогти зменшити ризики для працівників.

Аналіз параметрів зовнішньої оболонки для ефективного направленого розколу гірських порід є актуальною проблемою, яка об'єднує науковий і практичний інтерес. Вирішення цієї проблеми має великий потенціал для покращення продуктивності гірничого виробництва та збереження природних ресурсів при одночасному забезпеченні безпеки та екологічної стійкості.

Аналіз останніх досліджень

Останні роки принесли значний прогрес у розумінні та вирішенні проблеми аналізу параметрів зовнішньої оболонки для ефективного направленого розколу гірських порід. Багато дослідників та вчених спрямували свої зусилля на вдосконалення технологій та методів, що використовуються в гірничій промисловості, зокрема, на розробку більш точних та ефективних оболонок для забезпечення контрольованого розколу.

В актуальних дослідженнях автори розглядають сучасні підходи до розробки оболонок для вибухового розколу та аналізують їхні впливи на якість розколу гірської породи. Вони вказують на важливість оптимальної геометрії оболонки, а також на використання новітніх матеріалів для забезпечення максимальної передачі енергії у гірську породу.

Також ретельно розглядається єфективність оболонок для вибухового контрольованого розколу та аналізують вплив різних параметрів оболонки на якість розколу. Розглядаються різні форми та матеріали оболонок та їх вплив на вибуховий процес та результати розколу.

Незважаючи на значний прогрес, залишаються невирішеними деякі ключові аспекти загальної проблеми аналізу параметрів зовнішньої оболонки для ефективного направленого розколу гірських порід.

Отже перелік невирішених аспектів притаманних в дослідженнях:

Вплив тріщин. Розробка оболонок для ефективного розколу має враховувати наявність тріщин та дефектів у гірській породі. Важливо вивчити, як параметри оболонки впливають на розширення тріщин та покращення якості розколу.

Реалістичне моделювання. Для більш точного аналізу необхідно реалістично моделювати різні умови гірського середовища, такі як різні типи порід, геологічні структури та глибини. Розробка більш складних та точних моделей може допомогти зрозуміти, як параметри оболонки пов'язані з реальними умовами розколу.

Ефективність вибухового процесу. Незважаючи на покращення в ефективності розколу, деякі області можуть залишатися менш ефективними через нерівномірний розподіл вибухового навантаження. Вивчення впливу параметрів оболонки на розподіл енергії може покращити цю ситуацію.

Вплив наноматеріалів. Останніми роками дослідники вивчають можливість використання наноматеріалів для створення більш міцних та ефективних оболонок. Проте питання взаємодії наноматеріалів з гірською породою та їх впливу на довкілля залишаються недостатньо дослідженими.

Моделювання різних сценаріїв. Існує потреба у більш детальному моделюванні різних сценаріїв розколу з урахуванням різних параметрів оболонки. Це допоможе визначити оптимальні комбінації параметрів для різних умов гірського середовища.

Аналіз впливу на здоров'я робітників. Важливим аспектом є вивчення впливу параметрів оболонки на рівень вібрацій, шуму та пилового навантаження, які можуть вплинути на здоров'я та безпеку робітників. Додаткові дослідження можуть виявити оптимальні способи зменшення цього впливу.

Формулювання цілей статті

Означена стаття присвячується детальному аналізу параметрів зовнішньої оболонки для ефективного направленого розколу гірських порід. Вона включає у себе огляд останніх досліджень та публікацій, які становлять основу для розв'язання даної проблеми. Основні акценти робляться на важливості оптимізації параметрів оболонки для досягнення кращого контролю над процесом розколу, важливість визначити які параметри оболонки впливають на розширення тріщин, також буде проаналізовано, як різні параметри оболонки впливають на якість та ефективність розколу та на визначення невирішених аспектів, які вимагають подальших досліджень. Також може бути проведений порівняльний аналіз різних методів та підходів для вдосконалення параметрів оболонки та їх впливу на гірничі роботи, зокрема на вибуховий розкол гірських порід.

Виклад основного матеріалу

Вибухові речовини є невід'ємною частиною гірничо-видобувної промисловості, забезпечуючи ефективний спосіб розколу гірських порід. Направлений розкол відіграє важливу роль у досягненні точного та контрольованого руйнування порід з метою підвищення безпеки та ефективності видобутку. Однак від успішності цього процесу в значній мірі залежать параметри зовнішньої оболонки подовженого зазору вибухових речовин. Використання формул та математичних моделей допомагає раціонально підійти до проектування такої оболонки.

Зовнішня оболонка заряду вибухової речовини повинна відповідати ряду вимог, зокрема: забезпечувати рівномірний розподіл вибухової речовини по зазору; запобігати передчасному вибуху

вибухової речовини; забезпечувати направлене поширення ударної хвилі; мінімізувати пошкодження навколишніх гірських порід.

Параметри зовнішньої оболонки зазвичай визначаються на основі результатів численних випробувань. До основних параметрів зовнішньої оболонки належать: матеріал оболонки; товщина оболонки; герметичність оболонки; форма оболонки; тип з'єднання оболонки з зарядом вибухової речовини.

Ефективність направленого розколу гірських порід залежить від багатьох факторів, зокрема від типу вибухової речовини, форми і розмірів заряду вибухової речовини, параметрів зовнішньої оболонки, а також від гірничо-геологічних характеристик гірських порід.

За допомогою правильного вибору параметрів зовнішньої оболонки можна значно підвищити ефективність направленого розколу гірських порід.

Вибір матеріалу для зовнішньої оболонки має прямий вплив на її міцність та стійкість до навантажень. Міцність зовнішньої оболонки може бути оцінена за допомогою формули пружного розтягу:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \tag{1}$$

де σ – напруженість;

F – прикладена сила;

A – площа перерізу оболонки. Залежно від властивостей матеріалу оболонки (модуль пружності E σ_{max} та межа міцності σ_{max}), можна обрати оптимальний матеріал, що забезпечує необхідну міцність.

Для досягнення ефективної передачі енергії вибуху та зменшення ризику розриву оболонки, можна використовувати розрахунок оптимальної товщини. За допомогою рівняння теплопровідності можна знайти мінімальну товщину, яка запобігає перегріву оболонки:

$$h = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot t}{\pi \cdot \rho \cdot c}}, \tag{2}$$

де k – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, t – час вибуху;

ρ – щільність матеріалу оболонки;

c – його теплоємність.

Герметичність оболонки важлива для забезпечення стабільності вибухової речовини та попередження її не жаданого спрацювання. Величина герметичності може бути визначена за допомогою формули:

$$K_r = \frac{V_{витік}}{V_{заг} \cdot \Delta P}, \tag{3}$$

де $V_{витік}$ – об'єм витікання газу;

$V_{заг}$ – загальний об'єм вибухової камери;

ΔP – різниця тиску.

Для досягнення точного розколу гірських порід, можна використовувати віддалений ініціюючий механізм, який спрацьовує в заданий момент часу. Швидкість поширення звуку C може бути використана для розрахунку відстані до вибухового заряду:

$$d = \sqrt{\frac{L \cdot C}{2}} \tag{4}$$

де d – відстань до вибухового заряду;

L – час запуску;

C – швидкість звуку.

Форма оболонки повинна відповідати формі зазору. Найпоширенішими формами оболонок є циліндричні, конічні та сферичні.

Тип з'єднання оболонки з зарядом вибухової речовини повинен забезпечувати надійне зчеплення між ними і запобігати передчасному вибуху вибухової речовини. Найпоширенішими типами з'єднання оболонки з зарядом вибухової речовини є зварювання, паяння та склеювання.

Для підвищення рівномірного ініціювання вибухової речовини в роботі [3] пропонується використовувати конструктивне рішення де вирішується питання єфективного розташування ініціюючої системи в вибуховій речовині:

Пропонується використовувати 3 або більше ініціаторів в ініціюючій системі які зміщені один відносно одного на кут , який розраховується по формулі:

$$\alpha = 360° : N, \tag{5}$$

де N – кількість ініціаторів.

Крім того відстань між ініціаторами вздовж осі розраховується по формулі

$$H = \frac{L}{N}, \tag{6}$$

деL –– довжина заряду вибухової речовини.

Запропонована конструкція забезпечує за рахунок взаємодії детонаційних хвиль нерівномірне

просторове динамічне навантаження середовища, що руйнується та підвищує ефективність його вибухового руйнування.

Важливий момент в розробці оболонок для ефективного розколу має враховуватись наявність тріщин та дефектів в гірській породі. В роботі[4]автор акцентує увагу на важливість визначити які параметри оболонки впливають на розширення тріщин та покращення якості проведення робіт та інших показників, для більш точного аналізу потрібно максимально точно моделювати проходження процесів в різних умовах гірського середовища.

Під час здійснення вибуху циліндричного заряду вибухової речовини (ВР) на однорідний гірський масив утворюються три різних зони: область інтенсивного розколювання (змелення); зона формування тріщин (радіальні тріщини); область еластичних деформацій. Звичайно, межі між цими зонами не є чіткими, але вони поступово переходять одна в одну, і радіус зони формування тріщин визначає параметри загальної області розколювання. Механізми створення цих зон та їх характеристики визначаються як характеристиками ВР та конструкцією зарядної порожнини, так і властивостями гірського масиву, який стає об'єктом руйнування. Визначення розмірів областей інтенсивного розколювання та радіальних тріщин є важливою задачею під час проведення вибухових робіт на гірничих підприємствах, оскільки це впливає на ефективність руйнування гірського масиву.

Водночас відомо, що більшість гірських масивів, які підлягають промисловому руйнуванню, мають тріщини, і при впливі вибухового навантаження більша частина породи розламується вздовж існуючих тріщин в масиві. Лише певний фрагмент масиву, що межує з зарядом, піддається розколюванню на дрібніші частинки, ніж це відбувається з натуральними об'єднаннями. Розмір зони поширення вибухової дії та обсяг інтенсивного розколювання визначаються, так само як і в разі розколювання однорідного середовища, характеристиками застосованої ВР і міцністю та тріщиності гірських порід. Тому питання відносно руйнування тріщинуватого масиву завжди отримує значний розгляд, а визначення розмірів вищезгаданих руйнівних зон в різних гірничо-геологічних і гірничотехнічних умовах стає предметом науково-технічної проблеми, вирішення якої надає можливість ефективно контролювати вплив вибуху на гірський масив.

Встановлено, що в тріщинуватих масивах гранично можливий радіус зони розпушення збільшується обернено пропорційно коефіцієнту структурного ослаблення, який функціонально визначається зі співвідношення гранично можливого радіуса зони тріщиноутворення у монолітному масиві до середньої відстані між тріщинами.

З урахуванням проведених досліджень в роботі [4] формула набуває такого вигляду:

$$R_p = 1,4 R_П \sqrt{\frac{P_{BP} r_{CB} (0,97 + 0,182 \sqrt{\frac{R_П P_{BP} r_{CB}}{l_T^2 \tau}})}{R_n \tau}}, \quad (7)$$

де $R_П$ – радіус зони інтенсивного дроблення гірського масиву, яка утворюється під час підривання в ньому заряду ВР;

P_{BP} – середній тиск продуктів детонації ВР у зарядній камері;

r_{CB} – радіус циліндричного заряду (свердловини або шпуру);

τ – межа міцності руйнування гірської породи на зсув, Па;

$l_т$ – середня відстань між тріщинами.

Аналіз формули свідчить, що вона враховує як основні властивості гірського масиву (міцнісні характеристики та тріщинуватість), так і параметри буропідривних робіт, а саме радіус заряду та властивості вибухової речовини.

Аналіз даних показує, що за таких гірничо-геологічних умов, радіус зони вибухового розпушення зменшується зі збільшенням відстані між тріщинами. Для надзвичайно тріщинуватого (I категорія тріщинуватості) гірського масиву з відстанню між природними тріщинами до 0,1 м чисельне середнє значення радіуса зони вибухового розпушення становить 6,24 м. Для сильно тріщинуватих скельних масивів (II категорія тріщинуватості) з максимальною відстанню між тріщинами 0,5 м значення радіуса зони вибухового розпушення значно зменшується і становить 3,77 м. Для III категорії тріщинуватості гірських порід (середньотріщинуватий масив) з відстанню між тріщинами до 1 м вказаний параметр зменшується до значення 3,33 м, тобто в порівнянні з попередньою категорією зменшення становить 0,5 м, або близько 15 %. Для малотріщинуватих масивів (IV категорія) радіус зони вибухового розпушення становить 3,18 м для граничної відстані між тріщинами 1,5 м і для практично монолітних скельних порід V категорії тріщинуватості, де відстань між тріщинами становить більше 1,5 м, розміри зони розпушення майже не зменшуються (при зміні відстані між тріщинами з 1,5 до 2,0 м радіус зменшується з 3,18 до 3,09 м). В цілому ж на досліджуваному інтервалі зміни відстані між тріщинами з 0,1 до 2,0 м радіус зони розпушення зменшується з 6,24 до 3,09 м, тобто у 2,01 рази. Найбільша інтенсивність зменшення радіуса припадає на II категорію тріщинуватості гірського масиву, де його значення зменшується у 1,65 раза при збільшенні відстані між тріщинами до 0,5 м.

Висновки

Висновки дослідження вказують на те, що параметри дроблення та тріщиноутворення, які виникають під час вибуху свердловинного заряду в гірському масиві, залежать від кількох ключових факторів: діаметра заряду ВР, щільності заряджання та швидкості детонації ВР, а також меж міцності гірських порід на стиснення і зсув.

Особливу увагу слід звернути на зв'язок між радіусом зони вибухового розпушення та структурним ослабленням гірського масиву. За отриманими результатами, радіус зони вибухового розпушення в тріщинуватих масивах демонструє збільшення в порівнянні з радіусом зони тріщиноутворення у монолітних масивах. Це збільшення є оберненою пропорцією до коефіцієнта структурного ослаблення, який в свою чергу залежить від середньої відстані між тріщинами.

Важливим результатом дослідження є розроблена формула для визначення радіуса зони вибухового розпушення в тріщинуватих масивах. Ця формула пов'язує основні параметри гірського масиву та характеристики заряду вибухової речовини.

На прикладі гірничо-геологічних умов залізорудного кар'єру були проведені розрахунки радіусів зон вибухового розпушення при підриванні свердловинних зарядів у тріщинуватому гірському масиві за різних відстаней між природними тріщинами. Виявлено, що зміна відстані між тріщинами від 0,1 до 2,0 м призводить до зменшення радіуса зони розпушення з 6,24 до 3,09 м, тобто на 2,01 рази. Зокрема, найбільше зниження цього параметра відбувається у масиві II категорії тріщинуватості, і воно складає 65% при збільшенні відстані між тріщинами від 0,1 до 0,5 м.

Використання конструкційних рішень для розташування ініціаторів в заряді вибухової речовини, раціональній вибір основних параметрів зовнішньої оболонки і застосування формул та математичних моделей у проектуванні зовнішньої оболонки дозволяє досягти оптимальних параметрів для забезпечення безпеки, ефективності та точності направленого розколу гірських порід. Врахування цих параметрів під час проектування вибухових пристроїв сприяє підвищенню продуктивності та зниженню впливу на навколишнє середовище.

Отримані дані дозволяють вибрати більше правильний вектор наукових досліджень у постановці питань поставлених в роботі . Зокрема, перспективними є дослідження з визначення параметрів зони вибухового розпушення під час застосування різних типів ВР у різноманітних гірничо-геологічних умовах та подальшої роботи над більш ефективною оптимізацією проведення робіт.

Література

1. Воробйов В. В. Вплив конструкції заряду на характер розвитку початкової стадії руйнування твердих середовищ / В. В. Воробйов, М. В. Помазан // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2014. – № 1. – С. 124–129.

2. Коробійчук В. В. Руйнування гірських порід і промислова сейсміка / В. В. Коробійчук, В. Г. Кравець, В. В. Бойко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 400 с.

3. Патент на корисну модель № 3485/ЗУ/23 (2023.04). Свердловинний заряд вибухової речовини / Воробйов В. В., Воробйова Л. Д., Щіпанов І. А. – u 2023 01418, 2014, 5 с.

4. Фролов О. О. Визначення радіуса зони вибухового розпушення тріщинуватого скельного гірського масиву при підриванні свердловинного заряду / О. О. Фролов, М. І. Бельтек // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2020. – № 2. – С. 43–47.

5. Симанович Г. А. Руйнування гірських порід вибухом / Г. А. Симанович, О. Є. Хоменко, М. М. Кононеко. – Дніпропетровськ : ДНГУ, 2014. – 206 с.

6. Бойко В. В. Спеціальні вибухові технології в геоінженерії / В. В. Бойко, А. Л. Ган, О. В. Ган. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 315 с.

7. Фролов О. О. Встановлення закономірностей руйнування природно порушених скельних масивів вибухом / О. О. Фролов, М. І. Бельтек // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2019. – № 1 (83). – С. 283–288.

8. Фролов О. О. Лабораторні дослідження впливу хвиль напружень під час вибуху на параметри руйнування моделі / О. О. Фролов, В. В. Котенко // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2014. – № 3 (70). – С. 124–128.

9. Фролов О. О. Керування енергетичними потоками при вибуховому руйнуванні гірських порід на кар'єрах / О. О. Фролов, А. І. Крючков, Т. В. Косенко. – Київ : «Політехніка» КПІ імені Ігоря Сікорського, 2019. – 196 с.

10. Кравець В. Г. Фізичні процеси прикладної геодинаміки вибуху / В. Г. Кравець, В. В. Коробійчук, В. В. Бойко. – Житомир : ЖДТУ, 2015. – 408 с.

References

1. Vorobiov V. V. Vplyv konstruktsii zariadu na kharakter rozvytku pochatkovoi stadii ruinuvannia tverdykh seredovyshch / V. V. Vorobiov, M. V. Pomazan // Visnyk KrNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho. – 2014. – № 1. – S. 124–129.

2. Korobiichuk V. V. Ruinuvannia hirskykh porid i promyslova seismika / V. V. Korobiichuk, V. H. Kravets, V. V. Boiko. – Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2020. – 400 s.

3. Patent na korysnu model № 3485/ZU/23 (2023.04). Sverdlovynnyi zariad vybukhovoi rechovyny / Vorobiov V. V., Vorobiova L. D., Shchipanov I. A. – u 2023 01418, 2014, 5 s.

4. Frolov O. O. Vyznachennia radiusa zony vybukhovoho rozpushennia trishchynuvatoho skelnoho hirskoho masyvu pry pidryvanni sverdlovynnoho zariadu / O. O. Frolov, M. I. Beltek // Visnyk ZhDTU. Tekhnichni nauky. – 2020. – № 2. – S. 43–47.

5. Symanovych H. A. Ruinuvannia hirskykh porid vybukhom / H. A. Symanovych, O. Ye. Khomenko, M. M. Kononeko. – Dnipropetrovsk : DNHU, 2014. – 206 s.

6. Boiko V. V. Spetsialni vybukhovi tekhnolohii v heoinzhenerii / V. V. Boiko, A. L. Han, O. V. Han. – Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2022. – 315 s.

7. Frolov O. O. Vstanovlennia zakonomirnostei ruinuvannia pryrodno porushenykh skelnykh masyviv vybukhom / O. O. Frolov, M. I. Beltek // Visnyk ZhDTU. Tekhnichni nauky. – 2019. – № 1 (83). – S. 283–288.

8. Frolov O. O. Laboratorni doslidzhennia vplyvu khvyl napruzhen pid chas vybukhu na parametry ruinuvannia modeli / O. O. Frolov, V. V. Kotenko // Visnyk ZhDTU. Tekhnichni nauky. – 2014. – № 3 (70). – S. 124–128.

9. Frolov O. O. Keruvannia enerhetychnymy potokamy pry vybukhovomu ruinuvanni hirskykh porid na karierakh / O. O. Frolov, A. I. Kriuchkov, T. V. Kosenko. – Kyiv : «Politekhnika» KPI imeni Ihoria Sikorskoho, 2019. – 196 s.

10. Kravets V. H. Fizychni protsesy prykladnoi heodynamiky vybukhu / V. H. Kravets, V. V. Korobiichuk, V. V. Boiko. – Zhytomyr : ZhDTU, 2015. – 408 s.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-269-278
УДК 004.056.55

ЩУР НАТАЛІЯ
Державний університет «Житомирська політехніка»
https://orcid.org/0000-0002-1182-4799
e-mail: thalitana@gmail.com
ПОКОТИЛО ОЛЕКСАНДРА
Державний університет «Житомирська політехніка»
https://orcid.org/0000-0002-1587-235X
e-mail: kik_poa@ztu.edu.ua
БАЙЛЮК ЄЛІЗАВЕТА
Державний університет «Житомирська політехніка»
https://orcid.org/0000-0002-4961-7816
e-mail: liza.bailiuk@gmail.com

ОГЛЯД ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ-ФІНАЛІСТІВ КОНКУРСУ NIST ЗІ СТАНДАРТИЗАЦІЇ ЛЕГКОВАГОВОЇ КРИПТОГРАФІЇ

Статтю присвячено процесу стандартизації легковагових криптографічних алгоритмів, включаючи важливі етапи від відбору кандидатів до оголошення остаточного переможця. У статті здійснено огляд та порівняльний аналіз алгоритмів-фіналістів конкурсу NIST зі стандартизації легковагової криптографії. Розглянуто типові криптографічні конструкції та примітиви, на базі яких реалізовані перетворення у алгоритмах-фіналістах. Проведено дослідження специфікацій алгоритмів-фіналістів, проаналізовано їх можливі варіанти та модифікації. Представлено порівняння алгоритмів за різними характеристиками (розміри ключа, блоку, тегу тощо), наведено показники безпеки кожного алгоритму. Стаття має на меті дати загальне уявлення про дизайн та властивості алгоритмів-фіналістів конкурсу NIST, а також допомогти з вибором оптимального алгоритму для конкретного сценарію застосування.

Ключові слова: легковагова криптографія, стандартизація, автентифіковане шифрування, хешування.

SHCHUR NATALIIA, POKOTYLO OLEKSANDRA, BAILIUK YELYZAVETA
Zhytomyr Polytechnic National University

OVERVIEW AND COMPARATIVE ANALYSIS OF NIST COMPETITION FINALIST ALGORITHMS FOR LIGHTWEIGHT CRYPTOGRAPHY STANDARDIZATION

The shift from desktop computers to small devices brings a wide range of new security and privacy concerns. In many conventional cryptographic standards, the trade off between security, performance and resource requirements was optimized for desktop and server environments. As a result, implementing the current cryptography standards in resource-constrained devices becomes challenging due to the inherent limitations of such devices. Lightweight cryptography is an effective tool for the development of Internet of Things technologies, medical equipment, automotive electronics, and various other fields where balancing performance and security is crucial However, choosing the optimal cryptographic algorithm for lightweight cryptography remains a challenging task. That is why the main goal of the NIST competition is to select such lightweight cryptographic algorithms that would have low computational complexity, minimal memory usage, and low energy consumption, while providing a reliable level of protection for various applications.

Typical cryptographic constructions and primitives upon which transformations in finalist algorithms are built are discussed. Specifications of finalist algorithms are examined, and their potential variants and modifications are analyzed. A comparison of algorithms based on various characteristics (key size, block size, tags, etc.) is presented, security indicators of each algorithm are given. The article aims to provide a general understanding of the design and properties of NIST competition finalist algorithms, aiding in the selection of the optimal algorithm for specific usage scenarios.

Keywords: lightweight cryptography, standardization, authenticated encryption, hashing.

Постановка проблеми

Зі збільшенням використання малопотужних пристроїв у різних сферах, таких як охорона здоров'я, бездротові сенсорні мережі, Інтернет речей (Internet of Things, IoT) тощо, потреба в безпеці та належному захисті даних у таких пристроях також зростає. Незважаючи на те, що існує велика кількість криптографічних алгоритмів для безпечного шифрування даних, вони в основному розроблені для більш традиційного використання на ПК, і вони не тільки споживають багато енергії, але також вимагають багато процесорної потужності та фізичного простору.

Легковагова криптографія (lightweight cryptography, LWC) є галуззю криптографії, яка займається розробкою та застосуванням криптографічних алгоритмів для ефективної роботи на пристроях з обмеженими обчислювальними ресурсами. Ці алгоритми зазвичай називають «полегшеними» алгоритмами криптографії. «Легкі» не означає, що вони не є криптостійкими, а швидше те, що вони повинні бути ефективними та вимагати мінімальних ресурсів для своєї реалізації та виконання.

Розробка та стандартизація легковагових криптографічних алгоритмів є постійним процесом, оскільки швидкість розвитку технологій та вимоги безпеки змінюються з часом. Тому багато вчених та дослідників продовжують працювати над вдосконаленням і розвитком нових «полегшених» алгоритмів, які задовольняють сучасним вимогам безпеки та ефективності. Найчастіше, розробники LWC змушені вибирати між трьома, часом взаємовиключними, вимогами до алгоритмів: безпекою, вартістю і продуктивністю.

На практиці не складає труднощів оптимізувати будь-які два параметра: безпеку і вартість, безпеку і

продуктивність або вартість і продуктивність, однак дуже важко поєднати всі три одночасно. Наприклад, для блокових шифрів довжина ключа забезпечує компроміс між безпекою та вартістю, кількість раундів забезпечує компроміс між безпекою та продуктивністю, а апаратна архітектура – між ціною та продуктивністю. Розробка легковагових криптографічних алгоритмів вимагає балансування цих компромісів, щоб забезпечити належний рівень безпеки та ефективності в умовах обмежених ресурсів.

Аналіз останніх джерел

Проектуванням, розробкою та дослідженням алгоритмів легковагової криптографії займається велика кількість науковців і криптографів, серед яких C. Dobraunig, M. Eichlseder, F. Mendel, M. Schläffer, J. Daemen, G. Bertoni, D. Bernstein, T. Lange, A. Bogdanov та багато інших. Серед українських вчених різні питання створення та використання легковагових алгоритмів для захисту систем з обмеженими ресурсами розглядали такі дослідники як Я. Совин, Ю. Наконечний, І. Опірський, М. Стахів, В. Семеренко, В. Дудикевич, І. Собчук, Л. Ракобовчук, М. Родінко та інші.

Висвітленню процесу стандартизації легковагової криптографії присвячено ряд публікацій [1, 2]. У роботах [3–6] здійснено аналіз та оцінку показників роботи апаратних та програмних реалізацій легковагових алгоритмів на різних платформах за певних сценаріїв використання. Наприклад, у роботі [4] показано, що алгоритми, ASCON, TinyJambu, Xoodyak досягли в 10–25 разів кращої енергоефективності, ніж ISAP, Elephant та Grain-128AEAD при обробці однакової кількості біт.

Робота [7] надає оцінку криптографічного алгоритму-переможця ASCON для реальних IoT-застосувань. Зазначається, що ASCON потребує близько 0.2% RAM та 0.1% CPU для шифрування повідомлення довжиною 10 байт на Raspberry Pi Zero, у той час коли AES потребує близько 0.4% RAM та 0.2% CPU для шифрування такого ж повідомлення на тому самому пристрої.

У роботі [8] особлива увага приділяється аналізу вразливостей 10 алгоритмів-фіналістів конкурсу NIST зі стандартизації легковагової криптографії до атак з використанням помилок.

Разом з тим, варто зазначити, що процес стандартизації легковагової криптографії залишається недостатньо висвітленим в українській науковій літературі, що стало підгрунтям для обрання теми нашого дослідження.

Метою роботи є огляд та порівняльний аналіз алгоритмів-фіналістів конкурсу NIST зі стандартизації легковагової криптографії. В рамках статті планується описати основні конструкції та криптографічні примітиви, що лежать в основі алгоритмів-фіналістів. Стаття також має на меті провести дослідження специфікацій кожного алгоритму, проаналізувати їх можливі варіанти та модифікації, порівняти алгоритми-фіналісти за рядом характеристик (розміри ключа, блоку, стану, тегу, режими роботи тощо), оцінити показники їх безпеки проти відомих типів атак.

Виклад основного матеріалу

Національний інститут стандартів і технологій (National Institute of Standards and Technology, NIST) почав дослідження легковагової криптографії ще у 2013 році. Після декількох воркшопів і обговорень із зацікавленими сторонами в уряді, промисловості та наукових колах, у 2015 році NIST ініціював процес стандартизації алгоритмів, які б забезпечували функції автентифікованого шифрування та хешування для обмежених середовищ, де продуктивність поточних криптографічних стандартів NIST була неприйнятною.

У 2018 році було оголошено конкурс NIST Lightweight Cryptography з метою визначення стандарту легковагової криптографії та опубліковано основні вимоги до учасників конкурсу [9]. Алгоритми шифрування повинні забезпечувати автентифіковане шифрування з приєднаними даними (Authenticated Encryption with Associated Data, AEAD), тобто поєднувати як шифрування, так і автентифікацію в одному криптографічному алгоритмі. AEAD дозволяє не лише забезпечити конфіденційність та цілісність повідомлення, але й автентифікувати додаткові дані, які не підлягають шифруванню. Для перевірки автентичності даних використовується тег автентифікації (tag), що є унікальним значення фіксованого розміру, обчислення якого зазвичай відбувається за допомогою деякої криптографічної функції хешування. Відомі існуючі на той момент «легкі» криптографічні алгоритми такі як ACORN, PRESENT, CLEFIA, GRAIN, SIMON та інші не забезпечували шифрування і автентифікацію одночасно.

Учасникам було дозволено подавати на конкурс сімейство (не більше 10) алгоритмів, де члени сімейства можуть відрізнятися зовнішніми параметрами (наприклад, довжиною ключа) або внутрішніми параметрами (наприклад, кількістю раундів або розміром стану). Сімейство алгоритмів має включати одного основного члена, у якого довжина ключа щонайменше 128 біт, nonce (випадкове значення, що застосовуються для підвищення рівня безпеки) – 96 біт та тег – 64 біти. Обмеження на розміри вхідних даних (відкритий текст, приєднані дані та обсяг даних, які можна обробити з одним ключем) становить 2^{50}-1 байт. Для хеш-функцій обчислена довжина дайджесту (хешу) повинна бути щонайменше 256 біт, а максимальна довжина повідомлення 2^{50}-1 байт. Загальні компоненти алгоритмів хешування мають бути сумісні з AEAD-алгоритмами того самого сімейства. Основні критерії оцінки алгоритмів наступні:

1) *Стійкість до атак.* Алгоритм повинен бути стійким до методів лінійного та диференціального криптоаналізу, а також до таких типів атак як, атака бічними каналами (Side Channel Attack) та атаки на основі помилок (Fault Attack). Криптоаналітичні атаки мають потребувати щонайменше 2^{112} обчислень на класичному комп'ютері.

2) *Швидкодія на різних платформах.* Алгоритм повинен мати хорошу швидкодію на різних типах пристроїв, таких смартфони, смарт-карти, RFID-датчики, сенсори тощо. Швидкодія вимірюється за такими

показниками, як час шифрування, розшифрування, хешування одного блоку даних, пропускна здатність тощо.

3) *Енергоефективність.* Алгоритм повинен мати низьке енергоспоживання на пристроях, які працюють від батарейок або безпровідного живлення. Енергоефективність вимірюється за такими показниками, як кількість циклів процесора на один байт даних, кількість операцій на один байт даних, коефіцієнт енергоефективності тощо.

4) *Розмір коду.* Алгоритм повинен мати малий розмір коду для того, щоб займати менше пам'яті на обмежених пристроях. Розмір коду вимірюється за такими показниками, як кількість байт коду для реалізації алгоритму на C/C++, коефіцієнт стиснення коду тощо.

Загалом алгоритми-учасники конкурсу повинні були мати значно кращу ефективність в обмежених середовищах (апаратні та вбудовані програмні платформи) порівняно з поточними стандартами NIST.

У березні 2019 року NIST отримав 57 заявок з 25 різних країн, з яких 56 були прийняті до розгляду як кандидати для стандартизації у першому турі. Процес оцінки алгоритмів виконувався за допомогою відкритих методів та був доступним для перевірки й коментарів з боку громадськості та експертів. До другого туру, у серпні 2019 року, пройшли 32 алгоритми. Провівши складну процедуру відбору кандидатів, у 2021 році, було сформовано список 10 фіналістів, а саме ASCON, Elephant, GIFT-COFB, Grain-128AEAD, ISAP, PHOTON-Beetle, Romulus, SPARKLE, TinyJambu та Xoodyak. Зрештою, у лютому 2023 року NIST оголосив про рішення схвалити сімейство алгоритмів ASCON як новий стандарт легковагової криптографії.

Варто зазначити, що переважна частина алгоритмів-фіналістів використовують криптографічну губку як основу для своєї роботи. Криптографічна губка (Sponge) – це конструкція, яка може використовуватись для різноманітних криптографічних операцій, таких як хешування, шифрування, автентифікація та генерація випадкових чисел. Головна ідея губки полягає в тому, що вона може бути використана для обчислення функцій з різною фінальною довжиною виводу (дайджесту, шифру, тегу автентифікації тощо), шляхом зміни лише параметрів конструкції, а не її основного алгоритму. Найбільш відомий стандарт, який у своїй роботі використовує конструкцію губки є алгоритм хешування SHA-3 (Keccak).

Губка будується з трьох основних компонентів: функція доповнення pad, внутрішня функція перетворення f (зазвичай реалізовує псевдовипадкову перестановку за допомогою побітових операцій циклічного зсуву, XOR, AND, NOT) та внутрішній стан S (масив двійкових значень фіксованого розміру b (бітів)). Стан S поділяється на дві частини – бітрейт стану S_r та ємність стану S_c довжинами r та c відповідно, таким чином $b = r + c$. Бітрейт відповідає за швидкість обробки відкритого тексту, в той час як ємність відповідає за рівень безпеки.

Схематично структуру губки зображено на рис. 1 [10]. Спочатку вхідне повідомлення M, за допомогою функції доповнення pad, доповнюється (за необхідності) до довжини кратній бітрейту r та ділиться на блоки P_i. Потім b біт стану ініціалізуються нулем, і подальша робота губки проводиться в 2 етапи.

Поглинання (Absorbing). Вхідні дані подаються в губку блоками фіксованого розміру r. Губка послідовно абсорбує (поглинає) ці блоки даних – блок P_i додається за модулем 2 з бітрейтом стану S_r: $S = (S_r \oplus P_i)$, після чого проводиться перестановка із використанням внутрішньої функції перетворення f: $S = f(S)$. Така послідовність дій виконується з усіма блоками повідомлення.

Вижимання (Squeezing). Після поглинання губка переходить у режим вижимання, де вона «вичавлює» дані фіксованої довжини (або будь-якої потрібної довжини) зі свого внутрішнього стану. Це може бути хеш-значення, зашифрований текст або інші вихідні дані. Тепер на кожній ітерації формується вихідна послідовність бітів Z_i, елементами якої є біти бітрейту стану S_r: $Z_i = S_r$, а до стану знову застосовується перестановка f: $S = f(S)$. І це повторюється стільки разів, скільки блоків Z_i потрібно. У результаті отримується вихідне значення Z потрібної довжини l. У разі перевищення потрібної довжини результату зайві біти відкидають.

Для шифрування розробники передбачили дуплексний режим. Відмінність полягає в тому, що на кожній ітерації сформована послідовність бітів Z залежить від усіх раніше отриманих вхідних даних.

SPONGENT – це сімейство хеш-функцій, яке засноване на конструкції губки та використовує перестановку на зразок блокового шифру PRESENT [11]. SPONGENT має 13 варіантів, які позначають SPONGENT-$n/c/r$, де n – довжина хешу, c – ємність стану та r – бітрейт стану (наприклад, SPONGENT-128/256/128, SPONGENT-160/320/160, SPONGENT-224/448/224). Перестановка Spongent-π використовується як криптографічний примітив в алгоритмі-фіналісті Elephant і кількох інших LWC алгоритмах. Перестановка складається з трьох основних кроків: XOR бітів стану зі значенням, яке оновлюється за допомогою регістра зсуву лінійного зворотного зв'язку (LFSR), порозрядної підстановки з використанням 4-бітового S-боксу і бітової перестановки згідно таблиці.

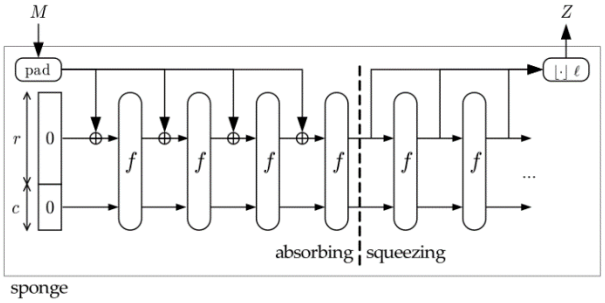


Рис. 1. Конструкція криптографічної губки (звичайний режим роботи)

Keccak – це сімейство універсальних хеш-функцій, яке базується на конструкції губки, має гнучкі параметри й може використовуватися як для хешування, так і для автентифікованого шифрування або генерації псевдовипадкових послідовностей [12]. У 2015 році NIST оголосив Keccak новим примітивом для використання в SHA-3 (Secure Hash Algorithm 3).

У Keccak основним примітивом є функція перестановки Keccak-f, обрана з набору 7 перестановок, позначених Keccak-f[b], де $b = 25 \times 2^{\ell}$ – розмір стану, ℓ – ціле число від 0 до 6. Keccak-f використовує операції XOR, AND і NOT, і розрахована на просту реалізацію як на програмному, так і апаратному рівнях. Кількість раундів може бути $12 + 2 \times \ell$ та відрізнятися в залежності від версії Keccak і необхідного рівня безпеки. Основна реалізація SHA-3 використовує значення $\ell = 6$, тобто має 1600 бітовий внутрішній стан і 24 раунди.

Стан S є тривимірним масивом розмірністю $5 \times 5 \times w$, де $w = 2^{\ell}$ біт. Складові масиву стану можуть бути представлені у вигляді рядка (raw), стовпчика (column), зрізу (slice), смуги (lane), площини (plane) тощо.

Кожен раунд Keccak-f складається з послідовного застосування кроків описаних нижче.

- θ (theta) – на цьому кроці стан розглядається як двовимірний масив (5×5), де кожен елемент масиву складається з одного слова довжиною w біт. Якщо позначити цей масив через $A(x, y)$, де $x, y = 0,1,\ldots,4$, то на кроці θ виконуються такі операції:

$$C[x] = A[x,0] \oplus A[x,1] \oplus A[x,2] \oplus A[x,3] \oplus A[x,4], \quad x = 0,1,2,3,4;$$

$$D[x] = C[x-1] \oplus rot(C[x+1],1), \quad x = 0,1,2,3,4;$$

$$A[x, y] = A[x, y] \oplus D[x], \quad x, y = 0,1,2,3,4.$$

$C[x]$ і $D[x]$ є одновимірними масивами, які містять п’ять слів довжиною w біт. Символ $\oplus$ позначає побітову операцію XOR двох w -бітових операндів, а $rot(C[x+1],1)$ виконує поворот операнда на один біт (в напрямку осі z). Усі індекси беруться за модулем 5, наприклад, $C[-1]$ означає $C[4]$.

- ρ (rho) – на цьому кроці відбувається обертання кожного біта стану на певне значення, залежно від його координат. В результаті чого отримується новий масив B:

$$B[y, 2x+3y] = rot(A[x, y], r[x, y]), \quad x, y = 0,1,2,3,4.$$

Операція $rot([x, y], i)$ повертає у масиві A одне слово на i бітових позицій праворуч відносно осі z. Кількість обертань становить $r[x, y]$ та визначається таблицею констант обертання, створеною розробниками.

- π (pi) – цей крок виконує перестановку координат кожного біта стану, що полягає у зміні положення смуг.
- χ (chi) – на цьому кроці виконується нелінійне перетворення кожного рядка стану за допомогою операцій XOR, NOT та AND і застосовується до площини за раз. Крок χ маніпулює масивом B, обчисленим на попередньому кроці, і розміщує результат у масиві стану A:

$$A[x, y] = B[x, y] \oplus \left(\left(\overline{B[x+1, y]}\right) \wedge B[x+2, y]\right), \quad x, y = 0,1,2,3,4.$$

$\overline{B[i, j]}$ позначає побітове доповнення смуги за адресою [i, j], а ∧ є порозрядна логічна операція AND двох операндів. Як і на всіх інших етапах, індекси беруться за модулем 5.

- ι (iota) – цей крок, виконує XOR смуги з раундовою константою в точці [0,0] масиву стану A:

$A[0,0] = A[0,0] \oplus RC[i]$.

Розглянемо детальніше 10 алгоритмів-фіналістів конкурсу NIST LWC та основні принципи їх роботи.

ASCON – сімейство алгоритмів, що базується на конструкції криптографічної губки, з однойменною перестановкою ASCON всередині. ASCON включає 7 варіантів криптографічних алгоритмів, що надають широкий спектр функціональних можливостей для вирішення різноманітних завдань безпеки, основні з яких – автентифіковане шифрування з приєднаними даними та хешування.

До AEAD-алгоритмів належать блокові шифри ASCON-128 та ASCON-128a. Також існує ще один варіант шифрування під назвою ASCON-80pq, який володіє стійкістю до квантового пошуку ключів. Ці шифри характеризуються довжиною ключа k, розміром блоку даних r, кількістю раундів a для перестановок p^a на початковій та завершальній стадіях і кількістю раундів b для перестановок p^b на проміжних стадіях.

ASCON-128 та ASCON-128a використовують 128-бітові ключі та 64-бітовий та 128-бітовий блоки вхідних даних відповідно. Також обидві конфігурації використовують 12 раундів перестановок p^a. А от кількість раундів перестановок p^b відрізняються: ASCON-128 передбачає 6 раундів, ASCON-128a – 8.

Для хешування ASCON пропонує набір хеш-функцій ASCON-Hash та ASCON-Hasha, ASCON-Xof та ASCON-Xofa. Хеш-функції ASCON-Hash та ASCON-Hasha обробляють блоки вхідних даних r довжиною 64 біт, а на виході отримують хеш довжиною 256 біт. Основна відмінність полягає в кількості раундів перестановок p^b, зокрема у першої функції – це 12 раундів, у другої – 8. Розробниками рекомендується поєднувати між собою ASCON-128 та ASCON-Hash (працюють з однаковим розміром блоку), або ASCON-128a та ASCON-Hasha (мають однакове значення p^b).

Головні процеси в шифрах ASCON – це дві 320-бітні перестановки p^a та p^b, які здійснюються над внутрішнім станом S. В процесі перестановок послідовно використовується перетворення, засноване на SP-мережі. Воно складається з етапів додавання констант, заміни за допомогою S -box та лінійної дифузії з 64-бітними дифузійними функціями.

Elephant – це також блоковий шифр на основі перестановок, що підтримує AEAD. Для автентифікації використовується процедура Encrypt-then-MAC – відкритий текст спочатку шифрується із застосуванням секретного ключа та алгоритму шифрування, а потім на основі отриманого зашифрованого тексту обчислюється MAC. Elephant був спроектований таким чином, щоб його роботу можна було легко розпаралелити.

Розробники представили три модифікації: дві з них – Dumbo та Jumbo використовують перестановку Spongent на 160 та 176 біт відповідно (забезпечують різний рівень безпеки), а третя – Delirium використовує перестановку Keccak на 200 біт. Усі три варіанти використовують LFSR для маскування. Основне маскування, що використовується в автентифікованому шифруванні, складається з LFSR і перестановки (Spongent або Keccak).

Dumbo і Jumbo мають розмір тегу 64 біти, тоді як Delirium – 128 біт. Розмір ключа становить 128 біт, а тегу – 96 біт для всіх трьох варіантів. Рівні безпеки, які вони забезпечують – 112 біт, 127 біт і 127 біт відповідно.

Алгоритм шифрування отримує на вхід ключ, nonce, приєднані дані та повідомлення, і повертає зашифрований текст та тег для автентифікації, розшифрування отримує на вхід ті самі параметри, але повертає розшифроване повідомлення, якщо тег коректний.

GIFT-COFB – легковаговий криптографічний алгоритм, який базується на блоковому шифрі GIFT-128 та використовує режим COFB (COmbined FeedBack). Його головною особливістю є ефективне поєднання GIFT-128 із зовнішнім режимом COFB, який дозволяє забезпечити автентифікацію шифрування без необхідності виконання складних операцій інверсії при розшифруванні. Режим COFB обрано для мінімізації розміру апаратної реалізації, що має значення для простоти та ефективності криптографічних алгоритмів.

Алгоритм GIFT-COFB використовує 128-бітний блок та 128-бітний тег. Його криптографічний примітив, GIFT-128, є 40-раундовим SPN-шифром зі структурою, подібною до AES, та ключем довжиною 128 біт. Кожен раунд складається з наступних операцій: ініціалізація, перетворення комірок, перестановка бітів та додавання раундового ключа. Існує альтернативна реалізація другого етапу – з використанням look-up table (LUT). В стандартному підході використовується послідовність бітових операцій для здійснення необхідних перетворень, а в LUT-варіанті – таблиця заздалегідь обчислених значень. Застосування другого способу може покращити ефективність, але автори наголошують, що він є повільнішим, ніж виконання бітових операцій.

Алгоритм шифрування приймає на вхід ключ шифрування K, блок асоційованих даних A та блок відкритого тексту M і генерує шифротекст C та тег автентифікації T таким чином, щоб $|C| = |M|$ і

$|\mathrm{T}| = n$, де n – розмір блоку шифрування в бітах. GIFT-COFB використовує значення n =128, функції доповнення (Padding Function) та зворотнього зв'язку (Feedback Function). Алгоритм дешифрування повертає вихідні дані M або $\perp$, якщо автентифікація не пройшла.

Grain-128AEAD – один із небагатьох біт-орієнтованих потокових алгоритмів з автентифікацією, представлених на конкурсі, оптимізований для апаратної реалізації. Він базується на шифрі Grain, в основі якого є регістри зсуву із зворотнім зв'язком. Версія Grainv1 була обрана фіналістом у 2008 році у профілі апаратних реалізацій в eSTREAM portfolio. Версія Grain-128a включена в стандарт ISO/IEC 29167-13:2015 для систем ідентифікації RFID. Алгоритм Grain-128AEADv2 схожий на Grain-128a, але був допрацьований для підтримки тегів більшого розміру та підтримки AEAD.

Grain-128AEADv2 складається з двох основних блоків: генератора гами, який побудовано з використанням лінійного (LFSR) та нелінійного (NFSR) регістрів зсуву і спеціальної функції для створення гами, та генератора тегу, що містить в собі регістр зсуву та акумулятор, біти якого залежать від гами та бітів відкритого тексту одночасно. Тег формується з усіх бітів акумулятора, які утворилися після оброблення вхідного тексту, та має розмірність 64 біти. Розміри регістрів LFSR та NFSR – по 128 біт кожен. Перед початком роботи алгоритм ініціалізує всі компоненти, використовуючи ключ, довжиною 128 біт, та nonce, довжиною 96 біт. Кількість раундів, зазначена авторами для фази ініціалізації – 512.

В режимі AEAD асоційовані дані не шифруються, але вони приймають участь у формуванні тегу. Алгоритм передбачає наявність бітової маски для виокремлення інформації, яка не потребує шифрування, але має бути автентифікованою. Її використання забезпечує гнучкість алгоритму, так як вона дозволяє включати незашифровані дані не тільки на початку, а і в будь-яких позиціях переданого набору бітів.

ISAP – це сімейство автентифікованих шифрів на основі перестановок, представлене чотирма варіантами: ISAP-A-128A, ISAP-K-128A, ISAP-A-128 і ISAP-K-128. Всі вони спроектовані для забезпечення 128-бітної безпеки від криптоаналітичних атак і відповідний рівень стійкості до атак бічними каналами, але два з них використовують 320-бітну перестановку Ascon-p, а інші – 400-бітну перестановку Keccak-f.

Розміри ключа, nonce та тегу для всіх згаданих варіантів – 128 біт. Значення кількості раундів представлене 4 числами. Перше – кількість раундів для фази автентифікації, друге – для обробки значення nonce у функції зміни ключа, третє – для фаз шифрування та дешифрування, і останнє – для генерації сесійних ключів у функції зміни ключа. Для ISAP-A-128A це значення виглядає як 16/1/8/8, для ISAP-K-128A – 12/1/6/12, для ISAP-A-128 – 20/12/12/12, для ISAP-K-128 – 12/12/12/12.

ISAP використовує підхід Encrypt-then-MAC, де шифрування виконується шляхом XOR-повідомлення та згенерованого потоку ключів, а автентифікація здійснюється на основі схеми Hash-then-MAC. Шифрування побудоване на базі конструкції губки в потоковому режимі з однією особливістю: спочатку викликається функція зміни ключа IsapRk для генерації підключа K_e, після чого все виконується в звичайному режимі. Функція IsapEnc отримує на вхід ключ K, nonce N та довільне велике повідомлення M і генерує шифротекст C розміром $|M|$. IsapEnc працює в режимі потокового шифрування, тому розшифрування ідентичне, за винятком того, що значення M і C міняються місцями.

Конструкція має можливість зміни ключа перед кожним застосуванням губки, що робить її стійкою до пасивних атак бічними каналами, зокрема атак типу DPA і SPA. Всі варіанти ISAP забезпечують конфіденційність повідомлення та цілісність шифротексу, включаючи асоційовані дані.

PHOTON-Beetle – це сімейство схем автентифікованого шифрування та хеш-функцій, яке використовує перестановку PHOTON256. Рекомендованими варіантами шифрування є PHOTON-Beetle[32] та PHOTON-Beetle [128], які відрізняються значеннями рейту. Також запропоновано хеш-функцію – PHOTON-Beetle-Hash [32]. PHOTON-Beetle-AEAD ґрунтується на «губкоподібному» режимі AEAD Beetle з комбінованим зворотним зв'язком, тоді як PHOTON-Beetle-Hash базується на структурі губки.

Перестановка PHOTON256 складається з 12 раундів, у кожному з яких виконуються операції AddConstant, SubCells, ShiftRows та MixColumnSerial. AddConstant забезпечує додавання фіксованих констант до комірок внутрішнього стану, SubCells застосовує 4-бітний S-Box до кожної з комірок, ShiftRow змінює позиції комірок в кожному рядку, а MixColumnSerial відповідає за перемішування стовпців шляхом множення визначеної матриці на матрицю стану.

Функція шифрування приймає на вхід ключ шифрування K, nonce N, асоційовані дані A та повідомлення M і повертає шифротекст C та тег T. Відповідно алгоритм дешифрування як вхідні дані приймає значення K, N, A, C і T та повертає відповідне відкрите повідомлення M, якщо тег перевірено.

PHOTON-Beetle-Hash приймає повідомлення будь-якої довжини і генерує хеш-значення довжиною 256 біт. Повідомлення розділяється на блоки, які послідовно обробляються за допомогою перестановки PHOTON256, а значення хешу скорочується до двох частин по 128 біт кожна.

Romulus – це сімейство алгоритмів автентифікованого шифрування з асоційованими даними (AEAD) і хеш-функції, яке базується на твіковому блочному шифрі Skinny-128-384+ (варіант Skinny-128-384, але замість 56 раундів використовуються 40).

Romulus має кілька варіантів: Romulus-N (з підтримкою унікального nonce), Romulus-M (стійкий до неправильного використання nonce), Romulus-T (стійкий до витоків) і Romulus-H (хеш-функція). Romulus-N використовує режим зі зворотнім зв'язком із комбінованим множником на основі змінного блочного шифру, Romulus-M – режим MAC-then-Encrypt, Romulus-T – режим Encrypt-then-MAC.

AEAD варіанти Romulus мають наступні параметри: довжина ключа, розміри nonce та тегу дорівнюють 128 біт. Для Romulus-H характерними ознаками є розмір блоку 256 біт та розмір дайджесту 256 біт.

Базова структура алгоритму включає в себе ініціалізацію з початковим налаштуванням внутрішнього стану, 40 раундів шифрування та формування шифротексту на базі остаточного внутрішнього стану блоку. Кожен раунд включає в себе операції, які ускладнюють структуру шифру і роблять його стійким до криптоатак. До них відносять SubCells (заміна значень кожної комірки стану блоку згідно з таблицею S-Box), AddConstants (генерація та додавання раундових констант до матриці стану), AddRoundTweakey (об'єднання перших двох рядків твікового ключа і стану блоку), ShiftRows (зсув рядків), та MixColumns (перемішування стовбців шляхом множення на визначену матрицю).

SPARKLE – це сімейство шифрів перестановки, яке включає схеми автентифікованого шифрування SCHWAEMM (Sponge-based cipher for Hardened but Weightless Authenticated Encryption on Many Microcontroller) та хеш-функції ESCH (Efficient Sponge-based and Cheap Hashing). Існують наступні варіанти SCHWAEMM: SCHWAEMM256-128, SCHWAEMM128-128, SCHWAEMM192-192 та SCHWAEMM256-256. Перше число в назві означає розмір nonce, друге – розмір ключа (в бітах). Розмір тегу для кожного з варіантів співпадає з розміром ключа, значення рейту – з розміром nonce. Рівень безпеки, який вони забезпечують, відповідно 120, 120, 184 і 248 біт. Проте він є дійсним тільки при унікальному використанні nonce.

Стосовно хеш-функцій, є два варіанти: ESCH256 (розмір дайджесту – 256 біт, рейт – 128 біт) та ESCH384 (розмір дайджесту – 384 біт, рейт – 128 біт). Перший забезпечує рівень безпеки на рівні 128 біт, другий – 192 біт.

AEAD-шифри SCHWAEMM побудовані на основі схеми подвійної губки з комбінованим зворотним зв'язком, хеш-функції – на основі губки. Перестановку SPARKLE побудовано за принципом ARX (Addition-Rotation-XOR) структури. Вона має 3 різновиди, залежно від розміру блоку – SPARKLE256, SPARKLE384 та SPARKLE512. Кожен з них має дві версії – slim та big, які відрізняються кількістю кроків, що використовуються. Slim версії мають меншу кількість кроків для оптимізації продуктивності на платформах з обмеженими ресурсами, тоді як big версії забезпечують більший рівень безпеки.

TinyJAMBU – це схема автентифікованого шифрування, розроблена на основі кандидата JAMBU третього раунду конкурсу CAESAR. Основною складовою режиму є ключова перестановка (без розкладу ключа), яка базується на 128-бітовому нелінійному регістрі зворотного зв'язку. Кожен раунд використовує операцію NAND для забезпечення нелінійності.

Є три варіанти AEAD для даної схеми з різною кількістю раундів (представлена у вигляді двох чисел, де перше – кількість раундів, що використовується для налаштування ключа, обробки тексту та генерації перших 32 біт тегу, а друге – кількість раундів, які застосовуються для обробки nonce, асоційованих даних та генерації останніх 32 біт тегу): TinyJAMBU-128 (128-бітовий ключ, 1024/640 раундів), TinyJAMBU-192 (192-бітовий ключ, 1152/640 раундів), TinyJAMBU-256 (256-бітовий ключ, 1280/640 раундів). Розмір nonce дорівнює 96 біт, тегу – 64, стану – 128 біт для всіх вище зазначених варіантів.

У TinyJAMBU використовується 128-бітний ключова перестановка P_n, що складається з n раундів. У кожному і-му раунді використовується 128-бітний нелінійний регістр зворотного зв'язку для оновлення стану. На 32-бітному процесорі можна обчислити 32 раунди перестановки паралельно.

Процес шифрування в алгоритмі TinyJAMBU складається з наступних кроків: ініціалізація початкового стану на основі ключа та nonce, обробка асоційованих даних шляхом застосування фрагментів FrameBits та 32-бітних блоків AD до стану S за допомогою перестановки P 640, шифрування з використанням перестановок P 1024 (TinyJAMBU-128), P 1152 (TinyJAMBU-192) або P 1280 (TinyJAMBU-256), та завершення і отримання 64-бітного тегу, який представляє фінальні 64 біта стану S.

Xoodyak – це універсальний криптографічний примітив, який функціонує як схема автентифікованого шифрування на основі перестановки і як алгоритм хешування. Він побудований на основі фіксованої перестановки з 384-бітовим станом, яка має назву Xoodoo, і працює в режимі Cyclist. Вона використовує тривимірний масив з розмірами 3x4x32 біт, забезпечуючи нелінійність за допомогою простих операцій над 3-бітовими стовпчиками та лінійного змішування між рівнями.

Xoodyak пропонує два режими роботи: хешування та шифрування з ключем, один з яких обирається при ініціалізації. У режимі хешування, він може абсорбувати вхідні рядки даних і отримувати з них дайджести за потреби. Функція Absorb(X) абсорбує вхідний рядок X, тоді як функція Squeeze(ℓ) видає дайджест довжиною ℓ байтів в залежності від вже абсорбованих даних. Режим з ключем забезпечує можливість потокового шифрування, обчислення MAC та автентифікованого шифрування.

Функція Ratchet() в алгоритмі використовується для динамічного оновлення підключів, що ускладнює задачу відновлення ключів або аналізу залежності між різними комунікаційними сесіями.

Для AEAD варіанту Xoodyak визначено наступні параметри: розміри ключа, nonce та тегу – по 128 біт, значення рейту – 192 біта, кількість раундів – 12. Хеш-варіант алгоритму має розмірність дайджесту 256 біт та значення рейту – 130 біт.

Загальні характеристики алгоритмів-фіналістів наведено у таблицях 1 та 2. Як показано в таблиці 1, більшість (сім) фіналістів є алгоритмами на основі криптографічної губки, два фіналісти є представниками блокових шифрів та один потоковий шифр.

Таблиця 1

Загальні характеристики AEAD-алгоритмів NIST LWC

Алгоритм-фіналіст	Варіант	Основний примітив	Режим роботи	Ключ (біт)	Nonce (біт)	Тег (біт)
ASCON	ASCON-128	ASCON Permutation	MonkeyDuplex	128	128	128
	ASCON-128a			128	128	128
	ASCON-80pq			160	128	128
Elephant	Dumbo	Spongent-π[160]	Encrypt-then-MAC	128	96	64
	Jumbo	Spongent-π[176]		128	96	64
	Delirium	Keccak-*f*[200]		128	96	128
GIFT-COFB	GIFT-COFB	GIFT-128	Combined Feedback	128	128	128
Grain-128 AEAD	Grain-128AEAD	Feedback shift register	Encrypt-and-MAC	128	96	64
ISAP	ISAP-A-128a	ASCON Permutation	Encrypt-then-MAC	128	128	128
	ISAP-K-128a	Keccak-*f* [400]		128	128	128
	ISAP-A-128	ASCON Permutation		128	128	128
	ISAP-K-128	Keccak-*f* [400]		128	128	128
PHOTON-Beetle	PHOTON-Beetle-AEAD[128]	$PHOTON_{256}$ Permutation	Sponge with Combined Feedback	128	128	128
	PHOTON-Beetle-AEAD[32]			128	128	128
Romulus	Romulus-N	Skinny-128-384+ Tweakable Block Chipher	Combined Feedback	128	128	128
	Romulus-M		MAC-then-Encrypt	128	128	128
	Romulus-T		Encrypt-then-MAC	128	128	128
SPARKLE	SCHWAEMM256-128	$SPARKLE_{384}$	Sponge with Combined Feedback	128	256	128
	SCHWAEMM128-128	$SPARKLE_{256}$		128	128	128
	SCHWAEMM192-192	$SPARKLE_{384}$		192	192	192
	SCHWAEMM256-256	$SPARKLE_{512}$		256	256	256
TinyJAMBU	TinyJAMBU-128	Keyed Permutation	Sponge	128	96	64
	TinyJAMBU-192			192	96	64
	TinyJAMBU-256			256	96	64
Xoodyak	Xoodyak	Xoodoo Permutation	Cyclist	128	128	128

Таблиця 2

Загальні характеристики алгоритмів хешування NIST LWC

Алгоритм-фіналіст	Варіант	Основний примітив	Режим роботи	Дайджест (біт)
ASCON	ASCON-Hash	ASCON Permutation	Sponge	256
	ASCON-Hasha			256
PHOTON-Beetle	PHOTON-Beetle-Hash [32]	$PHOTON_{256}$ Permutation	Sponge	256
Romulus	Romulus-H	Skinny-128-384+	MDPH[1]	256
SPARKLE	$ESCH_{256}$	$SPARKLE_{384}$	Sponge	256
	$ESCH_{384}$	$SPARKLE_{512}$		384
Xoodyak	Xoodyak	Xoodoo Permutation	Sponge	256

[1]MDPH означає Merkle-Damgard з перестановкою та використанням функції стиснення Hirose DBL

В таблиці 3 наведено результати комплексної оцінки криптографами NIST безпеки кожного з десяти алгоритмів-фіналістів відповідно до кількох ключових аспектів. Кількість доступних реалізацій дає загальну картину наявності та різноманітності варіантів для кожного алгоритму.

Важливо відзначити, що реалізації алгоритмів-фіналістів пройшли детальне дослідження з боку незалежних експертів, що підтверджує їх високий рівень безпеки. Наприклад, ASCON відрізняється великою кількістю аналізів і високим рівнем резервів безпеки, а результати атак на його раунди підкреслюють його надійність. Деякі алгоритми, такі як Elephant, хоча і мають високий рівень безпеки, показали вразливості до певних видів атак, зокрема на основі підстановки. Водночас, такі варіанти, як Romulus, здатні зменшувати кількість раундів для забезпечення більшої ефективності, але при цьому зберігають високий рівень стійкості.

Таблиця 3

Оцінка безпеки фіналістів

Алгоритм-фіналіст	Рівень безпеки	Атаки	Кількість раундів для атаки	Кількість AEAD реалізацій	Кількість Hash реалізацій	Кількість комбінованих реалізацій	Загальна кількість реалізацій
ASCON	Високий	Key-recovery, Distinguishers	7 (з 12) раундів ініціалізації	120	110	52	282
Elephant	Високий	Distinguishers	40 (з 80) раундів Spongent	6	-	-	6
GIFT-COFB	Високий	Key-recovery	27 (з 40) раундів GIFT-128	11	-	-	11

Алгоритм-фіналіст	Рівень безпеки	Атаки	Кількість раундів для атаки	Кількість AEAD реалізацій	Кількість Hash реалізацій	Кількість комбінованих реалізацій	Загальна кількість реалізацій
Grain-128 AEAD	Високий	Key-recovery	192 (з 512) раундів ініціалізації	6	-	-	6
ISAP	Високий	Forgery	4 (з 12) раундів	37	1	4	42
PHOTON-Beetle	Обмежений	Distinguishing	10 (з 12) раундів перестановки	20	10	16	46
Romulus	Високий	Key-recovery	32 (з 40) раундів Skinny, 23 (з 40) раунди (для хеш-варіанту)	32	11	27	70
SPARKLE	Високий	Key-recovery, Distinguishers	4,5 (з 11) етапів 384-бітної перестановки	25	13	3	41
TinyJAMBU	Середній	Weak-key distinguishing, Forgery	476 (з 1024) раундів, повний раунд TinyJambu-192 і TinyJambu-256 (для хеш-варіанту)	9	-	-	9
Xoodyak	Високий	Key-recovery	6 (з 12) раундів	9	8	1	18

Висновки

Легковагова криптографія є областю досліджень, яка активно розвивається та адаптується до нових викликів та потреб. З огляду на постійний розвиток криптографічних методів та збільшення обсягу цифрового обміну даними, стандартизація легковагової криптографії стає дедалі важливішою. Саме стандартизація сприяє покращенню якості та безпеки легковагових криптографічних алгоритмів, оскільки вона стимулює їх дослідження та криптоаналіз.

Конкурс NIST вивів на передній план різноманітність легковагових алгоритмів, що пропонують різні підходи щодо безпеки та ефективності. Кожен з цих алгоритмів має свої унікальні характеристики, які визначають його придатність для конкретних сценаріїв використання. Багато алгоритмів показали хороші результати роботи при обмежених обчислювальних ресурсах, що дозволяє їх використовувати на платформах з низькою обчислювальною потужністю, зберігаючи при цьому надійний рівень захисту. З огляду на це, подальші дослідження зосереджуватимуться на можливостях застосування легковагових криптографічних алгоритмів у реальних системах з обмеженими ресурсами.

References

1. Gookyi N., Agyemanh D., Kanda G., Ryoo K. NIST Lightweight Cryptography Standardization Process: Classification of Second Round Candidates, Open Challenges and Recommendations. Journal of Information Processing Systems, Vol. 17, No. 2, pp. 253-270, Apr. 2021. doi.org/10.3745/JIPS.03.0156

2. Turan M. S. Status Report on the Final Round of the NIST Lightweight Cryptography Standardization Process. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 2022. doi.org/10.6028/nist.ir.8454

3. Hira R. Software Evaluation for Second Round Candidates in NIST Lightweight Cryptography. Journal of Information Processing. 2023. Vol. 31. P. 205–219. doi.org/10.2197/ipsjjip.31.205

4. Elsadek I. Hardware and Energy Efficiency Evaluation of NIST Lightweight Cryptography Standardization Finalists. 2022 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Austin, TX, USA, 27 May – 1 June 2022. doi.org/10.1109/iscas48785.2022.9937643

5. Birleanu F. G., Bizon N. Quick Analysis of the NIST Lightweight Cryptography Standardization Process Finalists. 2022 14th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), Ploiesti, Romania, 30 June – 1 July 2022. doi.org/10.1109/ecai54874.2022.9847450

6. Buchanan W.J., Leandros M. Review of the NIST Light-weight Cryptography Finalist. 2023. doi.org/10.48550/arXiv.2303.14785

7. Avery J. Analysis of Practical Application of Lightweight Cryptographic Algorithm ASCON. Available at: https://csrc.nist.gov/csrc/media/Events/2022/lightweight-cryptography-workshop-2022/documents/papers/analysis-of-practical-application-of-lwc-cryptographic-algorithm-ascon.pdf (Accessed 06 August 2023).

8. Madushan H., Salam I., Alawatugoda J. A Review of the NIST Lightweight Cryptography Finalists and Their Fault Analyses. Electronics. 2022. Vol. 11, no. 24. P. 4199. doi.org/10.3390/electronics11244199

9. NIST. Submission Requirements and Evaluation Criteria for the Lightweight Cryptography Standardization Process. (2018). Available at: https://csrc.nist.gov/CSRC/media/Projects/Lightweight-Cryptography/documents/final-lwc-submission-requirements-august2018.pdfhttps://csrc.nist.gov/CSRC/media/Projects/Lightweight-Cryptography/documents/final-lwc-submission-requirements-august2018.pdf (Accessed 06 August 2023).

10. Bertoni G. Duplexing the Sponge: Single-Pass Authenticated Encryption and Other Applications. Selected Areas in Cryptography. Berlin, Heidelberg, 2012. P. 320–337. doi.org/10.1007/978-3-642-28496-0_19

11. Bogdanov A. SPONGENT: The Design Space of Lightweight Cryptographic Hashing. IEEE Transactions on Computers. 2013. Vol. 62, no. 10. P. 2041–2053. doi.org/10.1109/tc.2012.196

12. Paar C., Pelzl J. Understanding cryptography: A textbook for students and practitioners. Heidelberg: Springer, 2010. 372 p. Available at: https://www.cryptotextbook.com/download/Understanding-Cryptography-Keccak.pdf.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-325-5-279-281
УДК 004.358

ЯСІНСЬКИЙ АНДРІЙ
Приватний вищий навчальний заклад
«Міжнародний економіко-гуманітарний університет імені академіка Степана Дем'янчука»
https://orcid.org/0000-0002-1894-1314
e-mail: yasinskiy@meta.ua
СОЛОВЕЙ ЛЮДМИЛА
Приватний вищий навчальний заклад
«Міжнародний економіко-гуманітарний університет імені академіка Степана Дем'янчука»
https://orcid.org/0009-0001-2832-1741
e-mail: lyuda_solovej@ukr.net
ГРИСЮК АНДРІЙ
Приватний вищий навчальний заклад «Міжнародний економіко-гуманітарний університет імені академіка Степана Дем'янчука»
https://orcid.org/0009-0007-2287-5982
e-mail: jdroidcoder@gmail.com

РОЗВИТОК ГЛОБАЛЬНО РОЗПОДІЛЕНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ІНФРАСТРУКТУР

Розподілені обчислювальні системи – це сучасний тренд розвитку комп'ютерних технологій, викликаний розвитком обчислювальних потужностей та розширенням послуг глобальної мережі. GRID технологія покликана забезпечити гнучкий, безпечний і скоординований загальний доступу до ресурсів.

У статті розглянуто характеристики розподілених обчислювальних інфраструктур. Уточнено поняття «розподілені обчислення», «GRID технологія». Виконано порівняння та аналіз можливостей розподілених технологій, типів GRID-систем як засобу спільного використання ресурсів; напрямків подальших досліджень, використання, розвитку та впровадження.

Ключові слова: GRID технологія, розподілені обчислення, віртуальна організація, віртуальний обчислювальний центр.

YASINSKIIY ANDRIY, SOLOVEI LIUDMYLA, HRYSYUK ANDRIY
Private higher educational institution «Academician Stepan Demianchuk International University of Economics and Humanities», Rivne

DEVELOPMENT OF GLOBALLY DISTRIBUTED COMPUTING INFRASTRUCTURES

Distributed computing systems are a modern trend in the development of computer technologies caused by the development of computing power and the expansion of global network services. GRID technology is designed to provide flexible, secure and coordinated shared access to resources.

The article discusses the characteristics of distributed computing infrastructures. The concepts of "distributed computing" and "GRID technology" have been clarified. A comparison and analysis of the capabilities of distributed technologies, types of GRID systems, as a means of sharing resources was performed; directions for further research, use, development and implementation. The main idea behind the development of GRID technology is to combine network resources and obtain a metacomputer, users of such a virtual environment manage the information processing process from a personal computer.

Successfully deployed, in many countries of the world, and implemented projects with the use of Grid technologies have shown its perspective. Modern Grid projects described in the literature allow to "virtualize" computing resources and provide the user with a system that "encapsulates" (hides) the details of its implementation. Prospects for creating GRID systems in Ukraine and the world are considered. Ukrainian scientists took the first steps in the development of Grid technologies together with their European colleagues. The implementation of Grid-systems in the practice of scientific research, the organization and implementation of complex technological calculations, the processing of large data sets for the formation of management decisions will require appropriate specialists.

Keywords: GRID technology, distributed computing, virtual organization, virtual computing center.

Постановка проблеми

Досліджуючи тенденції розвитку цифрового суспільства вчені сходяться на тому, що інформатизація вийшла на четвертий етап свого розвитку. Перший етап зафіксували разом з появою великих комп'ютерів (мейнфреймів), із появою персональних комп'ютерів суспільство вступило у другий етап інформаційного розвитку, третій етап формувався разом із розвитком та становленням Інтернету, що дало можливість об'єднати користувачів та надати доступ до цифрових інформаційних масивів, створило передумови спільного формування єдиного інформаційного простору та його використання. Поява Grid-технології викликана динамічним розвитком обчислювальних потужностей та удосконалення послуг Інтернету. Всесвітня Grid-мережа виступила технологічною платформою сумісного використання розподілених сховищ даних та їх децентралізованої обробки. Grid технологія дозволяє перейти від обміну даними між комп'ютерами до створення обчислювальної структури, що можна ототожнювати із масштабованим віртуальним комп'ютером.

Аналіз останніх джерел

Дослідники розподілено обчислювальних систем вважають Grid технологію однією з найбільш перспективних концепцій з точки зору розвитку комп'ютерних технологій. Авторами цієї концепції вважаються Ян Фостер з Арагонської національної лабораторії Чиказького університету і Карл Кессельман

з Інституту інформатики Університету Південної Каліфорнії. Вперше термін Grid-компьютінг (Grid-computing) було запропоновано цими вченими в 1998 році для узагальненого опису програмно-апаратної інфраструктури, що об'єднує комп'ютери та суперкомп'ютери в територіально-розподілену інформаційно-обчислювальну систему [1]. Незважаючи на значний розвиток Grid технологій, їх визначення стало класичним, це «погоджене, відкрите і стандартизоване середовище, яке забезпечує гнучке, безпечне, скоординоване розподілення ресурсів у рамках віртуальної організації» [2].

Формулювання цілей статті

Метою роботи є обґрунтування доцільності застосування GRID-систем як засобу спільного використання ресурсів в Україні та світі. Аналіз перспектив інтеграції Grid технологій в освітню галузь та необхідність адаптувати вимоги навчального процесу до підготовки фахівців здатних адекватно реагувати на виклики сучасні тенденції.

Виклад основного матеріалу

Вивчаючи тенденції та темпи розвитку Grid технологій, необхідно визнати, що ця структура не є домінуючою у сфері комп'ютерних технологій. Як у свій час Інтернет і Web проходили етапи становлення та поширення, формування попиту та розвитку пропозицій. Кількість користувачів Інтернету у світі переступила за мільярд після швидкого розвитку сервісних пропозицій та формування цифрового простору. Таку ж динаміку сьогодні демонструє і Grid, тому впевнено можна прогнозувати швидке зростання популярності послуг цієї технології. Grid системи підтримують спільне використання різних ресурсів у динамічних розподілених віртуальних організаційних структурах.

Ідея використання мережі суперкомп'ютерів для вирішення масштабних задач вперше була сформована у 60-х роках XX століття та тільки зараз отримала технологічну основу та набула завершеної форми «концепції Grid технології».

Із розширенням сфери використання комп'ютерних технологій швидко зростають об'єми обчислювальних задач та об'єми даних що обробляються. Значно збільшити потужності обчислювальних платформ можна через нові рішення в архітектурі комп'ютерів, тобто шляхом створення суперкомп'ютерів та через організацію обчислень з використанням обчислювальних мереж (метакомп'ютинг).

Головна ідея розвитку GRID технології полягає в тому, щоб подолати технологічні перепони між розрізненими, просторово-розподіленими обчислювальними системами. Об'єднуючи ресурси мережі можна отримати метакомп'ютер, користувачі такого віртуального обчислювального середовища отримують обчислювальну платформу, управління якою здійснюється із персонального комп'ютера.

Американські вчені досліджуючи технології створення масштабованих віртуальних організацій «ставлять за мету створення з географічно й організаційно розподілених компонентів віртуальних обчислювальних систем, що достатньо інтегровані, розробити бажану якість обслуговування». [3]

Користувачі Grid системи отримують доступ до віртуального обчислювального середовища, що забезпечує використання відділених обчислювальних ресурсів та масивів обчислювальних даних. Для користувача Grid системи відсутня проблема доступу до каналів передачі даних, протоколів та верифікації доступу до цифрових ресурсів. До головних компонентів Grid системи можна віднести суперкомп'ютери та суперкомп'ютерні центри, що об'єднані високошвидкісними мережами передачі даних. Сучасний стан Grid – технологій дозволяє сподіватись на швидке впровадження систем у практику розв'язування надскладних задач. Віртуалізація ресурсів мережі та створення обчислювального офісу відбувається без активної участі користувача. Користувач здійснює управління опрацюванням даних залишаючи поза увагою пошук даних та проблеми апаратно програмної реалізації доступу. Об'єднання потужностей та зменшення пауз у роботі апаратних засобів підвищує ефективність використання розподілених ресурсів віртуальної організації. Гетерогенність Grid технологій дозволяє адаптувати обчислювальну систему до роботи у складному апаратно-програмному цифровому середовищі. Інтероперабельність Grid технологій сприяє стандартизації інтерфейсів що забезпечує функціональну сумісність різних компонентів цифрового простору. GRID-система координує розрізнені ресурси створюючи унікальні обчислювальні кластери, що сприяє інтенсифікації обробки даних та сприяє опрацюванню інформації з різних баз даних колективним обчисленням (Collaborative Computing).

В сучасних умовах Grid системи дозволяють проводити обчислення об'ємних задач, що вимагають супер великих ресурсів пам'яті та значних процесорних потужностей. Grid системи здатна ефективно організувати вільні обчислювальні ресурсів для опрацювання нескладних задач. Технологія надає можливість створювати обчислювальні віртуальні машини для вирішення надскладних одноразових розрахункових задач. Для розв'язування наукових та технологічних завдань Grid системи дозволяють проводити обчислення із використанням великих об'ємів розподілених даних (Data-Intensive Computing).

Реальні проекти із застосуванням Grid технологій розгорнуті в багатьох країнах світу. Так, у 2001 році розпочато роботу над впровадженням проекту TeraGrid в США. Головна мета цього проекту – створити розподілену інфраструктуру для високопродуктивних обчислень. У 2004 році вчені Європейського Союзу започатковують проект DEISA, що дозволило об'єднати національні комп'ютерні центри цих країн. Успішно відпрацював усі поставлені задачі європейський проект DataGrid, який дозволив розробити обчислювальну інфраструктуру та обмін даними між науковими організаціями цих країн. На замовлення

Європейського центру ядерних досліджень започатковано міжнародний проект високопродуктивної наукової Grid-мережі EGEE (Enabling Grids for E-scienc). Проектна потужність цієї Grid системи об'єднає в єдиний віртуальний обчислювальний центр 20 000 потужних процесорів.

Активну участь у розвитку Grid технологій приймають і українські вчені. Група вчених Харківського фізико-технічного інституту у 2002 році успішно реалізувала спільний проект із вченими ЦЕРН (CERN, Женева, Швейцарія), об'єднавши у Grid систему власні обчислювальні ресурси. Наступні проекти українських вчених дозволили Grid систему для розвитку освітніх послуг та проведення наукових досліджень. Українська дослідницька академічна мережа УРАН успішно інтегрована до Європейської мережі GEANT-2.

У 2007 році українські фахівці долучились до створення національної Grid-структури для забезпечення наукових досліджень за програмою «Інформаційні та комунікаційні технології в освіті й науці на 2006—2010 роки». Учені НТУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» розробили проект Grid системи UGRID. Впродовж наступних років до цього проекту долучились цілий ряд провідних освітніх закладів та наукових установ, таких як Запорізький національні технічні університети, Інститут моделювання в енергетиці НАНУ, Інститут системного аналізу НАНУ, державне підприємство «Львівський науково-дослідний радіотехнічний інститут», компанія ЮСТАР та ін.

Успішний розвиток проекту дозволив вирішити важливу технологічну задачу – включення UGRID у спільну Grid-інфраструктуру Європи, що забезпечило її повноцінне функціонування. Реалізація цього проєкту надала можливість українським вченим активно співпрацювати з науковими структурами Європейського Союзу над створенням і розвитком Grid-технологій.

Базовим компонентом Європейського дослідницького простору (European Research Area, ERA), який динамічно розвивається впродовж останніх років, стають інформаційно-комунікаційні системи, що базуються на технологіях Grid-мереж.

Впровадження Grid-систем у практику наукових досліджень, організація та проведення складних технологічних обчислень, опрацювання великих масивів даних для формування управлінських рішень потребуватиме відповідних фахівців.

Розуміючи перспективу застосування технології розподілених обчислень, необхідно забезпечити підготовку відповідних фахівців у закладах вищої освіти. Освітні програми та навчальні плани необхідно зорієнтувати на формування відповідних кваліфікаційних показників та програмних результатів. Вже у 2008 році в Україні був виданий перший навчальний посібник, зорієнтований на вивчення Grid-технологій та їх використання в науці і освіті [4].

Перспективи та розвиток технології розподілених обчислень залежать від результатів перспективних наукових досліджень таких як: розробка високоефективних протоколів зв'язку, розвиток технологій телеприсутності, удосконалення методик проблемно-орієнтованих середовищ, розвиток автоматизованих систем управління ресурсами та ряд інших.

Висновки

Успішний розвиток проєктів, зорієнтованих на формування Grid-інфраструктур в Європи та передових країнах світу забезпечує їх повноцінне функціонування в багатьох галузях суспільного життя.

GRID-системи виявилися перспективними інформаційними технологіями що забезпечують розвиток високопродуктивних глобально-розподілених обчислювальних IT інфраструктур, здатні розвинути корпоративну співпрацю різнопланових обчислювальних систем.

Розвиток GRID-системи сприяє створенню інструментів для вирішення суспільно-економічних проблем, таких як формування ефективних інформаційно-комунікаційних систем з питань охорони здоров'я й екології, платіжних систем та казначейського обліку, загальнодержавного контролю, створення повнотекстових електронних бібліотек та розвиток електронної науки.

В найближчий час GRID-технологія буде інтегрована в освітній процес, стане технологічною платформою для організації дистанційного навчання, відкриє доступ до електронних навальних та наукових ресурсів, удосконалить систему доступу до юридичних та довідкових матеріалів.

References

1. Foster I., Kesselman C. The Grid: Blueprint for a New Computing Infrastructure. Morgan Kaufmann Publishers, 1998. 701 p.

2. Foster I. What is the Grid? A Three Point Checklis. Department of Computer Science, University of Chicago, Chicago, IL 60637, July 20, 2002. http://www-fp.mcs.anl.gov/~foster/Articles/WhatIsTheGrid.pdf

3. Foster I., Kesselman C. and Tuecke S. The Anatomy of the Grid: Enabling Scalable Virtual Organizations. International. J. High Performance Computing Applications. 2001. 15(3). P. 200–222. www.globus.org/research/papers/anatomy.pdf

4. Petrenko A.I. Introduction to Grid-technologies in science and education (study guide). Kyiv: Polytechnic. 2008. 124 p.

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 № 3 від 26.10.2023 р.

Підп. до друку 26.10.2023 р. Ум.друк.арк. Ум.друк.арк. 32,43 Обл.-вид.арк. 30,16
Формат 30х42/4, папір офсетний. Друк різографією.
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