ISSN 2307-5732
DOI 10.31891/2307-5732

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

2.2023

ВІСНИК
Хмельницького національного університету

Том 1

Технічні науки

Technical sciences

SCIENTIFIC JOURNAL
HERALD OF KHMELNYTSKYI NATIONAL UNIVERSITY

2023, Issue 2, Volume 319

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, № 2(319)

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

Члени редколегії
Технічні науки

Березненко С.М., д.т.н., **Бойко Ю.М.,** д.т.н., **Говорущенко Т.О.,** д.т.н., **Гордєєв А.І.,** д.т.н., **Горященко С. Л.,** к.т.н., **Грабко В.В.,** д.т.н., **Диха О.В.,** д.т.н., **Защепкіна Н.М.,** д.т.н., **Рубаненко О. О.,** д.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 № 10 від 27.04.2023 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

ЗАЛЮБОВСЬКИЙ МАРК, БЛАЖЕНКО МАРІЯ, ПАНАСЮК ІГОР.
СИЛОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕАКТИВНИХ НАВАНТАЖЕНЬ У КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАХ ГАЛТУВАЛЬНОЇ МАШИНИ З РОБОЧОЮ ЄМКІСТЮ ЗІ СКЛАДНИМ ПРОСТОРОВИМ РУХОМ ТА ЗМІННИМ ОБ'ЄМОМ 9

АСАУЛЮК ТЕТЯНА, САРІБЄКОВА ЮЛІЯ, СЕМЕШКО ОЛЬГА, КУЛІШ ІРИНА
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПРЕКУРСОРІВ НА СТРУКТУРНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНТЕЗОВАНИХ НАНОЧАСТИНОК ZnO 15

БАБИЧ АНТОНІНА, ТЕЛУШКА СВІТЛАНА, БІЦЕНЄВА ТЕТЯНА
РОЗРОБКА КОЛЕКЦІЇ ЖІНОЧИХ ЛЕГКИХ СУКОНЬ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФІГУРИ ЗАМОВНИКА 20

БАТИГІН ЮРІЙ, ШИНДЕРУК СВІТЛАНА, ЧАПЛИГІН ЄВГЕН, ФЕНДРИКОВ ДЕНИС
РІЗНІ ПІДХОДИ ДО ПЕРЕТВОРЕННЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В АКТИВНУ 27

БЕЗВЕСІЛЬНА ОЛЕНА, НЕЧАЙ СЕРГІЙ, ТОЛОЧКО ТЕТЯНА, ГРИНЕВИЧ МАРІЯ
ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ МОДЕЛІ ПОБУДОВИ СТАБІЛІЗАТОРА З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ 36

ВАСИЛИНИЧ АНАСТАСІЯ, КИРИЦЯ ІННА
«ЗЕЛЕНІ ПОВЕРХИ» – МАЙБУТНЄ ЕКОЛОГІЧНИХ МІСТ 44

ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ МИКОЛА, БОЛДИРЕВА ОЛЬГА, ВАРГАТЮК ГАННА, БУДАШ МИХАЙЛО
ОПТИМАЛЬНІ СИГНАЛЬНО-КОДОВІ КОНСТРУКЦІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ РАДІОСИСТЕМ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 5G ТА 6G 48

ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ МИКОЛА, ГОРОДЕЦЬКА ОКСАНА, СТАЛЬЧЕНКО ОЛЕКСАНДР, БУДАШ МИХАЙЛО
ІНТЕГРОВАНА РАДІОСИСТЕМА СКАНУВАННЯ ТА ЗВ'ЯЗКУ 56

ВОЛОШКО АНАТОЛІЙ, ДЖЕРЯ ТЕТЯНА
МЕТОД ЛОКАЛЬНОГО ВІДНОВЛЕННЯ СЕГМЕНТІВ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ 64

ГАНЗЮК АЛЛА, МАСЛО ЛЕСЯ
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК САПОНІТОВОГО ГРАНУЛЯТУ 70

ДАНИЛИК ВІТАЛІЙ, ЛИТВИН ВАСИЛЬ, МУШАСТА СОЛОМІЯ
ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТЕРМІНІВ ТА АБРЕВІАТУР У ТЕКСТОВИХ ДОКУМЕНТАХ 81

ДАНИЛКОВИЧ АНАТОЛІЙ, ЛІЩУК ВІКТОР, САНГІНОВА ОЛЬГА
ФОРМУВАННЯ ШКІРИ, НАПОВНЕНОЇ МОДИФІКОВАНОЮ СИНТАННО-ТАНІДНОЮ КОМПОЗИЦІЄЮ 88

ДУБАС ЮРІЙ, КУНАНЕЦЬ НАТАЛІЯ
ВИКОРИСТАННЯ ОНТОЛОГІЇ В ІНФОРМАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ ДЛЯ ДОПОМОГИ У ФОРМУВАННІ ІНДИВІДУАЛЬНОЇ ОСВІТНЬОЇ ТРАЄКТОРІЇ СТУДЕНТІВ 94

ЄФІМОВА ВЕРОНІКА, ЛУЦЕНКО ТЕТЯНА
РОЗРОБКА СКЛАДУ ЛІКУВАЛЬНО-ПРОФІЛАКТИЧНОЇ ЗУБНОЇ ПАСТИ З ЕКСТРАКТОМ ШАВЛІЇ, ЯЛІВЦЮ ТА РОМАШКИ 103

ЗАВГОРОДНІЙ ОЛЕКСІЙ, ЛЕВКІН ДМИТРО, МАКАРОВ ОЛЕКСАНДР, КОТКО ЯНА
ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРАХУНКОВИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ 108

ЗАЙЦЕВ СЕРГІЙ, ТІХЕНКО ВАЛЕНТИН
ДІАГНОСТУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ОЛИВИ В СИСТЕМАХ ОХОЛОДЖЕННЯ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ 113

ЗАСПА ЮРІЙ
ТРОЇСТІ МУЛЬТИПЛІКАТИВНІ ТЕРМОРЕЗОНАНСИ НА СПЕКТРАХ ОБМІННОГО ІНЕРЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ, ЗГЕНЕРОВАНОГО В НЕРІВНОВАЖНИХ СЕРЕДОВИЩАХ З КОНТАКТНИМИ РОЗРИВАМИ В ТЕХНІЧНИХ, КОСМІЧНИХ, ПСЕВДОЕЛЕМЕНТАРНИХ ТА БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМАХ У КОМПЛЕКСНОМУ ПРОСТОРІ З ТРИПЛЕТНИМ ПОРУШЕННЯМ АНТИСИМЕТРІЇ 120

ЗУБКОВА КАТЕРИНА, СТОЯНОВА ОЛЬГА, ШЕРСТЮК ВОЛОДИМИР
ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ СУШІННЯ ТОМАТНОЇ ПАСТИ ТА КОНТРОЛЮ БЕЗПЕЧНОСТІ ЗГІДНО З ПРИНЦИПАМИ НАССР 134

КАЛИТА ОЛЕГ
МОДЕЛЬ ПОДАННЯ МІМІЧНИХ ПРОЯВІВ ЕМОЦІЙНИХ СТАНІВ ЛЮДИНИ ДЛЯ СИСТЕМ ВІДЕОНАГЛЯДУ 143

КАРПОВ ІГОР. , БУРОВ ЄВГЕН
ОНТОЛОГІЇ У ПРОЦЕСІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ 149

КОВАЛЕНКО ЮРІЙ, ТОКАРЧУК ВОЛОДИМИР, КОВАЛЕНКО СВІТЛАНА
ВПЛИВ СУЛЬФАТ-ІОННОГО СЕРЕДОВИЩА НА МОДИФІКОВАНУ ЦЕМЕНТНУ МАТРИЦЮ РЕДИСПЕРГОВАНИМИ ПОЛІМЕРАМИ 154

КОВАЛЕНКО ОЛЕКСАНДР, БОНДАРЕНКО ВІКТОР, БОНДАРЕНКО НАТАЛІЯ
КОНТРОЛЬ І ПІДТРИМКА ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ У VoIP МЕРЕЖІ 163

КРИВЕНЧУК ЮРІЙ, ВОВЧАК ЛЮБОМИР
ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕНДЕНЦІЙ АВТОМОБІЛЬНОГО РИНКУ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ 167

КРИВЕНЧУК ЮРІЙ, ПИХНЕЙ ВЕРОНІКА
ВЕБ-АПЛІКАЦІЯ З АНАЛІЗОМ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЄЮ МЕТРИК КРИПТОВАЛЮТ З ПЕРЕДБАЧЕННЯМ МАЙБУТНЬОЇ ЦІНИ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ 171

КРИЛИК ЛЮДМИЛА
ВИЗНАЧЕННЯ ЯКІСНОГО ВПЛИВУ ФАКТОРІВ НА ЧУТЛИВІСТЬ ЄМНІСНОГО СЕНСОРА ВОЛОГОСТІ ДВОШАРОВОЇ СТРУКТУРИ, ОСНОВАНОГО НА БАГАТОФАКТОРНОМУ ДИСПЕРСІЙНОМУ АНАЛІЗІ 175

КУЛЕШОВА СВІТЛАНА, ЛУЩЕВСЬКА ОЛЕНА, ЛЕБЕДИНСЬКА ОКСАНА., СЛОБОДЕНЮК ОКСАНА, КОВАЛЬСЬКА ДАРЬЯ
АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ НАПРАЦЮВАНЬ З ПРОЄКТУВАННЯ АДАПТИВНИХ РЕАБІЛІТАЦІЙНИХ ВИРОБІВ 181

ЛЕМЕШКО АНДРІЙ, АНТОНЕНКО АРТЕМ, ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ ОЛЕКСІЙ, ЗАВАДСЬКІЙ В'ЯЧЕСЛАВ
ОПТИМІЗАЦІЯ ЧАСУ РЕАГУВАННЯ ВЕБ СЕРВЕРУ APACHE 189

МАРЦЕНЮК ВАСИЛЬ, АНДРУЩАК ІГОР, КІТ НАТАЛІЯ, КРАВЧИК ЮРІЙ, СВЕРСТЮК АНДРІЙ, ПАЛЯНИЦЯ ЮРІЙ
ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЧИСЕЛЬНОГО АНАЛІЗУ МОДЕЛЮВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНИХ БІОСЕНСОРНИХ СИСТЕМ 202

МЕЛЬНИЧЕНКО ОЛЕКСАНДР
МЕТОД ОБЧИСЛЕННЯ КІЛЬКОСТІ ОБ'ЄКТІВ У ФРУКТОВОМУ САДУ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ 213

МИХАЛЕВСЬКИЙ ДМИТРО
ВІРОГІДНІСТЬ КОНТРОЛЮ ВИРОБІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ ЗА РІВНЕМ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ ШУМІВ 220

ОЛІЙНИК ВЯЧЕСЛАВ, ЛУКІН ВОЛОДИМИР
ВИКОРИСТАННЯ МЕТРИК ПОДІБНОСТІ ПРИ СТІЙКОМУ ОЦІНЮВАННІ ЗАТРИМКИ ЧАСУ 224

ПАВЛЕНКО ЄВГЕН, СТЕПАНОВ МИХАЙЛО
ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ЕКРАНУВАННЯ ЯК СПОСІБ ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ ІНФОРМАТИЗАЦІЇ ВІД ВИТОКІВ ІНФОРМАЦІЇ ТЕХНІЧНИМИ КАНАЛАМИ 231

ПАЯНОК ОЛЕКСАНДР, БАБІЙ СЕРГІЙ, ПРОЦЕНКО ДМИТРО, ГРАНЯК ВАЛЕРІЙ
ВДОСКОНАЛЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ РОЗПОДІЛОМ ТА ВИКОРИСТАННЯМ ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ ГАЛЬМУВАНЬ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ 240

ПЕРЛОВ ВІКТОР, КИРИЦЯ ІННА
ЗАСТОСУВАННЯ ТРАНСПОРТНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПІД ЧАС ПЛАНУВАННЯ МІСТ НА ПРИКЛАДІ ВІННИЦІ 247

ПОЛІЩУК АНДРІЙ, ПОЛІЩУК ОЛЕГ, ЛІСЕВИЧ СВІТЛАНА, УРБАНЮК ЄВГЕН, РУБАНКА МИКОЛА
КОМПОЗИЦІЙНІ СУМІШІ НА ОСНОВІ СИНТЕТИЧНИХ ПОЛІМЕРІВ І НАПОВНЮВАЧІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ 3D-ДРУКУ НИМИ 252

САВИЦЬКИЙ ЮРІЙ
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗАПОВНЕННЯ МЕТАЛОМ ПІНОПОЛІСТИРОВОЇ ЛИВАРНОЇ ФОРМИ 263

САМЧУК ЛЮДМИЛА, ПОВСТЯНА ЮЛІЯ, ЛІЩИНА НАТАЛІЯ, КЛІМЕНКО АРТЕМ
ВИКОРИСТАННЯ UML ДІАГРАМ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ НА ВИРОБНИЦТВІ 268

СЛАВІНСЬКА АЛЛА, СИРОТЕНКО ОКСАНА, МИЦА ВІКТОРІЯ, ДОМБРОВСЬКА ОКСАНА
КЛАСТЕРНИЙ АНАЛІЗ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ГРАДАЦІЇ КОНТРОЛЬНИХ ВИМІРІВ ОДЯГУ ДЛЯ ЖІНОК ВЕЛИКИХ РОЗМІРІВ 276

СЛОБОДЯН МАКСИМ
МОДЕЛЬ ХАОТИЧНОЇ НАДШИРОКОСМУГОВОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ 284

СМУТКО СВІТЛАНА, ПІДГАЙЧУК СВІТЛАНА,
ОНОФРІЙЧУК ВОЛОДИМИР, РОМАНЕЦЬ ТАРАС
РОЗРОБКА ПРИНЦИПІВ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ УНІВЕРСАЛЬНИХ ЗУБЧАСТО-ВАЖІЛЬНИХ МЕХАНІЗМІВ 289

СОКІЛ МАРІЯ, ЗВОРСЬКИЙ АНДРІЙ
ЕЛЕКТРОННІ РЕСУРСИ В НАУКОВО-ТЕХНІЧНІЙ БІБЛІОТЕЦІ ЛЬВІВСЬКОЇ ПОЛІТЕХНІКИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗРУЧНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ КОРИСТУВАЧІВ 294

ТКАЧИК ОЛЕКСАНДР
ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ ДАНИХ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ЦІЛЬОВИХ ГРУП КОРИСТУВАЧІВ НА РИНКУ НЕРУХОМОСТІ 300

ТКАЧУК АНДРІЙ, ГРОМОВИЙ ОЛЕКСІЙ., БЕЗВЕСІЛЬНА ОЛЕНА., БОНДАРЧУК ВАСИЛЬ
ДОСЛІДЖЕННЯ НА УДАРНІ НАВАНТАЖЕННЯ МОБІЛЬНОЇ ГУСЕНИЧНОЇ ПЛАТФОРМИ ІЗ АВТОНОМНОЮ СИСТЕМОЮ СТАБІЛІЗАЦІЇ 308

ХОДЯЧИЙ ВЛАДИСЛАВ, НІКІТІН ОЛЕКСАНДР
ПАРАМЕТРИ ПОТОКІВ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ 314

ЩЕРБАНЬ ВОЛОДИМИР, ШИЛІНГОВ СЕРГІЙ,
ЛУКАШЕВ АНДРІЙ, КОЛИСКО ОКСАНА, ЩЕРБАНЬ ЮРІЙ
СТРУКТУРА КОМП'ЮТЕРНОГО МОДУЛЯ ПРОГРАМИ KDAM ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВХІДНОЇ ЛАНКИ 319

ЮСКОВИЧ-ЖУКОВСЬКА ВАЛЕНТИНА, ЯСІНСЬКИЙ АНДРІЙ,
ЛОТЮК ЮРІЙ, СОЛОВЕЙ ЛЮДМИЛА
ТЕХНОЛОГІЇ VR/AR ДЛЯ E-LEARNING 323

ЯРЕМЧЕНКО ОЛЕСАНДР, ПУКАЧ ПЕТРО
РОЗРОБКА ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ РОЗПІЗНАВАННЯ МІКРОМІМІКИ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЛЮДИНИ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕМОЦІЙНОГО ШІ 329

СИНЬКО АННА, ЖЕЖНИЧ ПАВЛО
МЕТОД АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИЯВЛЕННЯ ТЕРМІНІВ СТАТЕЙ ЗА ДОПОМОГОЮ ДЕРЕВА ДЛЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ 338

ЛИСЕНКО СЕРГІЙ, САХНЮК ВІТАЛІНА, БОНДАРУК ОЛЕГ
МЕТОД СИНТЕЗУ АПАРАТНО-ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ КОРПОРАТИВНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ 344

ТИМЧИШИН ВАСИЛЬ, ОТОО ФРАНК
АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАБРУДНЕННЯ ГРУНТІВ ВНАСЛІДОК ДИФУЗІЇ ДІОКСИДУ АЗОТУ В ГРУНТАХ ТА ГРУНТОВИХ ВОДАХ 351

ЛИСЕНКО СЕРГІЙ, АТАМАНЮК ОЛЬГА, БОХОНЬКО ОЛЕКСАНДР
МЕТОД ПОБУДОВИ АПАРАТНОЇ АРХІТЕКТУРИ ДЛЯ СИСТЕМА КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ НА ОСНОВІ FPGA 360

БОЙКО СЕРГІЙ, ЩОКІН ВАДИМ, ВИШНЕВСЬКИЙ СВЯТОСЛАВ,
ДАНІЛІН ОЛЕКСАНДР, ГУСАРОВА ОКСАНА, ГРИБАНОВА СВІТЛАНА
АСПЕКТИ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В УМОВАХ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ 369

КУЛЕШОВА СВІТЛАНА, МАТВІЙЧУК СВІТЛАНА,
КОРОЛЬ СВІТЛАНА, ЛЕБЕДИНСЬКА ОКСАНА
ІННОВАЦІЇ В ДИЗАЙН-ПРОЄКТУВАННІ СПЕЦІАЛЬНОГО ОДЯГУ 374

CONTENCE

ZALYUBOVSKYI MARK, BLAZHENKO MARIIA, PANASYUK IGOR
FORCE STUDY OF REACTIVE LOADS IN KINEMATIC COUPLES OF A WORKING CAPACITY TURNING MACHINE WITH COMPLEX SPACE MOVEMENT AND VARIABLE VOLUME 9

ASAULYUK TATYANA, SARIBYEKOVA YULIA, SEMESHKO OLGA, KULISH IRINA
STUDY OF THE EFFECT OF PRECURSORS ON THE STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF SYNTHETIZED ZnO NANOPARTICLES 15

BABYCH ANTONINA, TELUSHKA SVITLANA, BITSENEVA TETYANA
DEVELOPMENT OF A COLLECTION OF WOMEN'S LIGHT DRESSES TAKING INTO ACCOUNT THE CHARACTERISTICS OF THE CUSTOMER'S FIGURE 20

BATYGIN YURIY, SHINDERUK SVITLANA, CHAPLYGIN EVGEN, FENDRYKOV DENIS
THE DIFFERENT APPROACHES TO THE TRANSFORMATION OF REACTIVE POWER INTO AN ACTIVE POWER 27

BEZVESILNA OLENA, NECHAI SERGEY, TOLOCHKO TETIANA, GRYNEVYCH MARIIA
RESEARCH OF THE CHANGE OF THE STABILIZER CONSTRUCTION MODEL WITH THE PURPOSE OF INCREASING ACCURACY 36

VASYLYNYCH ANASTASIIA, KYRYTSYA INNA
«GREEN FLOORS" – THE FUTURE OF ECOLOGICAL CITIES 44

VASYLKIVSKYI MYKOLA, BOLDYREVA OLHA, VARGATYUK GANNA, BUDASH MTHAILO
OPTIMAL SIGNAL-CODE CONSTRUCTIONS FOR INCREASE EFFICIENCY OF 5G AND 6G MOBILE INFOCOMMUNICATION RADIO SYSTEMS 48

VASYLKIVSKYI MYKOLA, HORODETSKA OKSANA., STALCHENKO OLEXANDER, BUDASH MYHAILO
INTEGRATED RADIO SCANNING AND COMMUNICATION SYSTEM 56

VOLOSHKO ANATOLY, DZHERIA TETIANA
METHOD OF LOCAL RESTORATION OF SEGMENTS OF INFORMATION SIGNALS 64

GANZYUK ALLA, MASLO LESYA
THE INVESTIGATION OF PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF SAPONITE GRANULATE 70

DANYLYK VITALII, LYTVYN VASYL, MUSHASTA SOLOMIYA
INFORMATION SYSTEM OF IDENTIFICATION OF TERMS AND ABBREVIATIONS IN TEXT DOCUMENTS 81

DANYLKOVYCH ANATOLII, LISHCHUK VIKTOR, SANGINOVA OLGA
FORMATION OF LEATHER FILLED WITH MODIFIED SYNTAN AND TANIDE COMPOSITION 88

DUBAS YURII, KUNANETS NATALIIA
USE OF ONTOLOGY IN INFORMATION SYSTEM TO ASSIST IN THE FORMATION OF AN INDIVIDUAL EDUCATIONAL TRAJECTORY OF STUDENTS 94

YEFIMOVA VERONIKA, LUTSENKO TETYANA
DEVELOPMENT OF THE COMPOSITION OF THE MEDICAL AND PREVENTIVE TOOTHPASTE WITH EXTRACT OF SAGE, JUNIPER AND CHAMOMILE 103

ZAVGORODNIY OLEXIY, LEVKIN DMYTRO, KOTKO YANA, MAKAROV OLEXANDER
RESEARCH OF COMPUTATIONAL MATHEMATICAL MODELS FOR TECHNICAL SYSTEMS 108

ZAITSEV SERGEY, TIKHENKO VALENTIN
DIAGNOSIS OF POWER OIL IN PUMPING UNITS COOLING SYSTEMS OF POWER PLANT EQUIPMENT 113

ZASPA YURII
TRIPLE MULTIPLICATIVE THERMORESONANCES ON THE SPECTRA OF EXCHANGE INERTIAL RADIATION GENERATED IN NON-EQUILIBRIUM MEDIA WITH CONTACT GAPS IN ENGINEERING, COSMIC, PSEUDO-ELEMENTARY AND BIOLOGICAL SYSTEMS IN COMPLEX SPACE WITH TRIPLET VIOLATION OF ANTISYMMETRY 120

ZUBKOVA KATERYNA, STOYANOVA OLHA, SHERSTIUK VOLODYMYR
STUDY OF THE TECHNOLOGICAL SCHEME OF TOMATO PASTE DRYING AND SAFETY CONTROL ACCORDING TO THE PRINCIPLES OF HACCP 134

KALYTA OLEG
MODEL OF MIMIC EXPRESSIONS OF HUMAN EMOTIONAL STATES FOR THE VIDEO SURVEILLANCE SYSTEMS 143

KARPOV IHOR, BUROV EUGENE
ONTOLOGIES IN THE DECISION-MAKING PROCESS 149

KOVALENKO YURII, TOKARCHUK VOLODYMYR, KOVALEKO SVITLANA
INFLUENCE OF SULFATE ION ENVIRONMENT ON THE CEMENT MATRIX MODIFIED BY REDISPERSIBLE POLYMERS 154

BONDARENKO VIKTOR, BONDARENKO NATALIIA, KOVALENKO OLEKSANDR
CONTROL AND SUPPORT OF THE QUALITY OF SERVICE IN THE VoIP NETWORK 163

KRYVENCHUK YURII, VOVCHAK LIUBOMYR
CREATION OF AUTOMOTIVE MARKET PREDICTION SYSTEM 167

KRYVENCHUK YURII, PYKHNEI VERONIKA.
WEB APPLICATION WITH ANALYSIS AND VISUALIZATION OF CRYPTOCURRENCY METRICS WITH FUTURE PRICE PREDICTION USING NEURAL NETWORKS 171

KRYLIK LYUDMILA
DETERMINATION OF THE QUALITATIVE INFLUENCE OF FACTORS ON THE SENSITIVITY OF THE CAPACITIVE HUMIDITY SENSOR OF A TWO-LAYER STRUCTURE BASED ON MULTIFACTOR DISPERSION ANALYSIS 175

KULESHOVA SVITLANA, LUSCHEVSKA OLENA, LEBEDINSKA OKSANA, SLOBODENIUK OLGA, KOVALSKA DARIA
ANALYTICAL REVIEW OF THE CURRENT STATE OF DEVELOPMENT IN THE DESIGN OF ADAPTIVE REHABILITATION GARMENTS 181

LEMESHKO ANDRII, **ANTONENKO ARTEM, DOBROVOLSKYI OLEKSII, ZAVADSKYI VIACHESLAV**
APACHE WEB SERVER RESPONSE TIME OPTIMIZATION 189

MARTSENYUK VASYL, ANDRUSHCHAK IGOR, KOZODII NATALIIA, KRAVCHYK YURII, SVERSTIUK ANDRIY , PALANIZA YURI
COMPARISON OF RESULTS OF NUMERICAL ANALYSIS OF SIMULATION OF CYBERPHYSICAL BIOSENSOR SYSTEMS 202

MELNYCHENKO OLEKSANDR
METHOD OF COUNTING OBJECTS IN AN ORCHARD IN REAL TIME 213

MYKHALEVSKIY DMYTRO
RELIABILITY OF THE CONTROL OF ELECTRONIC DEVICES BY LOW-FREQUENCY NOISE 220

OLIINYK VIACHESLAV, LUKIN VOLODYMYR
USE OF SIMILARITY METRICS IN ROBUST TIME DELAY ESTIMATION 224

PAVLENKO YEVHEN, STEPANOV MIKHAILO
ELECTROMAGNETIC SHIELDING AS A WAY OF PROTECTING INFORMATION FROM ITS LEAKAGE BY TECHNICAL CHANNELS 231

PAYANOK OLEKSANDR, BABIY SERGIY, PROCENKO DMYTRO, GRANYAK VALERY
IMPROVEMENT OF OPTIMAL MANAGEMENT OF THE CITY ELECTRIC TRANSPORT ELECTRIC BRAKING ENERGY DISTRIBUTION AND USE 240

PERLOV VIKTOR, KYRYTSYA INNA
APPLICATION OF TRANSPORT MODELING IN URBAN PLANNING USING THE EXAMPLE OF VINNYTSIA 247

POLISHCHUK ANDRII, POLISHCHUK OLEH, LISEVICH SVITLANA, URBANIUK YEVHEN, RUBANKA MYKOLA
COMPOSITE MIXTURES BASED ON SYNTHETIC POLYMERS AND FILLERS AND EQUIPMENT FOR 3D PRINTING WITH THEM 252

SAVYTSKYI YURYI
SIMULATION OF THE PROCESS OF FILLING POLYSTYRENE FOAM FOUNDRY MOLD WITH THE METAL 263

SAMCHUK LUDMILA, POVSTIANA YULIA, LISHCHYNA NATALIIA, KLYMENKO ARTEM
USING UML DIAGRAMS FOR THE TECHNOLOGICAL PROCESS IN PRODUCTION 268

SLAVINSKA ALLA, SYROTENKO OKSANA, MYTSA VICTORIIA, DOMBROVSKA OKSANA
CLUSTER ANALYSIS OF PARAMETRIC GRADATION OF CONTROL MEASUREMENTS OF CLOTHING FOR WOMEN OF LARGE SIZES 276

SLOBODIAN MAKSYM
MODEL OF A CHAOTIC ULTRA-WIDEBAND INFORMATION TRANSMISSION SYSTEM FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS 284

SMUTKO SVITLANA, PIDHAICHUK SVITLANA,
ONOFRIICHUK VOLODYMYR, ROMANETS TARAS
DEVELOPMENT OF THE PRINCIPLES OF FORMING THE STRUCTURE OF UNIVERSAL GEAR AND LEVER MECHANISMS 289

SOKIL MARIIA
ELECTRONIC RESOURCES IN THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL LIBRARY OF LVIV POLYTECHNIC TO ENSURE USER CONVENIENCE AND EFFICIENCY 294

TKACHYK OLEXANDER
APPLYING DATA CLUSTERING METHODS FOR CREATING TARGETING USER GROUPS FOR REAL ESTATE 300

TKACHUK ANDRII, GROMOVYI OLEKSIY, BEZVESILNA OLENA, BONDARCHUK VASIL
RESEARCH ON IMPACT LOADING OF A MOBILE TRACKED PLATFORM WITH AN AUTONOMOUS STABILIZATION SYSTEM 308

KHODIACHIY VLADYSLAV, NIKITIN OLEXANDER
PARAMETERS OF FLOWS OF GRAIN MATERIALS 314

SHCHERBAN VOLODYMYR, SHILINGOV SERGEY,
LUKASHEV ANDREW, KOLISKO OKSANA, SHCHERBAN YURYJ
STRUCTURE OF THE COMPUTER MODULE OF THE KDAM PROGRAM FOR DETERMINING KINEMATIC AND DYNAMIC PARAMETERS OF THE INPUT LINK 319

YUSKOVYCH-ZHUKOVSKA VALENTINA, YASINSKIIY ANDRIY,
LOTIUK YURII, SOLOVEI LIUDMYLA
VR/AR TECHNOLOGIES FOR E-LEARNING 323

YAREMCHENKO OLEKSANDR, PUKACH PETRO
RESEARCH OF STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF MEAT AS AN OBJECT OF PROCESSING IN MEAT COMMINUTOR 329

SYNKO ANNA, ZHEZHNYCH PAVLO
METHOD OF AUTOMATED DETECTION OF ARTICLE TERMS USING A DECISION TREE 338

LYSENKO SERGII, VITALINA SAKHNIUK, BONDARUK OLEG
A METHOD FOR SYNTHESIZING HARDWARE AND SOFTWARE TOOLS TO ENSURE THE STABILITY OF A CORPORATE COMPUTER NETWORK 344

TYMCHYSHYN VASYL, OTOO FRANK
ARCHITECTURE OF A SOFTWARE SYSTEM FOR SOIL POLLUTION PROCESSES MODELING AS A RESULT OF DIFFUSION OF NITROGEN DIOXIDE IN SOILS AND GROUNDWATER 351

LYSENKO SERGII,, ATAMANIUK OLGA, BOKHONKO O.
METHOD OF CONSTRUCTING HARDWARE ARCHITECTURE FOR COMPUTER VISION SYSTEM BASED ON FPGA 360

BOIKO SERGEY, SHCHOKIN VADYM, VISHNEVSKYI SVIATOSLAV,
DANILIN OLEKSANDR, HUSAROVA OKSANA, HRYBANOVA SVITLANA
ASPECTS OF DECARBONIZATION OF THE ELECTRICAL SUPPLY SYSTEM IN THE CONDITIONS OF INDUSTRIAL ENTERPRISES 369

KULESHOVA SVITLANA, MATVIICHUK SVETLANA,
KOROL SVITLANA, LEBEDYNSKA OKSANA
INNOVATIONS IN THE DESIGN OF SPECIAL CLOTHING 374

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-9-14
УДК 621.924.7

ЗАЛЮБОВСЬКИЙ МАРК
Київський національний університет технологій та дизайну,
Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»
https://orcid.org/0000-0001-6258-0088
e-mail: markzalubovskiy@gmail.com
БЛАЖЕНКО МАРІЯ.
Національний університет харчових технологій
Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»
https://orcid.org/0000-0002-0984-8660
e-mail: blagmary@ukr.net
ПАНАСЮК ІГОР
Київський національний університет технологій та дизайну
https://orcid.org/0000-0001-6671-4266
e-mail: panasjuk1961@gmail.com

СИЛОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕАКТИВНИХ НАВАНТАЖЕНЬ У КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАХ ГАЛТУВАЛЬНОЇ МАШИНИ З РОБОЧОЮ ЄМКІСТЮ ЗІ СКЛАДНИМ ПРОСТОРОВИМ РУХОМ ТА ЗМІННИМ ОБ'ЄМОМ

Високої продуктивності під час виконання фінішних галтувальних технологічних операцій, а також технологічних процесів змішування сипких дрібнодисперсних речовин можна досягнути із використанням обладнання, у якому робочі ємкості виконують складний просторовий рух. На сьогоднішній день відомі різні типи розроблених галтувальних машин зі складним просторовим рухом робочих ємкостей. Кожен тип такого обладнання відповідає реалізації різних галтувальних технологічних операцій – відділення деталей від ливників, шліфування чи полірування виробів, очищення металевих деталей від корозії або змішування сипких дрібнодисперсних речовин. При експлуатації галтувального обладнання у кінематичних парах виникають різні реактивні навантаження, які залежать від конструктивних особливостей машин. Із застосуванням системи автоматизованого проєктування «SolidWorks» виконано 3D моделювання та подальше силове дослідження моделі галтувальної машини з робочою ємкістю зі складним просторовим рухом та змінним об'ємом. У кінематичному ланцюзі досліджуваної машини використовується додаткова рухома ланка шатун із обертальною та поступальною кінематичними парами. У ході виконання силового дослідження визначено реакції в усіх обертальних та поступальній кінематичних парах, досліджено вплив зміни міжосьової відстані робочої ємкості та додаткової рухомої ланки шатуна на максимальні значення реакцій в кінематичних парах машини. Представлені результати аналітичних досліджень можуть бути застосовані у відповідних конструкторських бюро машинобудівних підприємств на стадії проектування обладнання зі складним просторовим рухом робочих ємкостей та галтувальних технологічних процесів.

Ключові слова: реакції, просторовий механізм, шатун, робоча ємкість.

ZALYUBOVSKYI MARK
Kyiv National University of Technology and Design,
Open International University of Human Development "Ukraine"
BLAZHENKO MARIIA
National University of Food Technologies
Open International University of Human Development "Ukraine"
PANASYUK IGOR
Kyiv National University of Technology and Design

FORCE STUDY OF REACTIVE LOADS IN KINEMATIC COUPLES OF A WORKING CAPACITY TURNING MACHINE WITH COMPLEX SPACE MOVEMENT AND VARIABLE VOLUME

High productivity when performing finishing technological operations, as well as technological processes of mixing loose fine-dispersed substances, can be achieved with the use of equipment in which working containers perform complex spatial movement. To date, various types of developed felting machines with complex spatial movement of working containers are known. Each type of such equipment corresponds to the implementation of various felting technological operations - separation of parts from sprues, grinding or polishing of products, cleaning of metal parts from corrosion or mixing of loose fine-dispersed substances. During the operation of the rolling equipment, various reactive loads arise in the kinematic pairs, which depend on the design features of the machines. With the use of the automated design system "SolidWorks", 3D modeling and further strength research of a model of a rolling machine with a working capacity with complex spatial movement and variable volume was performed. In the kinematic chain of the machine under study, an additional moving connecting rod link with rotational and translational kinematic pairs is used. During the performance of the force study, the reactions in all rotational and translational kinematic pairs were determined, the influence of the change in the interaxial distance of the working capacity and the additional moving link of the connecting rod on the maximum values of the reactions in the kinematic pairs of the machine was investigated. The presented results of analytical studies can be applied in the relevant design bureaus of machine-building enterprises at the stage of designing equipment with complex spatial movement of working capacities and felting technological processes.

Key words: reactions, spatial mechanism, connecting rod, working capacity.

Постановка задачі. Відома [1, 2] значні кількість розроблених конструкцій галтувальних машин зі складним просторовим рухом робочих ємкостей. Кожна розроблена конструкція такої машини має свої індивідуальні конструктивні особливості, які впливають на особливість характеру переміщення рухомих

ланок машини та її робочу ємкість, здатні реалізувати різні режими руху робочого масиву.

Таким чином, усі розроблені конструкції галтувальних машин можуть бути найбільш вдало використані для окремих типів галтувальних технологічних операцій, наприклад, для відділення деталей від ливників [3], шліфування чи полірування виробів [4], очищення металевих деталей від корозії або змішування сипких дрібнодисперсних речовин [5].

Наявність відмінних конструктивних особливостей зумовлюють не лише різний характер просторового переміщення рухомих ланок машини, але й призводить до різних навантажень, які будуть виникати під час експлуатації машини в її кінематичних парх. Важливою задачею є визначення значень цих реакцій у кінематичних парах машини при відповідних експлуатаційних умовах.

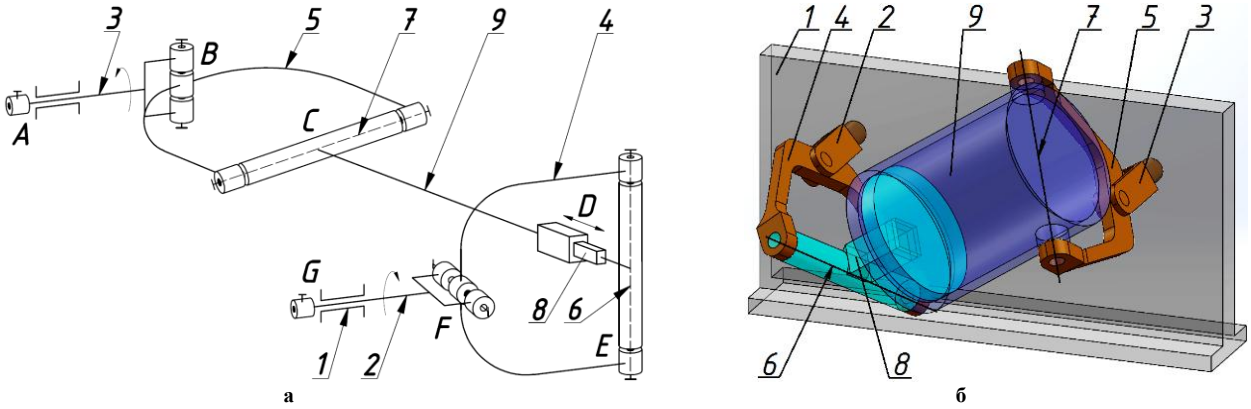
Аналіз досліджень та публікацій. Відомий ряд експериментальних та аналітичних досліджень, які висвітлені у наукових роботах [6–8], у яких підтверджується ефективність використання такого обладнання для виконання зазначених вище галтувальних технологічних операцій.

Також відомі проведені силові дослідження різних галтувальних машин зі складним просторовим рухом робочих ємкостей, зокрема у [9] представлені силові дослідження галтувальної машини з додатковою рухомою ланкою коромислом, що має вертикальну вісь обертання, у [10] – галтувальної машини з додатковою рухомою ланкою коромислом, що має горизонтальну вісь обертання, у [11] – галтувальної машини з додатковою рухомою ланкою повзуном, у [12] – галтувальної машини, у якій ведена вилка та робоча ємкість утворюють кінематичну пару четвертого класу, у [13] – галтувальної машини з двома робочими ємкостями, що з’єднані між собою поступальною кінематичною парою.

Виділення невирішених частин. Однак, не зважаючи на представлену вище інформацію щодо виконаних силових досліджень деяких галтувальних машин, у яких робочі ємкості виконують складний просторовий рух, на сьогоднішній день відсутня інформація щодо аналогічного силового дослідження галтувальної машини [14] з додатковою рухомою ланкою шатуном, якій містить обертальну та поступальну кінематичні пари та призводить до циклічної зміни об’єму робочої ємкості під час експлуатації даної конструкції машини. Лишається відкритим питання дослідження впливу зміни міжосьової відстані робочої ємкості, на максимальні значення реакцій в кінематичних парах машини.

Формулювання цілей. Метою роботи є визначення та аналіз реакцій в усіх обертальних та поступальній кінематичних парах просторового семиланкового механізму галтувальної машини з додатковою рухомою ланкою шатуном, якій містить обертальну та поступальну кінематичні пари та призводить до циклічної зміни об’єму робочої ємкості під час її експлуатації за допомогою САПР SolidWorks, дослідження впливу зміни міжосьової відстані робочої ємкості, на максимальні значення реакцій в кінематичних парах.

Виклад основного матеріалу. Розроблена конструкція галтувальної машини з додатковою рухомою ланкою шатуном, якій містить обертальну та поступальну кінематичні пари та призводить до циклічної зміни об’єму робочої ємкості під час її експлуатації та складається зі станини 1, ведучого 2 та веденого 3 валів. Вали 2 та 3 шарнірно з'єднані другими кінцями з ведучою 4 та веденою 5 вилками відповідно, діаметрально взаємно перпендикулярні вісі яких 6 і 7 є вісями кріплення шатуна 8 та ємності 9 відповідно. Шатун 8 виконаний у вигляді поршня, що за допомогою поступальної кінематичної пари *D* рухомо з’єднаний з ємністю 9, а за допомогою обертальної кінематичної пари *E* – з ведучою вилкою. Кінематична схема синтезованого механізму представлена на рис. 1.а, а модель розробленої машини – на рис. 1.б.



а б

Рис. 1. Конструкція машини з додатковою рухомою ланкою шатуном, якій містить обертальну та поступальну кінематичні пари: а – кінематична схема, б – модель машини

При моделюванні даної конструкції машини у САПР SolidWorks її геометричні параметри приймали аналогічними до геометричних параметрів промислового змішувача «Turbula T10B». Дані геометричні та параметри розробленої машини представлені у таблиці 1.

Слід зазначити, що у такій конструкції машини внаслідок додавання в кінематичний ланцюг додаткової рухомої ланки – шатуна з обертальною та поступальною кінематичними парами виключено пасивний зв’язок, який, як відомо з [15], має негативний вплив на експлуатаційні властивості машини. Після

звільнення від пасивного зв'язку стає можливим змінювати міжосьову відстань робочої ємкості $l_{PЄ}$. Таким чином, важливо дослідити, як зміна такого геометричного параметру може впливати на зміну максимальних значень реакцій в кінематичних парах машини, а також при якій міжосьовій відстані робочої ємкості $l_{PЄ}$ реакції в кінематичних парах машини будуть перевищувати попередньо визначені [16] максимальні значення реакцій у кінематичних парах «базової» конструкції машини, що є основою для порівняльного аналізу. Силове дослідження виконували за допомогою САПР SolidWorks.

У процесі дослідження збільшували міжосьову відстань робочої ємкості $l_{PЄ}$ та пропорційно їй збільшували міжосьову відстань додаткової рухомої ланки шатуна $l_{ДРЛ}$, дотримуючись сталого відношення 2,2:1 довжини робочої ємності $l_{PЄ}$ до довжини шатуна $l_{ДРЛ}$. Паралельно спостерігали за зміною реакцій в кінематичних парах машини, для кожної реакції визначали її екстремальні значення. При цьому, зміна міжосьової відстані робочої ємкості $l_{PЄ}$ виражалася коефіцієнтом δ, який був раніше запропонований у роботах [9–13]. Коефіцієнт δ для даної конструкції машини розраховувався, як відношення $l_{PЄ}+l_{ДРЛ}$, що характеризує суму довжин робочої ємності та шатуна до міжосьової відстані l_B вилки машини (ведучої чи веденої): $\delta = l_{PЄ}+l_{ДРЛ} / l_B$. Дослідження проводилися для наступних значень коефіцієнту δ: 1,2; 1,4; 1,6.

Таблиця 1

Геометричний параметр машини	Значення коефіцієнту δ		
	1,2	1,4	1,6
Діаметр робочої ємкості $d_{PЄ}$	0,318 м	0,318 м	0,318 м
Довжина (між торцями) робочої ємкості $l_Ц$	0,430 м	0,480 м	0,535 м
Міжосьова відстань вилки l_B	0,272 м	0,272 м	0,272 м
Міжосьова відстань робочої ємкості $l_{PЄ}$	0,330 м	0,380 м	0,435 м
Об'єм робочої ємкості $V_{PЄ}$	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 $\omega_{ведч.}$	3,3 с$^{-1}$ (32 об/хв)	3,3 с$^{-1}$ (32 об/хв)	3,3 с$^{-1}$ (32 об/хв)

Також визначали «граничну» міжосьову відстань робочої ємкості, подальше збільшення якої призведе до значного зросту максимальних значень реакцій у відповідних кінематичних парах, які перевищують значення реакцій в кінематичних парах «базової» конструкції машини. Схематичне зображення векторів реакцій в кінематичних парах просторового механізму машини з додатковою рухомою ланкою шатуном, якій містить обертальну та поступальну кінематичні пари представлено на рис. 2.

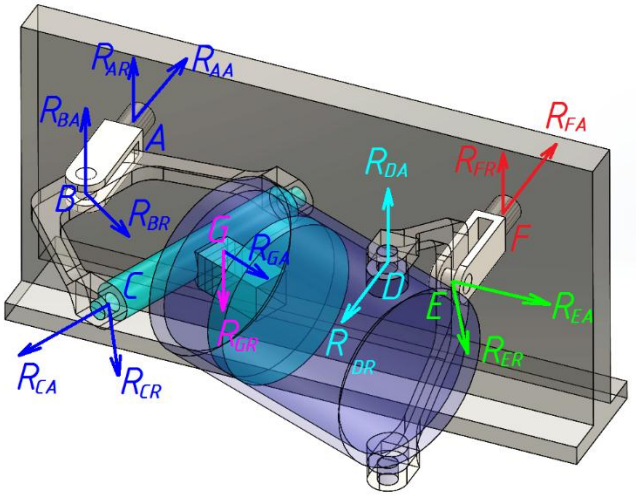


Рис. 2. Схематичне зображення векторів реакцій в кінематичних парах просторового механізму конструкції машини з додатковою рухомою ланкою шатуном, якій містить обертальну та поступальну кінематичні пари

Визначали максимальні значення осьових та радіальних складових повних реакцій R в шести обертальних кінематичних парах п'ятого класу A, B, C, D, E, F та одній поступальній кінематичній парі 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 – шатун»; R_{CR} – радіальна складова реакції в кінематичній парі «ведуча вилка – шатун»; R_{DA} – осьова складова реакції в кінематичній парі «ведена вилка – робоча ємність»; R_{DR} – радіальна складова реакції в кінематичній парі «ведена вилка – робоча ємність»; 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} – складові реакцій у кінематичній парі «шатун – робоча ємність».

У таблиці 2 представлено визначені за допомогою САПР SolidWorks максимальні значення реакцій в кінематичних парах досліджуваної конструкції машини в залежності від зміни коефіцієнту δ, а також значення реакцій у відповідних кінематичних парах просторового механізму базової конструкції машини, що відповідає коефіцієнту δ=1.

Таблиця 2

		Коефіцієнт λ, що характеризує відношення $l_{РС+ДРЛ} / l_B$			
		1,0	1,2	1,4	1,6
Значення реакцій в кінематичних парах машини, при її роботі на холостому ході	R_{AA}, [Н]	88	151	430	455
	R_{FA}, [Н]	68	162	430	420
	R_{AR}, [Н]	405	481	601	669
	R_{FR}, [Н]	608	458	994	1563
	R_{BA}, [Н]	198	122	171	235
	R_{EA}, [Н]	124	120	210	345
	R_{BR}, [Н]	294	375	459	811
	R_{ER}, [Н]	545	459	1035	1588
	R_{CA}, [Н]	95	118	272	490
	R_{DA}, [Н]	194	130	170	300
	R_{CR}, [Н]	325	408	769	1685
	R_{DR}, [Н]	342	294	700	1200
	R_{GA}, [Н]	-----	275	579	745
	R_{GR}, [Н]	-----	127	182	297

На основі представлених у таблиці 2 результатів досліджень було побудовано, у вигляді графіків, залежності максимальних значень реакцій в кінематичних парах досліджуваного просторового механізму від зміни коефіцієнту δ, які представлені на рис. 3 (осьові складові реакцій) та рис. 4 (радіальні складові реакцій).

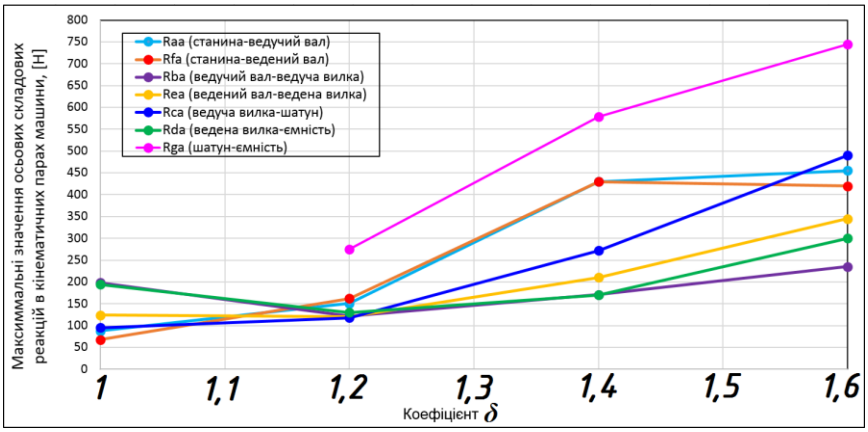


Рис. 3. Залежність максимальних значень осьових складових реакцій в кінематичних парах просторового механізму конструкції машини з додатковою рухомою ланкою шатуном, який містить обертальну та поступальну кінематичні пари від зміни коефіцієнту δ

Проаналізувавши дані, представлені у таблиці 2, а також є графічні залежності на рис. 3 та рис. 4 встановлено, що при коефіцієнті δ =1,2 реакція R_{FA} по відношенню до реакції у «базовій» конструкції машини збільшилася у 2,4 рази, а середньоарифметичне значення екстремумів реакцій по відношенню до середньоарифметичного значення екстремумів реакцій у «базовій» конструкції машини практично не змінилося.

При досягненні коефіцієнтом δ =1,4, більшість реакцій в усіх кінематичних парах перевищили відповідні значення реакцій у кінематичних парах «базової» конструкції машини, реакція R_{FA} по відношенню до реакції у «базовій» конструкції машини збільшилася у 6,3 рази. Лише реакції R_{BA} та R_{DA} все ще залишалися меншими. При подальшому збільшенні довжини робочої ємності та шатуна (δ >1,6), значення реакцій в усіх кінематичних парах перевищили відповідні значення реакцій у кінематичних парах «базової» конструкції машини.

На основі лінійної інтерполяції максимальних значень реакцій, був зроблений висновок, що конструкцію машини, в якій ведена вилка з'єднана з робочою ємністю за допомогою кінематичної пари 4-го класу, найбільш раціонально використовувати в межах зміни коефіцієнту δ=[1,0 – 1,3].

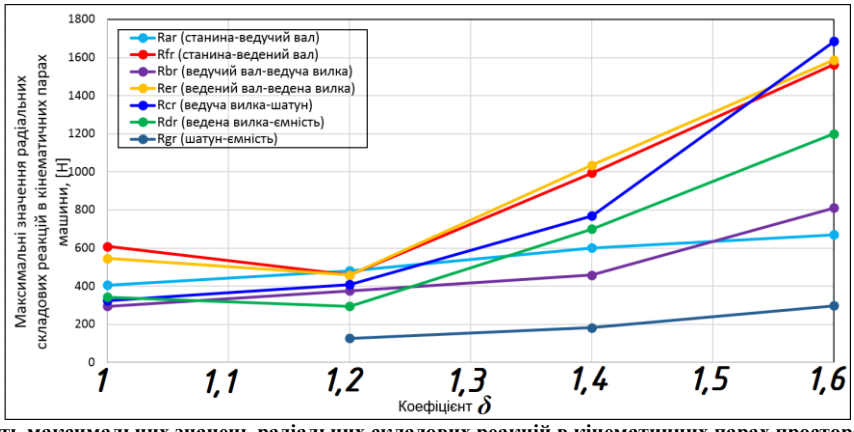


Рис. 4. Залежність максимальних значень радіальних складових реакцій в кінематичних парах просторового механізму конструкції машини з додатковою рухомою ланкою шатуном, який містить обертальну та поступальну кінематичні пари від зміни коефіцієнту *δ*

Також варто зауважити, що, аналогічно до попередньо досліджуваних конструкцій машин, зберігається характер зміни максимальних значень реакцій у кінематичних парах. Максимальні значення радіальних складових реакцій, при коефіцієнті δ=1,2 зменшилися, після чого відбулося їх подальше різке збільшення. Максимальні значення осьових складових реакцій залишалися майже сталими в діапазоні зміни коефіцієнту δ=[1,0 – 1,3], далі відбувається вже більш значний їх приріст.

Висновки

Виконано силове дослідження реактивних навантажень в усіх обертальних та поступальній кінематичних парах галтувальної машини з робочою ємкістю зі складним просторовим рухом та змінним об'ємом за допомогою САПР SolidWorks.

Досліджено вплив зміни коефіцієнту δ, який визначається відношенням суми міжосьових відстаней робочої ємкості та додаткової рухомої ланки шатуна до ємкості до міжосьової відстані ведучої (веденої) вилки машини на максимальні значення реакцій в кінематичних парах машини.

Встановлено, що досліджувану конструкцію машини раціонально використовувати в діапазоні зміни коефіцієнту δ=[1,0 – 1,3]. При подальшому збільшенні коефіцієнту δ спостерігався значний приріст максимальних значень реакцій в порівнянні з максимальними значеннями реакцій в кінематичних парах «базової» конструкції машини.

Література

1. 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.

2. 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.

3. Залюбовський М.Г. Експериментальне дослідження впливу режимів руху робочого масиву та об'єму заповнення ємкості на інтенсивність відділення металевих деталей від ливників / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2020. – № 1 (142). – С. 27–38.

4. 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.

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

6. 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.

7. Залюбовський М.Г. Техніко-економічне обґрунтування використання галтувального обладнання типу «Turbula» при виконанні відділення металевих деталей від ливників / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2022. – № 3 (309). – С. 92–98.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. Залюбовський М.Г. Машина для обробки деталей з семиланковим просторовим механізмом – синтез та дослідження / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну – 2020. – № 4 (148). – С. 38–47.

15. Решетов Л.Н. Конструирование рациональных механизмов / Решетов Л.Н. – Изд. 2-е, переработ. и доп. – М. : Машиностроение, 1972. – 256 с.

16. 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.

References

1. 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.

2. 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.Ie. Skyba, O.M. Syniuk. – Khmelnytskyi, 2007. – 255 c.

3. Zaliubovskyi M.H. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu rezhymiv rukhu robochoho masyvu ta obiemu zapovnennia yemkosti na intensyvnist viddilennia metalevykh detalei vid lyvnykiv / M.H. Zaliubovskyi, I.V. Panasiuk // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. – 2020. – № 1 (142). – S. 27–38.

4. 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.

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

6. Pershin V.F. Pererabotka sypuchih materialov v mashinah barabannogo tipa : monografija / Pershin V.F., Odnol'ko V.G., Pershina S.V. – M. : Mashinostroenie, 2009. – 220 s.

7. Zaliubovskyi M.H. Tekhniko-ekonomichne obgruntuvannia vykorystannia haltuvalnoho obladnannia typu «Turbula» pry vykonanni viddilennia metalevykh detalei vid lyvnykiv / M.H. Zaliubovskyi, I.V. Panasiuk // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2022. – № 3 (309). – S. 92–98.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. Zaliubovskyi M.H. Mashyna dlia obrobky detalei z semylankovym prostorovym mekhanizmom – syntez ta doslidzhennia / M.H. Zaliubovskyi, I.V. Panasiuk // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu – 2020. – № 4 (148). – S. 38–47.

15. Reshetov L.N. Konstruirovanie racional'nyh mehanizmov / Reshetov L.N. – Izd. 2-e, pererabot. i dop. – M. : Mashinostroenie, 1972. – 256 s.

16. 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.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-15-19
УДК 677.027.625

АСАУЛЮК ТЕТЯНА
Херсонський національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0001-5961-6895
e-mail: tatisevna@gmail.com
САРІБЄКОВА ЮЛІЯ
Херсонський національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0001-6430-6509
e-mail: ysaribyekova@gmail.com
СЕМЕШКО ОЛЬГА
Херсонський національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0002-8309-5273
e-mail: solgaya@gmail.com
КУЛІШ ІРИНА
Херсонський національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0002-0961-5904
e-mail: kulish.in.411@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПРЕКУРСОРІВ НА СТРУКТУРНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНТЕЗОВАНИХ НАНОЧАСТИНОК ZNO

У даній роботі наночастинки цинку оксиду (ZnO) отримані методом прямого осадження у водному розчині з використанням двох різних прекурсорів – цинку ацетату дигідрату і цинку хлориду – за однакових умов синтезу. Вплив обраних прекурсорів на структурні параметри кожного синтезованого зразка оцінювали за допомогою рентгеноструктурного аналізу. Результати аналізу демонструють синтезовану фазу ZnO з гексагональною структурою вюрциту і середніми розмірами кристалітів 28 нм для обох досліджуваних зразків. На основі даних рентгенограм визначено міжплощинну відстань, розмір кристалітів, щільність дислокацій і мікронапруження для різних кристалографічних площин. Аналіз отриманих значень показує невеликі відмінності утворених кристалічних матеріалів в залежності від використаного прекурсору. Розраховані структурні параметри обох синтезованих зразків ZnO добре узгоджуються зі стандартними звітними даними (JCPDS 36-1451). Досліджено вплив обраних прекурсорів на константи решітки, об'єм елементарної комірки, довжину зв'язку Zn–O та кристалічність синтезованих зразків ZnO. Встановлено, що зразок, отриманий з прекурсору цинку ацетату дигідрату характеризується відсутністю домішок та більш високою кристалічністю (93%), у порівнянні зі зразком, синтезованим з цинку хлориду, кристалічність якого становить 86%. Результати дослідження мають практичне значення для простого синтезу нанодисперсних форм ZnO і їх можливого застосування в опорядженні текстилю.

Ключові слова: оксид цинку, наночастинки, цинку ацетат дигідрат, цинку хлорид, рентгеноструктурний аналіз.

ASAULYUK TATYANA
Kherson National Technical University
SARIBYEKOVA YULIA
Kherson National Technical University
SEMESHKO OLGA
Kherson National Technical University
KULISH IRINA
Kherson National Technical University

STUDY OF THE EFFECT OF PRECURSORS ON THE STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF SYNTHETIZED ZNO NANOPARTICLES

In this work, zinc oxide (ZnO) nanoparticles were obtained by direct precipitation method in aqueous solution using two different precursors — zinc acetate dihydrate and zinc chloride — under the same synthesis conditions. The effect of the selected precursors on the structural parameters of each synthesized sample was evaluated using X-ray diffraction (XRD) analysis. The results of the analysis demonstrate the synthesized ZnO phase with a hexagonal wurtzite structure and the average crystallite size of 28 nm for both studied samples. Based on the XRD data, the interplanar spacing, crystallite size, dislocation density, and micro strain were determined for different crystallographic planes. Analysis of the obtained values shows slight differences in the formed crystalline materials depending on the used precursor. The calculated structural parameters of the synthesized ZnO nanoparticles are in good agreement with the standard reported data (JCPDS 36-1451). The effect of selected precursors on the lattice constants, unit cell volume, Zn–O bond length, and crystallinity of synthesized ZnO samples was studied. It was established that the sample obtained from the zinc acetate dihydrate precursor is characterized by the absence of impurities and higher crystallinity (93%) compared to the sample synthesized from zinc chloride, the crystallinity of which is 86%. The results are of practical value for simple synthesis of nano dispersed forms of ZnO and its possible application in textile finishing.

Keywords: zinc oxide, nanoparticles, zinc acetate dihydrate, zinc chloride, XRD analysis.

Постановка проблеми

Наночастинки оксиду цинку (ZnO) представляють собою багатофункціональний, економічний та екологічно чистий матеріал, який в останні роки привертає увагу науковців в галузі інтелектуальних текстильних матеріалів. Застосування наночастинок ZnO у текстильній промисловості має перспективи, оскільки дозволяє забезпечити комплекс спеціальних властивостей тканин поряд з біосумісністю і

безпечністю для зовнішнього середовища. Підвищена потреба в інноваціях у технологіях опорядження текстилю обумовлює актуальність пошуку простого і економічно доцільного методу синтезу наночастинок ZnO.

Аналіз останніх джерел

Наночастинки ZnO можуть бути отримані різними методами, такими як традиційний твердофазний високотемпературний метод, хімічне осадження, золь-гель синтез і гідротермальний метод.

Переважна більшість методів одержання наночастинок ZnO ґрунтується на мокрому хімічному методі, при якому регулюються умови синтезу. Було проведено кілька досліджень різних факторів, що впливають на форму, розмір та оптичні властивості наночастинок ZnO. Факторами є концентрації прекурсорів [1], температура [2, 3], концентрації поверхнево-активних речовин [4, 5], концентрації легуючих добавок [6], розчинне середовище [7] та pH реакційної суміші. У той же час вказані параметри впливають на точне налаштування таких властивостей, як антибактеріальна активність [8], структурна [9] та хімічна стабільність [10] для потенційного застосування.

Перевагою використання наночастинок ZnO, насамперед, як протимікробних засобів є їх значна ефективність щодо резистентних штамів мікробних збудників, низька токсичність і термостійкість. Крім того, навіть невелика кількість наночастинок ZnO виявляє сильну активність.

Постійно зростаючий інтерес до наноструктурних матеріалів на основі ZnO тягне за собою необхідність збільшення виходу та зниження витрат на їх отримання. З технологічної точки зору вирішити цю задачу можна за рахунок використання найбільш ефективних способів синтезу з погляду скорочення часу процесу, видалення або мінімізації стабілізуючих добавок і технічних засобів.

У наших попередніх дослідженнях [11] представлено результати синтезу наночастинок ZnO методом прямого осадження із водного розчину і визначено оптимальні температурні параметри процесу, які дозволяють отримати кристалічний матеріал високої якості.

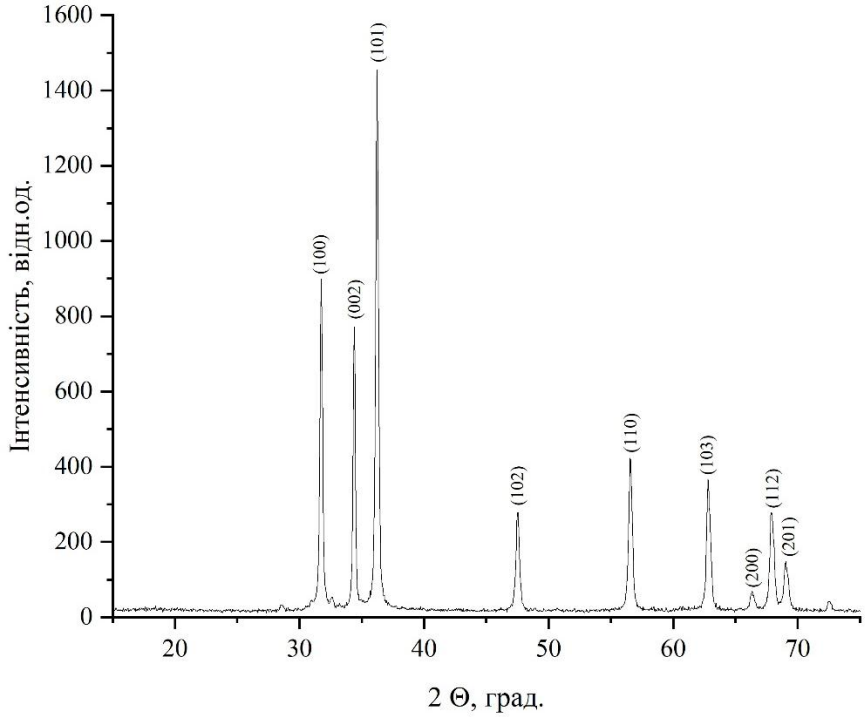
Метою даної роботи є дослідження впливу обраних прекурсорів на структурні характеристики синтезованих наночастинок ZnO.

Виклад основного матеріалу

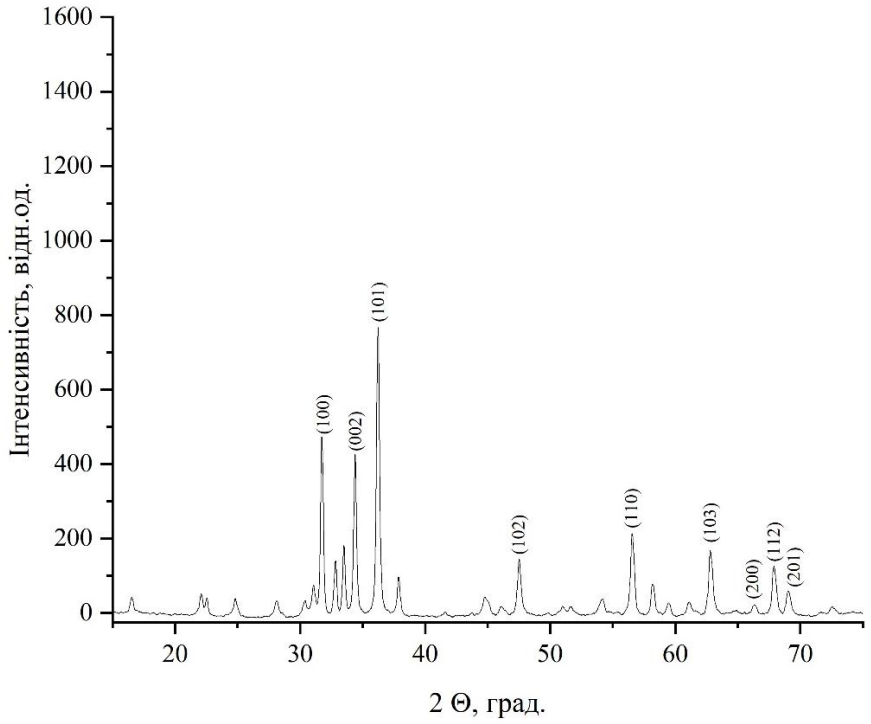
Два прекурсори – цинку ацетат дигідрат ($Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$) та цинку хлорид ($ZnCl_2$) – мали кваліфікацію ч.д.а. і використовувалися в даній роботі без додаткового очищення. Наночастинки ZnO синтезовані методом прямого осадження у водному розчині [11] при однакових умовах з наступним прожарюванням.

Кристалічну фазу та структурні параметри синтезованих із різних прекурсорів наночастинок ZnO визначали методом порошкової рентгенографії (Bruker D8 ADVANCE, Німеччина, CuK_α-випромінювання). Піки рентгенограм порівнювали зі стандартними доступними даними для підтвердження структури. Обробку результатів експериментів проводили за допомогою програм Origin 2021b та Excel 2019.

Порошкові рентгенограми зразків ZnO, синтезованих із прекурсорів $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ і $ZnCl_2$, представлені на рис. 1.



а)



б)

Рис. 1. Рентгенограми синтезованих зразків ZnO:
а) прекурсор $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$;
б) прекурсор $ZnCl_2$

На рентгенограмах (рис. 1) обох синтезованих зразків ZnO спостерігаються дифракційні піки, відповідні відображенню від (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112) та (201) площин кристала, що узгоджується зі стандартними піками XRD об'ємного ZnO, зазначеними у картці JCPDS (Об'єднаний комітет із стандартів порошкової дифракції) номер: 36-1451, та вказує на утворення ZnO із гексагональною структурою вюрциту.

Слід відзначити зміну інтенсивності дифракційних піків залежно від використаного прекурсору. Більш гострі дифракційні піки зразка ZnO, синтезованого з прекурсору $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ (рис. 1 а), вказують на більшу кристалічність частинок, у порівнянні зі зразком, отриманим з прекурсору $ZnCl_2$ (рис. 1 б). На відміну від першого зразка, наявність додаткових піків, крім характерних дифракційних піків ZnO, на рентгенограмі синтезованого з $ZnCl_2$ зразка ZnO може свідчити про присутність у ньому домішок.

З метою подальшого порівняння досліджуваних зразків ZnO необхідно розрахувати структурні параметри для різних кристалографічних площин.

Міжплощинна відстань (d_{hkl}), яка являє собою перпендикулярну відстань між двома послідовними кристалографічними площинами, утвореними окремими осередками в структурі решітки, розраховується для різних (*hkl*) площин за рівнянням Брегга (1):

$$n\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta, \tag{1}$$

де n – порядок дифракції (n = 1).

Розміри кристалітів синтезованих зразків ZnO оцінюються за формулою Шеррера (2):

$$D = \frac{K\lambda}{\beta\cos\theta}, \tag{2}$$

де D – розмір кристаліту, K – постійна Шеррера (0,89), λ – довжина хвилі рентгенівського випромінювання (0,15406 нм), θ – кут бреггівської дифракції, β – повна ширина на піввисоті (FWHM) дифракційного піку. Для розрахунку проводили апроксимацію дифракційних піків функцією Гауса.

Щільність дислокацій (δ), що відображає кількість дефектів у зразку, визначається як довжина ліній дислокацій в одиниці об'єму кристала та розраховується виходячи з розміру кристаліту (D) за співвідношенням (3):

$$\delta = \frac{1}{D^2}. \tag{3}$$

Мікродеформація (ε) визначається як середньоквадратична зміна параметрів решітки по всьому зразку і розраховується за формулою (4):

$$\varepsilon = \frac{\beta}{4\tan\theta}. \tag{4}$$

Усі розраховані параметри для різних кристалографічних площин кожного зі зразків ZnO, синтезованих із двох прекурсорів, у порівнянні зі стандартними даними (JCPDS 36-1451), а також зміна ширини на піввисоті різних дифракційних піків наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Структурні параметри синтезованих зразків ZnO для відповідних (*hkl*) площин

№	(*hkl*) площини	2θ (градуси)		Міжплощинна відстань, d_{hkl} (Å)		FWHM (градуси)	Розмір кристаліту, D_{hkl} (нм)	Щільність дислокацій, $\delta\times10^{-3}$ (нм$^{-2}$)	Мікродеформація, $\varepsilon\times10^{-3}$
		Стандарт (JCPDS 36-1451)	Синтезований	Стандарт (JCPDS 36-1451)	Синтезований				
прекурсор $Zn(CH_3COO)_2\cdot2H_2O$									
1	100	31,770	31,751	2,8143	2,8160	0,26181	31,196	1,028	4,017
2	002	34,422	34,399	2,6033	2,6050	0,22699	36,230	0,762	3,200
3	101	36,253	36,232	2,4759	2,4773	0,27377	30,192	1,097	3,651
4	102	47,539	47,524	1,9111	1,9117	0,31088	27,611	1,312	3,081
5	110	56,603	56,575	1,6247	1,6255	0,34447	25,899	1,491	2,793
6	103	62,864	62,843	1,4771	1,4776	0,37364	24,639	1,647	2,669
7	200	66,378	66,354	1,4071	1,4076	0,30998	30,280	1,091	2,069
8	112	67,961	67,932	1,3782	1,3787	0,39906	23,736	1,775	2,585
9	201	69,100	69,070	1,3582	1,3588	0,40643	23,464	1,816	2,577
прекурсор $ZnCl_2$									
1	100	31,770	31,745	2,8143	2,8165	0,26391	30,948	1,044	4,050
2	002	34,422	34,401	2,6033	2,6048	0,27018	30,438	1,079	3,808
3	101	36,253	36,233	2,4759	2,4772	0,29678	27,852	1,289	3,958
4	102	47,539	47,526	1,9111	1,9116	0,32607	26,325	1,443	3,231
5	110	56,603	56,573	1,6247	1,6255	0,34807	25,631	1,522	2,822
6	103	62,864	62,838	1,4771	1,4777	0,38119	24,150	1,715	2,723
7	200	66,378	66,344	1,4071	1,4078	0,29704	31,597	1,002	1,983
8	112	67,961	67,922	1,3782	1,3789	0,36887	25,678	1,517	2,390
9	201	69,100	69,057	1,3582	1,3590	0,35513	26,852	1,387	2,252

Порівняння даних отриманих рентгенограм (табл. 1) зі стандартними (JCPDS 36-1451) показують, що для обох досліджуваних зразків зсуви положення дифракційних піків дуже малі.

Аналіз отриманих значень міжплощинної відстані (d_{hkl}) для різних кристалографічних площин (табл. 1) показує, що для обох синтезованих зразків ZnO розрахункові та стандартні значення d_{hkl} відрізняються незначно. Невелика різниця може бути пов'язана з деформацією в кристалах.

Встановлено, що розрахункові розміри кристалітів обох синтезованих зразків ZnO знаходяться у нанорозмірному діапазоні (табл. 1). Передбачається, що розмір кристаліту є розміром когерентно дифрагуючого домену і не обов'язково збігається з розміром частинок.

Визначено, що щільність дислокацій досліджуваних зразків ZnO дуже мала (табл. 1). Найменші значення щільності дислокацій, а також мікродеформації кристалічних решіток спостерігаються для піків з високою інтенсивністю зразка ZnO, синтезованого з прекурсору $Zn(CH_3COO)_2\cdot2H_2O$. Зміна значень цього показника для різних кристалографічних площин пов'язана з анізотропією зростання кристалів.

Для оцінки якості отриманих нанокристалічних матеріалів необхідно визначити параметри кристалічної решітки зразків ZnO. В гексагональній структурі ZnO параметри решітки можна оцінити за допомогою рівняння, яке пов'язує міжплощинну відстань (d_{hkl}) з константами решітки *a*, *c* та індексами Міллера *h, k, l* (5):

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3}\left(\frac{h^2 + k^2 + hk}{a^2}\right) + \frac{l^2}{c^2}. \quad (5)$$

Розрахункові параметри решітки досліджуваних зразків ZnO, синтезованих із різних прекурсорів, у порівнянні зі стандартними даними елементарної комірки (JCPDS 36-1451), середні розміри кристалітів та кристалічність наведені у табл. 2.

Середні розміри кристалітів (табл. 2) синтезованих зразків ZnO, розраховані за методом Шеррера, можна розглядати як нижню межу розміру частинок, оскільки частинки часто являють собою скупчення великої кількості кристалітів. Використання обох прекурсорів дозволяє отримати наночастинки ZnO із середнім розміром кристалітів близько 28 нм.

Розраховані константи решітки (табл. 2) кристалітів ZnO, синтезованих із обох прекурсорів, мають невеликі відхилення і добре узгоджуються зі стандартними звітними даними (JCPDS 36-1451). Найближчий до еталону об'єм елементарної комірки V = 47,703 Å^3 відповідає зразку, синтезованому із $Zn(CH_3COO)_2\cdot2H_2O$. Розрахункова довжина зв'язку Zn–O в елементарній комірці досліджуваних зразків

становить 1,9789 Å і 1,9792 Å для прекурсорів $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ і $ZnCl_2$ відповідно.

Найбільша різниця між досліджуваними зразками спостерігається у кристалічності (табл. 2), яку визначали за відношенням площі кристалічних областей до сумарної площі аморфних та кристалічних областей на рентгенограмах. Порошок ZnO, синтезований із прекурсору $ZnCl_2$, показує на 7,5% меншу кристалічність, ніж зразок, отриманий із прекурсору $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$.

Таблиця 2

Загальні параметри кристалітів синтезованих зразків ZnO

Зразок		Середній розмір кристалітів, D (нм)	Константи решітки			Об'єм елементарної комірки (Å^3)	Довжина зв'язку Zn–O (Å)	Кристаліч ність (%)
			a (Å)	*c* (Å)	*c/a* (Å)			
Стандарт (JCPDS 36-1451)		–	3,2488	5,2066	1,6020	47,630	–	–
Синтезо -ваний	з ацетату	28,139	3,2516	5,20996	1,6023	47,703	1,9789	93,02
	з хлориду	27,719	3,2522	5,2096	1,6019	47,717	1,9792	85,51

Висновки

У роботі синтезовано наночастинки ZnO з двох різних прекурсорів ($Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ та $ZnCl_2$) методом прямого осадження за однакових умов. Результати рентгеноструктурного аналізу отриманих зразків показують, що в обох випадках наночастинки ZnO сформувалися в гексагональній структурі вюрциту із середнім розміром кристалітів 28 нм. Визначення залежності розрахованих структурних параметрів синтезованих кристалічних матеріалів від типу досліджуваних прекурсорів показує, що використання прекурсору $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ дозволяє отримати вільні від домішок наночастинки ZnO з більш високою кристалічністю, ніж у випадку $ZnCl_2$, за обраних умов синтезу. Даний метод синтезу представляє інтерес для подальших досліджень застосування отриманих наночастинок ZnO в технологіях опорядження текстильних матеріалів.

Література

1. Chand P., Gaur A., Kumar A., et al. Effect of NaOH molar concentration on optical and ferroelectric properties of ZnO nanostructures. Appl. Surf. Sci, 2015, 356, p. 438. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.08.107
2. Jyoti M., Vijay D., Radha S. To study the role temperature and sodium hydroxide concentration in synthesis Zinc Oxide. IJSRP, 2013, 3, 11, pp. 1-4.
3. Narayanan G.N., Ganesh R.S., Karthigeyan A. Effect of annealing temperature on structural, optical and electrical properties of hydrothermal assisted zinc oxide nanorods. Thin Solid Films, 2016, 598, pp. 39-45. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.11.071
4. Zhang Y.L., Yang Y., Zhao J.H., et al. Preparation of ZnO nanoparticles by a surfactant-assisted complex sol–gel method using zinc nitrate. J. Sol-Gel Sci. Technol, 2009, 51, pp. 198-203.
5. Bera A., Basak D. Effect of Surface Capping with Poly (vinyl alcohol) on the Photocarrier Relaxation of ZnO Nanowires. ACS Appl. Mat. Interfaces, 2009, 1, 9, pp. 2066-2070. DOI: https://doi.org/10.1021/am900422y
6. Podporska-Carroll J., Myles A., Quilty B., et al. Antibacterial properties of F-doped ZnO visible light photocatalyst. J Hazard Mater, 2017, 324 (Pt A), pp. 39-47. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.12.038
7. Bagabas A., Alshammari A., Aboud M.F.A., et al. Room-temperature synthesis of zinc oxide nanoparticles in different media and their application in cyanide photodegradation. Nanoscale Res. Lett, 2013, 8, p. 516.
8. Sirelkhatim A., Mahmud S., Seeni A., et al. Review on zinc oxide nanoparticles: antibacterial activity and toxicity mechanism. Nano-Micro Lett., 2015, 7, 3, pp. 219-242. DOI: 10.1007/s40820-015-0040-x
9. Zhang L., Ding Y., Povey M., York D. ZnO nanofluids – A potential antibacterial agent. Prog. Nat. Sci., 2008, 18, 8, pp. 939-944. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.01.026
10. Talebian N., Amininezhad S.M., Doudi M. Controllable synthesis of ZnO nanoparticles and their morphology-dependent antibacterial and optical properties. Journal of Photoch. and Photobio. B: Biology, 2013, 120, pp. 66-73. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2013.01.004
11. Asaulyuk T.S. Synthesis and structural characterization of ZnO nanoparticles / T.S. Asaulyuk, Yu.G. Saribyekova, O.Ya. Semeshko, I.M. Kulish // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2022. – № 4(311). – P. 35-41. DOI: 10.31891/2307-5732-2022-311-4-35-41

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-20-20
УДК 685.34.341

БАБИЧ АНТОНІНА
Київський національний університет технологій та дизайну
https://orcid.org/0000-0001-5061-3292
e-mail: basienka@ukr.net
ТЕЛУШКА СВІТЛАНА
Київський національний університет технологій та дизайну
e-mail:felis.briss@gmail.com
БІЦЕНЄВА ТЕТЯНА
Київський національний університет технологій та дизайну
e-mail:tata@gmail.com

РОЗРОБКА КОЛЕКЦІЇ ЖІНОЧИХ ЛЕГКИХ СУКОНЬ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФІГУРИ ЗАМОВНИКА

Використання класичних колористичних і конструктивних рішень при розробці сучасних моделей жіночого одягу в стилі «ретро» привертає увагу фахівців модної індустрії, оскільки мода час від часу повертається у наше суспільство за рахунок створення стилізованих моделей виробів з посилом до минулих 20–70-х років, простежується ланцюжком конкретних дій від «народження» ідеї і створення творчого джерела до виконання ескізного проєкту з підбором матеріалів та аксесуарів і детальної розробки конструкції виробів колекції. В статті досліджено і проаналізовано питання створення асортименту сучасних суконь з різних матеріалів, з урахуванням особливостей фігури замовника і вподобань споживача. Проаналізовано типи фігур жіночого тіла.

В статті досліджено і проаналізовано питання створення асортименту сучасного одягу для жінок різного призначення, конструкцій та матеріалів. Досліджено і проаналізовано питання конструктивізму в дизайні одягу. Проведено аналіз українських брендів – виробників одягу за допомогою google анкетування споживачів різної вікової групи. Теоретично доведено доцільність даної розробки. Наведено результати маркетингових досліджень щодо можливості використання сміливих конструктивних ідей і колористичних рішень в одязі жіночого асортименту в стилі «ретро». Розроблено ескізний проєкт, 3D моделі асортиментного ряду колекції одягу жіночої асортиментної групи. Розроблено конструкторсько-технологічну документацію на вироби. Виготовлено промисловий зразок легкої сукні жіночого асортименту розробленої колекції. Впроваджено розробку у виробництво на ФОП «А-стиль», м. Бердичів. Доведено теоретико-експериментальним шляхом доцільність даної розробки.

Ключові слова: *асортимент, тип фігури, конструкція, технологічність моделі, дослідження, попит, виріб.*

BABYCH ANTONINA, TELUSHKA SVITLANA, BITSENEVA TETYANA
National University of Technology and Design

DEVELOPMENT OF A COLLECTION OF WOMEN'S LIGHT DRESSES TAKING INTO ACCOUNT THE CHARACTERISTICS OF THE CUSTOMER'S FIGURE

The use of classic color and design solutions in the development of modern models of women's clothing in the "retro" style attracts the attention of fashion industry specialists, since fashion occasionally returns to our society due to the creation of stylized models of products with a reference to the past times of the 1920–1970. is traced by a chain of specific actions from the "birth" of an idea and the creation of a creative source to the execution of a sketch project with the selection of materials and accessories and the detailed development of the design of the products of the collection. The article researched and analyzed the issue of creating an assortment of modern dresses from different materials, taking into account the features of the customer's figure and consumer preferences. The types of female body shapes were analyzed. The article researched and analyzed the issue of creating an assortment of modern clothes for women of various purposes, designs and materials. The issue of constructivism in clothing design was investigated and analyzed. An analysis of Ukrainian brands of clothing manufacturers was carried out with the help of Google surveys of consumers of different age groups. The expediency of this development has been theoretically proven.

The results of marketing research on the possibility of using bold constructive ideas and color solutions in women's clothing in the "retro" style are given. A sketch project, 3D models of the range of the clothing collection of the women's range group have been developed. Design and technological documentation for products has been developed. An industrial sample of a light dress of the women's range of the developed collection was produced. The development was introduced into production at the FOP "A-style", Berdychiv. The expediency of this development has been proven theoretically and experimentally.

Key words: *assortment, figure type, design, manufacturability of the model, research, demand, product.*

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

Дизайн – це сфера творчості, пов'язана з соціальними, функціональними та естетичними проблемами формування предметно-просторового середовища, одна з важливих областей утворення стилю, яка впливає на загальні формоутворюючі процеси і історичні концепції [1].

Основою в професії дизайнера є проблема формування творчої особистості, неповторного стилю і світосприйняття. Саме ці чинники обумовлюють і формують спектр творчих підходів до вивчення конкретних питань щодо тілоскладень людини, формоутворення виробу та використання на практиці певних підходів і концепцій щодо пошуку креативної ідеї, розвитку творчого джерела і вирішення поставленої

задачі за принципом «від ідеї до готового виробу» [2–5].

Історичний аналіз розвитку у суспільстві мануфактур, виробництв, технологій і науково-технічного прогресу в цілому дозволив людям створити підприємства великої і середньої потужності, і як результат одягти людей, виготовляючи масово вироби. Однак вже сьогодні ми маємо потребу не стільки у кількості виробів, як у їх якості та індивідуальності. Тому на ряду з масовим випуском продукції індустрії моди функціонують і не великі підприємства та ательє, дизайн студій та майстерні з індивідуального виготовлення та ремонту виробів галузі.

Станом на 2023 рік можна впевнено сказати, що індивідуальні та багатофункціональні вироби індустрії моди полюбляють усі, однак є і сегмент одягових виробів певного призначення, який може бути повсякденним, але при цьому має відображати стиль, смак і вподобання носія [2–5].

Сьогодні ми маємо сучасні класичні і не типові для галузі матеріали, інноваційні технології та надсучасне і прогресивне обладнання, яке дозволяє втілити у життя практично усі сміливі і креативні ідеї дизайнера та замовника. Однак є категорія людей, яка схиляється до потреб у виробах класичного дизайну чи використанням елементів «ретро» стилю. Безумовно вік споживача і його соціальний статус та спосіб життя впливають на вибір стилю і форми виробу, однак мрії і бажання можуть бути не реально яскравими в кожного з нас.

При створенні колекції сучасних виробів легкого одягу, зокрема суконь, їх естетичну привабливість та індивідуальність, підвищену комфортність та функціональність, прийнятну собівартість і попит можна спрогнозувати і досягнути мети теоретично вже на етапі розробки ескізного проєкту, провівши низку маркетингових досліджень шляхом on-line опитування споживачів чи інших груп населення України та світу [6, 7]. В цілому питання конкурентоспроможності виробів і їх реалізація на ринку сучасних естетично і практично орієнтованих виробів, що виготовлені з класичних або інноваційних вітчизняних матеріалів є актуальним завданням науковців і виробничників усіх країн світу [8, 9].

Аналіз досліджень та публікацій

Розробкою і вдосконаленням конструкцій та технологій виготовлення одягу, вивченням тілоскладень жінок у широкому розумінні питання, вивченням і дослідженням властивостей матеріалів і комплектуючих для виробництва виробів даної групи займалися і займаються науковці різних країн світу.

В Україні, корифеями цієї справи і засновниками наукових шкіл і напрямів наукової діяльності є проф. Колосніченко М.В, проф. Ніколаєва Л.В., проф. Кротова Т.Ф., проф. Пашкевич К.Л., проф. Славінська А.Л., проф. Чупріна Н., доц. Остапенко Н.П., інші [6, 7].

Ці науковці внесли неоціненний вклад у розвиток новацій у дизайні, конструюванні, моделюванні, технології виробництва одягових виробів з різних матеріалів.

Так, професор Колосніченко М.В. з групою науковців, як наприклад Чупріна Н.П., доц. Остапенко Н.П., проф. Кротова Т.Ф. протягом своєї наукової діяльності займаються дизайном виробів індустрії моди, питаннями удосконалення форми виробу, питаннями колористики; професор Березненко С.М. з групою науковців, як наприклад доц. Білоцька Л.Б., проф. Зубкова Л.І. займаються дослідженнями тілоскладень, підлітків, молоді і дорослої категорії населення з урахуванням особливостей фігур за регіонами мешкання людини; досліджують конструктивні особливості і типи фігур; працюють над вдосконаленням конструкцій і параметрів виробів різного призначення. Також науковці і молоді вчені під керівництвом проф. Пашкевич К.Л. займались дослідженням питань ергономіки костюму, параметрів і форм. Інші вчені такі як проф. Супрун Н.П., проф. Галавська Л.Є., доц. Арабулі С.І. досліджували властивості матеріалів і процеси формування матеріалів при виготовленні одягу [8, 9].

Багато наукових шкіл і науковців, як наприклад Попова Н.В., Альошкова С.М., Омельченко Н.М., Войчак А.В., Мальченко В.М. займалися за час своєї роботи розробкою стандартів, нормативних баз, термінів, які є необхідними для початківців у вивченні певних питань [10, 11].

Багато вчених, як наприклад Бабич А.І., Попова Л.В., Гелевич Ю.В., Гриневич Т.М., Стоянов І.С. інші займались аналізом результатів випробування виробів індустрії моди з метою сертифікації; дослідженням і прогнозування міцності ниткових швів при скріпленні деталей виробів. Складали алгоритми прогнозування відповідності ниткового скріплення деталей. Проводили експериментальні дослідження процесу послаблення матеріалу в результаті проколу їх голкою [12–14].

Багато сучасних наукових досліджень відтворено у патентах науковців: Злотенко Б.М., Гаркавенко С.С., Борщевської Н.М., Бабич А.І., Кернеш В.П., Первої Н.В., які проводили дослідження з розробки виробів індустрії моди різних конструкцій і призначення; дослідження по розробці композицій для фарбування шкіри та текстилю; дослідження по розробці складу і рецептури наповнення шкіри; дослідження розробки способу виконання декору (принту) на поверхні матеріалу та багато інших наукових надбань і розробок [15–18].

Практична реалізація окремих напрямів наукового дослідження постійно зв’язана з великими витратами суспільної праці, матеріальних та фінансових ресурсів, коли реалізація заходів організаційного характеру в багатьох випадках не потребує нових затрат.

Українські вчені внесли значний внесок у розвиток галузі, в розробку конструкцій і технологій виготовлення виробів та матеріалів, запропонували нові принципи класифікації, досліджували різні варіанти удосконалень у вже існуючих конструкціях виробів, технологіях, матеріалах та обладнанні модної індустрії.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є дослідження і аналіз різновидів матеріалів для виготовлення виробів та вимог до них, особливостей типів фігур жінок і розробка колекції легкої сукні в стилі «ретро» з урахуванням особливостей фігури замовника [4].

Вивчення технік та особливостей технології виготовлення та оздоблення виробів і як результат досліджень розробка колекції жіночого одягу за рахунок використання композиційно-конструктивних елементів, колористичних акцентів і сучасної палітри кольорів, які можна додавати до виробу чи замінювати, враховуючи визначені шляхом аналізу проведених в роботі маркетингових досліджень найвагоміших думок споживачів щодо можливості втілення у вироби жіночого асортименту заданого стилю сміливої колористики і форми, матеріалів і технологій оздоблення виробів, що дасть можливість спрогнозувати позитивний результат [10].

Мета дослідження – дослідження типів фігур жінок і розробка колекції легкої сукні з урахуванням особливостей фігури замовника.

Матеріали та методи. У дослідженні використовувалися теоретико-практичні методи дослідження та практико-орієновані технології виготовлення виробів, а саме: технологія шиття, технологія модульного складання елементів виробу, декоративне оздоблення виробу. У якості матеріалів використано текстиль, аплікація та мережево.

Виклад основного матеріалу

Завдяки швидкій зміні стандартів життя, трансформації суспільства і переходу на новий рівень ведення бізнесу, а саме виробництва товарів і надання он-лайн послуг, завдяки стрімкому розвитку нових технологій у XXI столітті все більше з'являється інноваційних дизайнерських рішень, не типових матеріалів та технологій для створення і виготовлення виробів індустрії моди, однак класичні матеріали і прийоми, їх поєднання завжди є актуальними і модними [6–10].

Класична ручна розробка конструкцій і лекал виробів чи виконана в автоматизованому режимі за допомогою сучасних САПР «Грація», «CLO3D», вдосконалення конструкції і технології виробництва виробів різного призначення за рахунок розробки раціонального фасону відповідно до типу фігури споживача є актуальною сьогодні [12], оскільки усі ми різні і прекрасні, але практично кожен споживач має певні відхилення від норми у фігурі чи певні вади, які за рахунок фасону виробу можна відкорегувати чи приховати. Тому індивідуальний підхід до вимог і потреб споживача є конче необхідним і затребуваним.

На основі поставлених задач було проведено ряд маркетингових досліджень і теоретико-аналітичним шляхом досліджено типи тілоскладень (типи фігур) жіночого тіла (рис. 1), підібрано згідно фігури замовника вдалий конструктивний варіант легкої сукні, розроблено ескізний ряд моделей виробів колекції (рис. 2), лекала, технологічний маршрут, та виготовлено виріб-зразок (рис. 3).

Кожна жінка прагне виглядати красивою та доглянутою. Адже від того, як ми виглядаємо часто залежить емоційний стан, успіх кар'єри, особистих відносин та й здоров'я. Для цього звичайно потрібно вести здоровий спосіб життя, розвиватися розумово і фізично, а от сліпо слідувати тенденціям моди немає сенсу, оскільки не всім підходить однакова модель одягу, колір, стиль. Для виявлення справжньої особистої краси, естетики і стилю треба полюбити себе, вивчити своє тіло і вдало підбирати гардероб. Тільки тоді жінка буде випромінювати свою особисту красу, індивідуальність, тільки тоді жінка розквітає і наповнюється силою не залежно від типу фігури, розміру одягу, ваги і віку.

Однією зі складових вдалого образу є одяг, який правильно сидить по фігурі [6–8, 10]. Відомо, що немає не красивих жінок і поганих фігур, а є не вдало підібрані сукні. Тому необхідно дослідити це питання і розібратися з тим, які існують типи фігур у жінок , як визначити тип фігури і які фасони варто носити.

На жаль, дуже мало жінок мають абсолютно ідеальні пропорції тіла, але, на щастя є достатня кількість фасонів одягу, щоб правильно одягнути жінок усіх без винятку. Адже правильно підібраний одяг допоможе не тільки підкреслити достоїнства будь-якої жіночої фігури, але і приховати фізіологічні чи вікові недоліки.

Згідно інформації отриманої з різних інформаційних джерел в класичній класифікації виділяють 5 типів жіночих фігур: пісочний годинник (Х-силует), трикутник (А-силует), прямокутник (Н-силует), перевернутий трикутник (Т-силует) та коло (О-силует) (рис. 1). Розглянемо типи жіночих фігур і варіанти рекомендованих фасонів одягу [2, 6, 10].

Тип жіночої фігури трикутник або «А» Перевага цього типу статури полягає в тому, що можна створити ілюзію фігури пісочного годинника, якщо стилізувати образ правильно. Плечі вузькі, а стегна широкі. Все, що потрібно зробити, це знайти баланс. Можна носити костюми, які покращують і коригують нижню частину тіла, кльошні спідниці з паском на вузенькій талії.

Тип фігури пісочний годинник або «Х». У людей з таким типом фігури є природний баланс у пропорціях, тому сукні повинні просто повторювати контур тіла носія. Саме жінкам з такою фігурою рекомендується носити наступний одяг: блейзери до лінії стегон вільного крою; одяг з нагрудними кишенями; красиві широкі V-подібні вирізи, модні комірці; виріз човником; при вузьких плечах можна скористатися підплічниками; якщо плечі дуже вузькі, то виріз зони декольте може бути квадратним; підійдуть спущені плечі; верхній одяг на пружній підкладці; широкі, прямі жіночі спідниці середньої довжини і максі, можна зі складками; спідниці та брюки вільного крою з тонкої тканини; крій піджака

повинен відрізнятися від крою спідниці або штанів.

Тип фігури перевернутий трикутник або «V». Людям з таким типом фігури необхідно додати акценту стегнам і таким чином зосередитися на створенні балансу. Прямі джинси і сукні з природним V-подібним дизайном – все це одяг, який підійде даному типу. Жінкам з V-подібною фігурою підійдуть стриманий верхній жіночий одяг неяскравих кольорів; V-подібні або овальні вирізи; спідниці, які облягають стегна і м'яко розкльошені; прямі й короткі спідниці; брюки-стрейч, джинси, прямі й вузькі штани; моделі одягу із заниженою талією.

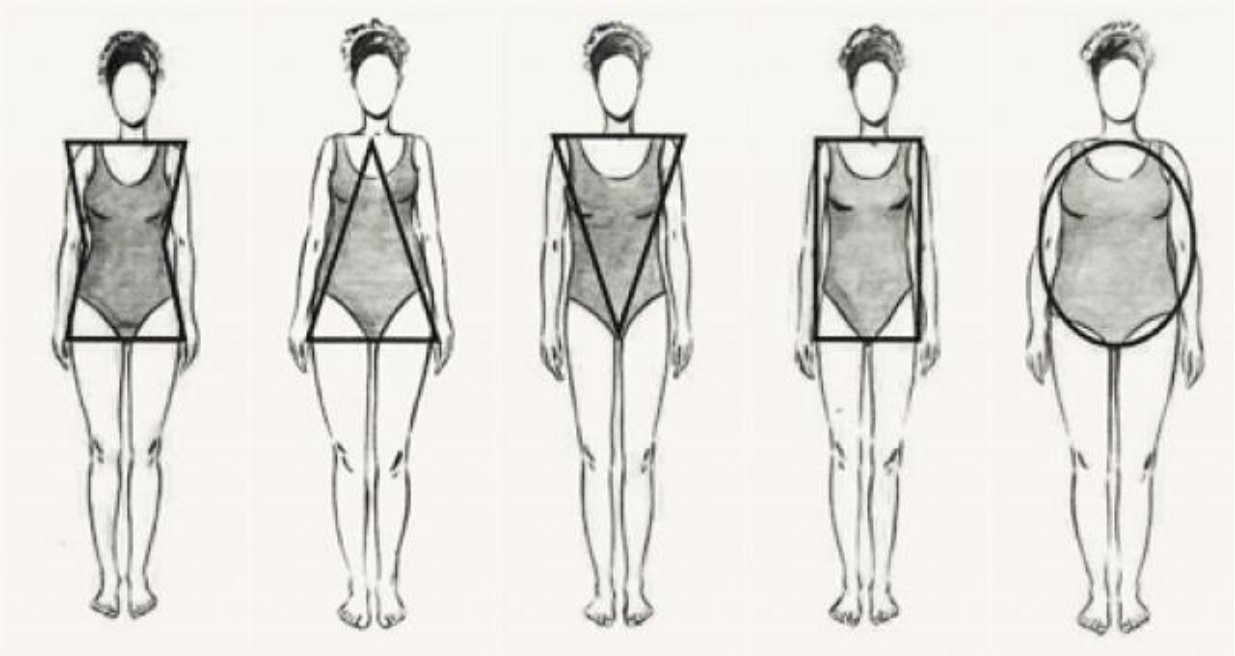


Рис. 1. Типи фігур жіночого тіла

Тип фігури яблуко «О». Оскільки велика частина ваги сконцентрована вище стегон, ця частина тулуба здається важчою, ніж нижня частина. Ідея в тому, щоб відвернути увагу від цієї частини тіла і підкреслити сильні сторони. Жінкам з такою фігурою необхідно відкривати ноги або носити сукні з V-подібним або глибоким V-подібним вирізом, який створює ілюзію подовження тулуба. Жінкам з фігурою кола чи яблука можна сміливо носити такі моделі одягу: подовжені кофтинки з неглибоким V-подібним вирізом; кофтинки з високим коміром, коміром «поло»; при вузьких плечах можна скористатися підплічниками, а вістря коміра повинні бути спрямовані вгору, при широких же плечах вістря коміра направляємо вниз; спідниці середньої довжини і максі; жакети до стегон; якщо наважуємось на сукню, то із завищеною талією; підійде і спідниця-брюки; брюки, завужені до низу.

Тип жіночої фігури прямокутник – «Н». Жінкам з типом фігури прямокутник рекомендується одягатися в такий спосіб: кофтинки з глибоким V-подібним вирізом; топи і блузи з запахом; трикотаж на блискавках, краще, якщо застібка-блискавка розстібається зверху і знизу; одяг з бічними розрізами і декоративною відстрочкою; спідниці-сонце, спідниці-напівсонце, спідниці-тюльпан; жакети та кардигани застебнуті в районі талії на один ґудзик; прямі або завужені донизу штани; укорочені моделі піджаків, кардиганів та жакетів; верхній жіночий одяг зі щільної структурної тканини, добре тримає форму.

На основі проведених теоретико-аналітичних досліджень та оцінки фігури замовниці була розроблена лінійка ескізів виробів (рис. 2), розроблено робочі креслення деталей сукні (рис. 3) та виготовлено виріб (рис. 4). Елементом оздоблення виробу є квіткова аплікація [10–18].

Рис. 2. Візуалізація ескізного проєкту дослідження

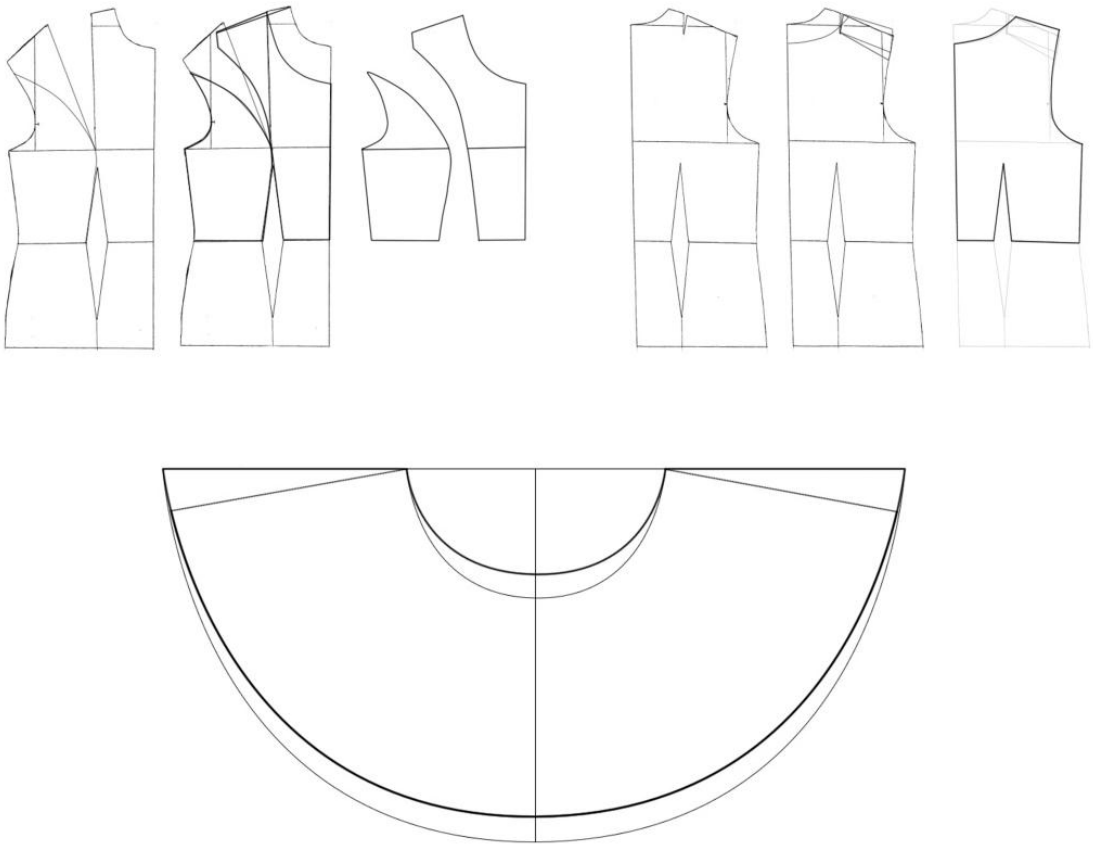


Рис. 3. Робочі креслення деталей сукні

Рис. 4. Готовий виріб легкої сукні жіночого асортименту на фігуру А-типу (трикутник)

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В результаті науково-практичного дослідження теми даної розробки можна дійти висновку, що світ дизайну є різноманітним, унікальним та інноваційним. Незалежно від змін в моді завжди присутнє дизайнерське бачення світу, моди та естетики, яке призводить до творчих експериментів, впровадження інноваційних матеріалів і технологій у процес виготовлення чи декорування виробу, а також разом з інноваціями використовує класичні матеріали та підходи до створення шедевру.

Такі творчі експерименти необхідні для розвитку і становлення особистості та індивідуальності дизайнера, а також відображення його ідей в реальному житті.

Отже, необхідно пам'ятати, що грамотно підібраний базовий гардероб, зробить жінку будь-якого віку та з будь-яким типом фігури неперевершеною.

Перспективами подальших розвідок у даному напрямі є поглиблене вивчення даного питання і практична реалізація ідей.

Література

1. Головні правила сучасного дизайну [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.remontbp.com/sovremennyj-interer-2020/
2. Офіційний сайт модного видання Vogue [Електронний ресурс]. – Режим доступу : //http://www.vogue.ua/
3. Знамениті дизайнери предметів інтер'єру [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://arx.novosibdom.ru/designers.
4. Україна в цифрах: статистичний збірник [Електронний ресурс]. – Київ, 2019. – Режим доступу : https://ukrstat. org/uk/druk/publicat/kat_u/2019/zb/07/Ukr_cifra_2018_u.pdf.
5. Українські еко-бренди [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://shotam.info/top-10-ukrains-ki-eko-brendy-iaki-pikluiut-sia-pro-dovkillia/
6. Божко Ю. Г. Архітектоніка і комбінаторика формоутворення : підручник. для худож.-пром. вузів і архіт. фак. / Ю. Г. Божко. – Київ : Вища шк., 1991. – 244 с.
7. Ніколаєва Т. В. Тектоніка формоутворення костюма : навч. посібник. – Київ : Арістей, 2011. – 340 с.
8. Бердник Т.О. Основи художнього проєктування костюма та ескізної графіки : навч. посібник / Т.О. Бердник. – Львів : Знання, 2019. – 350 с.
9. Васенок Т.М. Ілюстрований посібник з конструювання швейних виробів / авт.-уклад. Т.М. Васенок. – Глухів : РВВ ГДПУ, 2005. – 96 с.
10. Пашкевич К.Л. Застосування сучасних методів для проектування колекції одягу складних форм / К.Л. Пашкевич, М.В. Колосніченко, К.О. Науменко, О.С. Хапанцева // Теорія та практика дизайну. Технічна естетика. – 2015. – Вип. 8. – С. 217–225.
11. Raeve A. D., Vasile S., Cools J. Selected factors influencing wear comfort of clothing: case studies. J Textile Eng Fashion Technol. 2018. № 4(1). P. 66-71.
12. Супрун Н.П. Конфекціювання матеріалів для одягу : навч. пос. / Н.П. Супрун, Л.В. Орленко, Е.П. Дрегуляс, Т.О. Волинець. – К. : Знання, 2008. – 246 с.
13. Єжова О. В. Технологія швейних виробів. Ч. 1 / Єжова О. В. – Київ : ВШ, 2002. – 102 с.

14. Литвин В.Г. Конструювання швейних виробів : підручник / В.Г. Литвин, А.О. Степура. – К. : Вікторія, 2008. – 320 с.

15. Бабич А.І. Інновації в дизайні виробів індустрії моди, не типові матеріали та технології для їх виготовлення / А.І. Бабич, В.П. Кернеш, П.В. Білоус // Вісник Хмельницького національного університету. Серія "Технічні науки". – 2021. – № 6 (303). – С. 229–235.

16. Бабич А.І. Розробка асортименту жіночого взуття з урахуванням споживчих переваг / А.І. Бабич, В.П. Кернеш // Вісник Хмельницького національного університету. Серія "Технічні науки". – 2019. – № 1 (269). – С. 77–81.

17. Maryna Leshchyshyn, Antonina Babych, Victoria Kernesh. SHAPING THE RANGE OF FOOTWEAR IN DIFFERENT MATERIALS ACCORDING TO A PERSON'S PSYCHO-TYPE. ICAMS 2022 – 9th International Conference on Advanced Materials and Systems. https://doi.org/10.24264/icams-2020.I.0-83-88

18. Бабич А.І. Використання елементів 3D друку в дизайні чоловічого костюму / А.І. Бабич, В.П. Кернеш, Д.В. Ткаченко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2022. – № 5 (285). – 7 с.

References

1. Holovni pravyla suchasnoho dyzainu [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : https://www.remontbp.com/sovremennyj-interer-2020/

2. Ofitsiinyi sait modnoho vydannia Vogue [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : //http://www.vogue.ua/

3. Znamenyti dyzainery predmetiv interieru [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://arx.novosibdom.ru/designers.

4. Ukraina v tsyfrakh: statystychnyi zbirnyk [Elektronnyi resurs]. – Kyiv, 2019. – Rezhym dostupu : https://ukrstat.org/uk/druk/publicat/kat_u/2019/zb/07/Ukr_cifra_2018_u.pdf.

5. Ukrainski eko-brendy [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : https://shotam.info/top-10-ukrains-ki-eko-brendy-iaki-pikluiut-sia-pro-dovkillia/

6. Bozhko Yu. H. Arkhitektonika i kombinatoryka formoutvorennia : pidruchnyk. dlia khudozh.-prom. vuziv i arkhit. fak. / Yu. H. Bozhko. – Kyiv : Vyshcha shk., 1991. – 244 s.

7. Nikolaieva T. V. Tektonika formoutvorennia kostiuma : navch. posibnyk. – Kyiv : Aristei, 2011. – 340 s.

8. Berdnyk T.O. Osnovy khudozhnoho proiektuvannia kostiuma ta eskiznoi hrafiky : navch. posibnyk / T.O. Berdnyk. – Lviv : Znannia, 2019. – 350 s.

9. Vasenok T.M. Iliustrovanyi posibnyk z konstruiuvannia shveinykh vyrobiv / avt.-uklad. T.M. Vasenok. – Hlukhiv : RVV HDPU, 2005. – 96 s.

10. Pashkevych K.L. Zastosuvannia suchasnykh metodiv dlia proektuvannia kolektsii odiahu skladnykh form / K.L. Pashkevych, M.V. Kolosnichenko, K.O. Naumenko, O.S. Khapantseva // Teoriia ta praktyka dyzainu. Tekhnichna estetyka. – 2015. – Vyp. 8. – S. 217–225.

11. Raeve A. D., Vasile S., Cools J. Selected factors influencing wear comfort of clothing: case studies. J Textile Eng Fashion Technol. 2018. № 4(1). P. 66-71.

12. Suprun N.P. Konfektsiiuvannia materialiv dlia odiahu : navch. pos. / N.P. Suprun, L.V. Orlenko, E.P. Drehulias, T.O. Volynets. – K. : Znannia, 2008. – 246 s.

13. Iezhova O. V. Tekhnolohiia shveinykh vyrobiv. Ch. 1 / Yezhova O. V. – Kyiv : VSh, 2002. – 102 s.

14. Lytvyn V.H. Konstruiuvannia shveinykh vyrobiv : pidruchnyk / V.H. Lytvyn, A.O. Stepura. – K. : Viktoriia, 2008. – 320 c.

15. Babych A.I. Innovatsii v dyzaini vyrobiv industrii mody, ne typovi materialy ta tekhnolohii dlia yikh vyhotovlennia / A.I. Babych, V.P. Kernesh, P.V. Bilous // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriia "Tekhnichni nauky". – 2021. – № 6 (303). – S. 229–235.

16. Babych A.I. Rozrobka asortymentu zhinochoho vzuttia z urakhuvanniam spozhyvchykh perevah / A.I. Babych, V.P. Kernesh // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriia "Tekhnichni nauky". – 2019. – № 1 (269). – S. 77–81.

17. Maryna Leshchyshyn, Antonina Babych, Victoria Kernesh. SHAPING THE RANGE OF FOOTWEAR IN DIFFERENT MATERIALS ACCORDING TO A PERSONS PSYCHO-TYPE. ICAMS 2022 – 9th International Conference on Advanced Materials and Systems. https://doi.org/10.24264/icams-2020.I.0-83-88

18. Babych A.I. Vykorystannia elementiv 3D druku v dyzaini cholovichoho kostiumu / A.I. Babych, V.P. Kernesh, D.V. Tkachenko // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. – 2022. – № 5 (285). – 7 s.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-27-35
УДК 621.318

BATYGIN YURIY
Kharkiv National Automobile and Highway University
https://orcid.org/0000-0002-1278-5621
e-mail: yu.v.batygin@gmail.com
SHINDERUK SVITLANA
Kharkiv National Automobile and Highway University
https://orcid.org/0000-0002-6354-4174
e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net
CHAPLYGIN EVGEN
Kharkiv National Automobile and Highway University
https://orcid.org/0000-0003-1448-6091
e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com
FENDRYKOV DENIS
Kharkiv National Automobile and Highway University
https://orcid.org/0000-0002-9702-6412
e-mail: 097931417e@gmail.com

THE DIFFERENT APPROACHES TO THE TRANSFORMATION OF REACTIVE POWER INTO AN ACTIVE POWER

The relevance of the development of modern problems of the electric power industry in connection with the depletion of the planet's natural resources is undeniable and initiates the development of new physical and technical solutions with the practical use of known natural phenomena. The method of this work is to propose, justifying the expediency of a possible scheme of a resonant converter of reactive power into activity and conducting an analysis of the electromagnetic processes occurring in them. The proposed schemes combine the presence of resonant parallel and resonant circuit complexes. The difference is in the way they are implemented. For the data of the joint circuit, the feature is the presence of two inductively coupled active-reactive circuits, but different in the ways of creating resonance conditions. For a circuit without an additional power source, it is shown that the successful implementation of resonance conditions is possible by choosing the appropriate element base. For a circuit with an additional source of harmonic voltage, it is shown that for a suitable setting it is possible to completely eliminate the negative influence of the converter circuit on the source of reactive power. Calculations for the experimental model show that with the appropriate selection of the element base, it is possible to obtain a conversion factor of ~ 1.0 with a minimal effect on the current in reactive power sources. Given the calculated ratios, the mathematical apparatus of the theory of electric circuits was used to substantiate the principle possibility of resonant transformation of electrical energy. Thus, methods of calculating the characteristics of transient processes in closed circuits with active-reactive elements. For the first time, with the justification of practical power, we offer the possibilities of the scheme of resonant transformation of reactive power into active power, and an analysis of the electromagnetic processes occurring in them is carried out. The proposed work was initiated by the current needs of the electric power industry, caused by the depletion of natural resources and the rapidly growing needs of the world economy. The results of the work illustrate the practical possibilities of creating real schemes for converting reactive electricity into active electricity.

Keywords: electric power industry, resonant active-reactive electrical circuits, electrical power conversion.

БАТИГІН ЮРІЙ, ШИНДЕРУК СВІТЛАНА, ЧАПЛИГІН ЄВГЕН, ФЕНДРИКОВ ДЕНІС
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

РІЗНІ ПІДХОДИ ДО ПЕРЕТВОРЕННЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В АКТИВНУ

Актуальність вирішення сучасних проблем електроенергетики у зв'язку з виснаженням природних ресурсів планети є беззаперечною та ініціює розробку нових фізико-технічних рішень із практичним використанням відомих природних явищ. Метою даної роботи є запропонувати та обґрунтувати доцільність можливої схеми резонансного перетворювача реактивної потужності в активну та провести аналіз електромагнітних процесів, що відбуваються в них. Запропоновані схеми поєднують наявність резонансного паралельного та резонансного послідовного контурів. Різниця полягає в способі їх виконання. Для цих ланцюгів спільною ознакою є наявність двох індуктивно пов'язаних активно-реактивних ланцюгів, але різних за способами створення резонансних умов. Для схеми без додаткового джерела живлення показано, що успішна реалізація умов резонансу можлива шляхом вибору відповідної елементної бази. Для схеми з додатковим джерелом гармонічної напруги показано, що при відповідній настройці можна повністю усунути негативний вплив схеми перетворювача на джерело реактивної потужності. Розрахунки для експериментальної моделі показують, що при відповідному підборі елементної бази можна отримати коефіцієнт перетворення ~ 1,0 з мінімальним впливом на струм в джерелі реактивної потужності. Для обґрунтування принципової можливості резонансного перетворення електричної енергії при виведенні розрахункових співвідношень використано математичний апарат теорії електричних кіл. Зокрема, методи розрахунку характеристик перехідних процесів у замкнутих колах з активно-реактивними елементами. Вперше запропоновано можливі схеми резонансного перетворення реактивної потужності в активну з обґрунтуванням практичної потужності та проведено аналіз електромагнітних процесів, що відбуваються в них. Дана робота була ініційована поточними потребами електроенергетики, викликаними виснаженням природних ресурсів і стрімко зростаючими потребами світової економіки. Результати роботи ілюструють практичні можливості створення реальних схем перетворення реактивної електроенергії в активну.

Ключові слова: електроенергетика, резонансні активно-реактивні електричні ланцюги, перетворення електроенергії.

Introduction

Resonance as a key to "energetic spike" in oscillatory systems of any physical nature was first pointed out

in the works of Nikola Tesla. As it follows from his publications the main problem which demanded immediate solution was the problem not only resonant generation but and wireless transportation of the electrical energy on the long distances. With this goal N. Tesla built and successfully tested so named "Wardenclyffe Tower". It was the first telecommunication facility which was intended for commercial transatlantic telephony, broadcasting, and demonstration of the energy wireless transfer. No less important problem of our time is a problem of the effective conversion of the energy different kinds (solar, wind, thermal) in the electrical energy which is the indisputable factor of the Humanity comfortable existence. In this connection, it should be noted the obvious interest of the world scientific community to all practically possible technical elaborations which are directed on the solution of the above-marked problem of the modern electrical power engineering.

Brief literature review, the investigation purpose

The first type of patented electrical energy converter this is widely known as the “Tesla transformer” which is the super effective resonant amplifier of high voltage with the transformation factor – k > 1000 [1]. Many works dedicated to the investigation of this device, for example [2–4]. Among them, a search can be distinguished of determined optimal solutions of further increasing efficiency the "Tesla transformer" proper [2]. The publication [3] represents itself a practical manual for designing and creating the powerful many aim electrical energy converter for different fields of application. The investigations of the transient processes in the inductive coupled resonant circuits of the "Tesla transformer" with the attraction of the electrical circuit methods were conducted by authors of the work [4]. The got results and the numerical estimates agree fully with the inventor qualitative conclusions which were formulated else at the last century beginning. The articles [5–8] are dedicated to the non-traditional methods of conversion the different kinds of energy. So, the innovative approaches to the cosmic apparatuses energetic have been formulated on a base of the theoretical investigations of the vacuum quant states, substance stability and gravitation [5]. Technically based suggestions to convert a heat in the electrical energy are defended by Patents [6, 7]. The workable and quite effective resonant converters of electrical energy are represented in the works [9, 10]. At last, the appearance of the Patent [11] with a quite high area of application is conditioned by the practical interest to the resonant reactive power amplifying. The invention subject is related to the impact excitation systems in the power engineering but can find application in the uninterrupted feeding sources and the electromagnetic oscillations transmitters for creating the super-power probing signals.

The essential demerit of the known suggestions of the energy conversion based on the resonant phenomena in the electrical engineering systems (also and in the Tesla transformer!) is the reactive power output what is very problematic for a practical usage. In this connection, a transformation of the reactive power in an active one which can be used for different works fulfilling has the practical interest. A practical solution of this problem can be realized with help of scheme from two inductively coupled resonant circuits. The first of them is the parallel one and the second circuit is the serial circuit. The physical essence of the present suggestion consists in following. The reactive power from a source is fed to an input of the first parallel circuit. The latter one is excited in the "current resonance" regime when the currents in the reactive power source outputs equal to zero and when their influence on this source is excepted fully. At the expense of the inductive coupling, the signal is transmitted to the second serial circuit tuned on the "voltage resonance" what allows to maximize the output electrical power in resistor which is the converter active load.

In the converter represented variant the conditions for “the current resonance” in the input parallel circuit are being created at the expense of its parameters corresponding choice which is directed on what to exclude the converter influence on the processes into the reactive power source and to stabilize the device operation in whole.

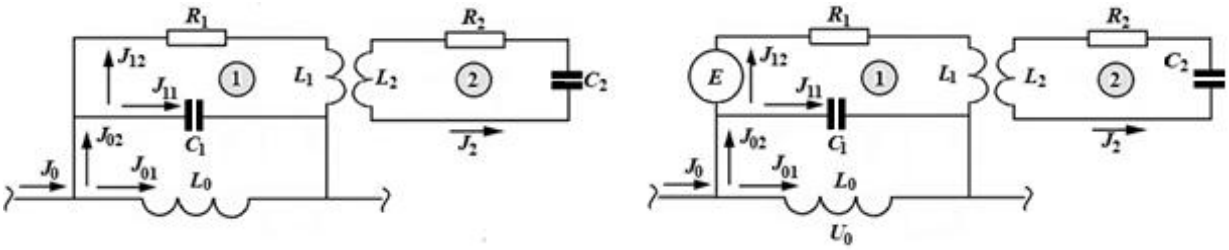
The other method of the resonant conditions creation in the input parallel circuit is possible. With this goal, the additional source of the harmonic voltage is being introduced. The appointment of the latter one analogically to the previous variant consists in what to exclude the energy interchange between the converter and the reactive power source.

Physically, the action of the additional source in the input parallel circuit with the real parameters can be interpreted as introducing some conditioned “negative” impedance which removes the influence of the active resistance and inductive coupling with the output circuit on the “resonance current” excitation in the converter input circuit [12].

The aim of the present work is the possible schemes suggestion of the resonant converter of the reactive power into the active one and the processes analysis in them. These schemes are united by the existence of the resonant parallel circuit and resonant serial circuit. The difference between the schemes consists in the realization methods of their principle action. In the first scheme, this is the choice of the corresponding element base. In the second one, this is the introduction of the additional auxiliary source of the harmonic voltage.

Problem formulation, calculation expressions

Electrical schemes. Two possible schemes of the suggested resonant conversion of the reactive power into active one are represented on Fig. 1.



a) b)

Fig. 1. Electrical schemes of the resonant converter of the reactive power into the active one
a) the scheme without the additional auxiliary source of the voltage;
b) the scheme with including the additional auxiliary source of the voltage – *E*

They are united by the availability of two inductive coupled resonant circuits – 1 and 2. The first of them is excited in the "current resonance" regime, the second one is excited in the "voltage resonance" regime [11]. The load of the converter suggested schemes is a resistor in the second resonant circuit. The reactive power source is the inductance – (with current and with voltage) fed by a current. Difference between the schemes represented variants consists in the methods of the "current resonance" excitation in the circuit – 1. In the scheme (on Fig. 1. a) a creation of the necessary conditions is realized at the expense of its element base choice. In the scheme (on Fig. 1. b) this problem is solved by the introduction of the additional harmonic voltage.

Action Principle. Naturally, electromagnetic processes in the converter circuits affect the current and voltage in the reactive power source. If the circuit – 1 is excited in "current resonance", it should not affect the processes in the inductance – L_0 because the current in the output conductors is zero $J_{02} = 0$ and the potential difference at the output of the source should determine the voltage – U ot on the capacitors without distortion – C_2 Next, the electromagnetic energy in circuit – 1 due to the inductive connection $L_1 - L_2$ is transferred to circuit – 2. The latter is excited in the "voltage resonance" mode, which allows to minimize losses and obtain output active power. current flowing in the load of the converter – R_2 .

The relation of the active power on the output to the input reactive power is the quantitative transformation index of one kind of the electromagnetic energy in another with help of the resonant converter suggested schemes.

It should be marked the common distinguished particularities of the suggested electrical schemes. The first of them consists in the application of the parallel circuit with the "current resonance" what allows to minimize the influence on the processes in the reactive power source. The second one consists in the application of the "serial circuit" with the "voltage resonance" what allows to maximize the output active power in the converter load.

Let us consider each represented scheme separately.

The reactive power converter to the active one the scheme of which consists of two resonant RLC circuits without the voltage additional source (Fig. 1 a).

As it was pointed out, the necessary conditions creation for the "current resonance" in the parallel circuit is realized at expense of the according element base choice.

For the solution of the formulated problem we shall accept the following statements.

1. The suggested scheme of the converter consists of two inductive coupled resonant circuits: parallel and serial.

2 The frequencies of these circuits equal between to each other and $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ – is the resonant frequency of all converter scheme.

3 The first resonant circuit – 1 is connected in parallel to the reactive power source (the inductance coil – L_0) with the harmonic current and voltage – $U_0(t) = U_m \sin(\omega \cdot t)$ (U_m – is the amplitude, ω – is the frequency, t – is the time).

The calculation relationships for theoretical justification of the accepted schemes workability are based on the physically "transparent" phenomenological statements and on the strict mathematical approach with the use methods of the theory electrical circuit [11].

We start from the second serial active-reactive circuit. The state equation has the view [11]:

$$\left(i\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right) + R_2 \right) \cdot J_2 + i\omega \left(k_{12} \cdot \sqrt{L_1 L_2} \right) \cdot J_{12} = 0 \qquad (1)$$

where $k_{12} \in [0,1]$ – is the electromagnetic coupling level coefficient between inductances – L_2 and L_1 .

In the resonant regime with frequency – $\omega = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$ the connection between the currents are being installed the expression:

$$J_2 = -\frac{i\omega\left(k_{12}\cdot\sqrt{L_1 L_2}\right)}{R_2}\cdot J_{12} \qquad (2)$$

In the first parallel active-reactive circuit the next equations system can be written:

$$\begin{cases} \left(i\omega L_1 + R_1\right)\cdot J_{12} + i\omega k_{12}\cdot\sqrt{L_1 L_2}\cdot J_2 = U_{C_1}, \\ U_{C_1} = \dfrac{1}{i\omega C_1}\cdot J_{11}, \end{cases} \qquad (3)$$

where U_{C_1} is the voltage on the parallel branches of the considered circuit.

From expressions (2) and (3) the currents in the parallel branches – J_{12} and J_{11} can be found.

$$\begin{cases} J_{12} = U_{C_1}\cdot\dfrac{1}{i\omega L_1 + \left(R_1 + \dfrac{k_{12}^2\cdot(\omega L_1)\cdot(\omega L_2)}{R_2}\right)}, \\ J_{11} = U_{C_1}\cdot i\omega C_1. \end{cases} \qquad (4)$$

Their sum determines the current – J_{02} in the output conductors from the reactive power source to the parallel resonant circuit [11].

Skipping the mathematical transformations [12], we receive that

$$J_{02} = J_{11} + J_{12} = U_{C_1}\cdot\left(i\omega C_1 + \frac{1}{i\omega L_1 + \left(R_1 + \dfrac{k_{12}^2\cdot(\omega L_1)\cdot(\omega L_2)}{R_2}\right)}\right) \qquad (5)$$

Dependencies (4) and (5) we shall re-write in the format which is comfortable for the next analysis.

$$\begin{cases} J_{02} = U_{C_1}\cdot\left(i\omega C_1 + \dfrac{1}{i\omega L_1 + R_1\cdot\left(1 + K_{12}^2\cdot Q_1\cdot Q_2\right)}\right), \\ J_2 = -ik_{12}\cdot\sqrt{\dfrac{L_1}{L_2}\cdot Q_2\cdot\dfrac{U_{C_1}}{i\omega L_1 + R_1\cdot\left(1 + k_{12}^2\cdot Q_1\cdot Q_2\right)}}, \end{cases} \qquad (6)$$

where $Q_1 = \dfrac{\omega L_1}{R_1}, Q_2 = \dfrac{\omega L_2}{R_2}$ – are Q – factors of the resonant circuits of the converter, correspondingly.

It is obvious from the physical considerations the “current resonance” realization in the parallel circuit demands quite small of the active resistance and quite weak electromagnetic coupling with the serial circuit. These facts determine the converter minimal influence on the reactive power source.

Neglecting summands $\left(\dfrac{R_1}{\omega L_1}\right) \ll 1$ and $k_{12}^2 \ll 1$, we shall receive the next expressions from the formulas (6):

$$\begin{cases} J_{02} \approx U_{C_1}\left(i\omega C_1 + \dfrac{1}{i\omega L_1}\right), \\ J_2 \approx -U_{C_1}\cdot K_{12}\cdot\sqrt{\dfrac{L_1}{L_2}\cdot Q_2\cdot\dfrac{1}{\omega L_1}}, \end{cases} \qquad (7)$$

In the resonant regime (with frequency $\omega = \dfrac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$) the expressions (7) accept the view:

$$\begin{cases} J_{02} \approx 0, \\ J_2 \approx -U_{C_1}\cdot K_{12}\cdot\sqrt{\dfrac{L_1}{L_2}}\cdot Q_2\cdot\dfrac{1}{\omega L_1}. \end{cases} \qquad (8)$$

It follows from (8), the current in the output wires from the reactive power source will equal to zero and the voltage on the parallel circuit branches will equal to the voltage on the terminals of this source, $U_{C_1} = U_0$.

The ratio of the output active power and the input reactive power (the conversion coefficient) can be written in the following way:

$$K = \frac{P_2}{P_0} = k_{12}^2 \cdot \left(\frac{L_0}{L_1}\right) \cdot Q_2. \qquad (9)$$

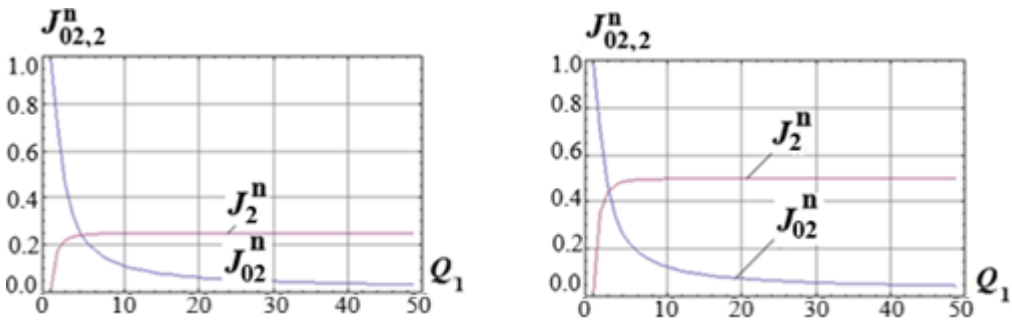
The got dependency is the main result of the accepted idealization. According to (9), if $k_{12}^2 \cdot \left(\frac{L_0}{L_1}\right) \cdot Q_2 > 1$, then not simply conversion but even the resonant amplifying the electrical power will have a place.

For the numerical estimates, we transform the dependencies (6) with normalizing to the current amplitude in the reactive power source inductance.

We receive that

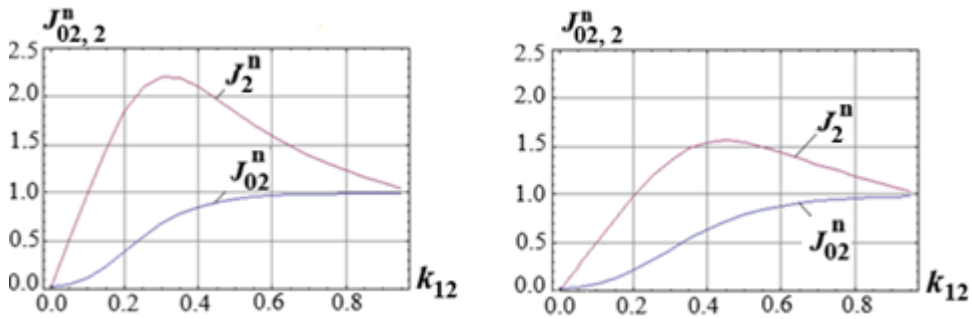
$$\begin{cases} J_{02}^n = \dfrac{J_{02}}{J_{01}} = \left(\dfrac{L_0}{L_1}\right) \cdot \left(\dfrac{\left(1 + k_{12}^2 \cdot Q_1 \cdot Q_2\right)}{\sqrt{Q_1^2 + \left(1 + k_{12}^2 \cdot Q_1 \cdot Q_2\right)^2}}\right); \\ J_2^n = \dfrac{J_2}{J_{01}} = \dfrac{k_{12} \cdot \dfrac{L_0}{\sqrt{L_1 L_2}} \cdot Q_1 \cdot Q_2}{\sqrt{Q_1^2 + \left(1 + k_{12}^2 \cdot Q_1 \cdot Q_2\right)^2}}. \end{cases} \qquad (10)$$

The calculated graphical dependencies for the converter experimental model with the considered electrical scheme are represented on Fig. 2 – Fig. 4.



a) b)

Fig. 2. The graphical dependencies of the excited currents on the Q-factor of the parallel circuit under $L_0 = L_1 = L_2 = 14.8$ μH
a) $Q_2 = 5$, $k_{12} = 0.05$; b) $Q_2 = 10$, $k_{12} = 0.05$



a) b)

Fig. 3. The dependencies of the excited currents on the electromagnetic coupling level under

$L_0 = L_1 = L_2 = 14.8$ μH and $k_{12} = 0.05$,

***a*) $Q_1 = 50$, $Q_2 = 10$; b) $Q_1 = 50$, $Q_2 = 5$**

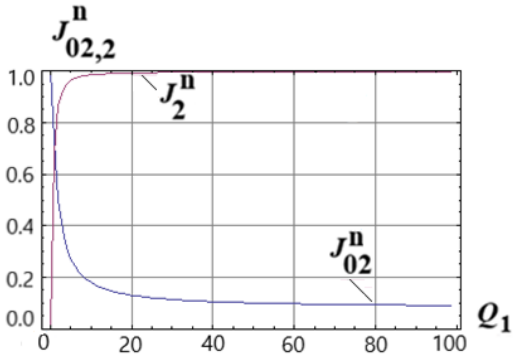


Fig. 4. The illustration of the electromagnetic processes characteristics in the converter optimal variant under $L_0 = L_1 = L_2 =$ 170 μH,

$$Q_2 = 12.5,\ k_{12} = 0.08,\ K = 1.0$$

The conducted calculations showed the effectiveness of the converter of the reactive power into the active one is determined by the following factors.

Increasing Q-factor of the parallel (the first) circuit allows decreasing its influence on the processes in the source what is explained by grows of this circuit inductive inductance relatively to its active resistance (the condition of the "current resonance").

The current limit value in the output from the source under the fixed Q-factor value of the serial (the second) circuit is determined by the relationship: $\lim\limits_{Q_1 \to \infty} J^{n}_{02} = \left(\frac{L_0}{L_1}\right) \cdot k^2_{12} \cdot Q_2$.

The current amplitude in the load beginning from some Q-factor value of the parallel (the first) circuit does not depend on its value and in limit will be equal to $\lim\limits_{Q_1 \to \infty} J^{n}_{2} = k_{12} \cdot \frac{L_0}{\sqrt{L_1 L_2}} \cdot Q_2$

A balance saves between the grows of the output current and decreasing the current in the output of the source demands quite small the electromagnetic coupling level between the circuits what is determined by fulfilling the "current resonance" conditions in the parallel circuit.

Finishing to comment the got results, it should be marked that the effective work of the investigated device means the maximum of the current and power in the load under the minimal influence on the inductance of the reactive power source.

As the calculations showed the optimal regime of the suggested converter of the reactive power into active one is the regime in which the circuits inductances are the same – $L_0 = L_1 = L_2 = 14.8$ μH, the Q-factors of the resonant circuits are $Q_1 = 100.0$, $Q_1 = 12.5$ and the level of the electromagnetic coupling between the circuits is $k_{12} = 0.08$ If the working frequency equals to ~ $25\,\text{kHz}$ then the active resistance of the parallel circuit has to be equaled to $R_1 \approx 0.27$ Om and the converter active load can equal to $R_1 \approx 2.14$ Om (it should be marked – low-resistance load).

The current distortion and, correspondingly, the influence index on the source amounts 8,5% – but the currents in the source and in the load are equaled to each other. And the input reactive power is transformed without losses in the output active electrical power in the load.

<u>The reactive power converter to the active one with the harmonic voltage additional source (Fig. 1. b)</u>

The corresponding conditions creation for the "current resonance" in the converter parallel circuit is realized at the expense of introduction of the harmonic voltage additional source.

The solution of the formulated problem will be conducted identically to the previous accordingly to the following assumptions.

The equivalent scheme of the converter consists of two inductively coupled resonant circuits: parallel and serial.

The frequencies of these circuits equal to between each other and $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ – is the resonant frequency of all converter scheme.

The first resonant circuit – 1 is connected in parallel to the reactive power source (the inductance coil – L_0) with the harmonic current and voltage – $U_0(t) = U_m \sin(\omega \cdot t)$ (U_m – is the amplitude, ω – is the frequency, t – is the time).

The additional harmonic voltage source – $E(t) = E \cdot \sin(\omega t)$ is connected in the parallel circuit in parallel to its capacitance.

Identically to the previous the state equations taking into account the voltage additional source can be written [11].

$$\begin{cases} R_2 \cdot J_2 + i\omega\left(k_{12} \cdot \sqrt{L_1 l_2}\right) \cdot J_{12} = 0; \\ \left(i\omega L_1 + R_1\right) \cdot J_{12} + i\omega\left(k_{12} \cdot \sqrt{L_1 L_2}\right) \cdot J_2 - E = U_{C_1}; \\ J_{11} = i\omega C_1 \cdot U_{C_1}; \end{cases} \quad (11)$$

where $Q_1 = \frac{L_1}{R_1}, Q_2 = \frac{\omega L_2}{R_2}$ are the Q – factors of the converter circuits, correspondingly.

The currents in the converter scheme elements are found from the algebraic equations system (11).

$$\begin{cases} J_2 = -\frac{i\omega\left(k_{12} \cdot \sqrt{L_1 L_2}\right)}{R_2} \cdot J_{12}; \\ J_{12} = \frac{U_{C_1} + E}{R_1 \cdot \left(iQ_1 + \left(1 + k_{12}^2 \cdot Q_1 \cdot Q_2\right)\right)}; \\ J_{11} = i\omega C_1 \cdot U_{C_1}. \end{cases} \quad (12)$$

The current in the output of the reactive power source is found summing the currents in the parallel circuit branches taking into account the resonance:

$$j_{02} = J_{11} + J_{12} = \frac{\left(E + i\frac{U_{C_1}}{Q_1} \cdot \left(1 + k_{12}^2 \cdot Q_1 Q_2\right)\right)}{R_1 \cdot \left(iQ_1 + \left(1 + k_{12}^2 \cdot Q_1 \cdot Q_2\right)\right)}. \quad (13)$$

As it follows from (13) in order to $J_{02} = 0$ it is necessary

$$E = -iU_{C_1} \cdot \left(\frac{1}{Q_1} + k_{12}^2 \cdot Q_2\right). \quad (14)$$

Taking into account that $U_{C_1} = U_0$ and under condition (14) the current in the converter load will equal to

$$J_2 = \frac{U_0}{R_2} \cdot \left(k_{12} \cdot \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}\right) \cdot e^{-\frac{\pi}{2}}. \quad (15)$$

The conversion coefficient of the amplitude of the reactive power into active one is being found by the known manner [12]:

$$K = \frac{|P_2|}{|P_0|} = \left(\frac{L_0}{L_1}\right) \cdot k_{12}^2 \cdot Q_2, \quad (16)$$

where $P_0 = \frac{U_0^2}{\omega L_0}$ – is the power of the reactive power source.

It is obvious that for the converter maximal effectiveness in the whole the additional voltage source contribution in the “current resonance” realization in the parallel circuit has to be minimal value. For this, as it follows from dependencies (14) and (16) it is necessary to create the quite high Q-factor – $Q_1 \gg 1$ and the quite weak electromagnetic coupling with the serial circuit under its small Q-factor. Formally, the latter requirements will be determined by the inequality: $k_{12}^2 \cdot Q_2 \ll 1$. Under this, the dependence of the conversion power coefficient – (16) demands increasing parameter – $k_{12}^2 \cdot Q_2$.

It is obvious from the practical considerations the main parameter in the effectiveness estimations of the suggested device is the voltage minimum of the additional source. The first, the coefficient conversion value is not so important because the formulated task consisted in the conversion of the reactive power into active one (but it was not the power amplify). The second, the coefficient of conversion depends on the relation – $\left(\frac{L_0}{L_1}\right)$, what

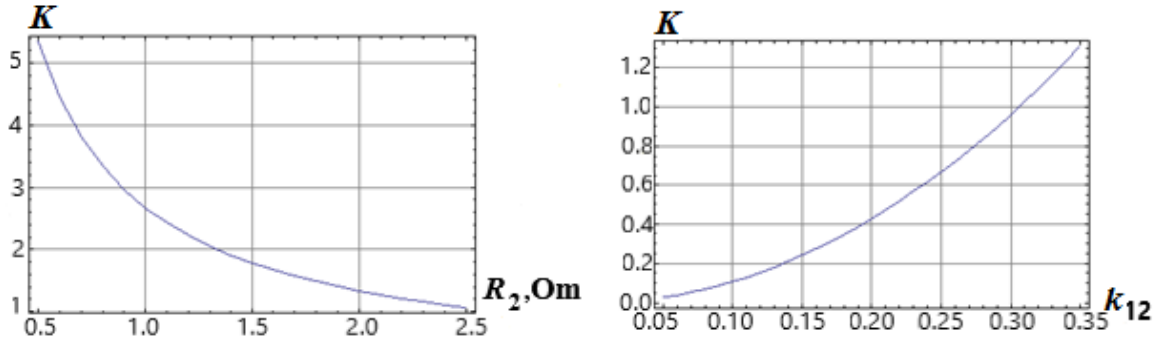
permits regulating its value. In this connection the choice of the parameter – $k_{12}^2 \square Q_2$ have to be oriented on the dependence (14) in the first turn and already after this on dependence (16).

It is obviously the variations of the marked quantities and the correspondingly correct choice of the key parameters of the suggested scheme will allow to determine the demanded voltage of the additional source and the conversion coefficient of the reactive power into active one.

The numerical estimates which illustrate usage of the got dependencies and the qualitative analysis results we shall fulfill for the converter experimental model. Let us start from the following initial data: $k_{12}^2 \square Q_2 = 0.1$ ($k_{12} = 0,1, Q_2 = 10$) the source reactive power inductance is $L_0 = 170\,\mu\text{H}$, the parallel circuit inductance is $L_1 = 17\,\mu\text{H}$, the working frequency is $\omega = 2\pi \square 25000\,\text{Hz}$. If $L_2 = L_0 = 170\,\mu\text{H}$ the acceptable value of the load active resistance will be equaled to $R_2 = \dfrac{\omega L_2}{Q_2} = 2.7\,\text{Om}$. Under the active resistance of the parallel circuit – $R_1 = 0.1\,\text{Om}$ its Q-factor will be equaled to $Q_1 = \dfrac{\omega L_1}{R_1} = 26.7$.

Now the conversion coefficient from the formula (16) will equal to – $K = 1.0$, the voltage of the additional source from the formula (14) will equal to – $|E| \approx 0.14 \square U_{C_1}$ what amounts to ~ 14% of the voltage of the reactive power source.

The functional dependencies – $K = K\left(R_2, k_{1,2}\right)$ are represented on Fig. 5.



a) b)

Fig. 5. The conversion coefficient of the reactive power into active one in the converter experimental model a) the dependence on the load resistance ($k_{12} = 0.1$),

b) the dependence on the electromagnetic coupling level between the circuits ($R_2 = 2.5\,\text{Om}$)

From dependencies on Fig. 5 the conclusion follows about the possibility work of the reactive power converter into active one as the electrical power amplifier. It is obvious from the graphic on Fig. 5 that under the quite real level of the electromagnetic coupling between the circuits – $k_{12} = 0.1$ and the active load value – $R_2 < 1.5\,\text{Om}$ the conversion coefficient amounts – $K > 1$.

The presented estimates suggest that the proposed converter circuit, with an appropriate choice of its parameters, makes it possible to obtain amplified active power in a low-resistance load at the output of the device under study.

It should be noted that in the converter experimental model the necessary voltage of the additional foreign source can be practically to install at expense variation of its amplitude-phase characteristics till receiving the zero current in conductors from the output clips of the reactive power source.

Conclusions

The possible schemes of the resonant converter of reactive power into active one the common thing for which is existence of two inductively coupled active-reactive circuits but different by the ways of the resonant conditions creation are suggested.

For the scheme where the resonance excitation is fulfilled by the corresponding choice of its parameters the conditions are determined the realization of which minimizes the suggested scheme influence on the processes in the reactive power source under the current maximum in the converter load.

The calculations for the experimental model showed that under the corresponding choice of the element base it is possible the real receiving the conversion coefficient ~ 1.0 under minimum influence on the current in the reactive power source (till ~ 8,5 %).

For the scheme with the additional source of the harmonic voltage it is shown that under corresponding tuning the negative influence of the converter scheme on the reactive power source can be fully excluded.

The numerical estimates for the experimental model with the additional source of the harmonic voltage showed its practical workability and the high effectiveness of the power conversion.

References

1. Tesla N. Inventions of Nikola Tesla: A Complete Set of Patents. Ed. Shedleski Ty. Book Shed. 2014. 618 p.
2. Denicolai M. Optimal performance for Tesla Transformers. Review of Scientific Instruments. 2002. Vol. 73 (9). P. 3332–3336.
3. Tilbury M. The Ultimate Tesla Coil Design and Construction Guide: McGraw-Hill.
4. Batygin Yu. V., Shinderuk S. A., Serikov G. S. The quantitative indices of the induction effects and the resonance phenomena in the Tesla transformer. Danish Scientific Journal. 2018. Vol. 11. P. 72–79.
5. Daniel C., Cole E., Harold Puthoff. Extracting energy and heat from the vacuum. Physical Reviewe. 1993. Vol. 48 (2). P. 1562–1565.
6. Zaev N. E. The capacitive converter of the environment heat into electrical energy: Patent RU 2227947.
7. 2002.
8. Danielian M. I., Anisimov V. E., Churilin V. V. The method of straight converting heat energy in the electrical energy: Patent RU 2236723. 2014.
9. Kenneth R. Shoulders Energy Conversion Using High Charge Density: Patent US 5018180. May 21, 1991.
10. Steigerwald R. I. A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies. IEEE Transactions on Power Electronics. 1988. Vol. 3. P. 174–182.
11. Daocheng H., C Lee Fred, Pengju K. High-Efficiency CLL Resonant Converters with Synchronous Rectifiers. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2011. Vol. 58. P. 3461–3470.
12. Pat. na korysnu model № 103215 Ukrainy. MPK (2015.01) N03N 7/00. Rezonansnyj pidsyljuvach potuzhnosti; zaiavnyk i patentovlasnyk Lyhovyd Ju. M. № u 2015 04915; zaiav. 20.05.2015; opubl. 10.12.2015, Bul. № 23. 6 p.
13. Tamm I. E. Fundamentals of the Theory of Electricity: Translated from the Russian by G. Leib. English translation. Mir Publishers. 1979.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-36-43
УДК 621.317

БЕЗВЕСІЛЬНА ОЛЕНА
НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
https://orcid.org/0000-0002-6951-1242
e-mail: o.bezvesilna@gmail.com
НЕЧАЙ СЕРГІЙ
НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
https://orcid.org/0000-0002-7821-6472
e-mail: prilad@gmail.com
ТОЛОЧКО ТЕТЯНА
НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
https://orcid.org/0000-0002-2346-0419
e-mail: prilad168@gmail.com
ГРИНЕВИЧ МАРІЯ
Державний університет «Житомирська політехніка»
https://orcid.org/0000-0001-9183-5211
e-mail: kakit_gms@ztu.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ МОДЕЛІ ПОБУДОВИ СТАБІЛІЗАТОРА З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ

У статті вирішено актуальну проблему - досліджено зміни моделі побудови стабілізатора з метою підвищення точності. У процесі оптимізації було визначено основні варіанти оптимальних значень налаштувальних коефіцієнтів блоку управління стабілізатора. Для перших трьох варіантів налаштувальних коефіцієнтів проведено порівняльне моделювання з використанням двох типів ДКШ: ГТ46 та G20-075-100 зі смугою пропускання 100 Гц. Показано, що збільшення коефіцієнта підсилення позитивно впливає на жорсткість системи. Показано, що, на відміну від стабілізатора з використанням ГТ46, уведення ДКШ МЕМС дозволяє збільшувати коефіцієнт підсилення й тим самим підвищити жорсткість системи. У результаті моделювання показано, що прийнятна динамічна помилка зберігається при подальшому збільшенні коефіцієнта підсилення до K_y K_y=109 і K_y K_y=116. Збільшення коефіцієнта K_y до значення 122 призводить до збільшення коливальності динамічної помилки стабілізатора. Встановлено, що зі зменшенням коефіцієнта підсилення характер зміни амплітуди динамічної помилки для ДКШ ГТ-46 та G20-075-100 збігається. Встановлено, що високочастотні коливання, які мають місце, обумовлені досить високим коефіцієнтом підсилення K_y K_y=102. Показано, що застосування ДКШ МЕМС, що характеризується високими резонансними частотами, дозволяє виключити смуговий фільтр із складу стабілізатора. Встановлено, що зі збільшенням смуги пропускання ДКШ забезпечується більш плавне відпрацьовування заданого гармонійного впливу. Визначено, що підвищення точнісних характеристик може бути досягнуто за рахунок зменшення дискретності обробки цифровим обчислювачем блоку управління до 1,0 мс та полосою пропускання не менше 100 Гц. Забезпечено високі вимоги щодо точності стабілізатора – динамічна похибка не перевищує 1 т.д. (3.6 кут. хв).

Ключові слова: стабілізатор, динамічна похибка, моделювання, гармонійний вплив, імпульсний вплив, налаштувальні коефіцієнти, коефіцієнт підсилення.

BEZVESILNA OLENA, NECHAI SERGEY, TOLOCHKO TETIANA
NTUU «Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky»
GRYNEVYCH MARIIA
State University «Zhytomyr Polytechnic»

RESEARCH OF THE CHANGE OF THE STABILIZER CONSTRUCTION MODEL WITH THE PURPOSE OF INCREASING ACCURACY

The article solves an actual problem - changes in the stabilizer construction model are investigated in order to increase accuracy. In the process of optimization, the main variants of the optimal values of the adjustment coefficients of the stabilizer control unit were determined. For the first three variants of the tuning coefficients, comparative modeling was carried out using two types of DCS: GT 46 and G20-075-100 with a bandwidth of 100 Hz. It is shown that an increase in the amplification factor has a positive effect on the rigidity of the system. It is shown that, in contrast to the stabilizer using GT46, the introduction of the DCS MEMS allows to increase the amplification factor and thereby increase the rigidity of the system. As a result of the simulation, it is shown that the acceptable dynamic error is preserved when the amplification factor is further increased to K_u = 109 and K_u = 116. An increase in the Ku coefficient to a value of 122 leads to an increase in the fluctuation of the dynamic error of the stabilizer. It was established that with a decrease in the amplification factor, the nature of the change in the amplitude of the dynamic error for the GT-46 and G20-075-100 DCS coincides. It was established that the high-frequency oscillations that occur are caused by a rather high amplification factor K_u=102. It is shown that the use of the DCS MEMS, which is characterized by high resonant frequencies, makes it possible to exclude the bandpass filter from the stabilizer. It was established that with an increase in the bandwidth of the DCS, a smoother working out of the given harmonic influence is ensured. It was determined that an increase in accuracy characteristics can be achieved by reducing the discreteness of processing by the digital computer of the control unit to 1.0 ms and a bandwidth of at least 100 Hz. High requirements for the accuracy of the stabilizer are ensured - the dynamic error does not exceed 1 td. (3.6 angular min).

Key words: stabilizer, dynamic error, modeling, harmonic influence, impulse influence, adjustment factors, gain factor.

Постановка проблеми

Стабілізатори використовуються у багатьох галузях науки і техніки: у гравіметрії для стабілізації осей чутливості навігаційних чутливих елементів (гравіметрів , акселерометрів), у військовій галузі для стабілізації озброєння та ін.

Від точності стабілізаторів великим чином залежить як точність гравіметричних систем, так і ефективність сучасних систем озброєння. Тому дослідження питань підвищення точності стабілізаторів надзвичайно актуальні.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Стабілізаторам присвячена велика кількість наукових праць [1–12 та ін.]. У [5] описана процедура вимірювання динамічної похибки стабілізації. В [7] надано технічний опис та деякі вказівки щодо експлуатації стабілізаторів. В [8] висвітлено автоматичні системи управління стабілізаторами. У [6] надано аналітичний огляд закордонних систем наведення та стабілізації.

Однак, з відомої літератури [1–12 та ін.], присвяченої стабілізаторам, видно, що дослідження зміни моделі побудови стабілізатора з метою підвищення точності не проводились.

Тому **мета даної статті** – висвітлити питання підвищення точності стабілізатора шляхом дослідження зміни моделі побудови стабілізатора.

Завдання статті наступні:

- дослідити вплив полоси пропускання;
- дослідити вплив дискретності обчислення;
- оцінити імпульсний вплив;
- оцінити похибку стабілізатора на підставі дослідження реакції на гармонійний сигнал.

Викладення основного матеріалу статті

Було проведене моделювання з метою вивчення можливості підвищення точнісних характеристик стабілізатора з використанням як традиційного електромеханічного гіроскопічного датчика кутової швидкості (ДКШ) ГТ46, так і сенсору нового типу, Кориолісова вібраційного гіроскопа (КВГ) [1,2].

Використання нових твердотільних КВГ є одним з основних напрямків сучасного приладобудування. Такі датчики мають широку область застосування, у тому числі, вони забезпечують стабілізацію платформ із установленими на них вимірювальними пристроями й системами керування рухомими об'єктами різного класу, вимірювальними блоками для інерціальної навігації.

Одночасно з гіротахометром ГТ46 [1,2] та ДКШ КВГ з полосою пропускання та дискретністю обчислення 100 Гц [5], були проведені відповідні оцінки і для ДКШ типів MEMSG20-075-100 з полосою пропускання 100Гц і волоконно-оптичного гіроскопа (ВОГ) ВГ910Ф [6] з полосою пропускання 450 Гц, представлені на рис. 1.

а) б) в) г)

Рис. 1. Датчики кутової швидкості: а) електромеханічний гіротахометр ГТ46; б) Коріолісовий вібраційний гіроскоп КВГ26; в) оптико-волоконний гіроскоп ВГ910Ф; г) мікромеханічний гіроскоп (МЕМС) CRS03

При проведенні моделювання було проведено оцінку впливу смуги пропускання та дискретності обчислення інформаційного обміну.

При моделюванні використовувались обчислювальні схеми гіроскопічних вимірювачів ГТ46, КВГ100 та ВГ910Ф [9–11]. Технічні характеристики цих датчиків кутової швидкості наведено у таблиці 1 [1].

Дослідження можливості підвищення точності стабілізатора з урахуванням уведення датчиків кутової швидкості нових типів було проведено з урахуванням таких основних положень, як оптимізація параметрів посилення ДКШ, постійна часу інтегратора, а також налаштувальні коефіцієнти у контурах керування.

Таблиця 1

Таблиця порівняльних характеристик датчиків кутової швидкості

№	Технічний параметр	ГТ46	КВГ	МЕМС CRS03	ВГ910Ф
1	Смуга пропускання	30 Гц	100 Гц	100 Гц	(400/–) Гц
2	Час готовності	120 с	< 1 с	< 0,1 с	–/0,2с
3	Діапазон швидкостей	± 50 °/с	± 200 °/с, ±400°/с	± 75 °/с	± 370 °/с
4	Поріг чутливості	0,015 °/с	–	–	–
5	Масштабний коефіцієнт	0,17 В-с/град	0,04 1/(град сек)	15 мВ/(град сек)	5,5/7,5 мВ/(град сек)
6	Дрейф нуля		< 5 град/час		< 4 град/час
7	Шум	–	0,003 град/час	0,05 град/сек/√Гц	–
8	Діапазон температур	– 40 ÷ +70° С	(– 40 ÷ +75)°С	(– 40 ÷ +85)° С	(– 40 ÷ +70)° С
9	Напруга живлення	~3ф, 36В 400Гц (0,4) А	(15 ÷ 30) В, 2,5 Вт	–	+ 5 В (20 °С)
10	Стійкість до ударів	100 g (0,5-1) мс	–	500g	1/150 мс/g
11	Середнє напрацювання на відмову	1000 ч	> 500000 ч	–	60000 ч
12	Вихідний сигнал	аналоговий	RS-422, RS-485	–	аналоговий
13	Маса	2,3 кг	2,6 кг	30 г	≈ 120 г

Оптимізація проводилася на підставі мінімізації H_2 H_2 - норми замкненої передатної функції лінійної моделі стабілізатора

$$H_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} tr\left(W(j\omega)^{*}W(j\omega)\right)d\omega}, \quad (1)$$

де $W(j\omega)$ - $W(j\omega)$ — передатна функція системи стабілізації,

* - символ комплексно-сполученої матриці.

Обраний критерій забезпечує високу точність процесів керування з урахуванням можливості зміни параметрів системи.

У процесі оптимізації були визначені наступні варіанти оптимальних значень налаштувальних коефіцієнтів блоку управління, які наведені у табл. 2.

Таблиця 2

Оптимальні значення налаштувальних коефіцієнтів блока управління [1]

	Коефіцієнт підсилення тракту управління 0÷136	Коефіцієнт передачі сигналу гіротахометра 0÷125	Коефіцієнт передачі в ланцюзі зворотного зв'язку по струму 0÷125
Варіант 1	102	9	10
Варіант 2	85	7	8
Варіант 3	44	6	8
Варіант 4	102	7	10
Варіант 5	109	6	2
Варіант 6	109	7	2

В основу аналізу результатів моделювання були покладені оцінка динамічної похибки стабілізатора і його реакція на імпульсний вплив.

Оцінка динамічної похибки стабілізатора проводилася на підставі дослідження реакції на гармонійний сигнал, що подавався на вхід ДКШ (рис. 2).

Амплітуда та частота зміни сигналу відповідають коливанням корпусу виробу з амплітудою 2,5º та частотою 0,8 Гц та аналогічні методам випробувань 2Э52 [1, 2].

Оцінка імпульсного впливу проводилася на підставі дослідження реакції на послідовність імпульсів, що подавались на вхід ДКШ. Параметри імпульсних впливів приймались у відповідності з даними, які отримані при проведенні ударних випробувань в польових умовах - тривалість імпульсу 5,0 мс з амплітудою 0,5 рад/с, що відповідає вихідному сигналу ГТ46 на рівні 6В.

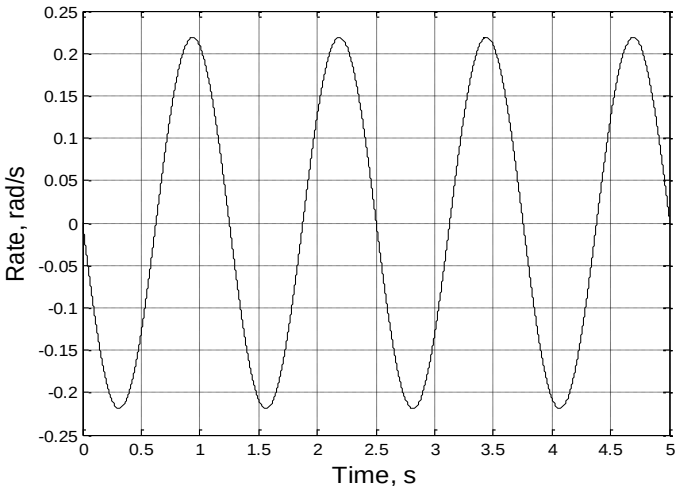


Рис. 2. Гармонійний вплив, що задається на вході ДКШ [1]

Наведемо результати досліджень щодо впровадження нових ДКШ.

У процесі моделювання [1, 2, 5, 6] були розглянуті варіанти налаштувальних коефіцієнтів блоку керування, значення яких наведені у табл. 1. Моделювання виконувалося на прикладі горизонтального каналу блоку управління.

Для перших трьох варіантів налаштувальних коефіцієнтів проводилося порівняльне моделювання з використанням двох типів сенсорів: ГТ46 та G20-075-100 зі смугою пропускання 100 Гц. Результати моделювання для першого варіанта налаштування представлені на рис. 3 та рис. 4. Показано, що збільшення коефіцієнта підсилення позитивно впливає на жорсткість системи.

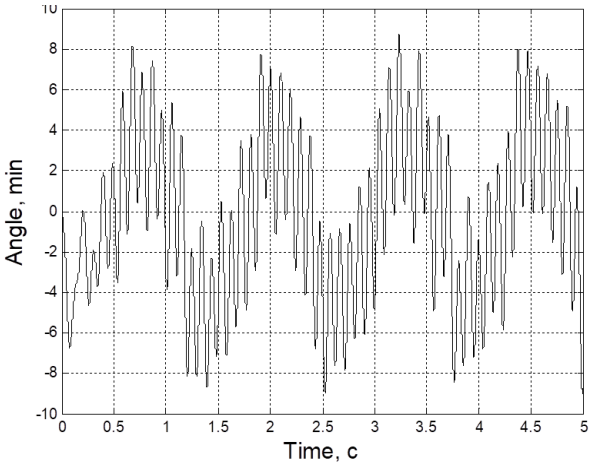


Рис. 3. Динамічна похибка стабілізатора з ГТ46 при завданні сигналу 0,219Cos(5,02t+π/2) для варіанта 1 налаштування

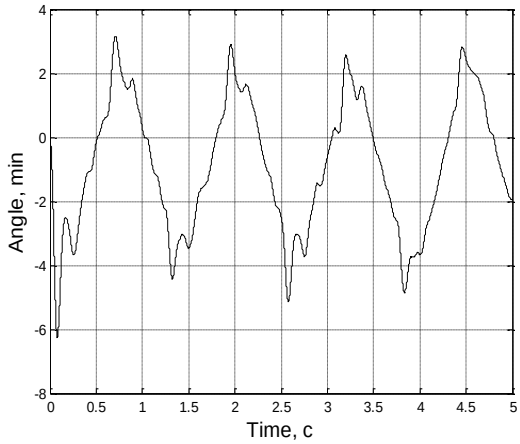


Рис. 4. Динамічна похибка стабілізатора з з G20-075-100 при завданні сигналу 0,219Cos(5,02t+π/2) $0{,}219Cos(5{,}02t+\frac{\pi}{2})$ **для варіанта 1 налаштування**

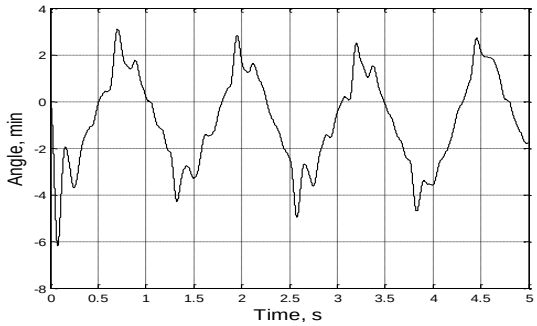


Рис. 5. Динамічна похибка стабілізатора з G20-075-100 при завданні сигналу 0,219Cos(5,02t+π/2) $0{,}219Cos(5{,}02t+\frac{\pi}{2})$ **для варіанта 1 налаштування K_y=109**

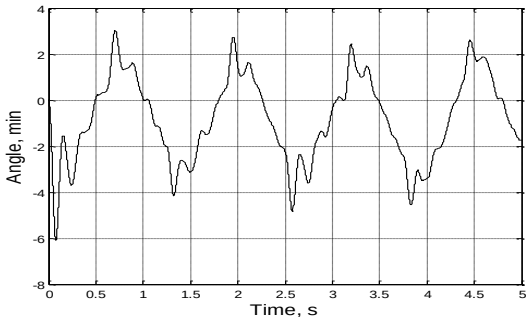


Рис. 6. Динамічна похибка стабілізатора з G20-075-100 при завданні сигналу 0,219Cos(5,02t+π/2) для варіанта 1 налаштування K_y=116

Найбільшим коефіцієнтом підсилення характеризується варіант 1 налаштувальних коефіцієнтів. На відміну від стабілізатора з використанням ГТ46, уведення ДКШ МЕМС дозволяє збільшувати коефіцієнт підсилення й тим самим підвищити жорсткість системи. Результати моделювання показали, що прийнятна динамічна помилка зберігається при подальшому збільшенні коефіцієнта підсилення до $К_у$ $K_у$=109 і $К_у$ $K_у$=116. Збільшення коефіцієнта $К_у$ $K_у$ до значення 122 призводить до збільшення коливальності динамічної помилки стабілізатора. Результати моделювання при збільшенні коефіцієнта підсилення до 109 і 116 представлені на рис. 5 та 6. Результати моделювання для другого й третього варіантів налаштування представлені на рис. 7- 8.

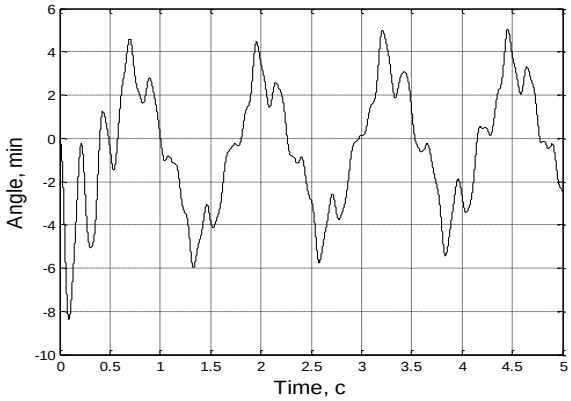


Рис. 7. Динамічна похибка стабілізатора з ГТ46 при завданні сигналу 0,219Cos(5,02t+π/2) для варіанта 2 налаштування

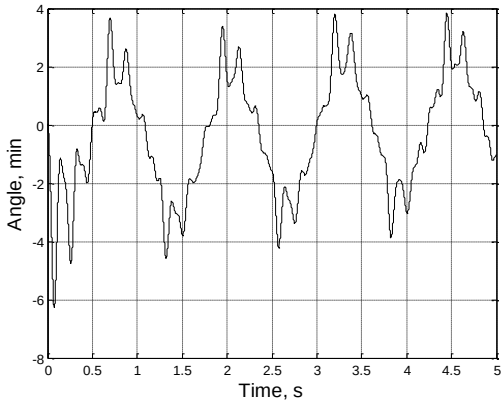


Рис. 8. Динамічна похибка стабілізатора з G20-075-100 при завданні сигналу 0,219Cos(5,02t+π/2) для варіанта 2 налаштування

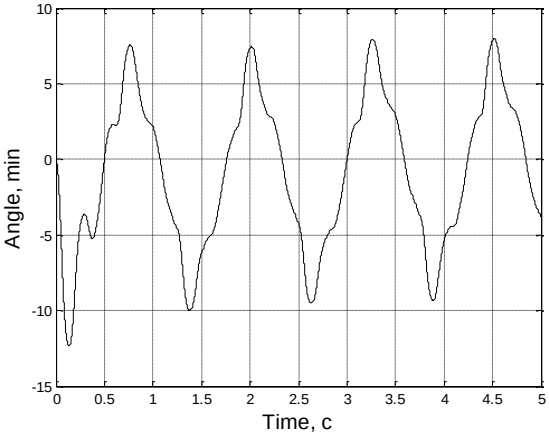


Рис. 9. Динамічна похибка стабілізатора з ГТ46 при завданні сигналу 0,219Cos(5,02t+π/2) для варіанта 3 налаштування *Ку* =44

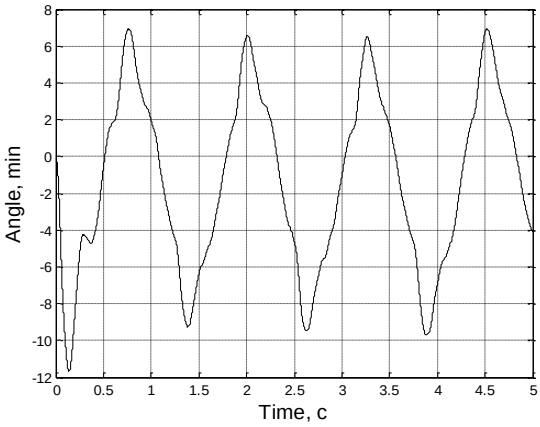


Рис. 10. Динамічна похибка стабілізатора з G20-075-100 при завданні сигналу 0,219Cos(5,02t+π/2) для варіанта 3 налаштування *Ку* =44

Аналіз рис. 5-6 показує, що зі зменшенням коефіцієнта підсилення характер зміни амплітуди динамічної помилки для ДКШ ГТ-46 та G20-075-100 збігається. Це дає можливість припускати, що високочастотні коливання, які мають місце на рис. 3, обумовлені досить високим коефіцієнтом підсилення $К_у$=102. Крім того, слід ураховувати те, що до складу стабілізатора із ГТ46 входить смуговий фільтр для зменшення резонансних частот (рис. 11). Застосування ДКШ МЕМС, що характеризуються високими резонансними частотами, дозволяє виключити смуговий фільтр із складу стабілізатора.

Зі зменшенням коефіцієнта підсилення до 44 (рис. 9 та 10, що відповідають варіанту 3 налаштування) амплітуда динамічної помилки і характер її зміни стають ідентичними. При цьому, амплітуда динамічної помилки стабілізатора перевищує припустиме значення у 2 рази.

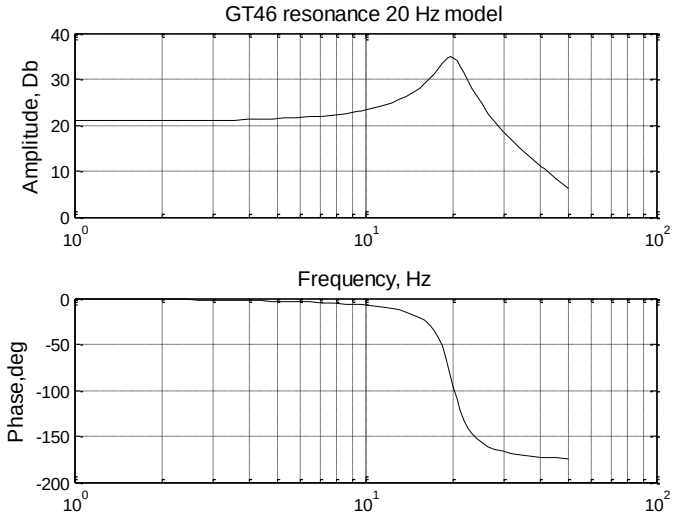


Рис. 11. ЛАЧХ ГТ46 з резонансом 20 Гц[1]

Наведемо результати досліджень впливу смуги пропускання. Результати дослідження впливу ширини смуги пропускання ДКШ на завадостійкість стабілізатора представлені на рис. 12–15, де задаються значення смуги пропускання 100 Гц, 200 Гц, 300 Гц, 400 Гц відповідно. При цьому використовується варіант 4 налаштувальних коефіцієнтів табл. 1. На рис. 15 представлено динамічну похибку СО при дискретності 1,0 мс для ДКШ типу ВГ910Ф. На рис. 17 представлено відпрацювання послідовності імпульсів при дискретності 1,0 мс для ДКШ типу ВГ910Ф. Графічні дані з наведених рисунків демонструють, що зі збільшенням смуги пропускання ДКШ забезпечується більш плавне відпрацьовування гармонійного впливу, що задається. При цьому виконуються вимоги щодо точності стабілізатора – динамічна похибка не перевищує 1 т.д. (3.6 кут. хв).

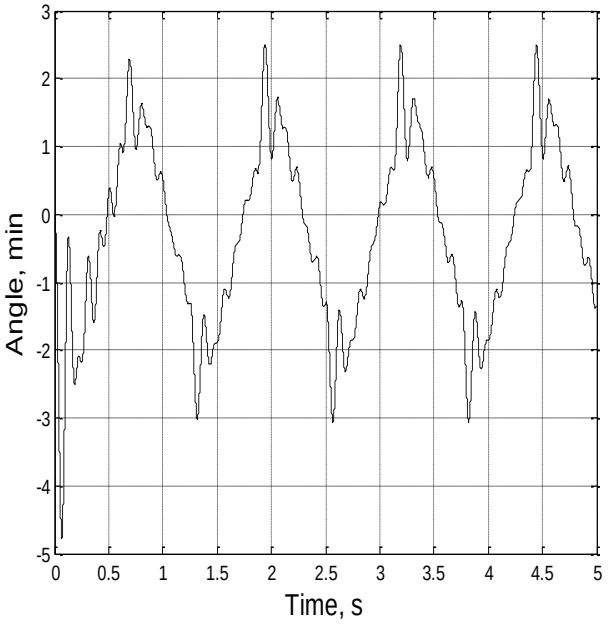


Рис. 12. Динамічна похибка при смузі пропускання ДКШ 100 Гц

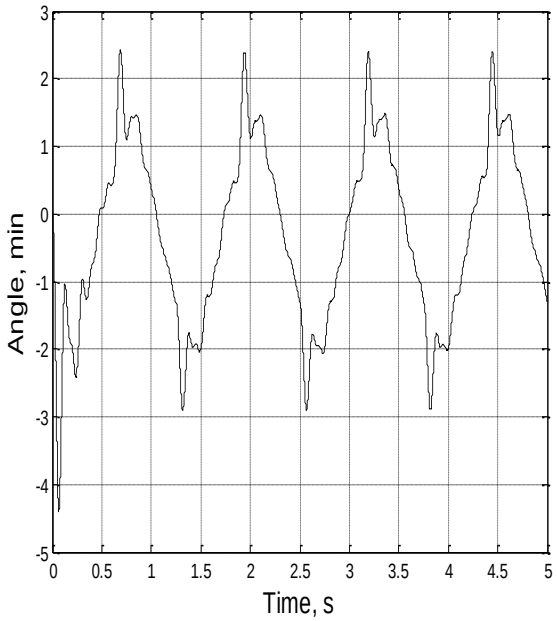


Рис. 13. Динамічна похибка при смузі пропускання ДКШ 200 Гц

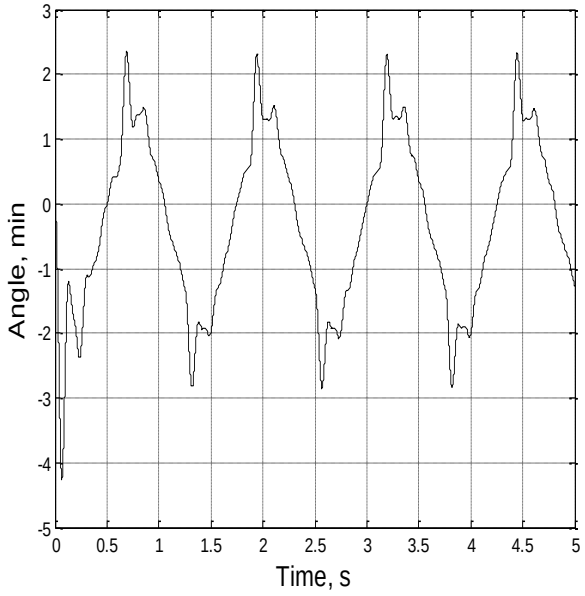


Рис. 14. Динамічна похибка при смузі пропускання ДКШ 300 Гц

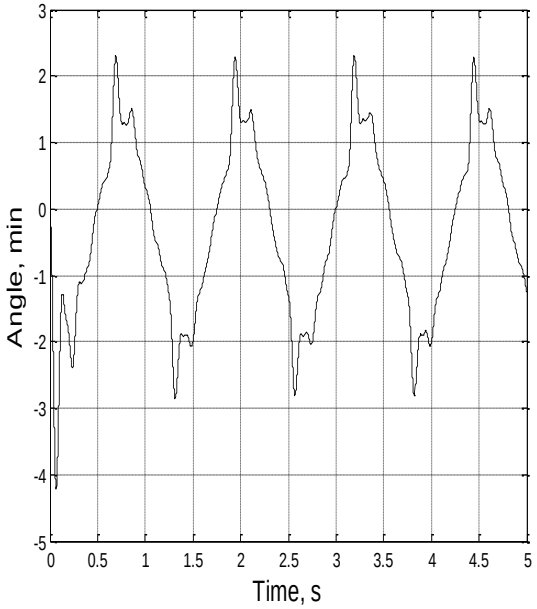


Рис. 15. Динамічна похибка при смузі пропускання ДКШ 400 Гц

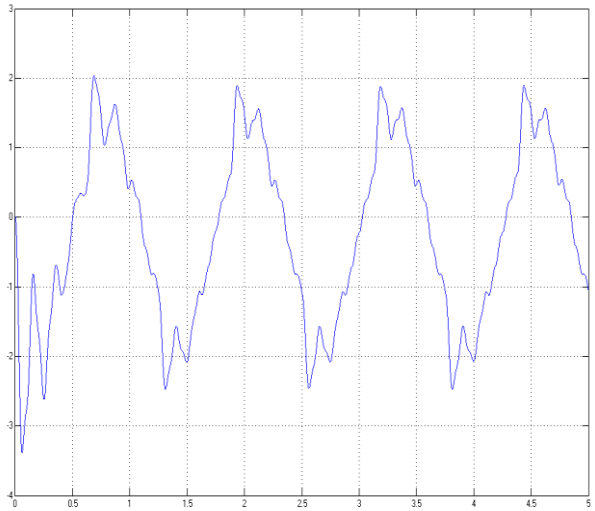


Рис. 16. Динамічна похибка СО при дискретності 1,0 мс для ВГ910Ф

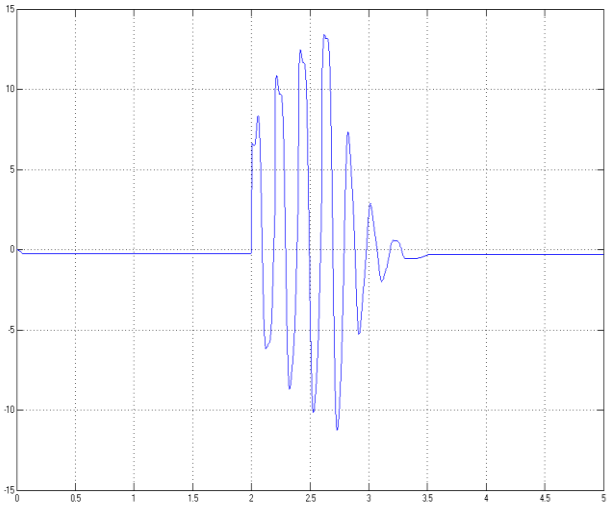


Рис. 17. Відпрацювання послідовності імпульсів при дискретності 1,0 мс для ВГ910Ф

Висновки

1. У процесі оптимізації було визначено основні варіанти оптимальних значень налаштувальних коефіцієнтів блоку управління стабілізатора;

2. Для перших трьох варіантів налаштувальних коефіцієнтів проведено порівняльне моделювання з використанням двох типів ДКШ: ГТ46 та G20-075-100 зі смугою пропускання 100 Гц. Результати моделювання для першого варіанта налаштування представлено на рис. 3 та 4. Показано, що збільшення коефіцієнта підсилення позитивно впливає на жорсткість системи;

3. На відміну від стабілізатора з використанням ГТ46, уведення ДКШ МЕМС дозволяє збільшувати коефіцієнт підсилення й тим самим підвищити жорсткість системи. Результати моделювання показали, що прийнятна динамічна помилка зберігається при подальшому збільшенні коефіцієнта підсилення до $K_у$ $K_у$=109 і $K_у$ $K_у$=116. Збільшення коефіцієнта $K_у$ до значення 122 призводить до збільшення коливальності динамічної помилки стабілізатора;

4. Встановлено, що зі зменшенням коефіцієнта підсилення характер зміни амплітуди динамічної помилки для ДКШ ГТ-46 та G20-075-100 збігається. Це дає можливість припускати, що високочастотні коливання, які мають місце, обумовлені досить високим коефіцієнтом підсилення $K_у$=102. Застосування ДКШ МЕМС, що характеризуються високими резонансними частотами, дозволяє виключити смуговий фільтр із складу стабілізатора;

5. Встановлено, що зі збільшенням смуги пропускання ДКШ забезпечується більш плавне відпрацьовування гармонійного впливу, що задається. При цьому виконуються високі вимоги щодо точності стабілізатора – динамічна похибка не перевищує 1 т.д. (3.6 кут. хв);

6. Математичним моделюванням визначено, що підвищення точнісних характеристик може бути досягнуто за рахунок зменшення дискретності обробки цифровим обчислювачем блоку управління до 1, 0 мс та полосою пропускання не менше 100 Гц.

Література

1. Безвесільна О.М., Ільченко М.В. Методи та засоби підвищення точністних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації. КПІ ім. Ігоря Сікорського. ДП «Редакція інформаційного бюлетеня» Офіційний вісник Президента України». З грифом КПІ ім. Ігоря Сікорського 2020. Київ, 208 с.

2. Безвесільна О.М., Квасніков В.П., Цірук В.Г., Чіковані В.В. Системи наведення та стабілізації озброєння. Житомир: ЖДТУ, 2014. 176 с.

3. Безвесільна О.М., Ткачук А.Г., Хильченко Т.В., Нечай С.О. Simulation of influence of perturbation parameters of the new dual-channel capacitive MEMS gravimeter performance. Східно-Європейський журнал передових технологій № 6/7(84), 2016, с. 50-57.

4. Bezvesilna O.M., Tkachuk A., Chepyuk L., Nechai S., Khylchenco T. Introducing The Principle of Constructing an Aviation Gravimetric System With Any Type of Gravimeter. Східно-Європейський журнал передових технологій. № 1/7(85), 2017, с. 45–56.

5. Bezvesilna O.M., Petrenko O., Galycky V., Ilchenko M. Devising and Introducing a Procedure for Measuring a dynamic Stabilization error in Weapon stabilizers. Східно-Європейський журнал передових технологій. № 1/9(103), 2020, с. 39–45.

6. Цірук В.Г., Цірук В.Г., Квасніков В.П., Чепюк Л.О. Аналіз закордонних систем наведення та стабілізації. Вісник Інженерної академії України. 2014. № 2. С. 155–159.

7. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Боевая машина пехоты БМП-2. Часть. 1. 1987. URL: http://armyman/info/books/id-44.html.

8. Лепешинский И.Ю., Варлаков П.М., Захаров Д.Н., Чикирев О.И. Автоматические системы управления вооружением: учебное пособие. Омск, 2010. URL: http://mslstaryrussia.ru/forum/dowland/life.php?id=36773.

9. Гиротахометри ГТ46-01.URL: https://zelaz.ru/girotahometr-gt46-gt46-01.html.

10. КВГ, ЦКВГ. URL: https://zelaz.ru/koriolisovyy-vibracionnyy-giroskop-kvg-ckvg.htm.

11. G20 to axis MEMS rate gyro. URL: http//www/gladiatortechnologies/ com.

12. Волоконные датчики вращения ВГ***. Сводные ТУ. URL: https://www.fizoptika.ru/docs/fizoptika_doc105.pdf.

References

1. Bezvesilna O.M., Ilchenko M.V. Methods and means of improving the accuracy characteristics of the instrument system for measuring mechanical parameters and stabilization. KPI named after Igor Sikorsky. SE SE "Editorial of the newsletter" Official Gazette of the President of Ukraine". With the seal of KPI named after Igor Sikorsky 2020. Kyiv: 208 p.

2. Bezvesilna O.M., Kvasnikov V.P., Tsiruk V.G., Chikovani V.V. Weapon guidance and stabilization systems. - Zhytomyr: Zhdtu, 2014. 176 p.

3. Unmarried O.M., Tkachuk A.G., Khilchenko T.V., Nechay S.O. Simulation of influence of perturbation parameters of the new dual-channel capacitive MEMS gravimeter performance. East European Journal of Advanced Technologies No. 6/7(84), 2016, p. 50-57.

4. Bezvesilna O.M., Tkachuk A., Chepyuk L., Nechai S., Khylchenco T. Introducing The Principle of Constructing an Aviation Gravimetric System With Any Type of Gravimeter. Eastern European Journal of Advanced Technologies No. 1/7(85), 2017, pp. 45-56.

5. Bezvesilna O.M., Petrenko O., Galycky V., Ilchenko M. Devising and Introducing a Procedure for Measuring a dynamic Stabilization error in Weapon stabilizers. East European Journal of Advanced Technologies No. 1/9(103), 2020, p. 39-45.

6. Tsiruk V.G., Tsiruk V.G., Kvasnikov V.P., Chepyuk L.O. Analysis of foreign guidance and stabilization systems. Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine. No. 2, 2014. P. 155-159.

7. Technical description and operating instructions. BMP-2 infantry fighting vehicle. part 1. 1987. http://armyman/info/books/id-44.html.

8. Lepeshinsky I.Yu., Varlakov P.M., Zakharov D.N., Chikyrev O.I. Automatic weapon control systems. Teaching manual. Omsk. 2010. http://mslstaryrussia.ru/forum/dowland/life.php?id=36773.

9. Gyrotachometers GT46-01. https://zelaz.ru/girotahometr-gt46-gt46-01.html.

10. KVG, TsKVG. https://zelaz.ru/koriolisovyy-vibracionnyy-giroskop-kvg-ckvg.htm.

11. G20 to axis MEMS rate gyro. http//www/gladiatortechnologies/ com.

12. Fiber sensors of rotation of VG***. Consolidated technical specifications. https://www.fizoptika.ru/docs/fizoptika_doc105.pdf.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-44-47
УДК 721

ВАСИЛИНИЧ АНАСТАСІЯ
Вінницький національний технічний університет
https://orcid.org/0009-0007-0298-3011
e-mail: vasilinichnastya@gmail.com
КИРИЦЯ ІННА
Вінницький національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0002-8280-5552
e-mail: kyrytsya@vntu.edu.ua

«ЗЕЛЕНІ ПОВЕРХИ» – МАЙБУТНЄ ЕКОЛОГІЧНИХ МІСТ

В роботі розроблено проєкт багатоповерхового екологічного житлового будинку із «зеленими поверхами» та запропоновані оригінальні ідеї, що дозволять зменшити негативний вплив будівництва на довкілля та поліпшити якість життя людей. Будівництво екологічних житлових будинків дозволить вирішити екологічні проблеми, покращити психоемоційний стан людей, а також заощадити на електроносіях. Отримані в роботі результати можуть бути використані фахівцями у сфері будівництва.

Ключові слова: «зелені поверхи», екологічні будинки, екологічні міста.

VASYLYNYCH ANASTASIIA, KYRYTSYA INNA
Vinnytsia national technical University

«GREEN FLOORS" – THE FUTURE OF ECOLOGICAL CITIES

In this work the project of a multi-story ecological residential building with «green floors» is developed and original ideas are proposed that will reduce the negative impact of construction on the environment and improve people's quality of life. «Green floors» are floors, the area of which is decorated with flower beds and vertical gardens, as well as recreation areas. «Green floors» play the role of an oxygen station (having a positive effect on the environment), inter-floor sound insulation, reduce wind load and increase fire safety, allow developers to build more densely by reducing the area of adjacent park areas. The increase in environmental trends in construction is due to several factors. One of the most important factors is the growing awareness of people about the impact of construction on the environment and human health. The threat of climate change and environmental crises has caused increased interest in ecological construction. In the proposed project, the roof of the house can be profitably used, receiving electricity not only with the help of solar panels, but also wind generators and hydro generators. By combining these three alternative energy systems, maximum energy accumulation can be achieved. «Green floors» are the future of high-tech ecological cities, which will not only add aesthetic charm to the urban landscape, but also bring tangible benefits. The construction of ecological residential buildings will solve environmental problems, improve the psycho-emotional state of people, and also save on electronic media. Today's «green houses» are built quickly with relatively low cost, combining cost-effective solutions for energy carriers, and therefore have great potential for developers. The results obtained in the work can be used by specialists in the field of construction.

Keywords: «green floors», ecological houses, ecological cities.

Вступ

На сьогоднішній день будівельна індустрія щохвилини змінюється, вдало та швидко вдосконалюються нові продукти й технології. Технології залізобетону розвиваються доволі стрімко та використовуються у різних сферах. Велика увага приділяється технологіям, за допомогою яких людство може отримати електричну енергію у кількості, що здатна повністю забезпечити потреби. Екологічні стартапи дивують нас швидким та якісним втіленням у життя. Для прикладу перша «зелена» багатоповерхівка була збудована у 1970-х роках. У Фінляндії є квартал будівель, у фасад яких вбудовані панелі, що накопичують сонячну енергію. Наприклад, в Естонії так звані «хрущівки» почали перетворювати на енергоефективні smart-будинки. Об'єкти обладнають сонячними панелями, встановлять сучасні вікна, системи опалення, ізоляції та вентиляції.

Один з найбільших екологічних будинків у світі – це багатоповерхівка «Taipei 101» в Тайвані. Цей будинок займає 508 тисяч квадратних метрів і був спроєктований з використанням екологічних матеріалів і технологій, таких як повітряна очистка, використання дощової води та сонячні панелі. Іншим прикладом може бути «The Edge» в Амстердамі, Нідерланди. Цей офісний будинок був названий «найбільш екологічним будинком у світі» за результатами конкурсу BREEAM Awards 2016. Він використовує відновлювальну енергію, забезпечує ефективне використання електроенергії та води і має високі показники енергоефективності. Багатоповерховий житловий комплекс «Bosco Verticale» («Вертикальний ліс») в Мілані, Італія, складається з двох веж висотою 80 та 112 метрів, на яких знаходяться більше 900 дерев і 20 тисяч рослин. Вони не тільки виглядають гарно та естетично, але і відновлюють повітря та зменшують викиди вуглецю.

Збільшення екологічних тенденцій у будівництві [1–6] пов'язане з кількома факторами. Один з найважливіших факторів – це зростання свідомості людей про вплив будівництва на навколишнє середовище та здоров'я людей. Загроза зміни клімату та екологічних криз викликала підвищений інтерес до екологічного будівництва. Інші фактори, що впливають на збільшення екологічних тенденцій у будівництві, включають:

- підвищення енергоефективності та зменшення витрат на енергію в будівлях, що допомагає зменшити викиди парникових газів;

- покращення якості повітря та води в приміщеннях, що забезпечує здоровіші умови для проживання;
- використання екологічних матеріалів у будівництві, таких як відновлювані деревинні матеріали, біопластики та інші, що зменшують вплив будівництва на довкілля;
- розвиток технологій та інновацій у будівельній галузі, що дозволяє створювати більш ефективні та екологічні будівлі.

В результаті, екологічні тенденції у будівництві зростають і стають все більш популярними [1–6], що дозволяє зменшити негативний вплив будівництва на навколишнє середовище та поліпшити якість життя людей.

Багато людей на сьогоднішній день зацікавленні у «зеленому житлі», це не просто тенденція або нова реформа передових країн. Оселя, яка збудована з екологічних будівельних матеріалів, автономна з огляду енергетичних ресурсів, а головне, яка б не забруднювала навколишнє середовище, набуває великого значення. На даний момент в Україні зруйновано 74 тис. житлових будинків і ця цифра не остаточна... У відбудові найпершим кроком до відновлення буде повернення населенню власного житла. Системний підхід і надання переваг «екологічним будинкам» дозволять швидко і якісно відбудовувати цілі міста.

Метою роботи є розробити проєкт багатоповерхового екологічного житлового будинку із «зеленими поверхами» та навести його переваги з огляду на довкілля та ресурсозбереження, а також запропонувати ескіз будинку.

Виклад основного матеріалу

Спроєктований багатоповерховий будинок (рис. 1) складається зі стінових панелей, за допомогою яких процес зведення значно прискорюється (здача будинку в експлуатацію через 8 місяців від початку зведення) та робить запропонований будинок набагато дешевшим в порівнянні з іншими. Панельне будівництво – це швидко, надійно та недорого. Дана конструкція включає в собі 8 наземних та 3 підземних поверхи. Паркінгова зона розрахована на 54 паркомісця і має особливий функціонал використання. На 2-му поверсі можна легко монтувати/демонтувати перегородки для бомбосховища. Туди підведені два окремих канали комунікацій та система мікроклімату. Завдяки товстому шару бетону та ізолюючих матеріалів приміщення захищене від радіаційної небезпеки. Отже, площа може бути використана для різних цілей. Найнижчий підземний поверх обладнаний невеликою ГеоТЕС, а також гібридним інвертором. Перший рівень парковки обладнаний системою малошумних гідротурбін, що перетворюють падаючу з даху воду у енергію. В літній час використана вода збирається у резервуар для поливу газону, а в зимовий – для миття автомобілів від бруду та протиожеледних засобів.

Рис. 1. Спроєктована модель зеленого житлового будинку

Наземні поверхи включають перший поверх під комерцію, четвертий та шостий – зелені поверхи, а всі інші – житлові. Зелений поверх – це поверх, площа якого оздоблена клумбами та вертикальними садами, а також зонами для відпочинку. На ньому не живуть люди, немає комерції, на ньому кожен охочий може відпочити, прогулятись та просто провести час на свіжому повітрі. Один такий поверх може замінити вуличний майданчик та виділяти кисень у навколишнє середовище в 3,8% більше ніж алея довкола будинку. Вночі кисень експортується в атмосферу через відчинені вікна, а вдень, коли пил забруднює повітря – надлишок кисню подається через вентиляційні канали до квартир (рис. 2). Такі поверхи відіграють роль кисневої станції (позитивно впливаючи на екологію), міжповерхової звукоізоляції, зменшують вітрове навантаження та збільшують протипожежну безпеку, дозволяють забудовникам будувати щільніше за рахунок зменшення площі прибудинкових паркових зон.

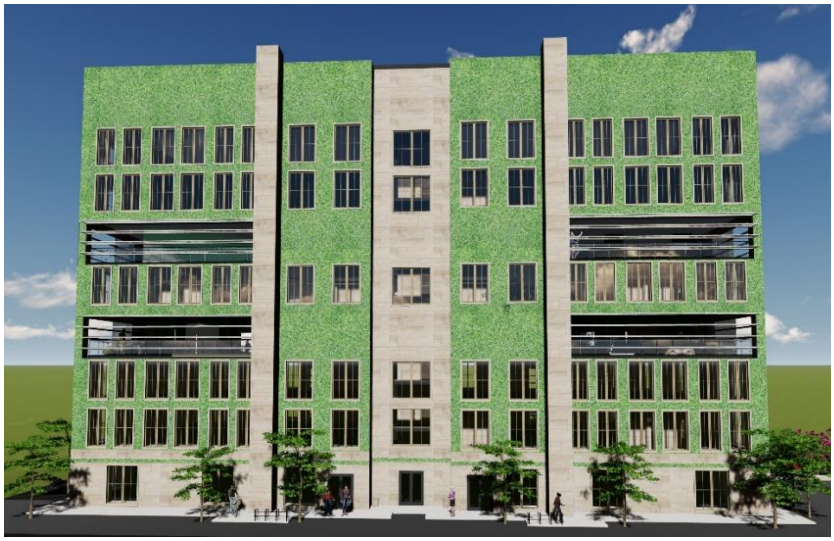


Рис. 2. Вид переднього фасаду багатоповерхового екологічного житлового будинку

Дах будівлі також поєднує інновації та ідеї. Нерухомі вітряні генератори, сонячні панелі та збір опадів у резервуар для скидання у турбіни ГЕС – ці системи в сумі здатні забезпечити автономне живлення будинку протягом 24 годин, а при надлишку електроенергії її можна експортувати у міську електромережу (рис. 3).

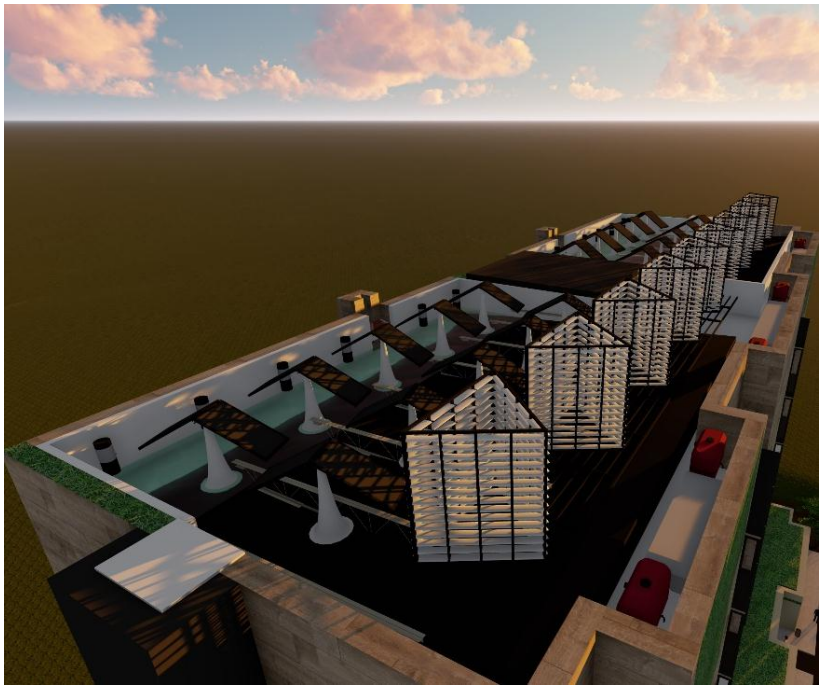


Рис. 3. Дах багатоповерхового екологічного житлового будинку

Дах будинку можна рентабельно використовувати отримуючи електроенергію не лише за допомогою сонячних панелей, а також вітрогенераторів і гідрогенераторів. При поєднанні цих трьох альтернативних систем енергетики можна досягти максимального акумулювання енергії.

Отже, перевагами даного проєкту є:

- швидке зведення будинку;
- наявність «Зелених поверхів»;
- наявність системи «Розумний дім»;
- наявність «зелених джерел енергії», що забезпечують автономність та прибуток.

Висновки

«Зелені поверхи» – це майбутнє високотехнологічних екологічних міст, які не лише додадуть естетичного шарму міському ландшафту, а і принесуть відчутну користь. Сучасні «зелені будинки» швидко будуються із відносно невеликою собівартістю, поєднуючи рентабельні рішення для енергоносіїв, а отже є великим потенціалом для забудовників.

Література

1. Абрамович В. С. Можливості зведення енергоефективних панельних будинків / В. С. Абрамович, В. П. Ковальський // Розвиток будівництва та житлово-комунального господарства в сучасних умовах : матеріали III Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції; 28-29. березня 2019 р.,- – Сєвєродонецьк : СНУ ім. В. Даля, 2019. – С. 13-14.

2. Сердюк Т. В. Особливості реалізації політики енерозбереження в Україні: досягнення та шляхи вдосконалення / Т. В. Сердюк, С. Ю. Франишина // Вісник Хмельницького національного університету. Серія "Економічні науки". – 2009. – № 1(125). – С. 52–57.

3. Сердюк Т. В. Економічні аспекти енергозбереження в будівництві та житловому фонді / Т. В. Сердюк, Т. В. Лавровська // Тези конференції. – 2015. – С. 48–52.

4. Еко-будинки: найцікавіші ідеї з усього світу. URL: https://www.5.ua/novyny-kompaniy/ekobudynky-naitsikavishi-idei-z-usoho-svitu-151950.html

5. Загоруйко А. О. Аналіз об'ємно-планувальних рішень театрів / А. О. Загоруйко, В. П. Ковальський // Енергоефективність в галузях економіки України : збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції 12-14 листопада. – Вінниця : ВНТУ, 2019. – С. 230–232.

6. Екологічні багатоповерхівки: чи є для них місце в Україні. URL: https://www.epravda.com.ua/columns/2019/11/25/654086/

References

1. Abramovych V. S. Mozhlyvosti zvedennia enerhoefektyvnykh panelnykh budynkiv / V. S. Abramovych, V. P. Kovalskyi // Rozvytok budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva v suchasnykh umovakh : materialy III Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii; 28-29. bereznia 2019 r.,- – Sievierodonetsk : SNU im. V. Dalia, 2019. – S. 13-14.

2. Serdiuk T. V. Osoblyvosti realizatsii polityky enerozberezhennia v Ukraini: dosiahnennia ta shliakhy vdoskonalennia / T. V. Serdiuk, S. Yu. Franyshyna // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriia "Ekonomichni nauky". – 2009. – № 1(125). – S. 52–57.

3. Serdiuk T. V. Ekonomichni aspekty enerhozberezhennia v budivnytstvi ta zhytlovomu fondi / T. V. Serdiuk, T. V. Lavrovska // Tezy konferentsii. – 2015. – S. 48–52.

4. Eko-budynky: naitsikavishi idei z usoho svitu. URL: https://www.5.ua/novyny-kompaniy/ekobudynky-naitsikavishi-idei-z-usoho-svitu-151950.html

5. Zahoruiko A. O. Analiz obiemno-planuvalnykh rishen teatriv / A. O. Zahoruiko, V. P. Kovalskyi // Enerhoefektyvnist v haluziakh ekonomiky Ukrainy : zbirnyk materialiv Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii 12-14 lystopada. – Vinnytsia : VNTU, 2019. – S. 230–232.

6. Ekolohichni bahatopoverkhivky: chy ye dlia nykh mistse v Ukraini. URL: https://www.epravda.com.ua/columns/2019/11/25/654086/

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-48-55
УДК 621.391

ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ МИКОЛА
Вінницький національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0002-6586-2563
e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com
БОЛДИРЕВА ОЛЬГА
Вінницький національний технічний університет
e-mail: rtt13bpoludenko@gmail.com
ВАРГАТЮК ГАННА
Вінницький національний технічний університет
e-mail: annaantonuik@gmail.com
БУДАШ МИХАЙЛО
Вінницький національний технічний університет
e-mail: mika@budash.dp.ua

ОПТИМАЛЬНІ СИГНАЛЬНО-КОДОВІ КОНСТРУКЦІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ РАДІОСИСТЕМ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 5G ТА 6G

В статті розглянуто способи підвищення ефективності інфокомунікаційних радіосистем мобільного зв'язку, що включає підвищення спектральної ефективності та енергоефективності при застосуванні для телекомунікаційного радіообладнання. Здійснено порівняння значень коефіцієнтів блокових помилок для методів f-OFDM, W-OFDM та OFDM при змішаній нумерології висхідного та низхідного абонентських каналів доступу до інформаційних ресурсів телекомунікаційної мережі.

Ключові слова: низхідний канал, висхідний канал, відношення пікової потужності до середньої потужності, сигнально-кодова конструкція, позасмугове випромінювання, метод ущільнення сигналів, доплерівський зсув діапазону, міжсимвольні завади, схема модуляції сигналів.

VASYLKIVSKYI MYKOLA, BOLDYREVA OLHA, VARGATYUK GANNA, BUDASH MYHAILO
Vinnytsia National Technical University

OPTIMAL SIGNAL-CODE CONSTRUCTIONS FOR INCREASE EFFICIENCY OF 5G AND 6G MOBILE INFOCOMMUNICATION RADIO SYSTEMS

The article discusses methods of increasing the efficiency of information communication radio systems of mobile communication, which includes increasing spectral efficiency and energy efficiency when used for telecommunication radio equipment. A comparison of block error coefficient values for f-OFDM, W-OFDM and OFDM methods with mixed numerology of uplink and downlink subscriber channels of access to information resources of the telecommunications network was made. As a result of the study of compression methods using several carriers, the dominant compression method for mobile communication systems, in particular, the CP-OFDM method due to its high efficiency of spectrum use, scalability and flexibility due to the introduction of a cyclic prefix, has been determined.

It is proved that the CP-OFDM compression method is free from the Doppler range shift problem, thus the range and Doppler shift estimations can be considered as independent tasks in CP-OFDM. In addition, CP-OFDM parameters such as carrier distance, guard interval size, frame length, and pilot shape can be tailored to optimize the performance and robustness of detection and data transmission. However, such advantages are based on perfect synchronization (time and frequency) between the transmitter and receiver - although perfect synchronization may not be possible, especially for bistatic scanning, where the transmitter and receiver of the scan signal are not adjacent. In this case, the cyclic prefix may not provide any advantage for quality scanning, and multiple unprefixed waveforms may be considered. The main disadvantage of rejecting the prefix is the difficulty of data detection (due to intersymbol interference), which must be eliminated. Another important challenge for scanning, where energy efficiency is extremely important, is the large PAPR of multi-carrier (prefixed or unprefixed) signals.

Single-carrier compression methods, which are based on the expansion of the code area of common radar signals and communication, in which the radar characteristics are affected by sequence autocorrelation, have been studied. However, the long spreading code, which leads to good autocorrelation, reduces the spectrum utilization efficiency for communication systems. In this case, the estimation of the Doppler effect is not trivial and requires more complex algorithms. The justification of the choice of the signal modulation scheme in 5/6G radio systems has been made.

Keywords: downlink, uplink, ratio of peak power to average power, signal-code design, out-of-band radiation, signal compression method, Doppler range shift, intersymbol interference, signal modulation scheme.

Постановка проблеми

Сучасні системи зв'язку 4G і 5G в смугах частот нижче 6 ГГц стикаються з великими завмирання, що зумовлені багатопроменевим поширенням. Для боротьби з цим небажаним явищем в стандартах LTE та NR пропонують використовувати технологію OFDM як основний метод ущільнення сигналів. Ця технологія також сумісна із методом MIMO, який забезпечує досягнення високої ефективності використання спектру. Однак у порівнянні з сигналами з однією несучою OFDM характеризується підвищеним відношенням пікової потужності до середньої потужності (PAPR). У сценаріях, де передача по висхідній лінії зв'язку обмежена зоною покриття, також підтримується сигнал OFDM з дискретним перетворенням Фур'є і розширенням спектра з низьким PAPR (DFT-s-OFDM) [1].

В стандартах LTE та NR для модуляції використовують звичайні сімейства QAM з кодами Грея. Технологія QAM полегшує проектування системи за рахунок простої демодуляції з поділом реального та

уявного компонентів, але за рахунок деякої втрати коефіцієнта підсилення. Крім того, для сценаріїв розширеного покриття з дуже низькою ефективністю використання спектру при роботі з сигналами DFT-s-OFDM для подальшого зменшення PAPR введена модуляція за схемою бінарної фазової маніпуляції π/2 (BPSK).

І хоча форми сигналів з кількома несучими, зокрема OFDM і звичайний QAM, ймовірно, продовжать відігравати центральну роль у системах бездротового доступу в майбутньому, можуть бути введені нові форми сигналів та схеми модуляції, оскільки з'являються нові варіанти використання пристроїв та спектру.

Низький рівень PAPR має вирішальне значення для багатьох застосувань. Наприклад, високочастотна частина спектру (ТГц-діапазон) відіграватиме важливу роль у задоволенні постійно зростаючого попиту на більш високі швидкості передачі даних та нові типи трафіку. Низький PAPR буде життєво важливим для будь-якої форми сигналу і схеми модуляції на високих частотах через проблеми, пов'язані з проектуванням ефективних високочастотних широкосмугових підсилювачів потужності, подоланням виникаючих втрат на трасі та обробкою даних із використанням плоского каналу з дуже рідкісним розсіюванням у просторово-часовому вимірі. Для вирішення таких проблеми необхідно використовувати нові форми сигналів та схеми модуляції. Оскільки висока пропускна здатність є ключовою вимогою для зв'язку на малих відстанях, небажано досягати низького PAPR за рахунок зниження пропускної спроможності. В супутниковому зв'язку через обмеження потужності супутників і нелінійності підсилювачів потужності потрібна нова форма сигналу з низьким PAPR. Низьке значення PAPR також є ключовою вимогою для досягнення низького енергоспоживання для недорогих пристроїв із простими підсилювачами потужності, низькими обчислювальними можливостями та обмеженими можливостями джерела живлення [2].

Для недорогих пристроїв складність є ще однією ключовою проблемою на додаток до низького PAPR. Форма сигналу і схема модуляції повинні мати низьку складність обробки з хорошою стійкістю до фазового шуму, зміщення несучої частоти, зсуву синхронізації, нелінійності і т. д. Це пов'язано з тим, що дешеве обладнання вносить спотворення радіочастот на різних рівнях [3].

При дослідженні об'єктів, що швидко рухаються, не можна ігнорувати ефект Доплера, який призводить до часової вибірковості в бездротових каналах. Якщо канали є LOS-домінуючими, тоді ефект Доплера може бути компенсований на стороні передавача або приймача із використанням результатів оцінювання за допомогою пілот-сигналу або апріорного знання. При подвійній вибірковості каналів, особливо в системах MIMO, необхідно розглядати вдосконалені схеми, які мають низькі накладні витрати та складність, а також відповідають вимогам конкретного випадку використання [4].

Ключовими вимогами для сценарію використання URLLC є низька затримка та висока надійність, при цьому бажана форма сигналу та схема модуляції повинні мати короткі часові інтервали та достатню продуктивність декодування без зниження інших показників продуктивності, таких як ефективність використання спектру.

Інтеграція процесів сканування та передавання даних в інфокомунікаційній системі (ISAC) ще більше вплине на форму сигналу для бездротового телекомунікаційного обладнання. В результаті, для зв'язку та сканування бажано використовувати ту саму форму сигналу, але це означає, що при розробці форми сигналу необхідно враховувати додаткові характеристики та вимоги, унікальні для сканування. Зокрема, форма сигналу, що підходить для зв'язку, зазвичай має високу спектральну ефективність і низьке позасмугове випромінювання, тоді як оптимальна форма сигналу для сканування об’єктів дослідження переслідує інші цільові показники, такі як точність та висока роздільна здатність. Зокрема, коли необхідно лише результати оцінювання дальності, рішення зводиться до дельта-подібної автокореляції у часовій області для кращої оцінки часової затримки. Крім того, форма хвилі, що використовується для сканування, вимагає достатнього виграшу при обробці, щоб забезпечити можливість вимірювання параметрів у сценаріях з сильним шумом та завадами, завмираннями через багатопроменеве поширення та недоліки обладнання (наприклад, відсутність синхронізації часу/частоти, фазовий шум і нелінійність підсилювача). Хоча допустимі помилки для систем зв'язку можуть серйозно знизити точність процесу сканування [5].

Аналіз останніх джерел

Метод ущільнення сигналів та схема модуляції для стільникового зв'язку в основному враховують такі вимоги: широкий спектр варіантів використання, включаючи eMBB, mMTC та URLLC; висока ефективність використання спектру для задоволення експоненційно зростаючого трафіку даних у сценаріях використання eMBB; досить широке охоплення; уніфікована структура для низхідного, висхідного та прямого каналів, добре сумісну з технологією MIMO для високої ефективності використання спектру; єдина структура побудови обладнання для низьких та високих частот; низька складність, простота впровадження та хороша енергоефективність [5-8]. Кожна форма сигналу має свої переваги та недоліки, а це означає, що не існує такого варіанту, який перевершить всі інші форми сигналу відповідно до зазначених вище вимог.

Метою роботи є підвищення ефективності використання ресурсів інфокомунікаційних радіосистем мобільного зв’язку за рахунок визначення та застосування оптимальної сигнально-кодової конструкції для телекомунікаційного радіообладнання із підвищеною спектральною та енергетичною ефективністю.

Виклад основного матеріалу

Сигнали з декількома несучими через випадкове складання сигналів від різних піднесучих дуже ефективно використовують спектр за рахунок досить високого PAPR. Розглянемо переваги та недоліки сигналів з декількома несучими. Детальні оцінки характеристик і порівняння різних форм сигналів представлені в [1].

Метод ущільнення CP-OFDM з обмеженням спектра використовується в низхідній лінії зв'язку LTE та допускає дуже гнучку обробку в частотній області, включаючи мультиплексування користувачів та каналів, виділення ресурсів і агрегацію несучих. Даний метод має дуже низьку складність на стороні передавача та приймача та забезпечує хороші показники за коефіцієнтом блокових помилок (BLER), і крім того, сумісний з MIMO, що є ключем для досягнення високої ефективності використання спектру та/або надійності. Проте, незважаючи на ці переваги, метод має дуже високе позасмугове випромінювання (OOBE). Для вирішення цієї проблеми пропонуються методи обмеження спектру на основі фільтрації та віконного перетворення, які показані на рис. 1.

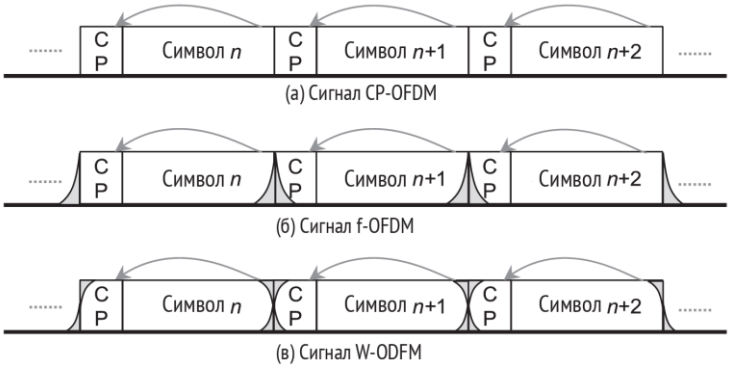
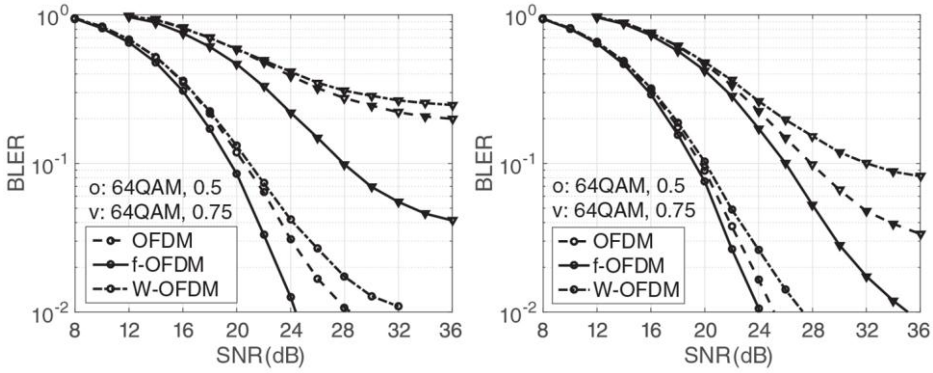


Рис. 1. Принцип реалізації методів обмеження спектру на основі фільтрації та віконного перетворення, що застосовуються у часовій області

Фільтрація на основі піддіапазонів застосовується до сигналів OFDM (f-OFDM) для придушення міжсмугових завад, якщо вони використовують різні нумерології або асинхронну передачу між собою [2, 3]. Для забезпечення зниження OOBE з незначним зниженням інших показників у кожному піддіапазоні порушується ортогональність між послідовними символами OFDM у часовій ділянці. У порівнянні зі звичайним OFDM, f-OFDM підтримує змішану нумерологію та асинхронну передачу по піддіапазонах, усуваючи необхідність глобальної синхронізації. Крім того, f-OFDM вимагає значно менше ресурсів захисної смуги, використовуючи спектр більш ефективно (завдяки хорошим показникам OOBE та BLER), при прийнятній обчислювальній складності.

Для згладжування переходу між послідовними символами OFDM застосовується непрямокутне вікно згортки в часовій області (W-OFDM), що знижує складність обробки [4]. Однак, частина довжини префікса використовується вікнами, що обмежує показники W-OFDM через зменшення його ефективної довжини.

На рис. 2 та 3 порівнюється рівень BLER для f-OFDM, W-OFDM та OFDM у випадках змішаної нумерології DL [5] та UL [6], відповідно, з номерами захисного тону 0 та 12. Порівняння засновані на каналі NLOS з багатовідвідною лінією затримки (TDL-C) з розкидом затримки 1000 нс у смузі 4 ГГц та з ідеальною оцінкою каналу.

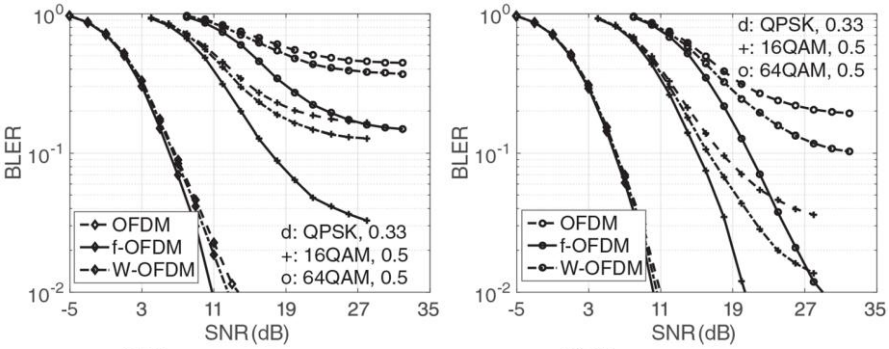


(а) Без захисних частот **(б) 12 захисних частот**

Рис. 2. Порівняння значень BLER для методів f-OFDM, W-OFDM та OFDM при змішаній нумерології DL

На рис. 2 простір піднесучих для цільового піддіапазону і піддіапазону, що заважає, становить 15 кГц і 30 кГц відповідно. На рис. 3 проміжки піднесучих для досліджуваного пристрою користувача і двох пристроїв, що створюють завади становлять 15 кГц і 30 кГц відповідно, а пристрій, що формує завади, має потужність на 5 дБ більшу за потужність досліджуваного пристрою користувача. Числові результати

показують, що f-OFDM забезпечує кращі параметри. Однак до тих пір, поки сигнал, що передається, відповідає вимогам до радіочастотного каналу, для різних сценаріїв можуть бути обрані різні схеми, які забезпечують баланс між складністю та якістю. Крім того, для придушення завад із сусідніх діапазонів приймач може реалізувати метод фільтрації або віконний метод. В залежності від практичних реалізацій в мережах 5G використовується метод CP-OFDM без явних вказівок на обмеження спектру на основі фільтрації або віконного керування.



(а) Без захисних частот **(б) 12 захисних частот**

Рис. 3. Порівняння значень BLER для методів f-OFDM, W-OFDM та OFDM при змішаній нумерології UL

Метод універсальної фільтрованої множинної несучої (UFMC) застосовує фільтрацію піддіапазонів до кожного символу OFDM, і через лінійний згорток фільтрації циклічний префікс замінюється розширеннями символів для формування захисних інтервалів між символами [7]. При цьому, довжина захисного інтервалу обмежує довжину UFMC фільтра і, отже, характеристики OOBE. Оскільки метод UFMC не має циклічного префікса, він більш складний з точки зору демодуляції та більш чутливий до синхронізації часу порівняно із методом ущільнення CP-OFDM.

В методі узагальненого мультиплексування з частотним поділом (GFDM) для досягнення хороших характеристик OOBE застосовується фільтрація піднесучих. Оскільки піднесучі розташовані близько один до одного і не взаємно ортогональні тому, для придушення завад між несучими (ICI) необхідно використовувати піднесучі високого порядку, кругову фільтрацію та кінцеві біти [1]. При цьому, для зменшення ICI, що залишається після фільтрації, особливо при модуляції високого порядку, як і раніше, необхідно використовувати ефективні приймачі, що ускладнює структуру пілот-сигналу і передачу MIMO. Крім того, сигнали в GFDM обробляються поблочно; хоча витрати на циклічний префікс можуть бути зменшені, але при цьому збільшується затримка обробки і, отже, не підходить для режиму передачі з малою затримкою.

Метод ущільнення із спектральним попереднім кодуванням (SP-OFDM) застосовує прекодер до символів даних перед модуляцією OFDM, що дозволяє зменшити OOBE [2]. Це скорочення обмежене, особливо при невеликій смузі пропускання. Хоча попереднє кодування створює завади між несучими, які можна зменшити (наприклад, шляхом множення на інверсію прекодера) в приймачі, якщо приймач має інформацію від прекодера. Отже, підвищується складність, і тому може знадобитися додаткова обробка сигналу. Крім того, попереднє кодування може викликати внутрішньосмугову пульсацію, яка погіршує характеристики детектора.

В методі на основі багаточастотного фільтрованого сигналу із зміщенням QAM (FBMC-OQAM) кожна піднесуча фільтрується індивідуально, забезпечуючи дуже хороші характеристики OOBE [3]. У порівнянні з іншими системами на основі префіксів або доповнень (наприклад, CP-OFDM), метод ущільнення FBMC-OQAM не потребує захисного інтервалу зі збереженням службових даних синхронізації. Однак через фільтрацію підносійних довжина фільтра зазвичай дуже велика (наприклад, більш ніж у три рази перевищує тривалість символу). В результаті, метод FBMC-OQAM не підходить для передачі коротких символів, як це необхідно для систем з малою затримкою. Крім того, він використовує складну схему оцінки каналу і не може бути легко розширений до MIMO через неортогональність у комплексних областях, що обмежує сферу його застосування.

Метод ущільнення на основі багаточастотного фільтрованого сигналу з QAM (FBMC-QAM) розроблений для пом'якшення складної форми сигналу FBMC-OQAM, коли парні та непарні піднесучі використовують різні фільтри [4]. Метод FBMC-QAM оптимізує два типи фільтрів для мінімізації внутрішніх взаємних завад між несучими, спричиненими неортогональністю в комплексних областях. Це забезпечує низький OOBE за рахунок використання довгого фільтра через природу фільтрації на основі піднесучих. Однак технологія FBMC-QAM не може повністю усунути внутрішні взаємні завади, які ведуть до зниження характеристик каналу навіть за умови використання вдосконаленого нелінійного приймача. Крім того, неортогональність ускладнює застосування методу ущільнення FBMC-QAM у сценаріях систем MIMO та неортогонального множинного доступу (NOMA).

Метод ущільнення на основі зваженої кругової згортки FBMC-OQAM (WCC-FBMCOQAM) використовується для видалення «хвостів», викликаних лінійною згорткою фільтра підносійних у схемі

FBMC-OQAM [5]. Це усуває часові витрати, не викликаючи появи взаємних завад між піднесучими або міжсимвольними завадами. Крім того, зважене керування періодичною згорткою в часовій області використовується для забезпечення плавних переходів по краях сигналу, тим самим вирішуючи проблему різких країв сигналу в часовій області, викликаних круговою згорткою. Метод ущільнення WCC-FBMC-OQAM забезпечує винятковий показник OOBE з обмеженими накладними витратами на періодичну згортку у часовій області. Хоча він видаляє хвости сигналу за допомогою фільтрації, він має інші недоліки FBMC-OQAM (наприклад, несумісний з технологією MIMO, яка є ключем до досягнення високої ефективності використання спектра).

Метод ущільнення на основі щільно налаштованого OFDM (FC-OFDM), який забезпечує співіснування FBMC-OQAM і OFDM в одному швидкому перетворенні Фур'є (FFT), де захисні піднесучі зарезервовані для розділення завад від FBMC-OQAM до OFDM [6]. В результаті, це дозволяє об'єднаній структурі передачі підтримувати ці дві форми сигналу. Однак для придушення OOBE OFDM потрібна додаткова фільтрація або періодична згортка. Крім того, коефіцієнт перекриття FBMC-OQAM (довжина фільтра, поділена на розмір FFT) обмежується значенням 1 для досягнення низької складності обробки, що зводить нанівець перевагу OOBE загального FBMC-OQAM, що використовує великий коефіцієнт перекриття (наприклад, 4).

В методі ущільнення на основі ортогонального частотно-часового простору (OTFS) використовується двовимірне перетворення Фур'є для перетворення даних частотно-часової області в область доплерівської затримки, і ці перетворені дані можуть передаватися за допомогою традиційного модулятора OFDM [5]. Метод ущільнення OTFS передбачає, що канали є розрідженими та незмінними в області доплерівської затримки, де дані згортаються з цими каналами. При цьому, забезпечується потенційний виграш у високошвидкісних сценаріях, але це відбувається за рахунок великої тривалості символу і дуже високої складності вирівнювальної фільтрації, не кажучи вже про застосування MIMO. Метод ущільнення CP-OFDM з додатковими опорними сигналами демодуляції (DMRS) для користувачів з високою мобільністю буде мати дуже хороші характеристики, особливо в каналах з переважанням LOS.

В методі спектрально ефективного мультиплексування з частотним поділом каналів (SEFDM) та мультиплексування в частотній області з перекриттям (OVFDM) порівняно з OFDM, сигнал SEFDM/OVFDM використовує інтервал між піднесучими, який менший за ширину піднесучої [4, 6]. Отже, сигнали стискаються у частотній області за рахунок наявності взаємних завад. Більше стиснення означає, що сигнал займає менш широку смугу, але це збільшує внутрішні завади. Для придушення цих завад можна використати вдосконалений приймач. Однак цей підхід зазвичай складний, особливо для багаторозрядної модуляції та великої кількості піднесучих. Використання потужного кодування (наприклад, полярний код) в системі передавання зменшує додатковий виграш у пропускній здатності. Оскільки висока модуляція чутлива до шуму та завад, через внутрішні взаємні перешкоди може статися втрата інформаційної здатності.

В методі ущільнення на основі векторного OFDM (V-OFDM) дані N підносійних кожного OFDM поділяються на K субвекторів довжиною N/K. До кожного субвектора застосовується зворотне швидке перетворення Фур'є (IFFT), і результуючі K субвекторів перемежовуються для генерації перемежованого вектора довжини N, який передається разом з циклічним префіксом. У порівнянні з OFDM, в якому використовується N піднесучих, V-OFDM зменшує розмір FFT, що дозволяє спростити обробку в передавачі і зменшити PAPR. Але оскільки сигнали чергуються, спектр не локалізований. Крім того, серед K субвекторів існують міжсимвольні завади, що підвищують складність вирівнювання V-OFDM у порівнянні із CP-OFDM.

Метод мультиплексування з неортогональним частотним поділом каналів (NOFDM) / імпульсне мультиплексування OFDM (P-OFDM) / OFDM (FB-OFDM) із фільтрацією замість використання прямокутної форми імпульсу (як використовується в CP-OFDM) NOFDM/P-OFDM/FB- OFDM розглядає форму імпульсу як ще один рівень свободи для задоволення різних вимог до сигналу [3–5]. Наприклад, форма імпульсу може бути спроектована так, щоб мати різке згасання в частотній області та покращити частотну локалізацію порівняно з OFDM. Різні методи формування сигналів з декількома несучими, такі як CP-OFDM, W-OFDM, GFDM і FBMC-OQAM, можуть спільно використовувати аналогічну обробку передачі, але вони використовують різні функції форми імпульсу та інтервали символів для різних форм сигналів. Це означає, що переваги та недоліки різняться залежно від задіяних імпульсних функцій та символьних інтервалів.

Метод ущільнення на основі вейвлет-OFDM замість використання швидкого перетворення Фур'є (як це робиться в OFDM) використовує дискретне вейвлет-перетворення (DWT) [6]. Зокрема, зворотне дискретне вейвлет-перетворення (IDWT) та DWT застосовуються на сторонах передавача та приймача відповідно, з використанням дискретних гребінчастих фільтрів. Подібно до схем фільтрації піднесучих, вейвлет-OFDM забезпечує низький рівень OOBE через перекриття символів (хвости в часовій області довгих фільтрів) і не вимагає захисного інтервалу в часі. Через довгі хвості у часовій області він не підходить для передачі з малою затримкою. Більше того, його адаптація до технології MIMO потребує подальшого поглибленого дослідження.

Метод мультиплексування з поділом по Лагранжу та Вандермонду (LVDM) узагальнює OFDM із заповненням нулями (ZP-OFDM), при якому передавач модулює вектор символів, що передаються за допомогою матриці Лагранжа, а приймач демодулює прийнятий вектор символів за допомогою матриці

Вандермонда [1]. Сигнатури для побудови матриць Лагранжа та Вандермонда оптимізуються відповідно до каналів завмирання, що потребує знання про канали. Якщо сигнатури були розподілені одиничним колом з невідомими каналами, LVDM скорочується до ZP-OFDM. Для визначення приросту характеристик необхідні додаткові дослідження (наприклад, порівняння BLER в кодованих системах).

Метод ущільнення на основі перетворення лінійночастотної модуляції, як розвиток перетворення Фур'є, задіяного в OFDM, [7] було запропоновано метод формування сигналу на основі дробового перетворення Фур'є, а в [8] було запропоновано метод формування сигналу на основі афінного перетворення Фур'є. Задачами даних методів є оброблення каналів, що змінюються в часі, в умовах виникнення ефекту Доплера. Введення свободи у параметр лінійної частотної модуляції робить систему більш стійкою до внутрішніх взаємних завад порівняно з OFDM у випадках, коли спостерігаються багатопроменеві канали з лінійною залежністю між затримками та доплерівськими зсувами. Втім, порівняння з OFDM потребує подальших досліджень.

Метод ущільнення на основі використання неортогональної множинної несучої із застосуванням базової функції Слепіана (SNMC) [1]. При цьому, одна піднесуча мультиплексується безліччю ортогональних базових функцій Слепіана, які переносять інформацію даних (наприклад, символи QAM). Оскільки концентрація енергії в базовій функції Слепіана оптимальна як у часовій, так і частотній областях, SNMC забезпечує дуже хороші характеристики OOBE. Хоча базова функція Слепіана ортогональна в одній піднесучій, все ж таки взаємні завади існують через неортогональність між піднесучими. Отже, для придушення взаємних завад необхідно використовувати вдосконалений приймач. При цьому, також ускладнюється схема пілотного сигналу та оцінки каналу. Очікується, що у сценаріях MIMO використання методу SNMC буде набагато складнішим у порівнянні із OFDM.

Сигнали з однієї несучої (наприклад, DFT-s-OFDM, прийняті в LTE та NR UL) більш вигідні з точки зору PAPR порівняно з формами сигналів з декількома несучими. Подібні сигнали також стійкіші до фазового шуму з відносно простою оцінкою та компенсацією в часовій області. Однак сигнали з однією несучою мають деякі загальні недоліки, які обмежують сценарії їхнього застосування. Зокрема, підтримка операцій мультиплексування з частотним поділом каналів (FDM), таких як поділ користувачів, поділ опорного сигналу і даних та агрегація несучих погіршить значення PAPR. Крім того, виділення частотних ресурсів та відображення даних для користувачів, що обслуговуються сигналами з однієї несучої, занадто обмежені, щоб підтримувати низький PAPR та розумну складність обробки. Застосування простої корекції в частотній області (застосовується в OFDM) в багатопроменевих частотно-вибіркових бездротових каналах призведе до погіршення функціональних параметрів системи передавання. Причому ця зміна параметрів набагато вища у сценаріях MIMO, де OFDM може реалізовувати попереднє кодування в частотній області (навіть для кожної підносійної), не впливаючи на PAPR. І навпаки, для підтримки низького PAPR сигнали з однією несучою можуть використовувати лише повносмугове попереднє кодування. Наведемо методи ущільнення сигналів з однією несучою.

Метод ущільнення із використанням одної носійної на основі розширення DFT, в якому більшість багаточастотних сигналів, розглянутих раніше, можна перетворити на відповідні версії з однієї несучої. Типовим прикладом є DFT-s-OFDM. У цьому випадку попереднє кодування DFT переносить вхідні сигнали в частотну область. Для подальшого зменшення PAPR може застосовуватися формування спектра частотної області (FDSS), яке зазвичай передбачає збільшення смуги пропускання (тобто за рахунок зниження ефективності використання спектра). Фільтр FDSS не може використовуватись при модуляції високого порядку, оскільки він значно знижує якість декодування через затребуваність додаткових службових сигналів. Сигнали частотної області формуються у бажаній смузі пропускання, а потім переносяться назад у часову область шляхом швидкого зворотного перетворення Фур'є. При цьому, для забезпечення можливості одноразової корекції частотної області на стороні приймача у сигнал зазвичай додається циклічний префікс. Хоча виділення ресурсів з точки зору обробки частотної області сумісне із OFDM та обмежено кількома варіантами для спрощення операції DFT.

Метод ущільнення SC-QAM/SC-FDE використовує традиційний сигнал з однією несучою, де вся обробка виконується в часовій області [5]. Подібно до методу ущільнення DFT-s-OFDM, в методі SC-QAM/SC-FDE додається циклічний префікс, нулі або унікальні слова (UW), щоб забезпечити одноразове вирівнювання частотної області на стороні приймача. У порівнянні з DFT-s-OFDM, метод SC-QAM/SC-FDE характеризується меншою складністю (бо ні DFT, ні IFFT не використовуються на стороні передавача) і меншою гнучкістю з точки зору операцій у частотній області. Зокрема, метод ущільнення SC-QAM/SC-FDE підтримує лише передачу/прийом з повною смугою пропускання без урахування частотного поділу користувачів, каналів чи опорних сигналів.

Метод ущільнення ZT/UW-DFT-s-OFDM базується на комбінації технологій DFT-s-OFDM, у якій нулі або унікальні слова додаються перед дискретним перетворенням Фур'є для заміни циклічного префікса [6]. У методі DFT-s-OFDM службові дані циклічного префікса є фіксованими та спільними для всіх користувачів, тоді як довжина нулів або унікального слова може залежати від користувача, для забезпечення динамічного регулювання службових даних на основі затримки розширення та розповсюдження в ZT/UW-DFT-s- OFDM. Це потенційно може зменшити деякі накладні витрати для користувачів з малим розкидом затримки. Однак, через відсутність префікса тривалість символу відрізняється від усіх сигналів на основі циклічного префікса, описаних раніше. Таким чином, метод ZT/UW-DFT-sOFDM не може

мультиплексуватися з цими користувачами в одній і тій самій смузі. Діпазон зміни значень затримки каналу повинен бути відомий на сторонах базової станції та обладнання користувача, для чого будуть потрібні додаткові службові дані. Крім того, параметри модуляції вищого порядку будуть обмежені через відсутність характеристик кільцевої згортки каналів.

Метод ущільнення на основі альтернативи Найквісту (FTN) / мультиплексування з перекриттям у часовій області (OVTDM), який на відміну від методу SEFDM/OVFDM, цей метод пакує символи в часовій області для передачі зі швидкістю FTN [1, 3]. Недоліки методу FTN/OVTDM такі самі, як і у методі SEFDM/OVFDM, а саме складний приймач з потенційно обмеженим збільшенням пропускної спроможності або взагалі без нього порівняно із системами, які використовують потужну схему кодування. Методи OVFDM та OVTDM спільно називаються методами мультиплексування X-області з перекриттям (OVXDM) [1].

Порівняно зі звичайною QAM модуляцією інші схеми модуляції можуть забезпечити кращий коефіцієнт підсилення, нижчий PAPR та кращу стійкість до радіочастотних спотворень. Деякі з таких схем модуляції необхідно розглянути.

Повернена QAM модуляція є звичайною QAM модуляцією після того, як до неї застосували зсув (поворот) фази. Наприклад, квадратурна фазова маніпуляція з поворотом $\pi/4$ (QPSK) застосовується у вузькосмуговому UL інтернету речей (NB-IoT), де поворот фази дорівнює $\pi/4\times(n \bmod 2)$, а n – індекс символу. Додаткове обертання фази може зменшити зсув фази між сусідніми модульованими символами, що, своєю чергою, може зменшити PAPR за рахунок використання сигналів з однією несучою. Однак зростання значення PAPR надзвичайно обмежує модуляцію вищого порядку вище за QPSK модуляцію. Крім того, обернена QAM модуляція зазвичай використовується разом з непрозорим FDSS фільтруванням для методу ущільнення DFT-s-OFDM із забезпеченням хороших характеристик PAPR та BLER.

В мережах 5G було запропоновано кілька схем нерегулярної QAM модуляції, включаючи 1D/2D-оптимізовану неоднорідну QAM модуляцію, ймовірнісну кодовану модуляцію [2] та амплітудно-фазову маніпуляцію (APSK). Ці схеми мають потенціал для забезпечення більш високих коефіцієнтів підсилення формування, поліпшення PAPR та стійкості до фазового шуму. Однак такий виграш досягається за рахунок вищої складності демодуляції.

Для зменшення фазового зсуву між сусідніми модульованими символами, [3] було запропоновано інтерполяцію сукупності. Зокрема, модульована сукупність спочатку інтерполюється по гладкій траєкторії з постійною огинаючою (для QPSK) або траєкторії з майже постійною огинаючою (для QAM) перед операцією дискретного перетворення Фур'є в методі ущільнення DFT-s-OFDM. Інтерполяція досягається за допомогою простого гратчастого кодера з Q станом, де Q - вихідний розмір сукупності. Підвищення коефіцієнту інтерполяції зумовлює збільшення обмеження траєкторії сукупності, що призводить до меншого PAPR за рахунок більш високої складності інтерполяції. Застосування технології FDSS може забезпечити компроміс між ефективністю використання спектру та PAPR, використовуючи різні фільтри формування спектру. Для вирівнювання каналів може використовуватися стандартний еквалайзер з одним відведенням у частотній області. Вирівняний символ потім подається в ґратчастий декодер Q станів для отримання логарифмічного відношення правдоподібності (LLR) для декодера з прямим виправленням помилок (FEC). Інтерполяція сукупності може забезпечити надзвичайно добрий рівень PAPR за рахунок ускладнення процесів передачі та прийому. Тому, необхідні подальші дослідження для вивчення рівня BLER при різних компромісах між ефективністю використання спектра та рівнем PAPR.

Багатовимірна модуляція використовує більше ступенів свободи для підвищення якості каналу за рахунок ускладнення реалізації. Дана модуляція може поліпшити коефіцієнт розрізнення символів, у порівнянні з традиційними комбінаціями QAM. Також вона може надати новий спосіб організації масового доступу користувачів, такий як схема множинного доступу з розрідженим кодом (SCMA) [4, 5]. Крім того, для некогерентного детектування без пілот-сигналу можуть застосовуватися грасманові сукупності, що дозволяє значно знизити накладні витрати на пілот-сигнал у певних випадках (наприклад, mMTC та масивні MIMO) за рахунок збільшення складності детектування [6].

При індексній модуляції індекси складових блоків у системах зв'язку використовуються для передачі додаткової інформації. Два застосування індексної модуляції – це просторова модуляція та OFDM з індексною модуляцією [7]. Просторова модуляція передає інформацію з використанням індексів передаючих антен на додаток до традиційної схеми символьної модуляції (наприклад, QAM). З іншого боку, OFDM з індексною модуляцією передає інформацію з використанням індексів підносійних передачі. Індексна модуляція може забезпечити хорошу енергоефективність, але ефективність використання спектра буде нижчою, ніж у традиційних систем зв'язку на основі QAM модуляції.

Висновки

В результаті дослідження методів ущільнення із використанням декількох носійних, визначено домінуючий метод ущільнення для мобільних систем зв'язку зокрема, метод CP-OFDM через його високу ефективність використання спектру, масштабованість та гнучкість завдяки введенню циклічного префіксу. Тому доцільно розглядали можливість використання подібних сигналів для сканування. Враховуючи той факт, що циклічні префікси можуть погіршити автокореляцію в часовій області, прийнято новий підхід до обробки частотної області, який може ефективно оцінювати параметри CP-OFDM з максимальним

виграшем від обробки. Крім того, було доведено, що метод ущільнення CP-OFDM вільний від проблеми доплерівського зсуву діапазону, таким чином оцінки дальності та доплерівського зсуву можуть розглядатися в CP-OFDM як незалежні завдання. Крім того, параметри CP-OFDM, такі як відстань до несучої, величина захисного інтервалу, довжина кадру та форма пілот-сигналу, можуть бути адаптовані для оптимізації роботи та стійкості детектування та передачі даних. Однак подібні переваги ґрунтуються на ідеальній синхронізації (часу та частоти) між передавачем і приймачем, хоча ідеальна синхронізація може виявитися неможливою, особливо для бістатичного сканування, коли передавач та приймач сигналу сканування не розташовані поруч. В цьому випадку циклічний префікс може не забезпечувати будь-яких переваг для якісного сканування, і можна розглядати форми сигналів з декількома без префіксу. Основним недоліком відмови від префіксу є складність детектування даних (через міжсимвольні перешкоди), яку необхідно усунути. Також розглянуто ще одну важливу проблему для сканування, де надзвичайно важлива енергоефективність, є великий PAPR сигналів з декількома несучими (з префіксом або без нього).

Досліджено методи ущільнення з одною несучою, які ґрунтуються на розширенні кодової області спільних сигналів радару та зв'язку, в якому на характеристики радару впливає автокореляція послідовностей. Однак довгий розширювальний код, що призводить до хорошої автокореляції, знижує ефективність використання спектру для систем зв'язку. У цьому випадку оцінка доплерівського ефекту не є тривіальною і потребує складніших алгоритмів. Здійснено обґрунтування вибору схеми модуляції сигналів в радіосистемах 5/6G.

Література

1. Liu X., Xu T., Darwazeh I. (2020). Coexistence of orthogonal and nonorthogonal multicarrier signals in beyond 5G scenarios, in Proc. 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT). IEEE, pp. 1–5.
2. Tourki K., Zakaria R., Debbah M. (2020). Lagrange Vandermonde division multiplexing, in Proc. 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, pp. 1–6.
3. Işcan O., Böhnke R., Xu W. (2019). Probabilistic shaping using 5G new radio polar codes, IEEE Access, vol. 7, pp. 22 579–22 587.
4. Gohary R. H., Yanikomeroglu H. (2019). Noncoherent MIMO signaling for block-fading channels: Approaches and challenges, IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 14, no. 1, pp. 80–88.
5. Васильківський, М., Нікітович, Д., & Болдирева, О. (2022). Керування доступом до інформаційних даних в інтелектуальних інфокомунікаційних мережах. Measuring and computing devices in technological processes, (4), 5–17. https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-1
6. Васильківський, М., Варгатюк, Г., & Болдирева, О. (2022). Дослідження архітектури штучного інтелекту для інфокомунікаційних мереж 6G. Measuring and computing devices in technological processes, (4), 62–70. https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-7
7. Васильківський, М., Коломієць, А., & Грабчак, Н. (2022). Дослідження функціональних параметрів інфокомунікаційних мереж 6G. Вісник Хмельницького національного університету, (6), 46–52. https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-46-52
8. Васильківський, М., Коломієць, А., & Будаш, М. (2022). Оцінювання параметрів радіотрактів інфокомунікаційних систем 5G/6G. Вісник Хмельницького національного університету, (6), 53–60. https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-53-60

References

1. Liu X., Xu T., Darwazeh I. (2020). Coexistence of orthogonal and nonorthogonal multicarrier signals in beyond 5G scenarios, in Proc. 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT). IEEE, pp. 1–5.
2. Tourki K., Zakaria R., Debbah M. (2020). Lagrange Vandermonde division multiplexing, in Proc. 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, pp. 1–6.
3. Işcan O., Böhnke R., Xu W. (2019). Probabilistic shaping using 5G new radio polar codes, IEEE Access, vol. 7, pp. 22 579–22 587.
4. Gohary R. H., Yanikomeroglu H. (2019). Noncoherent MIMO signaling for block-fading channels: Approaches and challenges, IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 14, no. 1, pp. 80–88.
5. Vasylkivskyi, M., Nikitovych, D., & Boldyreva, O. (2022). Keruvannia dostupom do informatsiinykh danykh v intelektualnykh infokomunikatsiinykh merezhakh. Measuring and computing devices in technological processes, (4), 5–17. https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-1
6. Vasylkivskyi, M., Varhatiuk, H., & Boldyreva, O. (2022). Doslidzhennia arkhitektury shtuchnoho intelektu dlia infokomunikatsiinykh merezh 6G. Measuring and computing devices in technological processes, (4), 62–70. https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-7
7. Vasylkivskyi, M., Kolomiiets, A., & Hrabchak, N. (2022). Doslidzhennia funktsionalnykh parametriv infokomunikatsiinykh merezh 6G. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, (6), 46–52. https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-46-52
8. Vasylkivskyi, M., Kolomiiets, A., & Budash, M. (2022). Otsiniuvannia parametriv radiotraktiv infokomunikatsiinykh system 5G/6G. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, (6), 53–60. https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-53-60

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-56-63
УДК 621.391

ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ МИКОЛА
Вінницький національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0002-6586-2563
e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com
ГОРОДЕЦЬКА ОКСАНА
Вінницький національний технічний університет
e-mail: horodecka.os@gmail.com
СТАЛЬЧЕНКО ОЛЕКСАНДР
Вінницький національний технічний університет
e-mail: magicphenix@gmail.com
БУДАШ МИХАЙЛО
Вінницький національний технічний університет
e-mail: mika@budash.dp.ua

ІНТЕГРОВАНА РАДІОСИСТЕМА СКАНУВАННЯ ТА ЗВ'ЯЗКУ

В статті розглянуто способи оптимізації продуктивності інфокомунікаційних систем, що включає підвищення спектральної ефективності та надійності при мінімізації затримки і енергоспоживання за рахунок повної інтеграції послуг зв'язку та сканування. Розглянуто алгоритм функціонування інтегрованої системи сканування та зв'язку та схему організації режиму зв'язку за допомогою процесу сканування на основі запропонованої узагальненої моделі інтегрованої системи сканування та передавання даних.

Ключові слова: інтегрована система сканування та зв'язку, мережа радіодоступу, спектральна ефективність, радіочастотне сканування, бездротовий зв'язок, гнучка система зв'язку, радарна візуалізація, томографія.

VASYLKIVSKYI MYKOLA, HORODETSKA OKSANA, STALCHENKO OLEXANDER, BUDASH MYHAILO
Vinnytsia National Technical University

INTEGRATED RADIO SCANNING AND COMMUNICATION SYSTEM

The article discusses ways to optimize the performance of information communication systems, which includes increasing spectral efficiency and reliability while minimizing delay and energy consumption due to the full integration of communication and scanning services. The functioning algorithm of the integrated scanning and communication system and the organization scheme of the communication mode using the scanning process based on the proposed generalized model of the integrated scanning and data transmission system are considered.

Ways to improve the efficiency of telecommunication systems due to the joint use of communication and scanning tools with the best compromise between scanning characteristics and the bandwidth of the transmission channel are considered.

Peculiarities of improving wireless communication systems with regard to high data transfer rates, low latency and wide connection possibilities are studied. In particular, access to other system functions, such as scanning/visualization and localization, is justified. Due to the considered innovative applications, the possibility of increasing the performance of the integrated wireless scanning and communication system (ISAC) is determined. The researched positioning process in 5G is proposed to be expanded due to additional detection functions, in particular with the use of new metrics such as accuracy and resolution. New KPIs in 6G networks are considered, replacing the KPI of positioning accuracy in 5G. As a result, key performance indicators based on different application scenarios are proposed, the accuracy of which should be from 1 to 10 cm, and the resolution should be up to 1 mm.

The potential of the new ISAC technology was investigated, in particular, the features of the coexistence of communication and scanning modules in an integrated solution at the system level and methods of increasing the efficiency of coexistence at the system level were considered; justification of a positive result from an integrated system solution for communication and scanning services; advantages and disadvantages of existing communication and scanning systems with implemented integration at the system level.

The obtained results of research on the integration of communication and scanning means, in particular: the analysis of the performance of generalized ISAC networks and the conclusions about the fundamental limits of performance obtained for a simple structure made it possible to determine the best compromise between the characteristics of scanning and the bandwidth of the communication channel, provided an opportunity to create practical schemes, which approximate a compromise of waveforms, coding tables, structures and protocols.

Keywords: integrated scanning and communication system, radio access network, spectral efficiency, radio frequency scanning, wireless communication, flexible communication system, radar imaging, tomography.

Постановка проблеми

Стільникові мережі спочатку були розроблені для забезпечення бездротового зв'язку, а швидке зростання попиту у користувачів, в значній мірі пов'язане із функцією визначення розташування мобільного засобу зв’язку, що привернуло значну увагу до досліджень позиціонування в стільникових мережах. Найбільш інтригуючі сценарії використання технологій 6G включають побудову картини навколишнього середовища за допомогою використання високоточного позиціонування, відображення та реконструкції, а також розпізнавання жестів/дій. Тому, процес ефективного сканування перетворюється на нову функціональну можливість систем 6G, яку можна охарактеризувати як процес отримання інформації про довкілля. Цей процес складається з операцій, які можна умовно віднести до однієї з двох наступних категорій: радіочастотне сканування: фактично це відправка радіосигналу та вивчення навколишнього середовища шляхом прийому та обробки відбитих сигналів; візуальне сканування (візуалізація):

використання зображень та відео, отриманих із навколишнього середовища (наприклад, за допомогою камери) для побудови просторової картини [1].

Посилаючи електромагнітну хвилю та отримуючи відлуння, радіочастотне сканування може отримувати інформацію про об'єкти в навколишньому середовищі, наприклад про існування, текстуру, відстань, швидкість, форму та орієнтацію. У сучасних системах радіочастотне сканування зводиться до класичного радару, який використовується для виявлення, локалізації та відстеження пасивних об'єктів, тобто об'єктів, які не зареєстровані у мережі. Існуючі системи радіочастотного сканування мають два основних обмеження: вони автономні та орієнтовані на конкретне застосування, тобто вони не взаємодіють з іншими радіочастотними системами; вони націлені лише на пасивні об'єкти і не можуть використовувати ознаки активних об'єктів, тобто об'єктів, зареєстрованих у мережі [2].

Основною метою проектування сучасної бездротової мережі є оптимізація продуктивності зв'язку, що включає підвищення спектральної ефективності та надійності при мінімізації затримки та енергоспоживання. Таким чином, зараз як ніколи необхідні більш інформативні, ефективні та гнучкі системи зв'язку, які покращують якість обслуговування та охоплення за рахунок різноманітних сценаріїв використання, так само як і сенсорні системи, які надають необхідні знання про навколишнє середовище. Традиційна практика включає дві різні підсистеми, які обмінюються обмеженим обсягом інформації для досягнення певного рівня пізнання, але цей підхід має багато недоліків, таких як великі накладні витрати, великий обсяг даних, неефективність і громіздкість підсистем. Альтернативний підхід ґрунтується на тому факті, що в сучасних бездротових системах передбачається значне зрушення у бік більш високих частот (таких як міліметрові хвилі і навіть ТГц-діапазон) з ширшим доступним спектром. Це дозволить системам зв'язку мати функціональні характеристики радіолокаційних систем. Отже, для зменшення потужності та форм-фактору деякі апаратні компоненти можуть використовуватися спільно двома типами систем, наприклад антени, підсилювачі потужності і генератори. Крім того, для підвищення ефективності такі системи можуть використовувати такі спільні ресурси, як час та спектр [3].

Впровадження нових технологій зумовлює подальші вдосконалення систем бездротового зв'язку щодо високих швидкостей передачі даних, низької затримки та широких можливостей з'єднання. Це відкриє користувачам доступ до інших функцій системи, таких як сканування/візуалізація та локалізація, тим самим представивши безліч інноваційних застосувань і підвищивши продуктивність майбутньої бездротової системи. В інтегрованій системі сканування та зв'язку (ISAC) сканування та зв'язок будуть двома взаємодоповнюваними функціями. Наслідуючи цю тенденцію, позиціонування в 5G (яке обмежено активними пристроями) буде розширено за рахунок додаткових функцій виявлення. Для цього необхідно застосовувати нові метрики (такі як точність і здатність) у якості нових ключових показників ефективності в мережах 6G, замінюючи KPI точності позиціонування в 5G. В результаті, пропонуються ключові показники ефективності, що ґрунтуються на різних сценаріях застосування, точність яких може становити від 1 до 10 см, а роздільна здатність – до 1 мм. Вказані функціональні характеристики залежать від супутніх технологій, які необхідно детально дослідити [4].

Аналіз останніх джерел

Проект партнерства 3-го покоління (3GPP) працює над інтеграцією зв'язку та позиціонування з часів GSM [1], і нещодавно було заплановано «удосконалення позиціонування для задоволення вимог до високої точності та затримки в промислових умовах в середині приміщень» як функції 5G NR, документ R17 [2]. Однак, як і в глобальній навігаційній супутниковій системі, функція позиціонування в 5G NR призначена тільки для активних об'єктів (на основі пристроїв), тобто пристрої обмінюються сигналами з кількома мережевими вузлами, а потім оцінюють інформацію про місцезнаходження локально на пристрої або віддалено через мережевий об'єкт. Однак існує безліч сценаріїв, в яких потрібне виявлення та локалізація пасивних об'єктів, наприклад, сканування навколишнього середовища, розпізнавання жестів та спостереження за зонами обмеженого доступу.

Виявлення пасивних об'єктів відноситься до сфери традиційних досліджень в галузі радіолокації. Протягом багатьох років радар використовувався в багатьох областях, включаючи керування рухом в аеропортах та морських портах, дистанційне сканування земної поверхні, високоточне виявлення невеликих деформацій поверхні, вимірювання обезліснення, а також моніторинг вулканів та землетрусів. Зовсім недавно тенденція змінилася, і тепер сюди додалися круїз-контроль та запобігання зіткненням, а також моніторинг стану здоров'я щодо серцебиття, дихання та руху голосових зв'язок людини. Оскільки подібні сенсори використовуються повсюдно, сценарії, в яких застосовується радар, перевершили всі очікування з того моменту, коли він був вперше розроблений та спроектований, наприклад, Google Soli [3]. Хоча 5G NR спочатку не підтримує радіолокаційне сканування із врахуванням конструкції системи, але все-таки проводиться значна кількість досліджень щодо використання існуючих стільникових сигналів для моностатичного або бістатичного виявлення цілей [4, 5]. Використання сигналів низхідної лінії передавання в LTE і NR для роботи радара передбачає дослідження проблеми повнодуплексного режиму моностатичної конфігурації.

Як правило, існують обмеження, пов'язані з прямим застосуванням фізичного сигналу традиційної стільникової системи (включаючи 5G NR) для сканування. Отже, опорні сигнали, що використовуються для оцінки каналу і відстеження фази в 5G NR, потенційно можуть бути повторно застосовані для сканування,

але при цьому, система не має в своєму розпорядженні достатніх ресурсів щодо спектра, часу або простору для виконання цієї операції з високою точністю і роздільною здатністю [6]. Це пов'язано з тим, що спектр є дуже обмеженим ресурсом для режиму зв'язку, а опорні сигнали ретельно розробляються для мінімізації накладних витрат. Крім того, режим передавання даних не потребує дуже точної оцінки довкілля. По-друге, пасивні бістатичні або мультистатичні системи радіолокації, що використовують стільникові сигнали, мають обмеження при проектуванні системи, через необхідність використання в пасивному радіолокаційному когерентному приймачу окремої спрямованої антени (прямий канал) для прийому сигналів прямої видимості в якості еталона синхронізації при когерентному детектуванні сигналів [7]. Проте насправді у багатьох випадках такого опорного сигналу LOS не існує через вплив шуму, завади і ефекти завмирання. Ця проблема ще більше посилюється в процесі формування променю (цифрового та/або аналогового), який супроводжується випромінюванням різних сигналів з боку базової станції, що направляються користувачам у різних напрямках, і тому прийнятий відбитий сигнал може і не бути затриманою та ослабленою версією опорного сигналу LOS. В результаті когерентне детектування недоцільне, а пасивний радар працює непередбачувано. Крім того, хоча для зв'язку сигнал прямої видимості зазвичай корисний, але при цьому, вкрай важливо в пасивній радіолокаційній системі для визначення слабких ехо-сигналів від об'єктів спостереження придушувати сильний сигнал прямої видимості, що проникає в канал спостереження. Це робить набагато жорсткішими вимоги до динамічного діапазону пасивних радіолокаційних приймачів ніж для приймачів зв'язку. І останнє, але не менш важливе: у пасивній мультистатичній конфігурації системи немає взаємодії між вузлами Tx і Rx, що значно ускладнює зменшення завад та проведення когерентної обробки [8].

Метою роботи є підвищення ефективності використання телекомунікаційних систем за рахунок спільного застосування засобів зв'язку та сканування із найкращим компромісом між характеристиками сканування та пропускною здатністю каналу передавання.

Виклад основного матеріалу

1. Формування зображень з високою роздільною здатністю з використанням радіочастотних сигналів (6G-візуалізація), що досягається за допомогою сканування, дозволяє отримати більше інформації про об'єкт і надати базові дані для класифікації та розпізнавання об'єктів [8]. Візуалізацію можна по суті змоделювати як обернену задачу електромагнітного розсіювання [1]. В основі візуалізації лежить використання електромагнітних хвиль для опромінення об'єкту дослідження та відновлення інформації про об'єкт дослідження шляхом збирання розсіяних ехо-сигналів. Дослідження в галузі візуалізації можна розділити на дві категорії: 2D-візуалізація та 3D-томографія. Двовимірне зображення використовується для об'єктів із струмопровідних матеріалів, а тривимірна дифракційна томографія застосовується для діелектричних тіл, як показано на рис. 1. У традиційних системах візуалізації відстань між передавачем та об'єктом дослідження є зазвичай великою; тому модель 2D-зображення може бути спрощена як лінійна обернена задача в дальній зоні [2]. У тривимірній томографії необхідно вирішувати нелінійні обернені завдання для отримання кількісної інформації, такої як діелектрична проникність і провідність, які, у свою чергу, необхідно перетворити на результат візуалізації. Порівняно з 2D-візуалізацією, томографія складніша, оскільки ефект багаторазового розсіювання призводить до нелінійної проблеми візуалізації [2]. В останні роки запропоновано метод візуалізації з високою роздільною здатністю на основі множинних спостережень з використанням просторово-часового випадкового поля випромінювання [3]. Також було запропоновано когерентну модель візуалізації, засновану на теорії сприйняття компресії при туберкульозі кістки та обчисленні кореляції функції Гріна [4], в якій позиціонування об'єкту дослідження досягається за допомогою спеціально розробленої антени з метаматеріалу. З розвитком метаматеріалів і матеріалів, що налаштовуються, для досягнення підвищеної роздільної здатності точність цієї системи візуалізації може бути покращена.

У мережах 6G послугу сканування можна розглядати як паралельну задачу послугам зв'язку, оскільки вона може працювати та приносити дохід незалежно від основного призначення мережі. Це означає, що система повинна бути спроектована так, щоб легко переходити від простого обміну даними до суміщення сканування та обміну даними, задовольняючи таким чином KPI для обох послуг.

Рівень взаємодії між системами сканування та зв'язку можна розділити на такі категорії [5]: співіснування у випадку, коли дві системи розглядають одна одну як джерела завад і тому не обмінюються інформацією між собою; співпраці у випадку, коли дві системи розробляються окремо, проте вони обмінюються інформацією між собою з метою зменшення міжсистемних завад; спільне/інтегроване проектування у випадку, коли дві системи спроектовані так, щоб сформувати єдину уніфіковану систему.

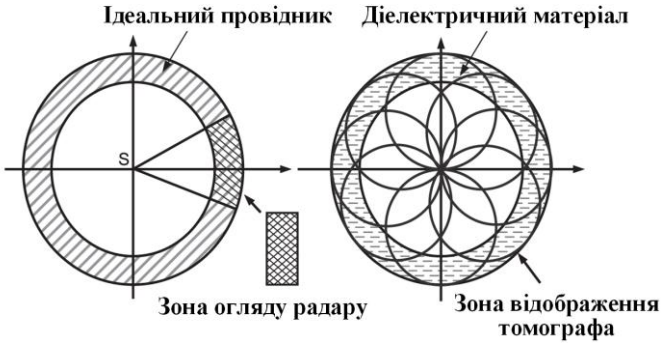


Рис. 1. Принцип спостереження за допомогою радарної візуалізації та томографії

Більшість досліджень, що стосуються інтегрованого проектування, здебільшого зосереджені на використанні спільної форми хвилі. Основною проблемою цього підходу полягає в тому, що зв'язок та сканування мають суперечливі KPI. Зокрема, розробки в галузі зв'язку в основному спрямовані на максимальне підвищення спектральної ефективності, тоді як оптимальна форма сигналу для сканування націлена на точні оцінки та високу роздільну здатність. Іншими словами, коли потрібна лише оцінка дальності, оптимальною формою сигналу зчитування є дельта-подібна функція автокореляції в часовій області поряд з високоефективною обробкою, що дозволяє оцінити параметр за наявності сильного шуму або інтерференції.

Хоча характеристика форми сигналу є важливим аспектом ISAC, але вона не охоплює всю картину. Тому пропонується здійснювати об'єднання схем сканування і зв'язку, яке виходить за рамки форми сигналу. В результаті, запропонована суперпозиція сигналів радара і зв'язку в області потужності та запропонований спільний метод в області потужності і просторової області. Однак майже вся існуюча література зосереджена на аспектах інтегрованого проектування на рівні каналів та не включає розгляд проблеми на рівні системи. Тому, результат проектування системної архітектури має гарантувати, що повна інтеграція систем зв'язку та сканування повністю реалізує очікувані переваги тієї та іншої послуги.

Мережі 6G мають працювати у більш високих частотних діапазонах з ширшою смугою пропускання (наприклад, на терагерцових частотах), а надмасивні антенні решітки стануть більш доступними. В результаті з’являється унікальна можливість розширити сферу застосування стільникових мереж від чистого зв'язку до комбінованої послуги зв'язку та сканування. При цьому, розробка мережі 6G повинна природним чином дійти інтегрованого рішення для зв'язку та сканування, на відміну від існуючого рішення, в якому основні компоненти (включаючи 5G NR, GNSS і радарні системи) працюють незалежно, як показано на рис. 2. Крім того, в результаті розвитку нових технологій і досягнень 6G (включаючи впровадження метаматеріалів, що реконфігуруються інтелектуальних антен та штучного інтелекту), таке інтегроване рішення буде ще більш виправданим, особливо з урахуванням того, що вказані технології є ключовими рушійними силами для обох систем.

Для розкриття величезного потенціалу нової технології ISAC, треба спочатку знайти відповіді на такі запитання: особливості співіснування модулів зв'язку та сканування в інтегрованому рішенні на системному рівні та способи підвищення ефективності співіснування на системному рівні; обгрунтування позитивного результату від інтегрованого системного рішення для послуг зв'язку та сканування; переваги та недоліки існуючих системах зв'язку та сканування із впровадженою інтеграцією на системному рівні.

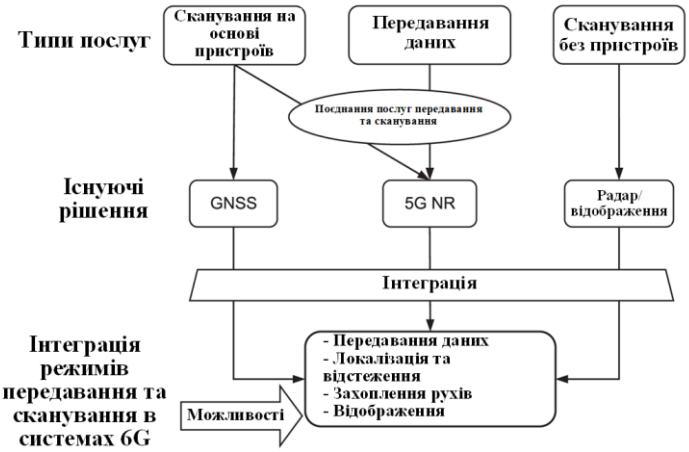


Рис. 2. Алгоритм функціонування інтегрованої системи сканування та зв'язку

Відповіді на ці запитання допомагають визначити нові потенційні напрямки досліджень. За допомогою рис. 3 можна дати просте пояснення інтеграції зв'язку та сканування.

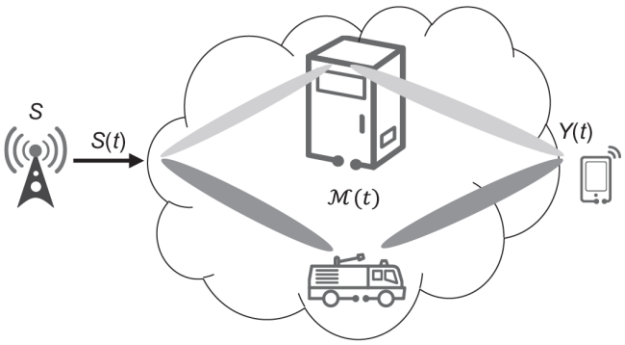


Рис. 3. Модель сегменту інтегрованої системи сканування та передавання даних

На схемі показаний радіочастотне джерело S, що передає сигнал S(t), який поширюється через середовище зв'язку M і приймається або обробляється одним або декількома приймачами. При обміні даними радіочастотний сигнал S(t) спочатку обробляється в джерелі для внесення інформаційних даних (d_s). Теоретичні межі швидкості передачі добре зрозумілі і можуть бути виражені як межа Шенона $I(S(t);Y(t)\,|\,M(t))$, де $Y(t)$ позначає прийнятий сигнал на передбачуваному приймачі, а $I(x;y\,|\,z)$ – взаємну інформацію між змінними x та y, що задана змінною z. Спочатку передбачалось, що це змінні є функціями часу (t). Що стосується операції сканування, радіочастотний сигнал вносить зміни до середовища зв'язку, а не джерело сигналу. Іншими словами, потрібно розглядати сканування як особливий спосіб зв'язку, в якому інформація (d_M), вбудована в середовище зв'язку та передається для приймача (приймачам) за допомогою радіочастотного сигналу, який може бути сформований третім пристроєм. В результаті, можемо визначити обмеження швидкості сканування як $I(Y(t);M(t)\,|\,S(t))$ [6]. Іншими словами, ключова відмінність сканування від традиційного зв'язку від здійснення інтеграції джерела інформації та джерела радіочастотного сигналу.

При цьому, вважаємо, що сканування і зв'язок можуть бути представлені як загальна задача зв'язку, в якій вихідним сигналом можна керувати за допомогою вихідних даних (d_S), або інформацією про середовище (d_M). В результаті, отримуємо можливість визначення структури мережі ISAC, де вузли можуть виконувати обидві функції з наступними перевагами: більш ефективне використання ресурсів, оскільки інтегрована конструкція забезпечує ефективне спільне використання ресурсів, а не консервативний їх поділ (наприклад, FDMA та TDMA); зменшення завад між сигналами сканування та зв'язку, оскільки зрозуміло, що основною перевагою інтегрованої конструкції буде запобігання або зменшення завад між двома системами, коли вони спільно використовують ресурси в часовій, частотній або просторовій області; найкраща якість зв'язку, оскільки інтеграція дозволяє покращити якість зв'язку за двома напрямками. Перший напрямок передбачає підстроювання зв'язку під середовище за допомогою ефективніших методів формування діаграми спрямованості та зменшення завад завдяки отриманій інформації. Другий напрямок передбачає більш гнучкий і передбачуваний зв'язок, який працює в оптимальних умовах з використанням інформації про поточний і майбутній статус каналу. Цей підхід ґрунтується на знанні характеристик навколишнього середовища та прогнозуванні змін у ньому. Знаючи фактичне середовище передавання даних, можна визначити основну причину змін в інформації про стан каналу, без виконання спостереження за нею; мережа ISAC забезпечує більш ефективне сканування за запитом. Іншими словами, сканування більше не є лише послугою, що керується додатком, а може запускатися по запиту від іншого мережного вузла; менша споживана потужність, оскільки, якщо врахувати, що більша частина електроенергії у високочастотних системах розсіюється на аналоговому інтерфейсі (наприклад, підсилювачі потужності та АЦП/ЦАП), тому потужність може використовуватися набагато ефективніше, якщо системи хоча б частково інтегровані.

Основною проблемою при аналізі системи ISAC є знаходження меж швидкодії. Одним з важливих висновків при дослідженні структури ISAC в одноцільовій системі є те, що, оскільки повна енергія сигналу, що передається джерелом фіксована, необхідно знайти компроміс між відбитими і поглиненими хвилями. Запропонована структура ISAC є дуже обмеженим прикладом у тому сенсі, що при цьому враховується лише моностатичне сканування, тобто передавач та приймач сигналу сканування розташовані разом. Іншим добре відомим прикладом ISAC в парадигмі когерентного зв'язку є процес «оцінки каналу», в якому деякі «відомі» сигнали, які називають опорними сигналами або пілот-сигналами, передаються разом з сигналом, що несе інформацію, і приймачі сигналу зв'язку та сигналу сканування об’єднуються в спільний телекомунікаційний пристрій. У цьому випадку на радіочастотний сигнал, що передається, впливають як вихідна інформація, так і канал поширення. Однак цей приклад системи ISAC, в якому інформація сканування (про канал поширення) не має цінності сама по собі і використовується тільки для того, щоб допомогти приймачу декодувати вихідні дані. Загалом у рамках системи ISAC задача сканування розглядається як окрема послуга, яка не обов'язково використовується для покращення зв'язку. Навіть якщо процес сканування має покращити якість зв'язку, позитивний ефект від процесу сканування може виходити за межі вузького призначення.

У телекомунікаційній системі 6G використовуються передові технології для подальшого підвищення продуктивності мережі мобільного зв'язку. Деякі з цих технологій, що мають ключове значення для системи 6G і охоплюють кінцеві пристрої та мережну інфраструктуру, відкривають такі перспективи: ширший та високочастотний спектр із більшою смугою пропускання; удосконалена конструкція антени з дуже великими гратками та метаповерхнею; більш узгоджена робота базових станцій та обладнання користувача; передові методи придушення завад; інтегрована вдосконалена обробка сигналів та штучного інтелекту (ШІ).

Розглянемо п'ять потенційних рівнів інтеграції ISAC. Перші два рівні стосуються спільного використання доступних фізичних ресурсів (включаючи спектр), обладнання та радіочастотних схем. На третьому рівні розглядається спільне використання ресурсів та можливостей цифрової обробки сигналів, таких як алгоритми та модулі обробки на фізичному рівні. Перехід на наступний рівень інтеграції може вимагати розробку інтерфейсу протоколу для забезпечення міжрівневого, міжмодульного та міжвузлового обміну інформацією. Нарешті, найбільш ефективний та ідеальний рівень передбачає спільне використання всіх доступних ресурсів та інформації для підвищення продуктивності обох служб. Таким чином, у мережі 6G можуть співіснувати різні рівні інтеграції відповідно до конкретних сценаріїв використання, ключових показників ефективності та витрат на реалізацію. Наприклад, для транспортних засобів з екстремальними вимогами до затримки зв'язку та ймовірності розпізнавання або виявлення об'єкта можуть знадобитися всі п'ять рівнів інтеграції.

Хоча ця багаторівнева структура може здатися простою в реалізації через очевидну схожість між послугами зв'язку та сканування, але для реалізації такої інтегрованої системи необхідно вирішити наступні основні проблеми: різні можливості вузлів, оскільки порівняно з 5G у бездротових мережах 6G буде ще більше бездротових вузлів з різноманітним набором можливостей у плані обробки сигналів, пам'яті, смуги пропускання та радіочастотного тракту. Це ускладнить інтеграцію порівняно із звичайним зв'язком, оскільки параметри вузла мають значно більший вплив на продуктивність сканування; напівдуплексні вузли, оскільки повнодуплексні приймачі вже прототиповані в існуючих системах з прийнятною продуктивністю і, як очікується, будуть комерціалізовані в найближчому майбутньому, але ще доведеться пройти довгий шлях, перш ніж в мережах будуть присутні тільки повнодуплексні вузли. Оскільки в майбутніх мережах залишиться велика кількість напівдуплексних пристроїв, тому напівдуплексні вузли ускладнюють сканування, особливо в моностатичному режимі, коли передавачі та приймачі розташовані поруч; обмежене покриття процесу сканування є одною з основних проблем сканування в мережах, яка полягає в тому, що дальність сканування збільшується як корінь четвертого ступеня з потужності передачі, а не другий, як у випадку зв'язку.

Наступні напрямки досліджень наблизять нас до інтеграції засобів зв'язку та сканування, зокрема: аналіз продуктивності узагальнених мереж ISAC а наявні висновки про фундаментальні межі продуктивності, отримані для простої структури бажано поширити на більш загальні варіанти багатовузлових багатоцільових мереж з мультистатичними сканування та знайти відповіді на такі питання: (1) який найкращий компроміс між характеристиками сканування та пропускною спроможністю каналу зв'язку; (2) як розробити практичні схеми, що наближають до такого компромісу, наприклад форми сигналів, таблиці кодування, структури та протоколи. Результати досліджень у цьому напрямі представлена в [7], де об'єкти сканування розглядаються як віртуальні приймачі енергії, а потім ISAC моделюється як завдання розподілу ресурсів інформації та енергії бездротовим каналом. З точки зору теорії інформації, сканованими об'єктами є радіорелейні станції, які приймають скануючий сигнал певної форми і пересилають його назад передавачу зі своєю власною інформацією про параметри середовища, що вбудовуються в хвилю відлуння. Необхідні додаткові підходи та ідеї, щоб отримати гарне уявлення про межі можливостей мереж ISAC у різних сценаріях; найбільш важлива проблема, яку необхідно вирішити, полягає в тому, як ця інтеграція впливає на конструкцію мережі радіодоступу на різних рівнях. Фізично при дослідженні знадобиться таке: архітектура мережі, що забезпечує гнучке і продуктивне співіснування між сигналами зв'язку та сканування, а також відповідними конфігураціями, тим самим гарантуючи, що робочі характеристики систем зв'язку та сканування не будуть погіршені; загальносистемні рішення для спільного використання скануючих можливостей різних вузлів, включаючи мережні вузли та пристрої користувача; механізми передачі сигналів, які формують взаємодію між мережевими об'єктами та забезпечують можливість проектування та налаштування пов'язаних параметрів; зв'язок за рахунок процесу сканування, оскільки в майбутньому сканування буде представлено як окрема послуга, все ж таки корисно дослідити, як інформацію, отриману за допомогою сканування, можна використовувати у зв'язку. Найбільш тривіальною перевагою сканування є визначення характеристик навколишнього середовища, що дозволяє організувати зв'язок по більш детермінованих і передбачуваних каналах завдяки знанням про середовище поширення. Приклади організації послуги зв'язку за рахунок процесу сканування показано на рис. 4, який демонструє, як знання про довкілля, отримані за допомогою сканування, можуть покращити зв'язок. Перший приклад відображає, як знання про довкілля використовуються для оптимізації формування променю в напрямку кінцевого пристрою (формування променю з урахуванням середовища), а другий приклад показує, як ці знання можуть бути використані для застосування всіх потенційних ступенів свободи в каналі поширення (підвищення рангу каналу з урахуванням середовища). Останній приклад показує, як поінформованість про середовище поширення допомагає зменшити або пом'якшити взаємні завади між кінцевими пристроями.

Ступінь, в якій процес сканування приносить користь системі в режимі зв'язку, не повинен обмежуватися покращенням пропускної спроможності та зменшенням завад. Окремий цікавий напрямок досліджень можна було б присвятити розширенню функціонального охоплення зв'язку за допомогою даних сканування та вивчення того, як функції, які зазвичай реалізуються системою зв'язку, можуть виконуватися підмодулем сканування. Результат спричинить величезну економію як з погляду накладних витрат, і з погляду затримки; інший погляд на парадигму конструкції ISAC передбачає використання альтернативного підходу до зв'язку за допомогою сканування. Як говорилося раніше, зв'язок і сканування можна розглядати як загальну платформу, в якій на радіосигнал від джерела в іншому місці накладаються дані про середовище, а потім він приймається третьою стороною. При такому підході немає необхідності обмежуватися спільним розміщенням джерел даних і радіосигналу, що буде особливо корисним в сценаріях, де для збору даних розгортаються пристрої з обмеженими можливостями обробки (більшість пристроїв IoT у майбутніх системах). Замість передачі зібраних даних пристрої можуть маніпулювати радіочастотним сигналом, що передається іншим джерелом радіочастотної області (на відміну від основної смуги частот), для економії значної кількості енергії. Цей тип зв'язку, поєднаний із функцією сканування, називається зв'язком із зворотним розсіюванням [8]. Іншим прикладом є зв'язок під впливом середовища [1], коли характеристики середовища проходження сигналу навмисно змінюються для передачі інформації; сканування за допомогою зв'язку, оскільки платформа зв'язку дозволяє нам досягати більш ефективного та інтелектуального сканування, з'єднуючи скануючі вузли між собою. У мережі підключених користувачів може бути реалізовано сканування на запит, тобто сканування може бути виконано на основі запиту іншого вузла або делеговано іншому вузлу. Крім того, спираючись на підтримку зв'язку, можна організувати спільне сканування, при якому кілька вузлів сканування отримують інформацію про довкілля. Всі ці розширені функції вимагають ретельно спроектованої RAN, щоб забезпечити зв'язок між скануючими вузлами каналами DL, UL і SL з вимогою на мінімальні витрати та максимальну ефективність сканування, що є цікавою темою дослідження; позиціонування за допомогою сканування: активна локалізація або позиціонування включає в себе локалізацію обладнання користувача за допомогою передачі або прийому сигналів до нього або від нього. Головною перевагою цього режиму є простота в експлуатації. Хоча точне знання розташування обладнання дуже цінується, його важко отримати через багато факторів, включаючи багатопроменеве поширення, недосконалу синхронізацію часу/частоти, обмежені можливості вибірки/обробки на стороні користувача і обмежений динамічний діапазон кінцевого пристрою [2].

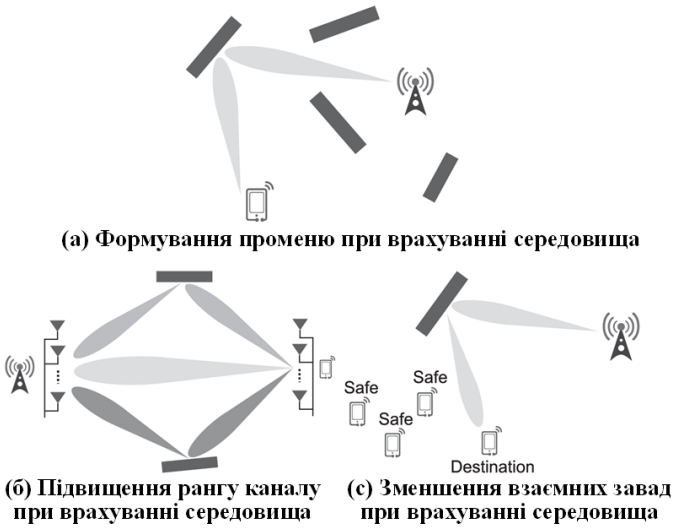


Рис. 4. Схема організації режиму зв'язку за допомогою процесу сканування

З іншого боку, пасивна локалізація включає отримання інформації про місцезнаходження активних або пасивних об'єктів шляхом обробки сигналів відлуння переданого сигналу в одному або декількох місцях. У порівнянні з активною локалізацією пасивна локалізація через сканування має такі явні переваги: вона допомагає у виявленні каналів LOS та зменшенні залишкового зміщення NLOS; на неї значно менше впливають помилки синхронізації між пристроєм користувача та мережею; вона може покращити роздільну здатність і точність позиціонування у випадках, коли смуга пропускання локалізації обмежена цільовим пристроєм користувача [3].

Зважаючи на ці моменти, потенційні дослідження можна зосередити на тому, як пасивна локалізація шляхом сканування усуває недоліки активної локалізації. Щодо пасивної локалізації, варто згадати проблему зіставлення (matching problem). Вона пов'язана з тим, що отримані сигнали відлуння не мають унікальної сигнатури, що дозволяє однозначно зіставити їх з об'єктами (і їх схованими змінними розташування), від яких вони відображаються. Це повністю відрізняється від локалізації з використанням активних сигналів або маяків, коли сигнатура, що відповідає маяку або орієнтиру однозначно ідентифікує

пов'язані з ними об'єкти. Тому потрібні подальші дослідження, щоб пов'язати спостереження з місцем розташування активних пристроїв, що істотно підвищить точність і роздільну здатність активної локалізації.

Висновки

Розглянуто способи підвищення ефективності використання телекомунікаційних систем за рахунок спільного застосування засобів зв'язку та сканування із найкращим компромісом між характеристиками сканування та пропускною здатністю каналу передавання.

Отримані результати досліджень інтеграції засобів зв'язку та сканування, зокрема: аналіз продуктивності узагальнених мереж ISAC та висновки про фундаментальні межі продуктивності, отримані для простої структури дозволили визначити найкращий компроміс між характеристиками сканування та пропускною спроможністю каналу зв'язку, забезпечили можливість створити практичні схеми, що наближають до компромісу форми сигналів, таблиці кодування, структури та протоколів.

Література

1. Barneto C. B., Riihonen T., Turunen M., Anttila L., Fleischer M., Stadius K., Ryynänen J., and Valkama M. Full-duplex OFDM radar with LTE and 5G NR waveforms: Challenges, solutions, and measurements, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 67, no. 10, pp. 4042–4054, 2019.

2. Rao R. M., Marojevic V., and H J. Reed, Probability of pilot interference in pulsed radarcellular coexistence: Fundamental insights on demodulation and limited CSI feedback, IEEE Communications Letters, vol. 24, no. 8, pp. 1678–1682, Aug. 2020.

3. Liu F., Masouros C., Petropulu A., Griffiths H., and Hanzo L. Joint radar and communication design: Applications, state-of-the-art, and the road ahead, IEEE Transactions on Communications, vol. 68, no. 6, pp. 3834–3862, 2020.

4. Dmytro V. Mykhalevskiy & Oksana S. Horodetska, 2019. Investigation Of Wireless Channels According To The Standard 802.11 In The Frequency Range Of 5 Ghz For Two Subscribers. Journal of Mechanical Engineering Research & Developments (JMERD), Zibeline International Publishing, vol. 42(2), pages 50-57, March.

5. Васильківський М., Нікітович Д., Болдирева О. (2022). Керування доступом до інформаційних даних в інтелектуальних інфокомунікаційних мережах. Measuring and computing devices in technological processes, (4), 5–17. https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-1

6. Васильківський М., Варгатюк Г., Болдирева О. (2022). Дослідження архітектури штучного інтелекту для інфокомунікаційних мереж 6G. Measuring and computing devices in technological processes, (4), 62–70. https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-7

7. Васильківський М., Коломієць А., Грабчак Н. (2022). Дослідження функціональних параметрів інфокомунікаційних мереж 6G. Вісник Хмельницького національного університету, (6), 46–52. https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-46-52

8. Васильківський М., Коломієць А., Будаш М. (2022). Оцінювання параметрів радіотрактів інфокомунікаційних систем 5G/6G. Вісник Хмельницького національного університету, (6), 53–60. https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-53-60

References

1. Barneto C. B., Riihonen T., Turunen M., Anttila L., Fleischer M., Stadius K., Ryynänen J., and Valkama M. Full-duplex OFDM radar with LTE and 5G NR waveforms: Challenges, solutions, and measurements, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 67, no. 10, pp. 4042–4054, 2019.

2. Rao R. M., Marojevic V., and H J. Reed, Probability of pilot interference in pulsed radarcellular coexistence: Fundamental insights on demodulation and limited CSI feedback, IEEE Communications Letters, vol. 24, no. 8, pp. 1678–1682, Aug. 2020.

3. Liu F., Masouros C., Petropulu A., Griffiths H., and Hanzo L. Joint radar and communication design: Applications, state-of-the-art, and the road ahead, IEEE Transactions on Communications, vol. 68, no. 6, pp. 3834– 3862, 2020.

4. Dmytro V. Mykhalevskiy & Oksana S. Horodetska, 2019. Investigation Of Wireless Channels According To The Standard 802.11 In The Frequency Range Of 5 Ghz For Two Subscribers. Journal of Mechanical Engineering Research & Developments (JMERD), Zibeline International Publishing, vol. 42(2), pages 50-57, March.

5. Vasylkivskyi M., Nikitovych D., Boldyreva O. (2022). Keruvannia dostupom do informatsiinykh danykh v intelektualnykh infokomunikatsiinykh merezhakh. Measuring and computing devices in technological processes, (4), 5–17. https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-1

6. Vasylkivskyi M., Varhatiuk H., Boldyreva O. (2022). Doslidzhennia arkhitektury shtuchnoho intelektu dlia infokomunikatsiinykh merezh 6G. Measuring and computing devices in technological processes, (4), 62–70. https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-7

7. Vasylkivskyi M., Kolomiiets A., Hrabchak N. (2022). Doslidzhennia funktsionalnykh parametriv infokomunikatsiinykh merezh 6G. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, (6), 46–52. https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-46-52

8. Vasylkivskyi M., Kolomiiets A., Budash M. (2022). Otsiniuvannia parametriv radiotraktiv infokomunikatsiinykh system 5G/6G. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, (6), 53–60. https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-53-60

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-64-69
УДК 621.316.72

ВОЛОШКО АНАТОЛІЙ
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
https://orcid.org/0000-0002-6867-2060
e-mail: avolosko820@gmail.com
ДЖЕРЯ ТЕТЯНА
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
https://orcid.org/0000-0002-9519-2951
e-mail: tatyanakurus0202@gmail.com

МЕТОД ЛОКАЛЬНОГО ВІДНОВЛЕННЯ СЕГМЕНТІВ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

В роботі запропонована модель локального відновлення часових сегментів інформаційних сигналів та синтезований на її основі послідовний алгоритм дій. На основі аналізу функціональних залежностей вейвлет-коефіцієнтів за рівнями вейвлет-декомпозиції представиено модифіковану схему реконструкції та розроблено модель, на основі якої розроблено метод локального (сегментного) відновлення інформаційних сигналів за рівнями вейвлет-декомпозиції. детально синтезовано на прикладі графіка електричного навантаження.

Ключові слова: графік електричного навантаження, енергосистема, вейвлет-перетворення, локальне відновлення, вейвлет-декомпозиція.

VOLOSHKO ANATOLY, DZHERIA TETIANA
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

METHOD OF LOCAL RESTORATION OF SEGMENTS OF INFORMATION SIGNALS

The use of centralized and decentralized electricity supply schemes, the introduction of feedback between the consumer of electricity and its producer led to a rapid increase in information flows at all stages of the functioning of the electricity industry of Ukraine, starting with the production of electricity and before its consumption. This necessitates the processing, storage and transmission of large data sets. On the other hand, the time constraints imposed on information processing and decision-making efficiency, as well as the limited bandwidth of communication networks require effective optimization of information flows in terms of their compression and compact storage, transmission and recovery without loss. At the same time, the determining quantitative and qualitative information parameters are electricity consumption modes and the quality of electric energy, and the main mode parameter for solving many problems of planning, management and carrying out commercial calculations is the graphs of electric load. Based on the analysis of the functional relationships of wavelet coefficients according to the levels of wavelet decomposition, the robot presents a modified reconstruction scheme and developed a model based on which a method of local (segmental) restoration of information signals according to the levels of wavelet detail is synthesized using the example of the electric load graph.

In the paper, a model of local recovery of time segments of information signals is proposed and a sequential algorithm of actions synthesized on its basis. This technique allows for effective segmentation of information signals, reduces the duration of mathematical processing, simplifies database analysis, increases the effectiveness of controlling the reliability of initial data recovery by reserving recovery paths with subsequent comparison of results.

Keywords: graph of electric load, power system, wavelet transformation, local recovery, wavelet decomposition.

Постановка проблеми

Для вирішення багатьох практичних задач (контроль проходження максимуму електроспоживання в Енергосистемі, планування режимів електроспоживання та інше) зазвичай немає необхідності проводити аналіз всієї сукупності часового ряду (у нашому випадку ГЕН) і «діставати» його із бази даних – для аналізу потрібна тільки деяка його локальна частина (сегмент).

Аналіз останніх джерел

Як відомо, звичайне вейвлет-перетворення за допомогою алгоритму Малла припускає відкидання частини високочастотної компоненти сигналу на кожному кроці вейвлет-декомпозиції. В [1] показано, що це може вносити досить суттєві похибки у випадку аналізу нестаціонарних часових рядів.

Особливе місце при обробці часових рядів загалом і прогнозуванні зокрема, займає вирішення проблеми обробки і відновлення пропущених значень. Частіше за все вона виникає у випадку ідентифікації залежностей, апріорна інформація про значення параметрів яких є неповною, що чинить значний вплив на результати прогнозування. Широке впровадження АСКОЕ, використання одержаних даних для цілей комерційного обліку, планування та управління електроспоживанням пред'являють високі вимоги до якості первинної інформації. Різного роду збої у працездатності АСКОЕ (вихід із ладу лічильників електричної енергії, збої в лініях зв'язку і т. ін.) призводять до виникнення пропусків даних. Питаннями відновлення пропусків даних займається широке коло спеціалістів.

Як відомо, на сьогоднішній день у математичній статистиці існує декілька шляхів вирішення проблеми неповних даних [2–4]:

-виключення некомплектних даних із вихідної вибірки; такий підхід не є цілком коректним – неповні дані містять нову інформацію, яка є необхідною для подальших досліджень, і тому потребують додаткового аналізу;

-застосування спеціально розроблених математичних методів аналізу неповних даних, таких як

метод зважування або метод максимальної правдоподібності, ЕМ – алгоритми; при цьому необхідно відмітити зростання складності подальшого аналізу [5, 6];

-відновлення пропусків даних (за середнім, використовуючи регресії і т. ін.); для більшості випадків такі підходи є ефективними [7].

Метою роботи є розробка методу локального відновлення сегментів інформаційних сигналів.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо побудову, так званого, вейвлет-перетворення Хаара із «дирками/отворами» (a trous). При цьому інформаційний сигнал, або часова серія $\{c_{0,t}\}$, визначається як скалярний добуток вхідного сигналу $f(x)$ і скейлинг-функції $\varphi(x)$, яка узгоджена із низькочастотним фільтром

$$c_{0,t} = \left\langle f(x), \varphi(x) \right\rangle. \tag{1}$$

Скейлинг-функція (функція масштабування) обирається так, щоб задовольнити рівнянню розширення

$$\frac{1}{2}\varphi\left(\frac{x}{2}\right) = \sum_k h(k)\varphi(x-k), \tag{2}$$

де $h(k)$ – дискретний фільтр низьких частот, пов'язаний із функцією масштабування. Це означає, що низькочастотна фільтрація інформаційного сигналу тісно пов'язана із іншим рівнем розкладання сигналу. Відстань між рівнями збільшується із коефіцієнтом 2 від одного масштабу до іншого. Згладжені дані $\{c_{j,t}\}$ рівня вейвлет-декомпозиції *j* і позиції *k* є скалярним добутком

$$c_{j,t} = \frac{1}{2^j}\left\langle f(x), \varphi\left(\frac{x-t}{2^j}\right)\right\rangle. \tag{3}$$

Отже в результаті згортки маємо

$$c_{j+1,t} = \sum_k h(k) c_{j,t+2^j k}. \tag{4}$$

Далі, застосовуючи в якості вейвлет-базису описуваний вейвлет Хаара, вираз (4) перевтілюється до виду

$$cA_{j+1,t} = \frac{1}{2}\left(cA_{j,t-2^j} + cA_{j,t}\right), \tag{5}$$

де $cA_{j+1,t}$ можемо назвати апроксимаційним коефіцієнтом, а різницю між двома послідовними розкладаннями

$$cD_{j=1,t} = cA_{j,t} - cA_{j+1,t}, \tag{6}$$

– деталізуючим коефіцієнтом, який також у свою чергу може бути вираженим та записаним через скалярний добуток

$$cD_{j,t} = \frac{1}{2^j}\left\langle f(x), \psi\left(\frac{x-t}{2^j}\right)\right\rangle. \tag{7}$$

При цьому вейвлет-функція визначається як

$$\frac{1}{2}\psi\left(\frac{x}{2}\right) = \varphi(x) - \frac{1}{2}\varphi\left(\frac{x}{2}\right). \tag{8}$$

У кінцевому випадку вихідний сигнал буде представлений у виді:

$$f(t) = cA_{J,t} + \sum_{j=1}^{J} cD_{j,t}. \tag{9}$$

Тобто вихідний сигнал буде розкладений у ортонормованому базисі (вейвлет Хаара – ортогональний) послідовністю апроксимуючих та деталізуючих коефіцієнтів за рівнями вейвлет-декомпозиції. Проаналізуємо етап реконструкції ГЕН за допомогою вейвлет-коефіцієнтів (5) та (6). При цьому необхідно відмітити, що із (6) слідує: $cA_{j,t} = cA_{j+1,t} + cD_{j+1,t}$. Тобто, апроксимуючий коефіцієнт вищого рівня вейвлет-декомпозиції розраховується за допомогою апроксимуючого коефіцієнту нижчого рівня з урахуванням відповідного деталізуючого коефіцієнту. На рис. 1 графічно представлено структурну схему реконструкції (відновлення) вихідних даних.

На структурній схемі (рис. 1) схематично представлено вейвлет-реконструкцію значення функції *f(x)* у проміжок часу *t* = 15 послідовно за рівнями вейвлет-декомпозиції

$$f(t_{15}) = cA_{5,0}(15) + cD_{5,1}(15) + cA_{4,0}(15) + cD_{4,1}(15) + \ldots + cA_{1,0}(15) + cD_{1,1}(15).$$

Виходячи із аналізу функціональних зв'язків вейвлет-коефіцієнтів за рівнями вейвлет-декомпозиції,

модифікуємо схему реконструкції (рис. 1), розробимо модель і на її основі синтезуємо спосіб локального (посегментного) відновлення інформаційних сигналів за рівнями деталізації на прикладі графіка електричного навантаження.

Розроблювана модель описується наступним чином

$$\left\{P_{0,i}\right\}_{1\le i\le N} = \left\{cA_{J,0}\right\}_{J=m} + sum\left\{cD_{j,i}(k)\right\}_{1\le j\le J}^{1\le k\le 2^{j}-1}, \quad (10)$$

де i – поточне значення інформаційного сигналу, m – рівень вейвлет-декомпозиції (залежить від частоти дискретизації інформаційного сигналу і підпорядковується властивостям вейвлет-аналізу).

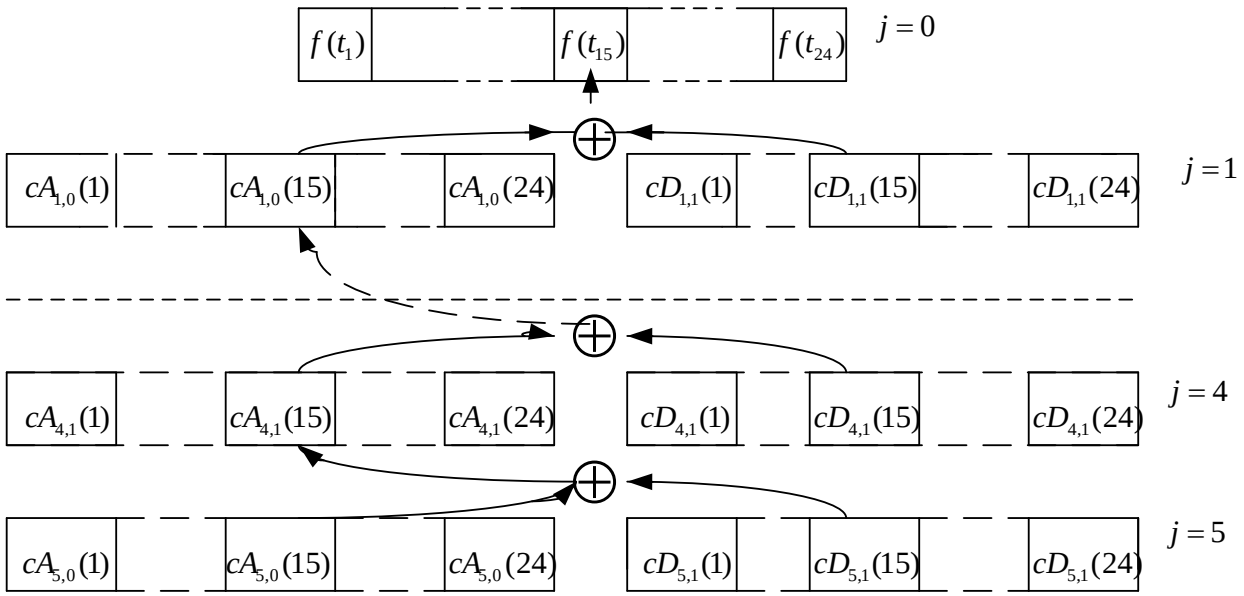


Рис. 1. Структурна схема вейвлет-реконструкції відповідно до (4.41) та (4.42)

Модель локального (посегментного) відновлення значень графіка електричного навантаження відповідно до (10) представлено на рис. 2.

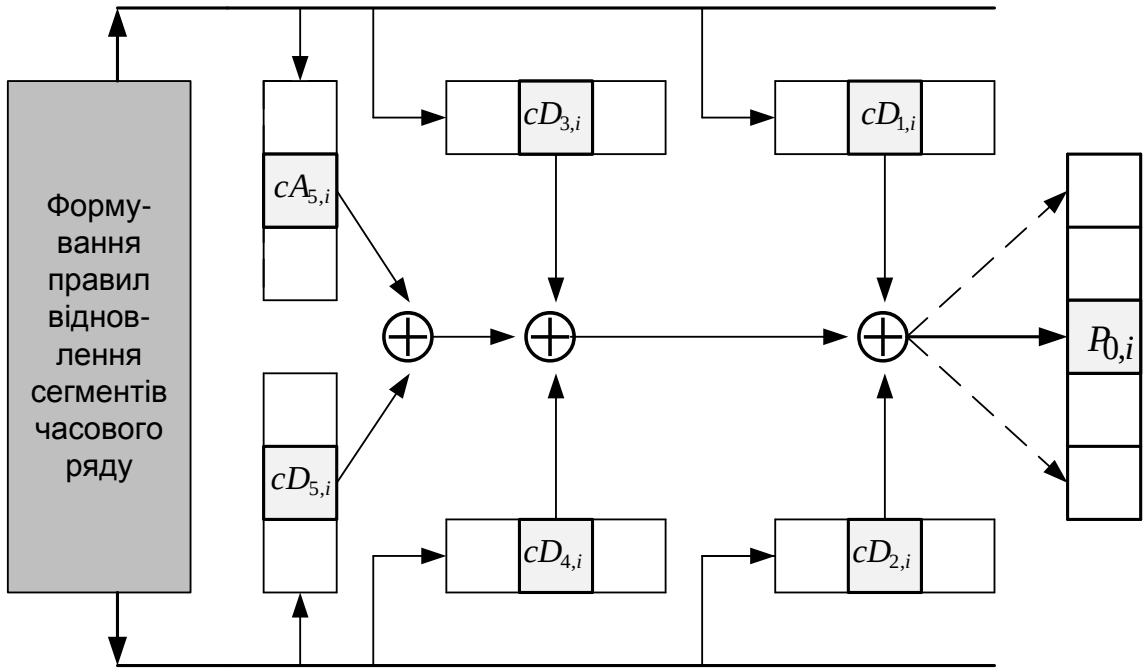


Рис. 2. Функціональна (структурно-логічна) модель поелементного відновлення значень інформаційного сигналу на основі аналізу функціональних зв'язків вейвлет-коефіцієнтів

Блок формування правил відновлення сегментів часового ряду формує послідовність та рівні відновлення, задає тривалість сегменту та шляхи перевірки результату відновлення. При цьому, шляхи перевірки правильності відновлення значень часового ряду формуються відповідно до структурної схеми

вейвлет-реконструкції на рис. 1.

Відповідно до (10) сформуємо модель посегментного відновлення значень інформаційного сигналу і опишемо її наступним чином

$$\left\{P_{0,сегмент}\right\}_{t_0}^{s\cdot\Delta t} = \left[sum\left\{P_{0,t_i}\right\}_{t_0\le t_i\le(t_0+s\cdot\Delta t)}^{1\le s\le S}\right], \quad (11)$$

де t_0 – початкове (часове) значення відновлюваного сегменту, $s\cdot\Delta t$ – тривалість сегменту (для ГЕН $\Delta t = 3,15,30,60$ (хвилин), S – межа сегменту.

Відповідно до розробленої моделі (рис. 2) та (11), представимо алгоритм відновлення значень часового ряду на прикладі графіка електричного навантаження (ГЕН). На рис. 3 показане відновлення значень електричного навантаження за восьмигодинні проміжки часу. Тобто, якщо необхідно проаналізувати середнє навантаження вночі – $\left\{P_{0,i}\right\}_{0\le i\le 8}$, вдень – $\left\{P_{0,i}\right\}_{8\le i\le 16}$ та ввечері – $\left\{P_{0,i}\right\}_{16\le i\le 24}$ відновлюються тільки дані значення.

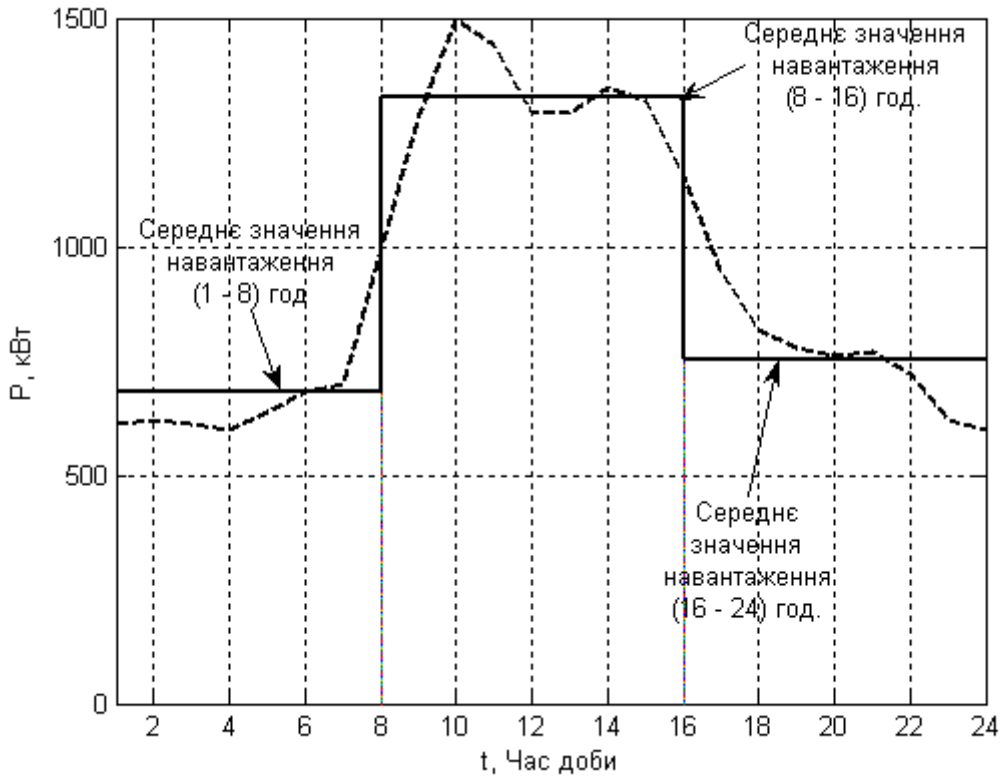
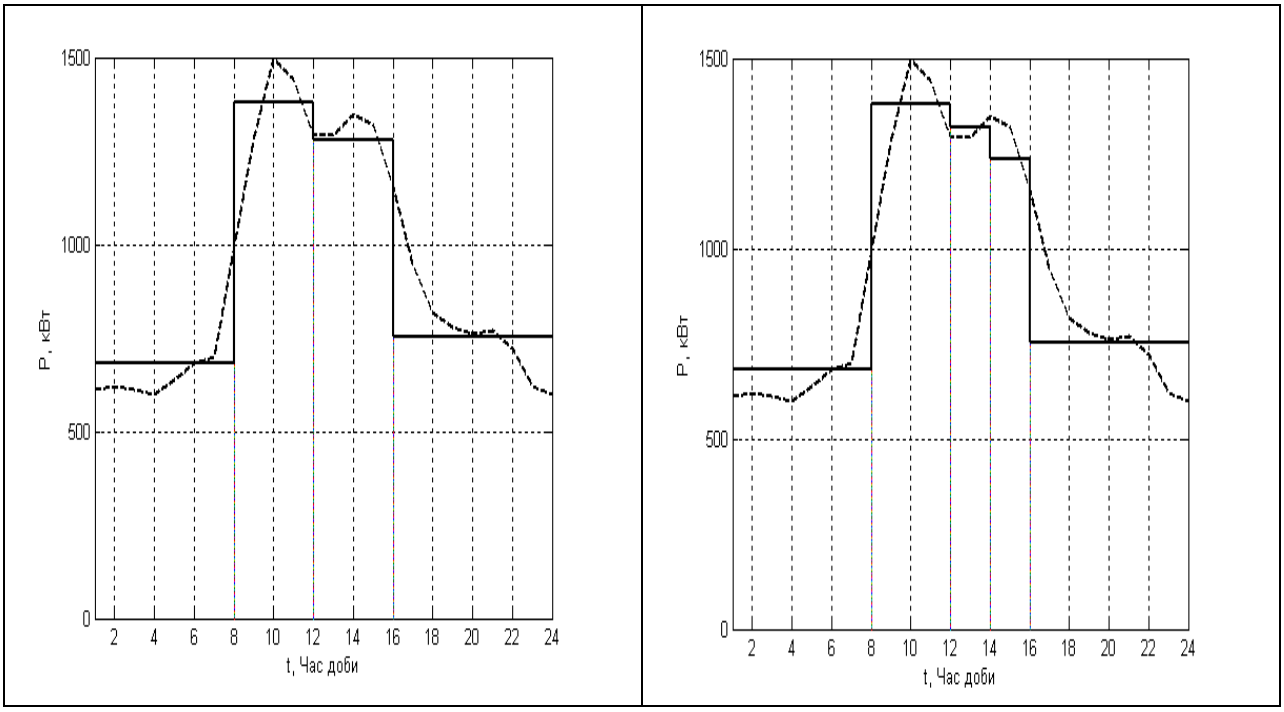


Рис. 3. Відновлення значень ГЕН (восьмигодинних сегментів)

Контроль проходження максимуму електроспоживання у ранкові $P_{ранок}^{макс}$ та вечірні $P_{вечір}^{макс}$ часи доби проводиться на основі результатів деталізованої сегментації у дані часи (від 8 до 11 годин – ранковий максимум, від 17 до 21 години – вечірній максимум). Дані години встановлюються Постановою НКРЕ України.

На рис. 4 представлено деталізацію сегменту ГЕН $\left\{P_{0,i}\right\}_{8\le i\le 16}$ на сегменти $\left\{P_{0,i}\right\}_{8\le i\le 12}$ та $\left\{P_{0,i}\right\}_{12\le i\le 16}$. Для більш детального аналізу ГЕН сегмент $\left\{P_{0,i}\right\}_{12\le i\le 16}$ у свою чергу деталізується на два сегменти $\left\{P_{0,i}\right\}_{12\le i\le 14}$ та $\left\{P_{0,i}\right\}_{14\le i\le 16}$ (рис. 4).



а) б)

Рис. 4. Деталізація восьмигодинного сегменту ГЕН на два чотиригодинних – а) та чотиригодинного на два двогодинних – б)

Відповідно до ГЕН, дана сегментація проводиться із використанням всього одного коефіцієнту апроксимації та деталізуючих вейвлет-коефіцієнтів відповідних рівнів вейвлет-деталізації. Впродовж процесу отримання інформації можлива перевірка правильності посегментного відновлення за моделлю рис. 2 за (5) та (6) у відповідності з рис. 1.

Таким чином запропонована модель і синтезований на її основі алгоритм дозволяє ефективно сегментувати інформаційні сигнали, зменшує тривалість математичної обробки, спрощує аналіз баз даних, збільшує ефективність контролю достовірності відновлення початкових даних резервуванням шляхів відновлення з подальшим порівнянням результатів.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Розроблено модель та структурований алгоритм локального відновлення часових сегментів ГЕН на підставі вирішення цільової функції: вейвлет-коефіцієнти погодинна деталізація функціональна залежність вейвлет-коефіцієнтів послідовних рівнів декомпозиції, який дозволяє із використанням трьох вейвлет-коефіцієнтів п’ятого рівня декомпозиції (тобто 25 % від значень початкової вибірки ІС) із високою точністю (до 100 %) оцінити величину електроспоживання послідовно за кожні вісім годин без повного відновлення ГЕН за 24 години, а також визначити у процесі моніторингу електроенергетичної системи конкретний етап відхилення відновлених даних від реальних значень величини електроспоживання для внесення необхідних коректив у реальному масштабі часу. Застосування даної моделі дозволить проводити процес прогнозу комбінованим способом, що значно підвищить його надійність та точність.

Література

1. Арцишевский Я.Л., Цюнь Г. Исследование и разработка алгоритма сжатия аварийной информации для повышения быстродействия информационного обеспечения процесса управления в ЭЭС. Вестник МЭИ. 2009. № 1. С. 119–126.

2. Остапченко К.Б., Лисовиченко О.И. Выбор модели прогнозирования электропотребления при решении задачи оперативного суточного планирования поставок электроэнергии на оптовом рынке. Адаптивні системи автоматичного управління : міжвідомчий науково-технічний збірник. 2014. № 1(24). С. 17 – 21.

3. Волошко А.В. Восстановление пропусков данных об электропотреблении с помощью интерполяции. ПРОМЭЛЕКТРО. 2007. С. 18–21.

4. Злоба Е., Яцкив И. Статистические методы восстановления пропущенных данных. Computer Modelling & New Technologies, 2002, Volume 6, No. 1, P. 51–61.

5. Засядько А.А. Многокритериальная модель процесса восстановления сигналов. Электронное моделирование. 2004. т. 26. № 4. С. 13–11.

6. Верлань А.Ф., Горошко И.О., Гушель Т.П. Способ регуляризации с усечением спектра ядра интегрального оператора в задаче восстановления сигналов. Электронное моделирование. 2003. Т. 25. №3, С. 3–11.

7. Волошко А.В., Лутчин Т.М., Міщенко Д.К. Відновлення втрачених облікових даних. Вісник КрНУ ім. М. Остроградського. Вип. 2 (73). 2012. С. 40−44.

References

1. Arcishevskij Ja.L., Cjun' G. Issledovanie i razrabotka algoritma szhatija avarijnoj informacii dlja povyshenija bystrodejstvija informacionnogo obespechenija processa upravlenija v JeJeS. Vestnik MJeI. 2009. № 1. S. 119–126.

2. Ostapchenko K.B., Lisovichenko O.I. Vybor modeli prognozirovanija jelektropotreblenija pri reshenii zadachi operativnogo sutochnogo planirovanija postavok jelektrojenergii na optovom rynke. Adaptivni sistemi avtomatichnogo upravlinnja : mizhvidomchij naukovo-tehnichnij zbirnik. 2014. № 1(24). S. 17 – 21.

3. Voloshko A.V. Vosstanovlenie propuskov dannyh ob jelektropotreblenii s pomoshh'ju interpoljacii. PROMJeLEKTRO. 2007. S. 18–21.

4. Zloba E., Jackiv I. Statisticheskie metody vosstanovlenija propushhennyh dannyh. Computer Modelling & New Technologies, 2002, Volume 6, No. 1, P. 51–61.

5. Zasjad'ko A.A. Mnogokriterial'naja model' processa vosstanovlenija signalov. Jelektronnoe modelirovanie. 2004. t. 26. № 4. S. 13–11.

6. Verlan' A.F., Goroshko I.O., Gushel' T.P. Sposob reguljarizacii s usecheniem spektra jadra integral'nogo operatora v zadache vosstanovlenija signalov. Jelektronnoe modelirovanie. 2003. T. 25. №3, S. 3–11.

7. Voloshko A.V., Lutchyn T.M., Mishchenko D.K. Vidnovlennia vtrachenykh oblikovykh danykh. Visnyk KrNU im. M. Ostrohradskoho. Vyp. 2 (73). 2012. C. 40−44.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-70-80
УДК 637.5.02

ГАНЗЮК АЛЛА
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0002-4954-8355
e-mail: alla.ganzyuk@gmail.com
МАСЛО ЛЕСЯ
Хмельницький торговельно-економічний коледж Київського
національного торговельно-економічного університету
e-mail: lesyaxxx555@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК САПОНІТОВОГО ГРАНУЛЯТУ

В роботі проаналізовано тенденції ринку нафтопродуктів України. Для вирішення проблем паливного ринку потрібно розробити програми переходу на екологічні норми Євро, стимулювати підвищення якості нафтопродуктів, що виробляють в Україні, переглянути чинні галузеві стандарти на компоненти моторного палива. Експериментально досліджено вплив процесу гранулювання на сорбційні властивості отриманих гранульованих алюмосилікатів. Визначено основні експлуатаційні характеристики отриманого сапонітового грануляту, а саме: стійкість та міцність гранул у бензині на протязі заданого проміжку часу; оцінено водостійкість та нафтоємність сорбційних матеріалів на основі шарових алюмосилікатів. Показано, що активація природних сорбційних матеріалів кислотами не суттєво впливає на показники термостійкості і процеси деструкції в системі сапоніт-активатор, а гранулювання покращує міцнісні і фільтраційні характеристики природних сорбентів, збільшуючи швидкість фільтрації та тривалість фільтроциклу.

Ключові слова: адсорбція, нафтопродукти, хроматографія, октанове число, сапоніт, тиск насиченої пари.

GANZYUK ALLA
Khmelnytskyi National University
MASLO LESYA
Khmelnytskyi College of Trade and Economics of Kyiv National University of Trade and Economics

THE INVESTIGATION OF PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF SAPONITE GRANULATE

The use of natural clays in production and environmental protecting measures is provided by their mineral compounds, physical and chemical properties which are defined by the composition and size of clay part. In terms of ecology that is expedient, as the clay minerals almost don't have compounds that pollute waters and they are natural for such areas. It has been investigated the problems of the Ukrainian market of petroleum products and suggested the ways to solve them by developing of a program for the transition to Euro environmental standards and alignment of Ukrainian standards with the European ones. The influence of the granulation process on the sorption properties of the obtained granulated aluminosilicates has been investigated. The main operational characteristics of the received saponite granulate namely: the stability and strength of the granules in gasoline over a given period of time; it has been evaluated the water resistance and oil capacity of sorption materials based on layered aluminosilicates. It has been shown that the activation of natural sorption materials with acids does not significantly affect the indicators of heat resistance and destruction processes in the saponite-activator system. Moreover, granulation improves the strength and filtration characteristics of natural sorbents by increasing the filtration rate. The results of the research allow us to recommend the obtained sorbent materials as an efficient filtering charge for cleaning and controlling specific properties as a filter load for cleaning hydrocarbon mixtures and for obtaining high-quality, high-octane and low-toxic fuels. It was established that the obtained sorption material based on saponite clay improves the basic exploitative characteristics of the fuel. Its application allow to solve the problem of reducing toxic emissions of e.g. motor vehicles in atmosphere.

Keywords: adsorption, petroleum products, chromatography, octane rating, saponite, vapor pressure.

Останніми роками на ринку нафтопродуктів України чітко визначилися такі тенденції: зростає невідповідність між технологічним рівнем автомобільного транспорту й стандартами якості нафтопродуктів; застаріла нормативна база стимулює збереження на ринку великої часткинизькоякісного моторного палива, використання якого шкодить довкіллю й паливним системам; відсутність системного контролю з боку держави й нерозвиненість громадських інститутів контролю якості провокують учасників ринку до випуску низькоякісного палива; відсутність заходів для економічного стимулювання системи контролю якості нафтопродуктів стримує її розвиток; невиконання зобов'язань уряду щодо створення економічних умов, які б сприяли модернізації НПЗ, ставить під загрозу розвиток та існування галузі. Для виправлення ситуації недостатньо лише запровадити гармонізовані з європейськими нормативні документи на бензин й дизельне паливо. Для цього необхідно: розробити програму переходу на екологічні норми Євро і гармонізації українських стандартів з європейськими, а також заходи із стимулювання підвищення якості нафтопродуктів, що виробляють в Україні; сприяти організації громадянського контролю над реалізацією програми й політикою у сфері контролю за обігом нафтопродуктів; привести у відповідність вимоги до палива і норми граничних викидів шкідливих речовин із відпрацьованими газами автомобілів; розробити принципи роботи та утворити міжвідомчу комісію з допуску нафтопродуктів до використання за участю представників усіх зацікавлених організацій; покласти на неї, зокрема, узгодження нових нормативних документів; переглянути чинні галузеві стандарти на компоненти моторного палива, їхні дослідні партії; визначити структуру, що здійснюватиме незалежний контроль якостінафтопродуктів; доцільніше зберегти цю функцію за управліннями із питань захисту прав споживачів, розробивши дієвий механізм фінансування

перевірок; розглянути можливість використання усіма виробниками нафтопродуктів технології паливних маркерів, що дозволяє контролювати якість палива від НПЗ до АЗС, встановлювати винного в її зниженні й визначати, наскільки постраждав оригінальний продукт; підвищити відповідальність за виготовлення неякісних нафтопродуктів, особливо в разі їхнього нелегального виробництва; виключити використання металовмісних присадок та ароматичних амінів для виготовлення високооктанового бензину; знизити граничні концентрації цих компонентів у низькооктановому бензині; підвищити вимоги до підприємств, який виробляють сумішевий бензин; установити, що обов'язковим елементом їхньої роботи є наявність лабораторногоконтролю якості продукції; виключити виготовлення на цих підприємствах високооктанового бензину; заборонити використання коксохімічної сировини у сумішевому паливі; запровадити в Україні міжнародні стандарти на методи випробувань палива; сприяти розширенню мережі лабораторій із контролю якості, зокрема, виділенню земельних ділянок чи приміщень, а також оснащенню сучасним обладнанням; розробити програму навчання працівників екологічних служб і лабораторій контролю якості нафтопродуктів, зокрема у питаннях аналізу продуктів неповного згоряння палива [1]. Серед методів, які успішно використовуються для очищення вуглеводневих сумішей, найбільш перспективним є сорбційна очистка на основі природних сорбентів. Це пов'язано, по-перше, з дешевизною і доступністю природних мінералів, що дозволяє їх одноразово використовувати, по-друге, природні алюмосилікати, на відміну від смол, характеризуються підвищеною вибірковістю, як до катіонів металів, так і до органічних барвників, парафінів, ароматичних сполук. Але, незважаючи на вище наведені переваги, природні алюмосилікати мають невисоку сорбційну ємність і недостатню механічну міцність, а тому їх фільтраційні характеристики низькі, і використання у динамічному режимі при високих навантаженнях є утрудненим. Розв'язання комплексної проблеми по покращенню механічних властивостей природних алюмосилікатних сорбентів і підвищення їх обмінної ємності в результаті різних методів попередньої підготовки є актуальною задачею. Як один із варіантів покращення технологічних і сорбційних характеристик природних алюмосилікатів є переведення їх в гранульовану форму з використанням різних зв'язуючих. Гранулювання, грануляція (від лат. Granulum – зернятко) – формування твердих частинок (гранул) певних розмірів і форми з заданими властивостями. Розмір гранул залежить від виду матеріалу, способу його подальшої переробки або застосування і становить зазвичай (мм): для мінеральних добрив від 1 до 4, термопластів від 2 до 5, каучуків і гумових сумішей від 15 до 25 і більше, лікарських препаратів (таблеток) від 3 до 25. Формування гранул розміром менше 1 мм іноді називають – мікрогранулюванням. Якщо розмір частинок менше 0,5 мм, то це – порошки. Гранулювання може грунтуватися на ущільненні порошкоподібних матеріалів (з використанням зв'язуючих або без них), диспергуванні та подальшій кристалізації розплавів або розчинів або на подрібненні великих шматків в дробарках. Основні показники ефективності гранулювання: вихід товарної (кондиційної) фракції; якість одержуваних гранул (форма, міцність, насипна маса); однорідність гранулометричного складу [2]. Процес можна здійснювати з поверненням дрібних (некондиційних) частинок на стадію гранулоутворення (ретурне гранулювання) або без нього (безретурне). За першою схемою гранулюють добрива, за другою – полімери і лікарські препарати. Відношення кількості ретуру до виходу товарної фракції називається ретурністю. Цей показник, наприклад для гранулювання добрив методом обкочування може змінюватися від 0,3 до 10-15. Придання речовинам форми гранул поліпшує умови їх зберігання і транспортування, дозволяє механізувати і автоматизувати процеси подальшого використання продуктів, Обкачування в барабанному грануляторі відбувається на бічній циліндричній поверхні, в тарілчастому – в основному на поверхні днища тарілки. Для інтенсифікації обкачування застосовують швидкісні і вібраційні гранулятори, в яких отримують більш щільні і однорідні за розмірами гранули. У швидкісному грануляторі шар матеріалу сильно перемішується за допомогою шнека (частота обертання 1000-2500 хв$^{-1}$) і валу з насадженими на нього штирями або пластинами [3]. Пресування – отримання гранул в формі брикетів, плиток, таблеток шляхом ущільнення сухих порошків, іноді з подальшим дробленням спресованого матеріалу. Для гранулювання фосфатних шлаків і деяких видів добрив застосовують валкові й вальцеві преси, лікарських препаратів і вітамінів – таблетувальні машини, реактопластів – зубчаті роторні гранулятори, вальці й спеціальні екструдери. Для безперервної подачі порошку і його попереднього ущільнення використовують підпресовувач (спіралевидний шнек). Особливість гранулювання на валках і вальцях – видавлення з порошку в зоні деформації повітря і його фільтрація крізь шар поступаючого в цю зону матеріалу. У цьому випадку швидкість процесу, що визначає продуктивність преса, лімітується тією величиною, при якій порошок переходить в зоні деформації у зважений стан. Екструзія – утворення гранул шляхом продавлювання пластично-в'язкої маси за допомогою шнека через головку екструдера з подальшим розрізанням або дробленням матеріалу. Метод використовують в основному для гранулювання термопластів, каучуків і гумових сумішей, а також концентрування кормів. В технології неорганічних речовин екструзію застосовують для гранулювання багатьох видів каталізаторів. Найбільше поширення отримали черв'ячні екструдери. Порошкоподібний матеріал плавиться і видавлюється у вигляді джгутів або стрічок, які ріжуться безпосередньо після виходу з головки або дробляться після охолоджування в спеціальній ванні. При гранулюванні борошнистих кормів їх обробляють парою або змішують з водою чи біомасою, подають на перфоровану матрицю, що обертається, видавлюють через її отвори і розрізають на гранули ножами [4–6]. Для отримання гранул використовують декілька методів. Обкачування включає наступні стадії: змочування частинок матеріалу зв'язуючим (водою, сульфіт-спиртовою бардою, сумішами з водою вапна, глин, шлаків і інших зв'язуючих матеріалів), внаслідок

чого утворяться окремі грудки – агломерати частинок і відбувається нашарування дрібних частинок на більш великі; ущільнення агломератів в шарі матеріалу. Процес здійснюють в барабанних, тарілчастих, швидкісних і вібраційних грануляторах. Принцип дії барабанного і тарілчастого грануляторів ґрунтується на обертанні відповідного барабана, встановленого горизонтально або під кутом від 1 до 3° (частота обертання від 5 до 20 хв$^{-1}$), і спеціальної тарелі, розміщеної під кутом від 45 до 55° (частота обертання від 5 до 50 хв$^{-1}$), всередині якої переміщається шар матеріалу. Ступінь заповнення ним апаратів може змінюватися від 10 до 15%. Об´єктом дослідження є природні зразки термічно-активованої сапонітової глини (Ташківське родовище Славутського району Хмельницької області) та вуглеводнева суміш, а саме бензин марки А-92 (Укрнафта). Мета роботи – отримання та дослідження експлуатаційних характеристик грануляту на основі сапонітової глини. Отже, мелений сапонітовий концентрат, який використали в якості вихідної сировини, містив 90% частинок розміром 1 мм але, об'ємне співвідношення між сапонітовим концентратом і водою, підбирали експериментально, щоб забезпечувалась достатня пластичність і формостійкість суміші. Масовий вміст рідкої складової підтримували на рівні 35%. Суспензію перемішували на протязі 10-15 хвилин, так як ступінь однорідності підготованої суміші суттєво впливає на властивості кінцевого продукту, готували напівфабрикат, продавлюючи підготовлену масу через філь'єри певної форми і розмірів (діаметром 1 мм) методом екструзії. Цей метод є простим та економічним, який забезпечує отримання достатньо пористих і міцних гранул. Сушіння напівфабрикату необхідне для закріплення його форми і зниження вмісту рідкого технологічно зв'язуючого. Сушіння гранул здійснювали при кімнатній температурі (17 °С) на протязі 1 доби. Обпалювання перетворює напівфабрикат в готовий виріб, що слугує місцем ущільненню гранул. Температуру і час обпалювання підбирали експериментально; ці показники знаходились в межах від 1 до 3 год, а температура від 100 до 700 °С [5–8].

Режим конвективної обробки – температура і тривалість нагріву – мають велике значення, так як кінцевий продукт повинен бути не тільки механічно міцним, але й володіти достатньо високою сорбційною здатністю. Вибір температури базується на даних термічного аналізу, досліджуваного сапоніту. Деякі глинисті матеріали достатньо активні в природному середовищі, але більшу частину з них доцільно активувати хімічним або термічним способом для збільшення і регулювання їх пористої структури, зміни хімічної природи поверхні. Різні способи модифікації природних матеріалів дають можливість отримувати сорбенти, які володіють специфічними сорбційними властивостями відносно широкого спектра органічних і неорганічних речовин. Найбільш простим способом, що не вимагає додаткових реагентів і складного апаратурного оформлення, є термічне модифікування різних матеріалів, які характеризуються підвищеними сорбційними властивостями щодо різних органічних і неорганічних речовин. Оптимальна температура активації глинистих матеріалів, за якої найбільшою мірою проявляються їх адсорбційні, вибілювальні та каталітичні властивості, залежить від мінералогічного складу сорбенту, місця розташування його родовища тощо. Тому умови термічної активації мінеральних сорбентів для кожного виду і родовища визначають дослідним шляхом. Більшість дослідників відзначили, що температури активації коливаються у межах від 200 °С до 700 °С.

В залежності від часу та температури спікання отримано різну колірну гаму та міцність гранул. Тобто, чим вища температура та довший час спікання, тим вища міцність гранул, а колір змінюється від коричневого до чорного. Характеристика отриманих зразків гранульованих сорбційних матеріалів на основі сапоніту наведена в таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристика зразків сорбційних матеріалів

№	Зразок сорбційного матеріалу	Розмір зерен, мм	Температура спікання, °С	Час спікання, год	pH	Спостереження
1	Природний сапоніт	1	400	1	6,28	суспензія темно коричневого кольору
2	Природний сапоніт	1	400	2	6,90	суспензія темно коричневого кольору
3	Природний сапоніт	1	400	3	6,47	суспензія світло коричневого кольору
4	Природний сапоніт	1	700	3	6,55	суспензія світло коричневого кольору

5	Природний сапоніт + силікагель	1	700	3	7,05	суспензія коричневого кольору
6	Сапоніт кислотно-активований (H_2SO_4)	1	200	2	5,05	суспензія коричневого кольору
7	Сапоніт кислотно-активований (H_2SO_4)	1	200	3	5,33	суспензія коричнево-оранжевого кольору
8	Сапоніт кислотно-активований (H_2SO_4)	0,25-1	300	3	5,81	суспензія насичено-коричневого кольору
9	Сапоніт кислотно-активований (H_2SO_4)	-	400	1	5,7	суспензія насичено-коричневого кольору
10	Сапоніт кислотно-активований (H_2SO_4)	-	400	2	5,39	суспензія насичено-коричневого кольору
11	Сапоніт кислотно-активований (H_2SO_4)	-	400	3	5,76	суспензія кров′яного кольору
12	Сапоніт кислотно-активований (H_2SO_4)	-	700	3	6,31	суспензія кров′яного кольору

Очищення бензину А-92 (Укрнафта) проводили таким методом: зразки термічно та кислотно-активованого грануляту на основі сапоніту, подрібнили на фракції з розміром від 0,3 до 0,5 мм. До наважки отриманого грануляту масою 1,25 г додали 5 мл вуглеводневої суміші. Перемішування суспензії проводили за допомогою ультразвуку на протязі 5 хв; центрифугували 2 хв, з верхнього шару суспензії відбирали очищену пробу та хроматографували. За допомогою програми «GAZOLIN» [9, 10] обробляли результати. Відсотковий масовий вміст вуглеводнів та їх фізико-хімічні показники зразків очищених вуглеводневих сумішей представлені в таблицях 2 та 3.

Таблиця 2

Відсотковий масовий вміст вуглеводнів у очищених зразках вуглеводневих сумішей

№	Зразок очищеної вуглеводневої суміші	Парафіни	Ізо – парафіни	Ароматика	Нафтени	Олефіни	Оксигенати
1	Неочищений бензин А-92 (стартовий)	9,803	28,985	29,017	11,335	8,672	2,416
2	Бензин, очищений гранулятом природнього сапоніту (τ=1 год, T=400 °C)	9,601	25,460	31,916	12,221	3,474	-
3	Бензин, очищений гранулятом природного сапоніту (τ=2 год, T=400 °C)	15,863	30,766	15,984	22,387	1,434	0,729
4	Бензин, очищений гранулятом природного сапоніту (τ=3 год, T=400 °C)	9,287	26,260	27,667	12,431	7,206	-
5	Бензин, очищений гранулятом природного сапоніту (τ=3 год, T=700 °C)	8,501	30,764	29,611	11,016	5,618	1,520

6	Бензин очищений гранулятом природного сапоніту + силікагель (τ=3 год, T=700 °C)	9,344	33,252	27,426	11,467	5,934	0,723
7	Бензин, очищений гранулятом кислотно-активованого сапоніту (H_2SO_4) (τ=1 год, T=400 °C)	9,475	30,102	31,733	15,685	4,292	1,992
8	Бензин очищений гранулятом природнього сапоніту (τ=1 год, T=400° C)	9,601	25,460	31,916	12,221	3,474	-
9	Бензин очищений гранулятом природного сапоніту (τ=2 год, T=400 °C)	15,863	30,766	15,984	22,387	1,434	0,729
10	Бензин очищений гранулятом природного сапоніту (τ=3 год, T =400 °C)	9,287	26,260	27,667	12,431	7,206	-
11	Бензин очищений гранулятом природного сапоніту (τ=3 год, T=700 °C)	8,501	30,764	29,611	11,016	5,618	1,520
12	Бензин очищений гранулятом природного сапоніту + силікагель (τ=3 год, T=700 °C)	9,344	33,252	27,426	11,467	5,934	0,723
13	Бензин очищений гранулятом кислотно-активованого сапоніту (H_2SO_4) (τ=1 год, T=400 °C)	9,475	30,102	31,733	15,685	4,292	1,992

Таблиця 3

Основні фізико-хімічні показники зразків вуглеводневих сумішей

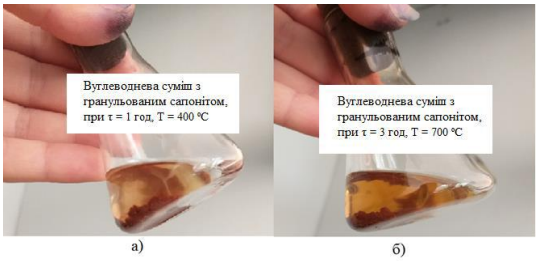
№	Зразок очищеної вуглеводневої суміші	Середня молекулярна маса, г/моль	Середня густина, г/см^3	Тиск насиченої пари, кПа	Октанове число	
					дослідницьке	моторне
1	Неочищений бензин А-92 (стартовий)	103,81	0,771	64,119	90,926	84,282
2	Бензин, очищений гранулятом природного сапоніту (τ=1 год, T=400 °C)	105,979	0,785	44,813	94,013	81,406
3	Бензин, очищений гранулятом природного сапоніту (τ=2 год, T=400 °C)	104,111	0,760	36,805	81,516	72,814
4	Бензин очищений гранулятом природного сапоніту (τ=3 год, T=400 °C)	109,386	0,787	39,714	86,236	84,086
5	Бензин, очищений гранулятом природного сапоніту (τ=3 год, T=700 °C)	106,643	0,778	53,146	87,455	83,811
6	Бензин, очищений гранулятом природного сапоніту + силікагель (τ=3 год, T=700 °C)	104,961	0,769	53,638	86,529	83,367

7	Бензин, очищений гранулятом кислотно-активованого сапоніту (H_2SO_4) (τ=1 год, T=400 °C)	102,392	0,770	47,282	88,608	82,017
8	Бензин очищений гранулятом природного сапоніту (τ=1 год, T=400 °C)	105,979	0,785	44,813	94,013	81,406
9	Бензин очищений гранулятом природного сапоніту (τ=2 год, T=400 °C)	104,111	0,760	36,805	81,516	72,814
10	Бензин, очищений гранулятом природного сапоніту (τ=3 год, T=400 °C)	109,386	0,787	39,714	86,236	84,086
11	Бензин, очищений гранулятом природного сапоніту (τ=3 год, T=700 °C)	106,643	0,778	53,146	87,455	83,811
12	Бензин, очищений гранулятом природного сапоніту+ силікагель (τ=3 год, T=700 °C)	104,961	0,769	53,638	86,529	83,367
13	Бензин, очищений гранулятом кислотно-активованого сапоніту (H_2SO_4) (τ=1 год, T=400 °C)	102,392	0,770	47,282	88,608	82,017

Під час очищення вуглеводневих сумішей за допомогою різних зразків природного та кислотно-активованого грануляту на основі сапоніту важливим елементом було не лише зберегти відповідний фракційний склад нафтопродукту, але й в першу чергу залишити незмінними (або ж покращити) основні фізико - хімічні показники бензину А-92, до яких відносять: октанове число (за дослідницьким та моторним методами), відносну середню густину та тиск насиченої пари [11–13]. Бажаний результат, як видно з таблиць 2 та 3, вдалося досягти при очищенні вуглеводневої суміші гранулятом природного сапоніту, при τ=1 год та T=400 ºC, де отримано максимальне октанове число за дослідницьким, яке становить 94,013, і моторним – 81,406 методами.

Показники тиску насиченої пари стартового бензину А-92 та очищеного за допомогою зразків сапонітового грануляту лежать в межах від 28,005 до 66,448 кПа, де за ДСТУ 4839.2007, у літній та зимовий періоди показники становлять від 45 до 95 кПа. Чим вищий тиск насиченої пари, тим більше у бензині фракцій, які легко випаровуються. Такий бензин має кращі пускові властивості, а двигун краще прогрівається. Водночас зростає небезпека утворення «парових корків», втрат бензину від випаровування при його зберіганні, забруднення навколишнього середовища. Тиск насиченої пари очищеного бензину сапонітовим гранулятом при τ=1 год та T=400 ºC становить – 44,813 кПа, що є відносно нижчим показником в порівнянні з стартовим бензином А-92, про те наближений до показника, який вказаний в технічних умовах [10, 11].

Експлуатаційні властивості сапонітового грануляту характеризують можливість використовувати його у визначених цілях. Ці властивості визначаються спеціальними випробуваннями залежно від умов проведення досліджень. До основних експлуатаційних властивостей гранульованого сапоніту, в першу чергу слід віднести: стійкість та міцність гранул у бензині на протязі певного проміжку часу. З цією метою паралельно виконали два експерименти, різниця яких полягала лише в тому, що дані дослідження провели на різних проміжках часу, а саме: протягом трьох тижнів та п'яти місяців. Проби зразків природнього гранульованого сапоніту (τ=3 год, T=700 ºC та τ=1 год, 400 ºC) масою наважки 1 г, заливали вуглеводневою сумішшю. Далі оцінювали органолептично такі показники, а саме зміну міцності гранул та кольору суспензії. На рисунку 1, наведено фото суспензій, очищених природним гранульованим сапонітом (тривалість утримування грануляту у вуглеводневих сумішах – від трьох тижнів та п’яти місяців).

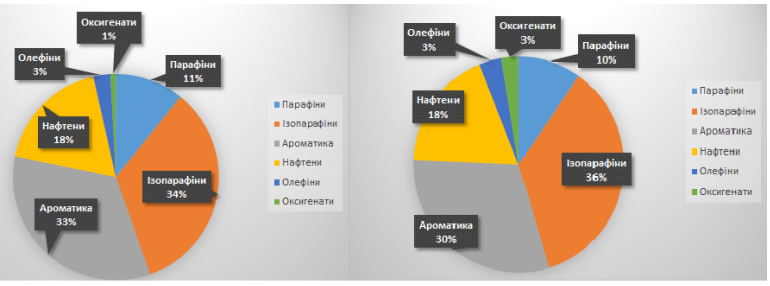


а) б)

Рис. 1. Фото суспензій природного гранульованого сапоніту у вуглеводневих сумішах: а) при τ=1 год, T=400 °C; б) при τ=3 год, T=700 °C

Протягом трьох тижнів (рис. 1а), гранули природнього сапоніту у суспензії не змінили кольору, але стали крихкішими у порівнянні з вихідним зразком. Також змінився і колір суспензії з жовтого на світло-коричневий. З рисунка 1б видно, що протягом визначеного часу, гранулят природнього сапоніту не змінив своїх органолептичних показників. Твердість та колір залишились без змін. Проте, колір суспензії досліджуваної вуглеводневої суміші став більш насичено-коричневим. Ймовірно, відбулась десорбція октаєдричного катіону Fe^{3+} у досліджуваний зразок нафтопродукту.

Цікаво було прослідкувати, яким став вуглеводневий склад бензину після довготривалого очищення гранулятом смектитової глини. А тому наступним етапом було проведення газохроматографічного дослідження вуглеводневих сумішей. Детальний відсотковий масовий вміст вуглеводнів, основні фізико-хімічні показники та показники октанового числа очищених зразків вуглеводневих сумішей, наведені на рисунку 2 та в таблиці 4.



а) б)

Рис. 2. Масовий вміст вуглеводнів у зразках очищеного бензину А-92: а) при τ=1 год, T=400 °C; б) при τ=3 год, T=700 °C

Провівши аналіз результатів газохроматографічних досліджень зразків очищених нафтопродуктів, можна зробити висновок про те, що незалежно від тривалості сорбції бензину А-92, фракційний склад змінюється несуттєво, а основні фізико-хімічні показники очищеної вуглеводневої суміші, а саме молекулярна маса, тиск насиченої пари та відносна середня густина знаходяться в межах норми згідно ДСТУ 4839.2007.

Таблиця 4

Основні фізико-хімічні показники та показники октанового числа

№	Зразок очищеної вуглеводневої суміші	Швидкість пропускання вуглеводневої суміші, мл/хв	Середня молекулярна маса, г/моль	Середня густина, г/см^3	Тиск насиченої пари, кПа	Октанове число	
						дослідницьке	моторне
1	Бензин, очищений гранулятом природнього сапоніту (τ=1 год, T=400 °C)	4	105,050	0,776	60,418	88,662	84,114
2		5	103,894	0,767	56,217	96,337	81,997
3		6	101,059	0,758	69,882	90,292	83,231
4		7	101,225	0.761	73,812	89,802	83,076

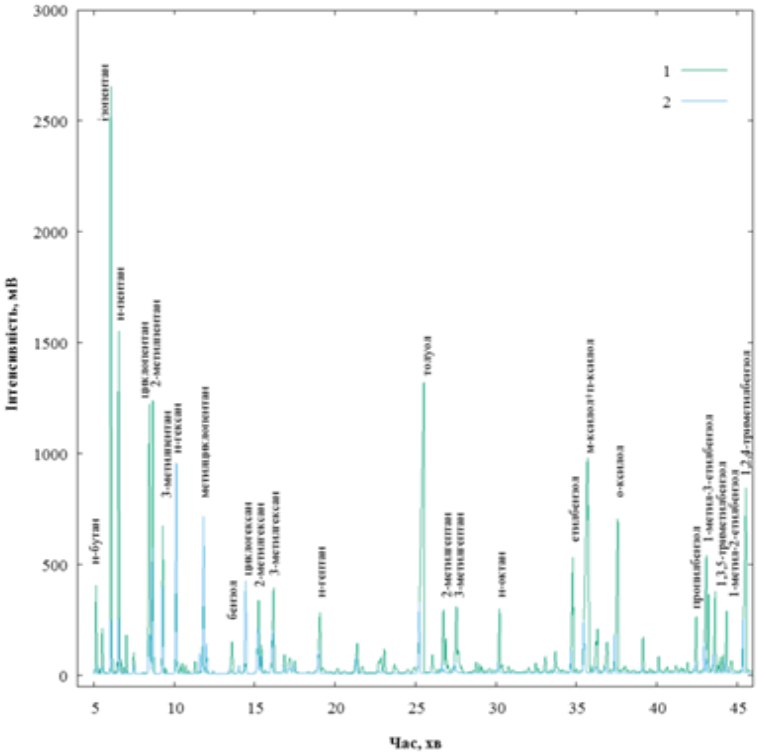


Рис. 5. Фрагмент хроматограми очищеної вуглеводневої суміші гранулятом природним при τ=1 год, Т=400 ºС

Так як, нафтопродукти мають здатність швидко окислюватись, то сорбційний матеріал на основі гранул сапоніту може запобігти даному процесу, в першу чергу призупинити окиснення таких вуглеводнів, як олефіни та оксигенати. Цим і пояснюється зменшення октанового числа під час очищення нафтопродукту на протязі 21 дня, але під час очищення бензину тривалістю п'ять місяців октанове число зростає, що говорить про те, що в системі сапоніт-вуглеводнева суміш проходять самочинні процеси десорбції вуглеводнів з міжшарового простору смектитової глини у суспензію.

Стійкість зерен або ж гранул сорбенту до дії киплячої води характеризується водостійкістю. Для дослідження водостійкості сапонітового грануляту паралельно провели два досліди. Для цього, наважки гранул смектитової глини (τ=1 год, 400 ºС) залили 100 мл води. Один із зразків кипів протягом 3 хв, інший залишили при кімнатній температурі, періодично помішуючи. Через деякий час, вміст суспензій ретельно ще раз перемішали та відфільтрували, далі висушили до постійної маси. У двох випадках гранули на основі сапоніту, які знаходились при кімнатній температурі та ті, які піддавались кипінню, утворили суспензії, оскільки смектитова глина є гідрофільним сорбційним матеріалом, який характеризується низькою водостійкістю. Після висушування до постійної маси досліджуваних зразків смектитової глини, їх зважили, отримавши відповідно значення 2,483 г та 2,310 г. А це означає, що для отримання водостійких гранул природнього сапоніту, доцільно було б наповнити їх полімерним матеріалом.

Сорбційна нафтоємність оцінюється як відношення маси поглинутого нафтопродукту до маси сорбенту. Основними вимогами до сорбентів нафти є плавучість і водопоглинання. В якості для порівняння та проведення досліду, обрали два зразки сорбційного матеріалу, один з яких показав кращі результати у попередніх дослідженнях, інший – гірший, а саме природний гранулят на основі сапоніту: при τ=1 год, Т=400ºС та при τ=2 год, Т=400 ºС. Визначення нафтоємності сорбентів провели таким чином: у колбу налили 40 мл нафтопродукту і внесли відому кількість сорбенту (0,4 г) різної активації та ступеня дисперсності. Сорбція проходила протягом 5, 10, 30, 60, 120 хв. Фото даних зразків суспензій наведено на рисунку 6.

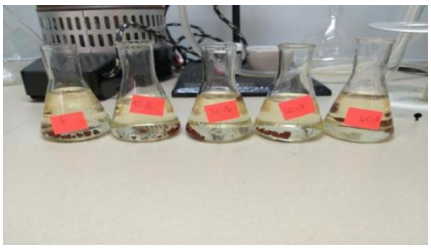


Рис. 6. Фото суспензій вуглеводневих сумішей

Потім сорбент зважили і оцінювали нафто ємність, як відношення маси поглинутого нафтопродукту

до маси сорбенту. Результати визначення нафто ємності та маса поглинутого бензину А-92 гранулами смектитової глини під час сорбції певного часу, представлені у таблицях 5 та 6.

Таблиця 5

Оцінка нафтоємності сорбентів

Зразок сорбенту	Нафтоємність по бензину (г/г), хв				
	5	10	30	60	120
Гранулят природний (τ=1 год, T=400ºC)	0, 0686	0,0770	0,0782	0,0873	0,0963
Гранулят природний (τ=2 год, T=400ºC)	0,0705	0,0745	0,0795	0,0831	0,0964

Таблиця 6

Маса поглинутого бензину А-92 гранулами смектитової глини

Зразок сорбенту	Маса поглинутого бензину, г (хв)				
	5	10	30	60	120
Гранулят природний (τ=1 год, T=400ºC)	0, 032	0,034	0,037	0,042	0,045
Гранулят природний (τ=2 год, T=400ºC)	0,03	0,035	0,038	0,041	0,043

Залежність маси поглинутого бензину від часу сорбції наведено на рисунку 7 у вигляді точкової діаграми.

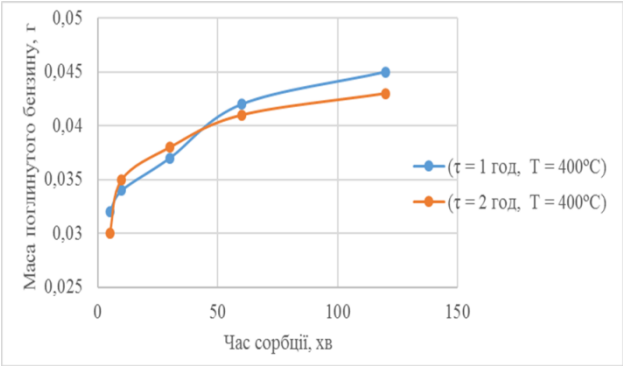


Рис. 7. Залежність маси поглинутого бензину А-92 від часу сорбції

Таким чином, на рисунку 7 показано, що кращий результат по нафтоємності отримав зразок гранульованого сапоніту при τ=1 год та T=400ºC. Щодо іншого зразка сорбційного матеріалу (τ=2 год, T=400ºC), то він під час експерименту показав нижчі показники по масі поглинутої вуглеводневої суміші. Виходячи з отриманих результатів, можна зробити висновок, що маса поглинутого нафтопродукту зростає в залежності від часу сорбції, разом із тим зростає і нафто ємність. Про те, якщо надалі збільшити тривалість сорбції, то процес поглинання вуглеводнів буде спадати, або ж взагалі досягне максимуму, оскільки сорбент своїми порами перестане поглинати складові нафтопродукту [13]. Таким чином, отримано нові композиційні сорбенти на основі розробленого гранульованого носія для очищення вуглеводневих сумішей в статичних і динамічних умовах, оцінено їх водостійкість, нафтоємність та стійкість у бензині.

Висновки

Отримано гранулят на основі сапонітової глини з різним часом та температурою спікання. Показано, що гранулювання покращує міцнісні і фільтраційні характеристики природних сорбентів, збільшуючи швидкість фільтрації та продовжуваність фільтроциклу. Газохроматографічно оцінено склад очищених зразків вуглеводневої суміші за допомогою сапонітового грануляту у статичних (ОЧ = 94,013) та динамічних умовах (ОЧ = 96,337). Визначено основні експлуатаційні характеристики отриманого сапонітового грануляту, а саме: стійкість та міцність гранул у бензині на протязі заданого проміжку часу;

оцінено водостійкість та нафтоємність сорбційних матеріалів на основі шарових алюмосилікатів. Таким чином, отримані нові композиційні сорбенти на основі розробленого гранульованого носія доцільно використовувати для очищення вуглеводневих сумішей в статичних і динамічних умовах. Результати дослідження дозволяють обґрунтовано рекомендувати отримані гранульовані сорбційні матеріали з розвинутою поверхнею та контрольованими специфічними властивостями в якості фільтруючої загрузки для очистки вуглеводневих сумішей та для отримання якісних, високооктанових і низькотоксичних палив. На основі результатів досліджень встановлено, що органомінеральний сорбційний матеріал на основі сапоніту покращує основні експлуатаційні характеристики палива. Використання розроблених сорбційних матеріалів вирішить проблему зниження токсичних викидів автотранспорту в атмосферу.

Література

1. Фільтр грубої очистки палива. URL: https://auto.today/bok/3174-filtr-gruboy-ochistki-topliva-dlya-chego-on-nuzhen.html#h-id-2 (Дата звернення: 19.05.2019).

2. Рябцев Г. Л. Основні підходи до формування в Україні запасів нафти і нафтопродуктів відповідно до вимог Європейського енергетичного співтовариства / Г. Л. Рябцев // Вісник Національної академії державного управління при Президентові України. – 2015. – № 1. – С. 107–112.

3. Вилесов Н. Г. Процессы гранулирования в промышленности / Н.Г. Вилесов, В. Я. Скрипко, В. Л. Ломазов, И.М. Танченко. – К. : Техника, 1976. – 192 с.

4. Sokol H., Sprynskyy M., Ganzyuk A. Structural, Mineral and elemental composition features of iron-rich saponite clay from Tashkiv deposit (Ukraine). Colloids and Interfaces. 2019. № 3. P. 10.

5. Сокол Г. М. Отримання гідрофобних органомінеральних сорбційних матеріалів на основі сапоніту / Г. М. Сокол, А. Я. Ганзюк // Наукові нотатки. – 2017. – Вип. 58. – С. 288–294.

6. Сокол Г. М. Структурна модифікація сапонітових глин кислотною обробкою / Г. М. Сокол // Наукові нотатки. – 2017. – Вип. 56. – С. 149–153.

7. Ганзюк А. Модифікація сапонітових глин поверхнево-активними речовинами / А. Ганзюк, С. Карван, Г. Дейчук, Х. Ганзюк // Вісник Львівського університету. Серія хімічна. – 2015. – Вип. 56(1). – С. 1.

8. Yeh J. M., Huang H. Y., Chen C. L., Su W. F., Yu Y. H. Siloxane-modified epoxy resin–clay nanocomposite coatings with advanced anticorrosive properties prepared by a solution dispersion approach. Surface and Coatings Technology. 2006. № 200 (8). P. 2753–2763.

9. Стремецький О. І. Дослідження корозії низьковуглецевих сталей у водних розчинах в присутності сапоніту / О. І. Стремецький, Г. М. Сокол // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2016. – № 5. – С. 38–42.

10. Сокол Г. М., Очищення нафтопродуктів та вилучення їх слідових кількостей з пожежного сміття за допомогою сорбційних матеріалів для подальшого дослідження хроматографічним методом / Г. М. Сокол, А. Я. Ганзюк, О. П. Шелестюк, О. М. Міщук // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 1. – С. 87–94.

11. Експлуатаційні матеріали : методичні вказівки до лабораторних занять для студентів напряму 6.070106 «Автомобільний транспорт» денної форми навчання / уклад. Т. В. Фурс, О. Є. Сколоздра. – Луцьк : Луцький НТУ, 2014. – 80 с.

12. Ганзюк А. Я. Дослідження процесів очищення нафтопродуктів за допомогою активованих смектитових глин / А. Я. Ганзюк, Д. М. Вишневська, Н. Л. Похило // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2019. – № 1. – С. 82–90.

13. Сокол Г. М. Структурна модифікація сапонітових глин кислотною обробкою / Г. М. Сокол // Наукові нотатки : міжвузівський збірник наукових праць / Луцький національний технічний університет. – Луцьк, 2017. – № 56. – С. 149–153.

Referense

1. Filtr hruboi ochystky palyva. URL: https://auto.today/bok/3174-filtr-gruboy-ochistki-topliva-dlya-chego-on-nuzhen.html#h-id-2 (19.05.2019).

2. Riabtsev H. L. Osnovni pidkhody do formuvannia v Ukraini zapasiv nafty i naftoproduktiv vidpovidno do vymoh Yevropeiskoho enerhetychnoho spivtovarystva / H. L. Riabtsev // Visnyk Natsionalnoi akademii derzhavnoho upravlinnia pry Prezydentovi Ukrainy. – 2015. – № 1. – S. 107–112.

3. Vylesov N. H. Protsessы hranulyrovanyia v promыshlennosty / N.H. Vylesov, V. Ya. Skrypko, V. L. Lomazov, Y.M. Tanchenko. – K. : Tekhnyka, 1976. – 192 s.

4. Sokol H., Sprynskyy M., Ganzyuk A. Structural, Mineral and elemental composition features of iron-rich saponite clay from Tashkiv deposit (Ukraine). Colloids and Interfaces. 2019. № 3. R. 10.

5. Sokol H. M. Otrymannia hidrofobnykh orhanomineralnykh sorbtsiinykh materialiv na osnovi saponitu / H. M. Sokol, A. Ya. Hanziuk // Naukovi notatky. – 2017. – Vyp. 58. – S. 288–294.

6. Sokol H. M. Strukturna modyfikatsiia saponitovykh hlyn kyslotnoiu obrobkoiu / H. M. Sokol // Naukovi notatky. – 2017. – Vyp. 56. – S. 149–153.

7. Hanziuk A. Modyfikatsiia saponitovykh hlyn poverkhnevo-aktyvnymy rechovynamy / A. Hanziuk, S. Karvan, H. Deichuk, Kh. Hanziuk // Visnyk Lvivskoho universytetu. Seriia khimichna. – 2015. – Vyp. 56(1). – S. 1.

8. Yeh J. M., Huang H. Y., Chen C. L., Su W. F., Yu Y. H. Siloxane-modified epoxy resin–clay nanocomposite coatings with advanced anticorrosive properties prepared by a solution dispersion approach. Surface and Coatings Technology. 2006. № 200 (8). R. 2753–2763.

9. Stremetskyi O. I. Doslidzhennia korozii nyzkovuhletsevykh stalei u vodnykh rozchynakh v prysutnosti saponitu / O. I. Stremetskyi, H. M. Sokol // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2016. – № 5. – S. 38–42.

10. Sokol H. M., Ochyshchennia naftoproduktiv ta vyluchennia yikh slidovykh kilkostei z pozhezhnoho smittia za dopomohoiu sorbtsiinykh materialiv dlia podalshoho doslidzhennia khromatohrafichnym metodom / H. M. Sokol, A. Ya. Hanziuk, O. P. Shelestiuk, O. M. Mishchuk Herald of Khmelnytskyi National University. – 2017. – № 1. – S. 87–94.

11. Ekspluatatsiini materialy : metodychni vkazivky do laboratornykh zaniat dlia studentiv napriamu 6.070106 «Avtomobilnyi transport» dennoi formy navchannia / uklad. T. V. Furs, O. Ye. Skolozdra. – Lutsk : Lutskyi NTU, 2014. – 80 s.

12. Ganzyuk A. Ya. Doslidzhennia protsesiv ochyshchennia naftoproduktiv za dopomohoiu aktyvovanykh smektytovykh hlyn / A. Ya. Ganzyuk, D. M. Vyshnevska, N. L. Pokhylo // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2019. – № 1. – S. 82–90.

13. Sokol H. M. Strukturna modyfikatsiia saponitovykh hlyn kyslotnoiu obrobkoiu / Sokol H. M. // Naukovi notatky : mizhvuzivskyi zbirnyk naukovykh prats / Lutskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet. – Lutsk, 2017. – № 56. – S. 149–153.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-81-83
УДК 004.89

ДАНИЛИК ВІТАЛІЙ
Національний університет "Львівська Політехніка"
https://orcid.org/0000-0001-5928-7235
e-mail: vitalii.danylyk.msaad.2021@lpnu.ua
ЛИТВИН ВАСИЛЬ
Національний університет "Львівська Політехніка"
https://orcid.org/0000-0002-9676-0180
e-mail: vasyl.v.lytvyn@lpnu.ua
МУШАСТА СОЛОМІЯ
Національний університет "Львівська Політехніка"
https://orcid.org/0000-0003-4932-4113
e-mail: solomiyanytrebych@gmail.com

ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТЕРМІНІВ ТА АБРЕВІАТУР У ТЕКСТОВИХ ДОКУМЕНТАХ

У роботі описано процес побудови та функціонування системи ідентифікації термінів та абревіатур у текстових документах. Така проблема ідентифікації часто виникає у військовій сфері. Окремий термін чи абревіатура може мати кілька пояснень, що враховано у процесі роботи системи. Для пошуку термінів у різних відмінках використано методи опрацювання природномовних текстів. Описано вимоги до системи та обґрунтовано вибір програмних засобів. Наведено приклади функціонування системи.

Ключові слова: інформаційна система, опрацювання природної мови, термін, абревіатура, текстовий документ.

DANYLYK VITALII, LYTVYN VASYL, MUSHASTA SOLOMIYA
Lviv Polytechnic National University

INFORMATION SYSTEM OF IDENTIFICATION OF TERMS AND ABBREVIATIONS IN TEXT DOCUMENTS

The paper examines the process of building and functioning of the system for identifying terms and abbreviations in text documents. The task of developing such a system is urgent, since such an identification problem often arises in the military sphere. During the implementation of the system, it was taken into account that a single term or abbreviation may have several explanations in different regulatory documents. All available explanations are added to the term or abbreviation, which is taken into account during the operation of the system. A feature of the system is the use of natural language processing methods, since terms can be found in different cases. To implement the system, ready-made Python packages were used to cover similar tasks: Tkinter, PyMuPDF Examples of the system's functioning are given. The developed system is used in practice.

In the process of completing the work, the research of problems and the search for solutions for the tasks is carried out, an information system is developed for the processing of documents with the aim of integrating definitions of potentially unknown terms and abbreviations into them, in order to enable officers to use any literature without problems, because all terms and abbreviations will be known. To generalize the documentation, all the necessary requirements for the system are defined, and in order to correctly create the architecture and allocate the functional tasks of the system under development, a system analysis is performed and a conceptual model is built. Using all the specified information, all the necessary diagrams are built using the UML notation. Diagrams depict the relationships between objects and the overall architecture of the system. The architecture of the system is built in such a way that the component systems and the system as a whole can be easily expanded. At the end of the development, testing and implementation of the project is carried out. The process of operation of the components of the system on the part of the end user and the process of deployment by the end user of the information system are described. The object of the study is the presence of slowing factors in the process of command and control carried out by commanders of tactical units, which can slow down decision-making and also affect their correctness. The subject of the study is to solve the problems of the appearance of slowing factors in the process of command and control carried out by commanders of tactical units, by means of work with military data.

Keywords – information system, natural language processing, term, abbreviation, text document.

Постановка проблеми та її рішення

У багатьох документах (D), особливо у військовій сфері, використовуються незнайомі терміни (T) та абревіатури (A). Пояснення цих термінів та абревіатур можна знайти у нормативних документах (ND) [1]. Інколи в різних ND можуть бути різні пояснення. Очевидно, що пам'ятати всі терміни та абревіатури користувачам документів D неможливо. Потрібна автоматизована система, яка б надавала пояснення термінів та абревіатур. Наприклад під час наїзду мишкою на термін чи абревіатуру висвітлюється його пояснення з посиланням на відповідні джерела інформації ND.

Терміни та абревіатури разом формують певний словник $S=T \cup A$. Документи D, що опрацьовуються, як правило знаходяться в pdf форматі.

Після проведення бізнес-аналізу із користувачами такої системи, нами визначено такі вимоги до системи інтеграції в інформаційні матеріали визначень потенційно невідомих термінів та абревіатур:

- Програма має бути розроблена з використанням Python + Tkinter + PyMuPDF.
- Програмне забезпечення повинне забезпечувати функціонування в режимі 24 години на добу, 7 діб на тиждень, 365 днів на рік (за умови безвідмовного функціонування апаратного забезпечення).
- Програмне забезпечення не має вимагати перерв на регламентне обслуговування та/або резервне копіювання інформаційного змісту.

Система повинна дозволяти користувачам виконувати наступні операції:

- Вибір словника та інформаційного pdf файлу – користувач має мати можливість вибирати як і інформаційний файл формату pdf, так і словник перед інтеграцією.
- CSV словник – користувач має мати можливість використовувати CSV як базу даних всіх термінів, абревіатур та їх визначень.
- Нотатки як визначення – інтегрування в PDF нотаток з визначеннями термінів та абревіатур, які з'являються при наведенні в програмах-переглядачах PDF.
- Формування файлу вхідного розширення – збереження результату як інформаційний файл з тим самим розширенням, що і вхідний інформаційний файл.
- Зберігання останнього використаного словника – при наступному вході в програму останній використаний словник буде вибраний автоматично.
- програма повинна встановлюватися на персональні комп'ютери.

Програма для інтеграції в інформаційні матеріали визначень потенційно невідомих термінів та абревіатур передбачає роботу одного користувача. Вона використовує файли інших програм. Зокрема PDF для інформаційних файлів в які будуть додаватись невідомі терміни та абревіатури зі словника, а словник в свою чергу має розширення CSV. Для використання словника такого типу потрібно його утворити за допомогою інших програм [2].

Для відображення роботи системи використано діаграму станів (Рис. 1). Дана діаграма відображає всі стани та переходи в яких може перебувати система.

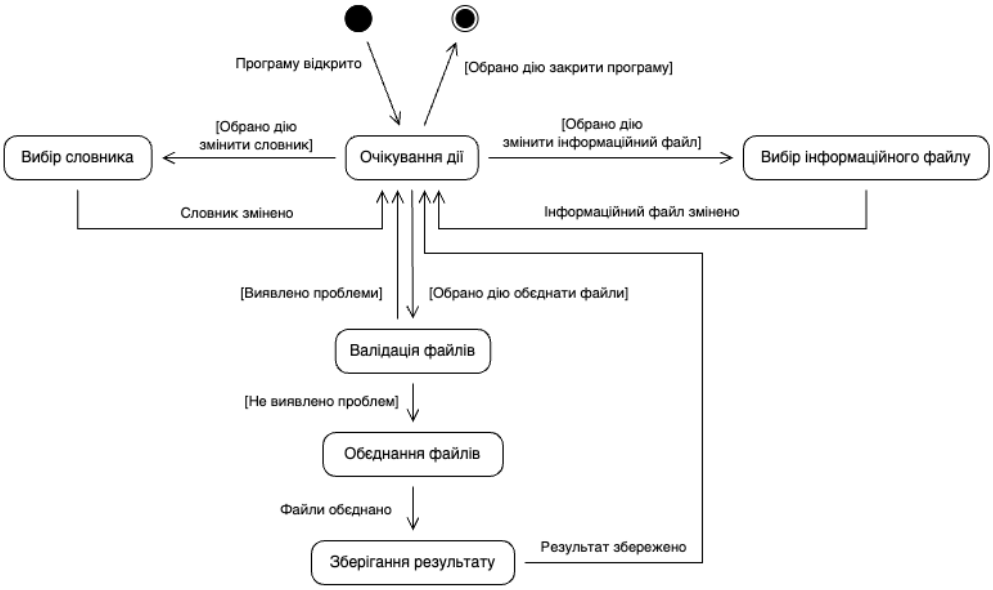


Рис. 1. Діаграма станів інтеграції в інформаційні матеріали визначень потенційно невідомих термінів та абревіатур

Система містить два зовнішні об'єкти: користувач та програма. Діаграма послідовності (рис. 2) відображає взаємодії цих об'єктів. На діаграмі не показано інші програми які утворюють інформаційний файл чи формують словник так як для роботи з програмою для інтеграції в інформаційні матеріали визначень потенційно невідомих термінів та абревіатур потрібно мати вже готові файли для об'єднання. Вони використовуються як вхідні дані.

Рис. 2. Діаграма послідовності інтеграції в інформаційні матеріали визначень потенційно невідомих термінів та абревіатур

Моделювання об'єктів предметної області

Система інтеграції в інформаційні матеріали визначень потенційно невідомих термінів та абривіатур передбачає роботу з інформаційними файлами та словниками. Ці файли можуть мати різні розширення, відповідно для кожного з розширень буде своя реалізація. Для вирішення цього основного завдання на базі інтерфейсів була розроблена відповідна діаграма класів (рис. 3) [3]. Можна дописувати різну реалізацію інтерфейсів IResource та Idictionary, що дає можливість в майбутньому розширювати програму для багатьох інших типів файлів [4].

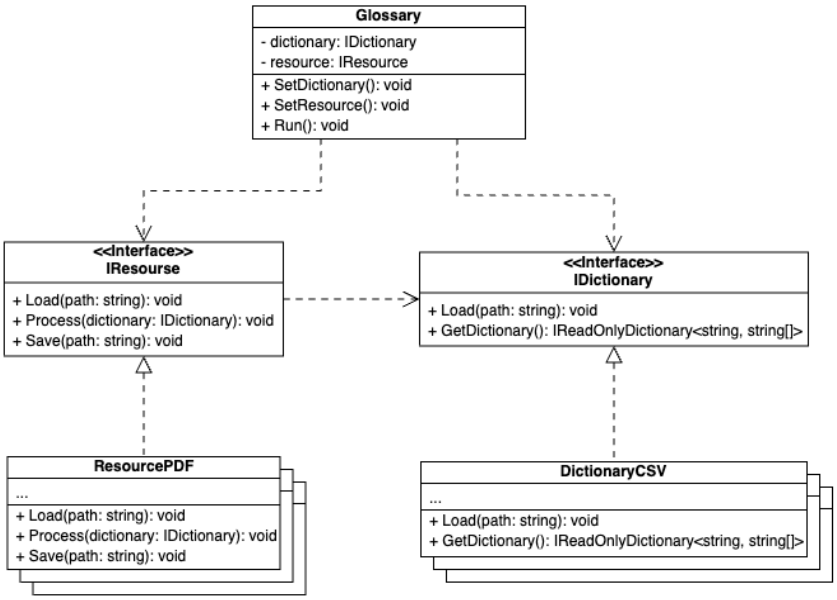


Рис. 3. Діаграма класів інтеграції в інформаційні матеріали визначень потенційно невідомих термінів та абревіатур

Вибір та обґрунтування методів розв'язання задачі

Особливістю системи є опрацювання природної мови (NLP), оскільки терміни можуть зустрічатися у різних відмінках тощо. NLP поєднує комп’ютерну лінгвістику – моделювання людської мови на основі правил – зі статистичними моделями, моделями машинного та глибокого навчання [5]. Разом ці технології дозволяють комп’ютерам обробляти людську мову у формі тексту або голосових даних і «розуміти» її. Обробка природної мови включає два підходи: статистичний та методи нейронних мереж [6]. Багато досліджень обробки природної мови значною мірою покладаються на машинне навчання [7]. Обробка природної мови є необхідним функціоналом для інтеграції в інформаційні матеріали визначень потенційно невідомих термінів та абревіатур. У системі розроблено методи обробки певних слів та словосполучень для їх пошуку, а не методи для усвідомлення сенсу речень чи подібних завдань з якими безперечно краще справиться нейронна мережа. Завдання що необхідно виконати відносяться до морфологічного аналізу. Морфологічний аналіз включає лематизацію, морфологічну сегментацію, позначення частини мови та стемінг.

Лематизація – завдання видалення лише флективних закінчень і повернення базової словникової форми слова, яка також відома як лема. Це ще один прийом редукції слів до їх нормалізованої форми. Але в цьому випадку перетворення фактично використовує словник для відображення слів у їх фактичній формі.

Морфологічна сегментація – розділення слова на окремі морфеми та визначення класу морфем. Складність цього завдання багато в чому залежить від складності морфології (тобто структури слів) мови, що розглядається. Англійська мова має досить просту морфологію, особливо флексійну, і тому часто можна повністю ігнорувати це завдання і просто моделювати всі можливі форми слова (наприклад, «open, opens, opened, opening») як окремі слова. Однак у багатьох мовах такий підхід неможливий, оскільки кожна стаття словника містить тисячі можливих словоформ.

Позначення частини мови – визначення частини мови для кожного слова за поданим реченням. Багато слів, особливо загальновживані, можуть виконувати функції кількох частин мови. Наприклад, «book» може бути іменником («the book on the table») або дієсловом («to book a flight»); «set» може бути іменником, дієсловом або прикметником; і «out» може бути будь-якою з принаймні п'яти різних частин мови.

Стемінг – процес скорочення відмінюваних (або іноді похідних) слів до основної форми (наприклад, «close» буде коренем для «closed», «closing», «closed», «closer» тощо). Створення коренів дає такі ж результати, як і лематизація, але робить це на основі правил, а не словника.

Ці всі методи будуть грати ключову роль в алгоритмах опрацювання природної мови, яка буде міститись в інформаційних файлах pdf. Ці методи допоможуть зв'язати словник з текстом навіть тоді, якщо слова будуть стояти в різних відмінках чи словосполученнях.

Програма інтеграції в інформаційні матеріали визначень потенційно невідомих термінів та абревіатур передбачає опрацювання алгоритму формування структури даних словника яка з'єднує всі слова з усіма визначеннями (рис. 4) [8].

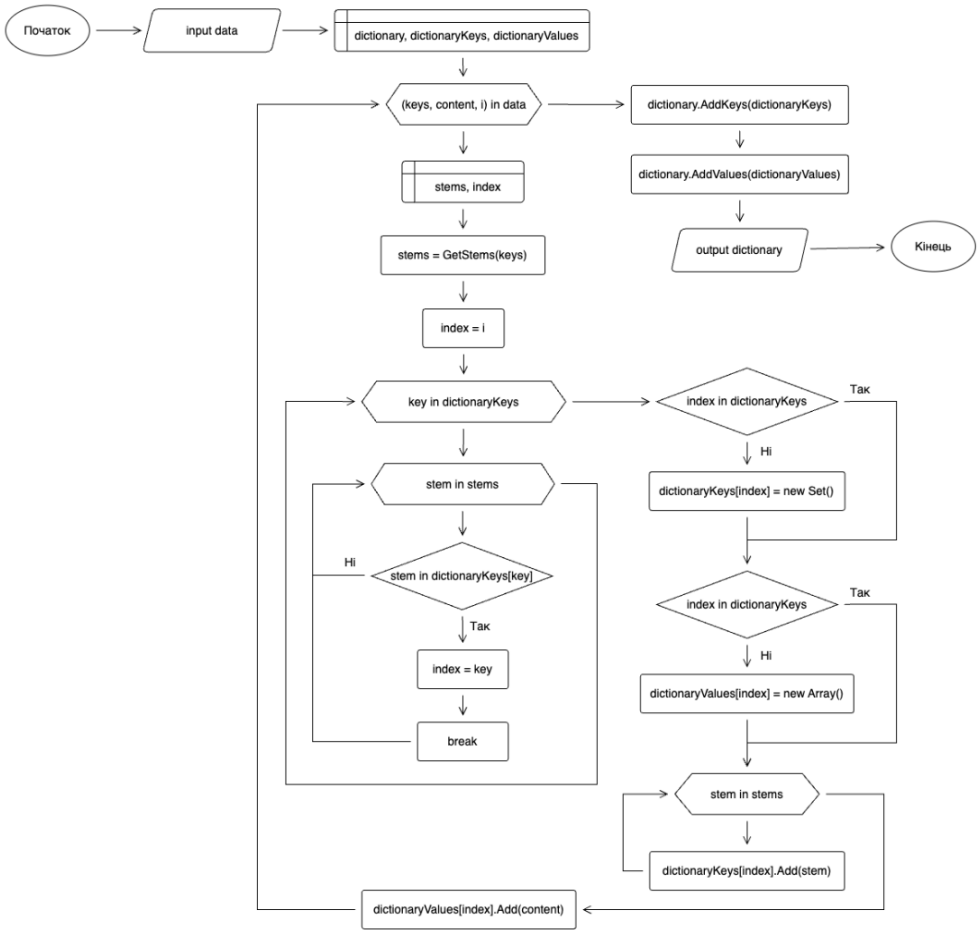


Рис. 4. Блок-схема алгоритму інтеграції в інформаційні матеріали визначень потенційно невідомих термінів та абревіатур

Алгоритм отримує на вхід дані словника в текстовій формі з метою перетворити ці дані на структурований об'єкт, який містить модель словника з яким буде працювати програма. Алгоритм формує дві структури даних на основі хеш-таблиці для ключів (слів словника) та визначень (контенту який пов'язаний з словом в словнику). У словнику може бути декілька визначень для декількох термінів. Даний алгоритм визначає групи та об'єднує сутності для укомплектування декількох визначень одного терміну чи словосполучення. У результаті ці об'єкти об'єднуються в єдину структуру даних що повертається.

Вибір і обґрунтування засобів розроблення проекту

Програма інтеграції в інформаційні матеріали визначень потенційно невідомих термінів та абревіатур передбачає роботу на персональному комп'ютері. Також для роботи даної програми потрібно взаємодіяти з форматами файлів PDF та CSV. Відповідно найкращим підходом буде використовувати готові пакети Python для покриття даних задач: Python + Tkinter + PyMuPDF. Python також має низку бібліотек, які дозволяють програмістам писати програми для аналізу даних і машинного навчання швидше і ефективніше, наприклад TensorFlow і Keras. Python має багато фреймворків графічного інтерфейсу, але Tkinter є єдиним фреймворком, вбудованим у стандартну бібліотеку Python. Tkinter має кілька сильних сторін. Він кросплатформний, тому той самий код працює в Windows, macOS і Linux. Візуальні елементи відображаються за допомогою власних елементів операційної системи, тому програми, створені за допомогою Tkinter, виглядають так, ніби належать платформі, на якій вони запускаються.

Цей фреймворк Python надає інтерфейс до набору інструментів Tk і працює як тонкий об’єктно-орієнтований рівень зверху Tk [9]. Набір інструментів Tk – це кросплатформна колекція «графічних елементів керування», або віджетів, для створення інтерфейсів програм. PyMuPDF — це прив’язка Python для MuPDF —засіб перегляду PDF, XPS і електронних книг, який підтримується та розробляється Artifex Software, Inc. MuPDF може отримати доступ до файлів у форматах PDF, XPS, OpenXPS, CBZ, EPUB і FB2 (електронні книги), він відомий своєю високою продуктивністю та високою якістю візуалізації. Для зручної розробки був використаний редактор коду Visual Studio Code де можна було підібрати різноманітні додаткові інструменти в вигляді розширень [10].

Розробка програми

Перед розробкою проекту було організовано робочий простір та визначено основний об'єктно орієнтований підхід який добре висвітлений в різноманітних програмах розроблених на Java [11]. Також було опрацьовано завдання клієнта та сервера [12]. Роль клієнта і сервера було об'єднано в єдину програму з графічним інтерфейсом та роботою з даними яка зазвичай опрацьовується сервером [13]. Для зручної роботи з програмою було використано елементи синхронних методів та функцій які використовуються при розробці програм що опрацьовують дані в реальному часі [14]. Було встановлено Python та імпортовано необхідні пакети такі як Tkinter, Fitz та інші. Також перед розробкою коду був розроблений прототип в інструменті для створення дизайну Figma (рис. 5). Таким чином було підібрано зручний і красивий графічний інтерфейс програми.

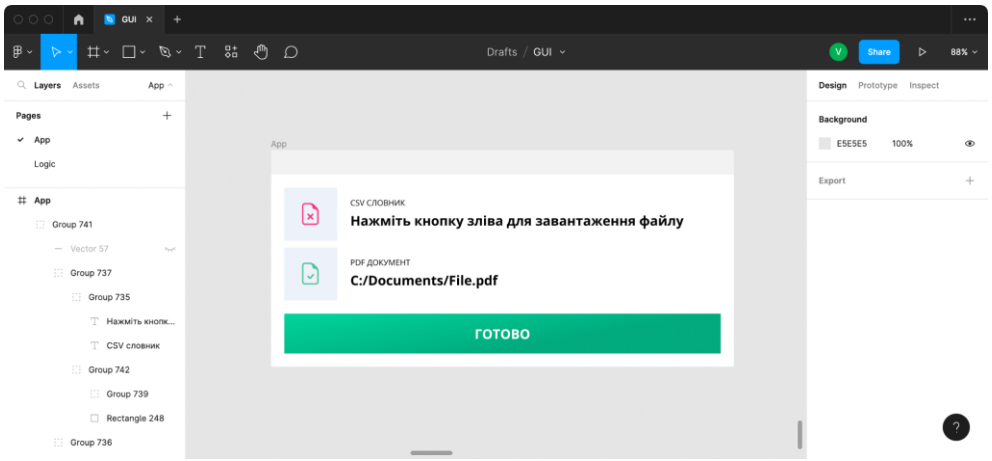


Рис. 5. Дизайн графічного інтерфейсу

Після створення дизайну було розроблено верстку графічного інтерфейсу використовуючи бібліотеку Tkinter. Таким чином стало можливим відкривати програму і користуватись нею, використовуючи графічний інтерфейс.

Програма інтеграції в інформаційні матеріали визначень потенційно невідомих термінів та абревіатур має одне вікно для взаємодії користувача з програмою (рис. 6) та передбачає формування словника в любій зручній програмі яка дозволяє експортувати дані з типом CSV (рис. 7). Даний файл, як і інформаційний файл з типом PDF, буде завантажуватись в програму для їх об'єднання.

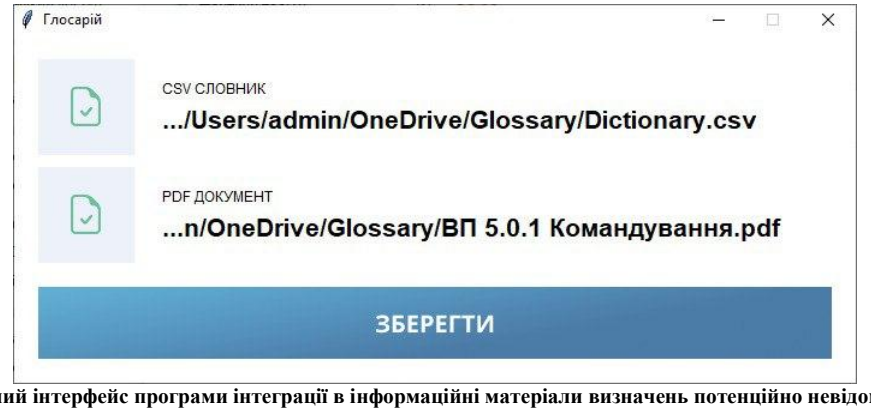
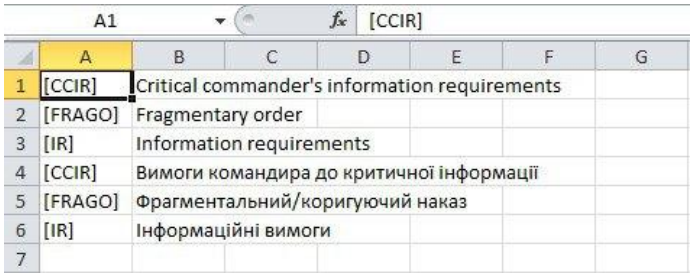


Рис. 6. Графічний інтерфейс програми інтеграції в інформаційні матеріали визначень потенційно невідомих термінів та абревіатур



	A	B
1	[CCIR]	Critical commander's information requirements
2	[FRAGO]	Fragmentary order
3	[IR]	Information requirements
4	[CCIR]	Вимоги командира до критичної інформації
5	[FRAGO]	Фрагментальний/коригуючий наказ
6	[IR]	Інформаційні вимоги
7		

Рис. 7. Словник термінів та абревіатур

У результаті в користувача на комп'ютері з'являється копія інформаційного файлу з додатковими даними, які відображаються в переглядачі як нотатки (рис. 8) [15]. Таким чином користувач може переглядати документ без зайвої інформації, а коли ця інформація знадобиться, він може знайти її, навівши курсор на відповідний термін. Розроблена система використовується на практиці [16].

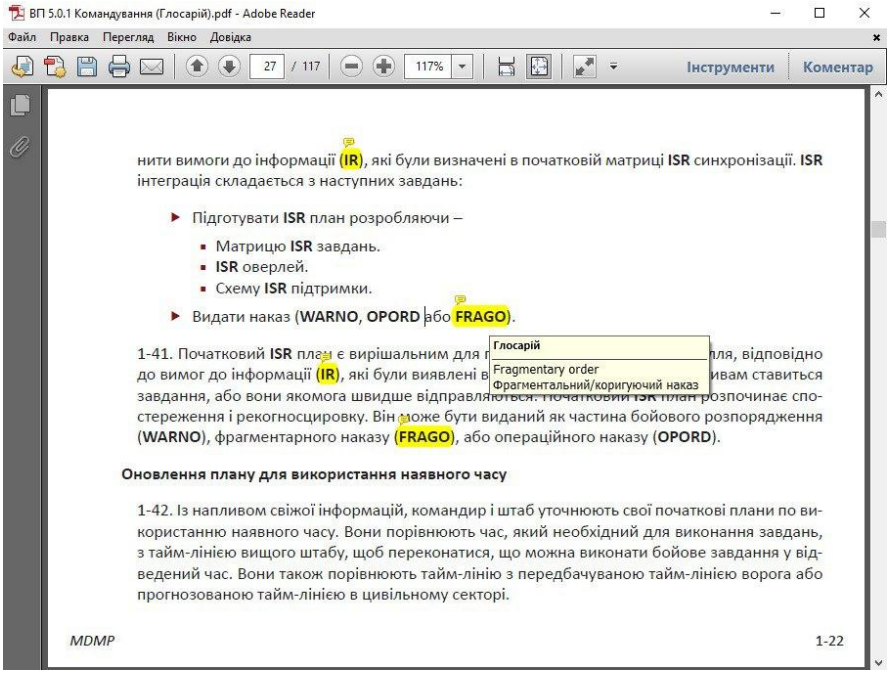


Рис. 8. Інформаційний файл, що генерує система

Висновки

У роботі досліджено процес побудови та функціонування системи ідентифікації термінів та абревіатур у текстових документах. Завдання з розроблення такої системи є актуальною, оскільки така проблема ідентифікації часто виникає у військовій сфері. Під час реалізації системи враховано те, що окремий термін чи абревіатура може мати кілька пояснень в різних нормативних документах. Всі наявні пояснення доєднуються до терміну або абревіатури, що враховано у процесі роботи системи. Особливістю системи є використання методів опрацювання природної мови, оскільки терміни можуть зустрічатися у різних відмінках. Для реалізації системи використано готові пакети Python для покриття подібних задач: Tkinter, PyMuPDF Наведено приклади функціонування системи. Розроблена система використовується на практиці.

Література

1. Klymovych O., Hrabchak V., Lavrut O., Lavrut T., Lytvyn V., Vysotska V. The diagnostics methods for modern communication tools in the Armed Forces of Ukraine based on neural network Approach. CEUR Workshop Proceedings. 2020. Vol. 2631. P. 198–208.

2. Pashchetnyk O., Lytvyn V., Zhyvchuk V., Polishchuk L., Vysotska V., Rybchak Z., Pukach Y. The ontological decision support system composition and structure determination for commanders of Land Forces formations and units in Ukrainian Armed Force. CEUR Workshop Proceedings. 2021. Vol. 2870. Kharkiv, Ukraine, April 22-23, 2021. P. 1077–1086.

3. Buschmann F., Meunier R., Rohnert H., Sommerlad P., Stal M. Pattern-Oriented Software Architecture. 2002.

4. Bass L., Clements P., Kazman R. Software Architecture in Practice. Addison-Wesley, 2003.

5. Gyansetu. Intro to NLP in Machine Learning. 12, 2020. URL: https://gyansetu.in/blogs/what-is-natural-language-processing/.

6. Trevor Hastie, Robert Tibshirani, Jerome H. Friedman The Elements of Statistical Learning. Trevor Hastie. Springer, 2001.

7. Stuart Russell, Peter Norvig Artificial Intelligence – A Modern Approach. Prentice Hall. Stuart Russell. 2002.

8. Evergreen. UML: для чого потрібні діаграми процесів. Лютий 2021. URL: https://evergreens.com.ua/ua/articles/uml-diagrams.html.

9. Jacobsen Ivar, Magnus Christerson, Patrik Jonsson, Gunnar Overgaard. Object Oriented Software Engineering. Jacobsen, 1992.

10. Visual Studio Code. Why Visual Studio Code? June, 2021. URL: https://code.visualstudio.com/docs/editor/whyvscode.

11. Simplilearn. Node.js vs. Java: Differences, Applications, and Why You Should Learn Them. April 12, 2021. URL: https://www.simplilearn.com/node-js-vs-java-article/.

12. Coursera. What Does a Front-End Developer Do? September 30, 2022. URL: https://www.coursera.org/articles/front-end-developer/.

13. Coursera. What Does a Back-End Developer Do? September 30, 2022. URL: https://www.coursera.org/articles/back-end-developer/.

14. Search Unified Communications. What is a real-time application (RTA)? Definition and Examples. May 2022. URL: https://www.techtarget.com/searchunifiedcommunications/definition/real-time-application-RTA/.

15. Берко А. Ю. Організація баз даних / А. Ю. Берко, О. М. Верес. – Університет «Львів. політехніка», 2003.

16. Smashing magazine. What Is User Experience Design? October 2010. URL: https://www.smashingmagazine.com/2010/10/what-is-user-experience-design-overview-tools-and-resources/.

References

1. Klymovych O., Hrabchak V., Lavrut O., Lavrut T., Lytvyn V., Vysotska V. The diagnostics methods for modern communication tools in the Armed Forces of Ukraine based on neural network Approach. CEUR Workshop Proceedings. 2020. Vol. 2631. P. 198–208.

2. Pashchetnyk O., Lytvyn V., Zhyvchuk V., Polishchuk L., Vysotska V., Rybchak Z., Pukach Y. The ontological decision support system composition and structure determination for commanders of Land Forces formations and units in Ukrainian Armed Force. CEUR Workshop Proceedings. 2021. Vol. 2870. Kharkiv, Ukraine, April 22-23, 2021. R. 1077–1086.

3. Buschmann F., Meunier R., Rohnert H., Sommerlad P., Stal M. Pattern-Oriented Software Architecture. 2002.

4. Bass L., Clements P., Kazman R. Software Architecture in Practice. Addison-Wesley, 2003.

5. Gyansetu. Intro to NLP in Machine Learning. 12, 2020. URL: https://gyansetu.in/blogs/what-is-natural-language-processing/.

6. Trevor Hastie, Robert Tibshirani, Jerome H. Friedman The Elements of Statistical Learning. Trevor Hastie. Springer, 2001.

7. Stuart Russell, Peter Norvig Artificial Intelligence – A Modern Approach. Prentice Hall. Stuart Russell. 2002.

8. Evergreen. UML: dlia choho potribni diahramy protsesiv. Liutyi 2021. URL: https://evergreens.com.ua/ua/articles/uml-diagrams.html.

9. Jacobsen Ivar, Magnus Christerson, Patrik Jonsson, Gunnar Overgaard. Object Oriented Software Engineering. Jacobsen, 1992.

10. Visual Studio Code. Why Visual Studio Code? June, 2021. URL: https://code.visualstudio.com/docs/editor/whyvscode.

11. Simplilearn. Node.js vs. Java: Differences, Applications, and Why You Should Learn Them. April 12, 2021. URL: https://www.simplilearn.com/node-js-vs-java-article/.

12. Coursera. What Does a Front-End Developer Do? September 30, 2022. URL: https://www.coursera.org/articles/front-end-developer/.

13. Coursera. What Does a Back-End Developer Do? September 30, 2022. URL: https://www.coursera.org/articles/back-end-developer/.

14. Search Unified Communications. What is a real-time application (RTA)? Definition and Examples. May 2022. URL: https://www.techtarget.com/searchunifiedcommunications/definition/real-time-application-RTA/.

15. Berko A. Yu. Orhanizatsiia baz danykh / A. Yu. Berko, O. M. Veres. – Universytet «Lviv. politekhnika», 2003.

16. Smashing magazine. What Is User Experience Design? October 2010. URL: https://www.smashingmagazine.com/2010/10/what-is-user-experience-design-overview-tools-and-resources/.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-88-93
УДК 675.92.027:675.2

ДАНИЛКОВИЧ АНАТОЛІЙ
Київський національний університет технологій та дизайну
https://orcid.org/0000-0002-5707-0419
e-mail: ag101@ukr.net
ЛІЩУК ВІКТОР
Київський національний університет технологій та дизайну
https://orcid.org/0000-0003-1943-8048
e-mail: lishukviktor@gmail.com
САНГІНОВА ОЛЬГА
Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського»
https://orcid.org/0000-0001-6378-7718
e-mail: sanginova@xtf.kpi.ua

ФОРМУВАННЯ ШКІРИ, НАПОВНЕНОЇ МОДИФІКОВАНОЮ СИНТАННО-ТАНІДНОЮ КОМПОЗИЦІЄЮ

Розроблено технологію наповнювання-пластифікації шкіряного матеріалу для верху взуття з напівфабрикату хромового дублення сировини яловиці легкої з використанням синтанно-танідної композиції, модифікованої алкілкарбоксиетаноламіном аліфатичних кислот фракції C_{7-9}. За комплексом фізико-хімічних і технологічних властивостей дослідний напівфабрикат й отриманий шкіряний матеріал перевершують промислові зразки. Зокрема, об'ємний вихід і питома поверхнею напівфабрикату підвищуються відповідно на 8,0 і 11,0 %, а вихід площі матеріалу – на 3,2 %. Деформаційні властивості різних топографічних ділянок отриманого матеріалу також свідчать про підвищену однорідність його структури і можливість ефективного використання для виготовлення деталей верху взуття.

Ключові слова: *напівфабрикат хромового дублення, модифікація, наповнювання, синтанно-танідна композиція, алкілкарбоксиетаноламін, фізико-хімічні властивості.*

DANYLKOVYCH ANATOLII, LISHCHUK VIKTOR
Kyiv National University of Technologies and Design
SANGINOVA OLGA
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

FORMATION OF LEATHER FILLED WITH MODIFIED SYNTAN AND TANIDE COMPOSITION

The technology of manufacturing leather material for the upper of shoes from semi-finished chrome tanning obtained from raw cow hides been has been developed. The technology at the filling-plasticization stage involves the use of a syntane-tanide composition modified with alkylcarboxyethanolamine of aliphatic acids of fraction C_{7-9}. The filling and plasticizing composition includes syntane BNS TU 17-06-165-89 and mimosa extract tanids with a content of the main substance of 81.7%. The semi-finished product is plasticized with Fosfol L-1301 emulsion of Cromogenia Units, S.A., Spain. Chemical reagents in the structure of the material are fixed by potassium alum modified with sodium formate. All previous and subsequent processes and operations are performed according to the industrial technology of the enterprise "Chinbar". The resulting semi-finished product is characterized by a volumetric yield of 256 cm^3/100 g of protein, a specific surface area of 71 m^2/g, which are 8.0 and 11.0% higher than the industrial sample.

Deformation properties of topographic areas and coefficients of uniformity of topographic areas of leather materials at loads of 10.0 MPa and rupture were calculated. At the same time, a more effective characteristic of the homogeneity of the material structure is the uniformity factor at a load of 10.0 MPa. The leather material obtained by the experimental technology has a uniformly oriented structure with an arithmetic average coefficient of uniformity of 1.0, and the industrial material has a transversely oriented structure with an arithmetic average coefficient of uniformity of 0.83. The advantage of the experimental material over the industrial one in terms of the complex of physico-chemical and technological properties and the coefficient of uniformity increases the efficiency of its use for the manufacture of leather products. The obtained leather material meets the requirements of DSTU 2726-94 "Leathers for shoe uppers. Specifications".

Key words: *chrome tanning semi-finished product, modification, filling, syntane-tanide composition, alkylcarboxyethanolamine, physical and chemical properties.*

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

Сучасні виробництва матеріалів різного призначення спрямовані на отримання конкурентоздатної продукції шляхом постадійного удосконалення і розроблення нових технологій її виготовлення. В значній мірі це стосується багатовікового, матеріалоємного і багатостадійного виробництва натуральної шкіри. При цьому, слід відзначити, особливу роль процесу наповнення у технологічному циклі такого виробництва. Наповнення пористої структури дубленого напівфабрикату та його консолідація супроводжуються утворенням великої кількості адгезійних зв'язків між сітчастим і сосочковим шарами, а також підвищенням однорідності та рівномірності властивостей різних топографічних ділянок шкіри. Це особливо має значення у виробництві шкіри для верху взуття, що характеризуються комплексом специфічних фізико-хімічних властивостей, обумовлених особливими умовами їх виготовлення і експлуатації. З цією метою використовується широкий асортимент хімічних реагентів зі специфічною реакційною здатністю і впливом їх на властивості готового матеріалу. При цьому основні труднощі пов'язані з структурою і властивостями сировини та комплексом бажаних властивостей шкіри залежно від її призначення. У зв'язку з цим

виявляється об'єктивна необхідність проведення систематичних досліджень впливу природних і синтетичних реагентів, як на процес наповнення, так і на технологічні й фізико-хімічні властивості шкіряного матеріалу.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій

В процесах формування технологічних і фізико-хімічних властивостей готового шкіряного матеріалу відбуваються глибокі структурні зміни напівфабрикату після його кислотно-сольового оброблення з використанням комплексних сполук поліфункціональної дії. Так, авторами [1] використано кополімер хром-поліетиленгліколь метилового естеру акрилової кислоти для наповнення структури напівфабрикату. При цьому полімерна частина комплексу блокує йонізовані атоми хрому і забезпечує його дифузію у структуру напівфабрикату. За підвищення pH відбувається ефективне зшивання колагенової структури, що супроводжується підвищенням стійкості й фізико-механічних властивостей матеріалу при високому хімічному зв'язуванні хрому. Авторами [2] досліджено комплексні сполуки амфотерного поліуретан/поліальдегіду з колагеновими волокнами. При цьому спостерігається підвищення їх термостабільності, фізико-механічних властивостей та реакційної здатності до аніонних матеріалів, зокрема, це стосується барвників і жирувальних речовин. Як наповнювач шкіряного напівфабрикату авторами роботи [3] використані високодисперсні нанокомпозити алюмосилікат/акриловий полімер. Досліджено колоїдно-хімічні властивості отриманого нанокомпозиту з розміром частинок 62–295 нм. Встановлено підвищення органолептичних показників – повноти, наповненості й м'якості готової шкіри з вмістом 5 % алюмосилікату та міцності на 7,7 % порівняно з контрольним матеріалом. Використання природних високодисперсних силікатів, модифікованих акриловими полімерами [4] забезпечує збереження ефекту розділення мікрофібрилярної структури шкіряного напівфабрикату після зневоднення і підвищення рівномірності властивостей по топографічним ділянкам шкіри. Автори [5] дослідили вплив концентрації і розміру частинок композиції нано-SiO_2/оксазолідин на формування структури шкіряного матеріалу. Встановлено рівномірність розподілу наповнювача в структурі матеріалу навіть за витрати менше ніж 5 мас. % маси напівфабрикату. З цією ж метою автори [6] використали нанокомпозит монтморилоніту, модифікований цис-13-декозиновою кислотою, ріпакову олію, етилендіамін та бісульфіт натрію. Встановлено, що при 8 % витраті цього композиту від маси напівфабрикату фізико-механічні показники й м'якість матеріалу досягають максимального значення.

Використання бутилакрилового полімеру для наповнювання шкіряного напівфабрикату хромового дублення [7] дало можливість отримати матеріал підвищеної гідротермічної стійкості, еластичності та міцності. Досліджено вплив акрилових кополімерів різного хімічного складу на властивості наповненої шкіри [8]. Встановлено максимальне підвищення еластичності матеріалу при використанні етил- і бутилакрилатних кополімерів. Перспективним наповнювачем шкіряного напівфабрикату автори [9] вважають продукти біохімічної деструкції відходів шкіряного виробництва. У [10] досліджено вплив танідів і синтетичних дубителів з алюмосилікатами на властивості шкіряного напівфабрикату і готової шкіри. Виготовлені зразки еластичних шкір характеризувались підвищеними фізико-хімічними показниками. Авторами [11] проведено порівняльний аналіз впливу танідів хни і мімози на комплекс властивостей хромових шкір. Встановлено, що таніди хни виявляють хімічну активність аналогічну танідам мімози. При використанні танідів мімози з оксазолідином для наповнювання напівфабрикату хромового дублення великої рогатої худоби авторами [12] отримані еластичні шкіри. Встановлено підвищення рівномірності пористості й однорідності топографічних ділянок шкіри. При цьому збільшується вихід площі шкіряного матеріалу. Застосування танідів сумаху і природних алюмосилікатів для наповнення шкіряного напівфабрикату хромового дублення [13] дало можливість підвищити комплекс фізико-хімічних властивостей отриманих шкір.

$$HO(CH_2)_2NH_3^+ \times {}^-O(O)CR,$$

Отже, комплексні дослідження формування шкіряних матеріалів на стадії наповнювання-додублювання стосується використання композиційних наповнювачів на основі синтетичних і природних високодисперсних матеріалів. При цьому використання танідів різного походження забезпечує ефективне формування шкіряних матеріалів з підвищеними експлуатаційними властивостями.

Формулювання цілей статті

Мета роботи: дослідження процесу формування шкіряного напівфабрикату при наповненні його структури з використанням синтанно-танідної композиції, модифікованої алкілкарбоксиетаноламіном аліфатичних кислот (АКЕА АК). Для цього реалізовані наступні задачі: формування еластичного шкіряного матеріалу для верху взуття; встановлення фізико-хімічних властивостей напівфабрикату хромового дублення після його наповнення; визначення рівномірності деформаційних властивостей готової шкіри за топографічними ділянками.

Матеріали і методи дослідження

Для формування шкіри використовується шкіряний напівфабрикат хромового дублення з температурою гідротермічної стійкості 107 °C, отриманий на ПрАТ «Чинбар» м. Київ, Україна з яловиці легкої масою 13 кг товщиною 0,9–1,1 мм. Процес наповнення-пластифікації напівфабрикату виконується синтанно-танідною композицією, модифікованою АКЕА АК

де R – радикал аліфатичних кислот фракції C_7–C_9.

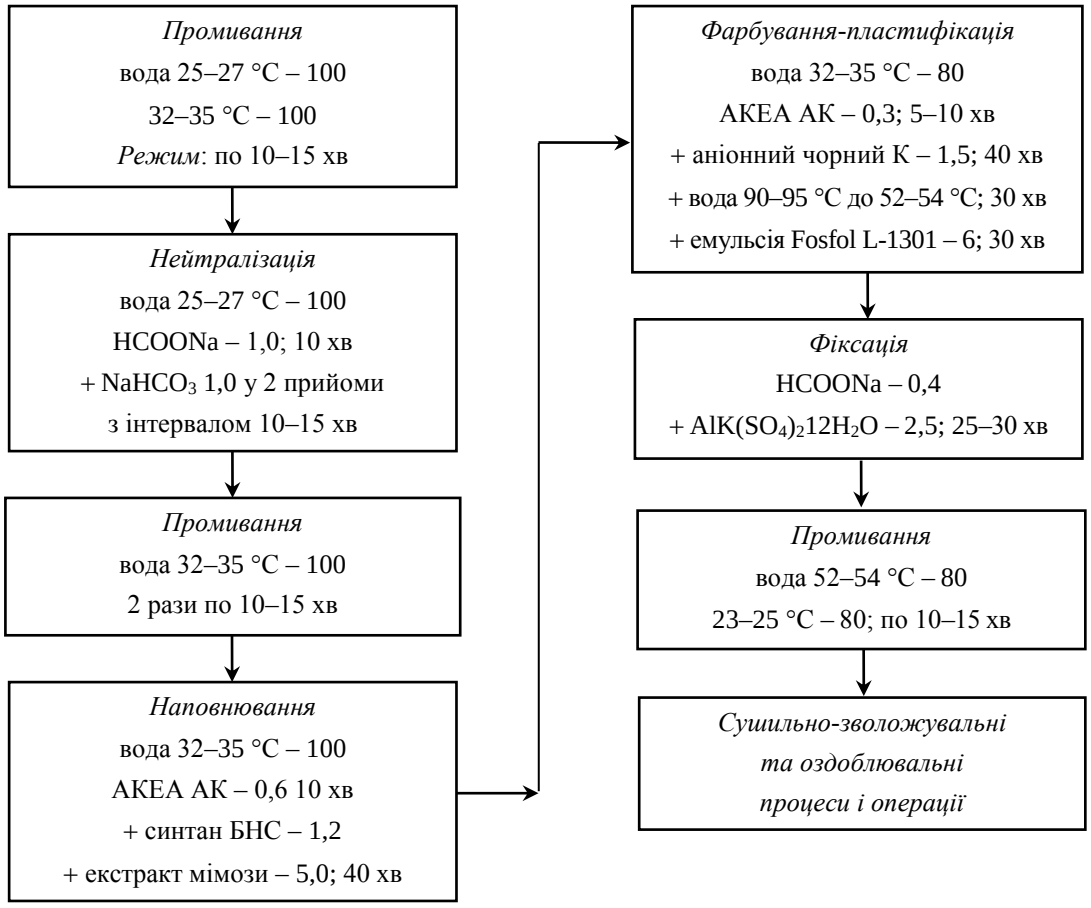
При цьому використовуються наступні реагенти: промислова вода; форміат натрію HCOONa ТУ У 3.50-14308351-74-95; гідрокарбонат натрію $NaHCO_3$; продукт взаємодії 2-нафтолсульфокислоти з діоксидіфенілсульфоном – синтан БНС ТУ 17-06-165-89; таніди екстракту мімози з вмістом основної речовини 81,7 %; емульсія Fosfol L-1301 компанії Cromogenia Units, S.A., Іспанія; барвник аніонний чорний К; алюмокалієвий галун $AlK(SO_4)_2 12H_2O$ компанії Allbiz, Україна. Наповнений-пластифікований шкіряний напівфабрикат в подальшому обробляється за промисловою технологією виробництва шкір для верху взуття.

Фізико-хімічні дослідження отриманих зразків проводяться за методиками [14] після їх кондиціювання за нормальних умов. Зокрема, гідротермічна стійкість шкіри визначається візуально за ефектом початку скорочення зразка у водно-гліцериновій суміші при швидкості його нагрівання 2–3 °/хв. Пористість напівфабрикату – за відношенням об'єму пор напівфабрикату, встановленого з використанням авіаційного гасу, до його уявного об'єму; об'ємний вихід – за об'ємом зразка, що містить 100 г білка; паропроникність – з використанням осушаючого агенту сірчаної кислоти густиною 1,84 г/мл; повітропроникність – за об'ємом повітря при різниці тисків з обох боків зразка 1 кПа; гігроскопічність – за різницею мас зразків при 100 % вологості та витриманого у стандартних умовах; питома поверхня – за сорбцією парів води.

Фізико-механічні випробування виконуються на розривній машині моделі РТ-250М за швидкості деформування зразка 0,09 м·хв$^{-1}$. Коефіцієнти рівномірності K_p деформацій шкіри за топографічними ділянками розраховуються за відношенням значень поперечних → деформацій до поздовжніх ↑ відносно хребтової лінії шкіри [15]. Середній коефіцієнт рівномірності $\overline{K_p}$ деформаційних властивостей шкіри відповідає середньоарифметичному значенню K_p чепрака, воротка і пол. Товщина топографічних ділянок шкіри визначається мікрометром марки ТР 25-100 в центрі топографічних ділянок і відносно нього діагонально протилежних чотирьох точках. Площа шкіри – на вимірювальній електронній машині моделі 07484/P1 фірми Svit, Чехія.

Виклад основного матеріалу

Для забезпечення якісного формування шкіряного матеріалу з біосировини нерівномірної структури на стадії наповнювання-пластифікації отриманого напівфабрикату використовується модифікована синтанно-танідна композиція. Рідинні процеси формування шкіряного матеріалу виконуються в умовах ПрАТ «Чинбар» у барабані фірми Doze (Німеччина) об'ємом 0,39 м^3 при постійному його обертанні зі швидкістю 7–8 хв$^{-1}$. При цьому обробляється два зразки яловиці легкої хромового дублення площею по 207 дм^2 за наведеною технологічною схемою (рис. 1).



Примітка. Витрати матеріалів у % маси напівфабрикату

Рис. 1. Технологічна схема багатостадійного процесу наповнення-пластифікації

Після наскрізної нейтралізації й промивання для прискорення дифузії танідів у структуру напівфабрикату в розчин додається поверхнево-активний реагент АКЕА АК [16]. Потім у барабан дозується диспергатор БНС з екстрактом танідів мімози. Наступне фарбування напівфабрикату виконується на свіжому розчині з еголізатором АКЕА АК і додаванням барвника у сухому виді. Для подальшої пластифікації напівфабрикату використовується жирувальна емульсія скоригована гідроксидом амонію чи розчином оцтової кислоти до pH 7,8–8,2. Фінішна стадія наповнювання-пластифікації напівфабрикату завершується при pH 4,0–4,2 після обробки напівфабрикату модифікованим розчином алюмокалієвого галуну з наступним подвійним його промиванням. Готова шкіра отримується після сушильно-зволожувальних і оздоблювальних процесів та операцій за промисловою технологією.

У наповнювально-пластифікаційних процесах відбувається комплекс складних колоїдно-хімічних явищ, пов'язаних з дифузією реагентів у структуру напівфабрикату хромового дублення. При цьому частина сорбованої води заміщується частинками поверхнево-активних і наповнювальних реагентів, що відкладаються у міжфібрилярному просторі, переважно у крупних порах напівфабрикату. В результаті взаємодії частинок жирової емульсії з колагеновою структурою, вони розшаровуються і пластифікуючий агент відкладається на поверхні елементів фібрилярної структури. Водночас цей процес супроводжується зменшенням загальної гідрофільності пористої структури напівфабрикату. Після видалення з напівфабрикату основної частини незв'язаної води при вакуумному зневодненні, сорбована частина реагентів перешкоджає міжфібрилярній взаємодії, що супроводжується збереженням ефективної пористості матеріалу. В подальшому при формування структури шкіри для запобігання агломерації макромолекул напівфабрикату його поступово зневоднюють до вмісту вологи не менше 16 %. При цьому пористість дослідних і промислових наповнених зразків збільшується відповідно на 11,0 і 9,0 % (таблиця 1) щодо напівфабрикату хромового дублення. При цьому дослідні зразки перевершують промислові на 3,5 %. Це стосується також питомої поверхні, яка на 10,9 % є більшою порівняно з промисловими зразками. Ефекти, що спостерігаються обумовлені особливостями хімічного складу наповнювальних композицій і умовами проведення технологічного процесу.

Таблиця 1

Фізико-хімічні властивості шкіряного напівфабрикату

Показник	Напівфабрикат		
	хромового дублення	наповнений	
		дослідний	промисловий
Границя міцності, МПа	15,6	18,0	17,5
Видовження при 10 МПа, %	21,0	39,0	36,0
Видовження при розриванні, %	33,0	58,0	61,0
Пористість, %	49,0	60,0	58,0
Питома поверхня, $м^2/г$	52,0	71,0	64,0
Об'ємний вихід, $см^3$/100 г білка	183,0	256,0	237,0
Паропроникність, мг/($см^2$·год)	12,2	14,3	13,8
Повітропроникність, мл/($см^2$·год)	410,0	720,0	680

Аналогічним чином збільшується об'ємний вихід напівфабрикату, отриманого за дослідною технологією, що перевершує промислові зразки на 8,0 %. При цьому повітро- і паропроникність дослідного напівфабрикату також досягають вищих значень. Однак, у зв'язку зі зменшенням гідрофільності матеріалу цей ефект менше виражений у випадку паропроникності, що обумовлено сорбційно-десорбційним механізмом дифузії молекул води через структуру шкіряного напівфабрикату. Порівняльний аналіз результатів фізико-механічних властивостей свідчить також про позитивний вплив наповнювально-пластифікаційних композицій на процес формування отриманого напівфабрикату.

Отже, за комплексом фізико-хімічних властивостей наповнений-пластифікований напівфабрикат, отриманий за дослідною технологією, перевершує промислові зразки, особливо за такими показниками як об'ємний вихід і пористість.

Після проведення сушильно-зволожувальних і оздоблювальних процесів та операцій наповненого напівфабрикату отримано шкіряний матеріал. Результати комплексних фізико-механічних досліджень шкіряного матеріалу по топографічним ділянкам наведено в таблицях 2 і 3.

Аналіз зміни товщини і міцності ділянок чепрака і пол шкіряного матеріалу дослідної технології виявляє збільшення різниці між ними порівняно із зразками промислової технології, що свідчить про ефективніше наповнення структури периферійних ділянок дослідного зразка. Відповідно цьому різниця між границями міцності чепрака і пол є меншою у матеріалу дослідної технології при більшій міцності. Водночас отримана шкіра за дослідною технологією має більший вихід площі на 3,2 %. Більш детальну інформацію про підвищення однорідності шкіряних матеріалів можна отримати з аналізу розподілу деформацій за різними топографічними ділянками та коефіцієнтам їх рівномірності (таблиця 3).

Таблиця 2

Технологічні властивості шкіряного матеріалу

Показник	Технологія	
	дослідна	промислова
Товщина, мм		
Чепрак	1,25	1,19
Вороток	1,31	1,23
Поли	1,33	1,24
Границя міцності при розриванні, МПа		
Чепрак	26,0	22,8
Вороток	24,1	19,7
Поли	23,0	19,0
Вихід площі шкіри, % промислових зразків	103,2	100,0

Таблиця 3

Деформаційні властивості шкіряного матеріалу

Показник	Зразки дослідні			Зразки промислові		
	орієнтація		K_p	орієнтація		K_p
	→	↑		→	↑	
Видовження при 10 МПа, %						
Чепрак	25,6	24,8	1,03	29,7	34,6	0,86
Вороток	26,9	25,3	1,06	28,8	36,2	0,80
Поли	28,7	29,1	0,97	31,6	38,4	0,82
$\bar{K}_p$			1,02			0,83
Видовження при розриві, %						
Чепрак	59,1	56,7	1,04	61,3	67,8	0,90
Вороток	57,2	58,6	0,98	60,1	72,3	0,83
Поли	59,6	60,2	0,99	62,8	74,2	0,85
$\bar{K}_p$			1,0			0,86

Визначення деформаційної здатності шкіряного матеріалу з врахуванням напрямку деформування зразків при навантаженнях 10 МПа і розриві на відміну від міцності свідчить про протилежний характер залежностей цього показника для ділянок чепрака і пол зразків дослідного та промислового шкіряного матеріалу. Слід відзначити, що визначені K_p топографічних ділянок за деформаційною здатністю при навантаженнях 10 МПа і розриві для зразків дослідного та промислового матеріалів змінюються аналогічним чином. Разом з тим, більш об'єктивною характеристикою рівномірності шкіряного матеріалу можна вважати структурно чутливий K_p, визначений при напруженості 10 МПа. Отримані результати свідчать про вищі значення K_p топографічних ділянок дослідного матеріалу порівняно з промисловим зразком. Про це також свідчить результати розрахунків середньоарифметичних значень коефіцієнтів рівномірності зразків шкіри, які враховуються при розкроюванні матеріалу.

Отже, дослідний шкіряний матеріал характеризується рівномірними деформаційними властивостями у поперечному і поздовжньому напрямках щодо хребтової лінії шкіри та перевершує промислові зразки за однорідністю структури. Це дає підстави вважати ефективним використання отриманого матеріалу з більш орієнтованою структурою для виготовлення і експлуатації виробів при складних, багатоциклічних згинально-розгинальних деформаціях.

Висновки

Розроблена технологія виготовлення шкіряного матеріалу для верху взуття з сировини яловиці легкої, що передбачає наповнювання-пластифікацію напівфабрикату хромового дублення синтанно-танідною композицією, модифікованою алкілкарбоксиетаноламіном аліфатичних кислот фракції C_{7-9}. Визначено комплекс фізико-хімічних і технологічних властивостей отриманого шкіряного матеріалу, що перевершує промисловий зразок. Зокрема, %: за міцністю на 14–21, об'ємним виходом на 8,0 і виходом площі на 3,2. За розрахованими коефіцієнтами рівномірності дослідний шкіряний матеріал характеризується рівномірно-орієнтованою структурою з середньоарифметичним коефіцієнтом рівномірності 1,0. Промисловий матеріал має поперечно-орієнтовану структуру з середньоарифметичним коефіцієнтом рівномірності 0,83. Сприятлива перевага дослідного шкіряного матеріалу за орієнтацією структури підвищує ефективність його використання для виготовлення виробів зі шкіри. Отриманий шкіряний матеріал відповідає вимогам ДСТУ 2726-94 «Шкіри для верху взуття. Технічні умови».

Література

1. Clay/polymer nanocomposites as filler materials for leather / J. S. Essomba et al. // J. of Cleaner Production. – 2019. – 237 (10). https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117837.

2. Preparation of reactive amphoteric polyurethane with multialdehyde groups and its use as a retanning agent for chrome‐free tanned leather / W. Xu et al. // JAPS. – 2019. – 136. https://doi.org/10.1002/app.47940.

3. pH-Sensitive and Chromium-Loaded Mineralized Nanoparticles as a Tanning Agent for Cleaner Leather Production / K. Li et al. // Sustainable Chem. Eng. – 2019. – 7 (9). – P. 8660–8669. DOI: 10.1021/acssuschemeng.9b00482.

4. Dzyazko Y. Nanophysics, Nanophotonics, Surface Studies, and Applications / Y. Dzyazko, Y. Volfkovich, N. Nikolskaya // Springer Proceeding in Physics: Hfrt IV. – 2016. – 183. – P. 277–290.

5. Nano-SiO_2 oxazolidine combination tannage: Potential for chrome-free leather / L. Yan et al. // JALCA. − 2008. − 92 (6). − P. 252−257.

6. Nanocomposite based on erucic acid modified montmorillonite/sulfited rapeseed oil : Preparation and application in leather / B. Lyu et al. // Applied Clay Seience. − 2016. – 121. − P. 36–45. https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.12.021.

7. Nashy E. H. A. Novel retanning agents for chrome tanned leather based on emulsion-nano particles of styrene/butyl acrylate copolymers / E. H. A. Nashy et al. // JALCA. − 2011. − 106 (9). − P. 241–248.

8. Ma J. Z. Elasticity studies on leather retanned with various types of acrylic polymers / J. Z. Ma, H. Lu // JALCA. – 2008. – 103 (11). – P. 363–369.

9. Retanning Bioagent Used in Leather Processing and Process of Obtaining Thereof / R. R. Constantinescu et al. // Rev. Chim. – 2019. – 70 (11). – P. 3878–3880. https://doi.org/10.37358/RC.70.19.11.7663.

10. Gürler K. D. Possibilities of usage of alkali aluminosilicates as tanning material in chromium-free leather produgtion / K. D. Gürler, G. Gülümser // JTATK. – 2016. – 26(1). – P. 117–124.

11. Henna extract: can it be an alternative retanning agen? / A. E. Musa, B. Madchan et al. // JALCA. – 2008. – 103(6). – P. 188–193.

12. Combined organic tanning based on mimosa and oxazolidine: development of a semi-industrial scale process for high-qualiti bovine upper leather / A. D`Aquino et al. // JSLTC. – 2013. – 1 (1). – P. 9–15.

13. Плаван В. П. Застосування танідів сумаху для поліпшення експлуатаційних властивостей шкір / В. П. Плаван // Вісник КНУТД. – 2010. – № 5. – С. 79–85.

14. Данилкович А. Г. Практикум з хімії і технології шкіри та хутра : навч. посіб. / А. Г. Данилкович. – 2 вид., перероб. і доп. – Київ : Фенікс, 2006. – 340 с.

15. Рибальченко В. В. Матеріалознавство виробів легкої промисловості. Методи випробувань : навч. посіб. / В. В. Рибальченко, В. П. Коновал, Е. П. Дрегуляс. – Київ : КНУТД, 2010. – 394 с.

16. Касьян Э. Е. Отечественные полифункциональные ускорители пропитки для грунтования кожи / Э. Е. Касьян, А. Г. Данилкович, В. И. Стадник // КОП. – 1987. – № 2. – С. 41–44.

References

1. Clay/polymer nanocomposites as filler materials for leather / J. S. Essomba et al. // J. of Cleaner Production. – 2019. – 237 (10). https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117837.

2. Preparation of reactive amphoteric polyurethane with multialdehyde groups and its use as a retanning agent for chrome‐free tanned leather / W. Xu et al. // JAPS. – 2019. – 136. https://doi.org/10.1002/app.47940.

3. rH-Sensitive and Chromium-Loaded Mineralized Nanoparticles as a Tanning Agent for Cleaner Leather Production / K. Li et al. // Sustainable Chem. Eng. – 2019. – 7 (9). – R. 8660–8669. DOI: 10.1021/acssuschemeng.9b00482.

4. Dzyazko Y. Nanophysics, Nanophotonics, Surface Studies, and Applications / Y. Dzyazko, Y. Volfkovich, N. Nikolskaya // Springer Proceeding in Physics: Hfrt IV. – 2016. – 183. – R. 277–290.

5. Nano-SiO2 oxazolidine combination tannage: Potential for chrome-free leather / L. Yan et al. // JALCA. − 2008. − 92 (6). − R. 252−257.

6. Nanocomposite based on erucic acid modified montmorillonite/sulfited rapeseed oil : Preparation and application in leather / B. Lyu et al. // Applied Clay Seience. − 2016. – 121. − R. 36–45. https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.12.021.

7. Nashy E. H. A. Novel retanning agents for chrome tanned leather based on emulsion-nano particles of styrene/butyl acrylate copolymers / E. H. A. Nashy et al. // JALCA. − 2011. − 106 (9). − R. 241–248.

8. Ma J. Z. Elasticity studies on leather retanned with various types of acrylic polymers / J. Z. Ma, H. Lu // JALCA. – 2008. – 103 (11). – R. 363–369.

9. Retanning Bioagent Used in Leather Processing and Process of Obtaining Thereof / R. R. Constantinescu et al. // Rev. Chim. – 2019. – 70 (11). – R. 3878–3880. https://doi.org/10.37358/RC.70.19.11.7663.

10. Gürler K. D. Possibilities of usage of alkali aluminosilicates as tanning material in chromium-free leather produgtion / K. D. Gürler, G. Gülümser // JTATK. – 2016. – 26(1). – R. 117–124.

11. Henna extract: can it be an alternative retanning agen? / A. E. Musa, B. Madchan et al. // JALCA. – 2008. – 103(6). – R. 188–193.

12. Combined organic tanning based on mimosa and oxazolidine: development of a semi-industrial scale process for high-qualiti bovine upper leather / A. D`Aquino et al. // JSLTC. – 2013. – 1 (1). – R. 9–15.

13. Plavan V. P. Zastosuvannia tanidiv sumakhu dlia polipshennia ekspluatatsiinykh vlastyvostei shkir / V. P. Plavan // Visnyk KNUTD. – 2010. – № 5. – S. 79–85.

14. Danylkovych A. H. Praktykum z khimii i tekhnolohii shkiry ta khutra : navch. posib. / A. H. Danylkovych. – 2 vyd., pererob. i dop. – Kyiv : Feniks, 2006. – 340 s.

15. Rybalchenko V. V. Materialoznavstvo vyrobiv lehkoi promyslovosti. Metody vyprobuvan : navch. posib. / V. V. Rybalchenko, V. P. Konoval, E. P. Drehulias. – Kyiv : KNUTD, 2010. – 394 s.

16. Kas'jan Je. E. Otechestvennye polifunkcional'nye uskoriteli propitki dlja gruntovanija kozhi / Je. E. Kas'jan, A. G. Danilkovich, V. I. Stadnik // KOP. – 1987. – № 2. – S. 41–44.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-94-102
УДК 637.5.02

DUBAS YURII
Lviv Polytechnic National University
https://orcid.org/0000-0002-9847-7661
e-mail: blabla304@gmail.com
KUNANETS NATALIIA
Lviv Polytechnic National University
https://orcid.org/0000-0003-3007-2462
e-mail: nek.lviv@gmail.com

USE OF ONTOLOGY IN INFORMATION SYSTEM TO ASSIST IN THE FORMATION OF AN INDIVIDUAL EDUCATIONAL TRAJECTORY OF STUDENTS

This work examines the problem of individual educational trajectory in Ukraine. During research, it was found that this issue is considered mainly from a theoretical aspect, which results in the lack of effective and convenient tools for practical implementations to solve the problem. The analysis of existing methods and means of solving the problem has been carried out. The results of the analysis indicate that the implemented information systems partially satisfy the needs of students in the formation of an individual trajectory.

Objective. Develop an information system model to help in the formation of an individual educational trajectory for students of higher educational institutions, taking into account the needs of leading IT companies and students' inclinations. Aiding students in the formation of an IET is based on a set of recommendations formed based on student preferences.

Method. To solve the problem information system model was developed, which uses two main modules to operate. First module allows its user to pass a career guidance test and second module provide the semantic algorithm to determine disciplines best suited for user based on his professional inclinations. Levenstein's algorithm using ontology was chosen as a semantic algorithm.

Results. During research information system was developed which allows students to receive recommendation for formation of individual educational trajectory. Conducted experiments with random input data had shown the system is fully functional and performing its task. All operational aspects of the system are presented in this work using UML diagrams.

Conclusions. Forming recommendations for an individual educational trajectory is a complex process that requires a significant amount of resources. The use of information technologies allows to simplify this process, and the development of an information system - to automate it and make it accessible. The implementation of the information system model made it possible to understand all the subtleties of the process of forming recommendations and ensure their accuracy. The operation of the information system was ensured by the use of two modules to determine the user's professional orientation and search for the appropriate discipline. The process of finding a discipline that will match the professional inclination of the user is based on work with semantics, for which the ontology was used. The use of ontology in the process of determining semantic proximity using the Levenshtein algorithm made it possible to obtain semantic units that are as close as possible to the student's professional inclinations and ensure the most accurate result when formulating recommendations.

Keywords: individual educational trajectory, information system, ontology, levenshtein distance.

ДУБАС ЮРІЙ, КУНАНЕЦЬ НАТАЛІЯ
Національний університет «Львівська політехніка»

ВИКОРИСТАННЯ ОНТОЛОГІЇ В ІНФОРМАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ ДЛЯ ДОПОМОГИ У ФОРМУВАННІ ІНДИВІДУАЛЬНОЇ ОСВІТНЬОЇ ТРАЄКТОРІЇ СТУДЕНТІВ

У цій роботі розглядається проблема формування індивідуальної освітньої траєкторії в Україні. Досліджуються варіанти та засоби вирішення проблеми та розглядається власне рішення з використанням інформаційних технологій та онтології.

Ключові слова: індивідуальна освітня траєкторія, інформаційна система, онтологія, відстань левенштейна.

Problem overview

The development of education is increasingly perceived as a condition and prerequisite for the qualitative development of the economy and the social sphere. Human capital plays an increasingly important role in the modern economy. This justifies the increase in budgetary investments in the education system. The complexity of human relations is increasing, which requires a new level of socialization of the younger generation. The complexity of the education system itself is increasing, which places new demands on teaching staff, their qualifications, and even on the quality of management in this area.

At the same time, getting an education requires more and more public and private expenses. In poor and developing countries, this growth is due to an increase in children's and youth's access to education (it is becoming more accessible), in developed countries - to an increase in the quality and diversity of educational trajectories, and individualization of educational programs.

In particular, the concept of Individual Education in Ukraine did not exist as such, and the corresponding law was only recently adopted. Recognition of the right of education seekers to an individual educational trajectory (IET) is one of the progressive innovations of the Law “On Education” (2017), which provides for “a personal way of realizing the personal potential of an education seeker, which is formed taking into account his abilities, interests, needs, motivation, opportunities and experience, is based on the choice of the education seeker of types, forms and

pace of education, subjects of educational activity and educational programs offered by them, educational disciplines and their level of complexity, methods and means of education" [1].

Such a law was necessary, because nowadays the priority goal is the development of competent specialists. Necessary qualities for such specialists are the ability for self-development and self-realization. Ensuring these factors is possible with an orientation to educational processes that involve taking into account the capabilities of each individual, their needs and freedom of choice. Thus, in our time, every student of education can expect to receive an education and choose an individual educational trajectory (IET).

Analysis of recent sources

Focusing on the problem of the formation of IET, we should, first of all, turn to sources that consider the process of implementing the functionality that could be used for its formation. This is due to the peculiarity of the concept of IET, which can be interpreted as follows: it's a personal path of personal development of the student's potential. This path is formed considering the abilities, interests, needs, motivation, abilities and experience of the applicant and is based on his chosen types, forms and pace of learning, educational programs, disciplines and their level of complexity, methods and teaching. An IET is also determined by an individual curriculum.

Accordingly, for the implementation of IET, a tool is needed that will take into account the personal characteristics of the applicant, his interests, needs or motivation, as well as provide further advice on choosing the appropriate educational institution.

Such a tool should be linked to the educational institution for better efficiency. The most common tools created for educational institutions are information systems, as their use in the fields of education is massive. This is due to the urgency of effective provision and organization of the education of pupils/students in the transforming education system, forming a new information mentality of all interested parties. Such rapid development requires constant monitoring and assessment of the state of the education system, which is based on the collection, processing of information, and analysis of educational data necessary to ensure the adoption of well-founded management decisions.

Several researchers described and substantiated the use of modern information technologies in education. The conducted analysis showed that modern information technologies give students access to non-traditional sources of information, increase the efficiency of independent work, provide completely new opportunities for creativity, finding and consolidating professional skills [2].

If we return to the consideration of sources while thinking about the functional implementation, it is possible to single out works of S. Sharov, A. Bogdanov, and Sh. Danyla [3–5].

Let us check the information system (IS) described in the work [3]. The process of formation of the trajectory is described as such, which involves the analysis of the curriculum of the specialty, familiarization with the annotations of the disciplines that are included in the curriculum, as well as the analysis of competencies that are formed in the process of studying specific disciplines [3]. The complexity of the process of forming an individual trajectory justifies the use of information systems to achieve results.

When developing the IS, the authors set themselves several tasks, among which the most important are:

- Creating a project of the structure of the IS.
- Selection of tools for IS development.
- Uploading official information about educational programs, users, etc. into the IS.

The most important functions of IS include the following:

- Creation, editing and approval of the curriculum for a specific educational program.
- The student's choice of disciplines by choice from the list of courses by choice of the curriculum.
- Formation of an individual study plan by the student.

Worth mentioning that different information technologies, such as the PHP programming language and the MYSQL database were used in the development of IS. The created system was implemented in the form of an interface program with full functionality according to the described methodology.

Another example is described in the article [4]. The information support system developed in this example is designed to help people who want to get an education for employment in creating IET, with the possibility of analyzing their current knowledge and skills and comparing them with the needs of the labor market [4]. The system is implemented using web technologies such as PHP and Javascript, and the design is developed using the Bootstrap framework.

A main feature of the system is its modularity and openness, which allows for further expansion or temporary use of modules of other systems [4]. A total of seven modules were developed:

- The main module (provides representative and general management functions).
- Communication module (ensures the possibility of free expansion of the system).
- The profession space module (ensures the possibility of registration and description of professions).
- Knowledge module (allows you to accumulate and systematize a list of knowledge).
- Module of skills (contains a list of possible users' skills).
- The knowledge determinant module (determines the level of professional knowledge of those seeking a profession).
- The ability determiner module (helps in choosing professions based on the individual characteristics of a person's abilities).

The analysis of these works showed that although the ISs were developed and performed the assigned tasks (formation of individual trajectories), none of them gives any recommendations when choosing disciplines and forming trajectories. All implemented systems only optimized the process of collecting and providing information to the user. Thus, when using such a system, the user is faced with a choice among dozens or even educational programs and disciplines without any help in their formation. Also, among the reviewed recommendation systems, the use of an ontological approach was not noticeable, which would allow obtaining more accurate results.

The last IS taken for consideration from the article [5] describes a recommendation system for personalizing the learning path. During the development of the system, various web technologies were used, such as JavaScript, AngularJS, Bootstrap. NoSQL DB technology - MongoDB was used for data storage. The developed recommender system uses hybrid filtering with more active use of content filtering and less active use of collaborative filtering. The algorithm consists of analyzing the preferences and interests of students and finding appropriate educational materials. Searching for content occurs in various ways, which are separated into separate functions. These functions use the built-in logic for determining the recommended weight, which is presented in the form of a transition graph. As a result, recommendations for the user are shown with a list of twenty educational materials. The user also has the opportunity to find out why this particular discipline was recommended to him and, accordingly, decline the recommendations and receive a new one.

Although this IS uses web technologies, which gives it certain advantages over other implementations, the algorithms used to determine and provide recommendations are far from what is necessary to solve the problem of IET formation. The input data for performing the analysis are the preferences of students and their interests, which is a meager amount of information in the process of forming IET. Such a limited analysis cannot be efficient and is unlikely to provide accurate results.

The purpose of the work is: the creation of an information system model that will assist in the formation of IET with the use of ontology.

Presentation of the main material

During the literature review, it was concluded that currently there are no competent existing IS capable of assisting in the formation of IET, which would use web technologies and data analysis at the same time. The complexity of the data analysis process lies in the peculiarities of the formation of IET, namely, finding disciplines that would satisfy the student. For this, it is necessary to conduct a data analysis that would take into account the characteristics of the student and his professional inclinations and would select the appropriate disciplines from educational and professional programs. With such ideas, the IS model for formation of IET was developed with the use of ontology. Additionally, the process of assisting in IET formation in the system is ensured thanks to the following modules:

1. Career orientation tests to determine the characteristics of students;
2. Algorithm for determining the semantic proximity between student's characteristics and disciplines from educational and professional program with the use of ontology.

There is also a system module that is responsible for creating a user profile and interaction between the IS and the database. Before considering the operation of each module in detail, it is necessary to determine the general characteristics and features of the system. In particular, the general scheme of the IS is shown in Fig. 1

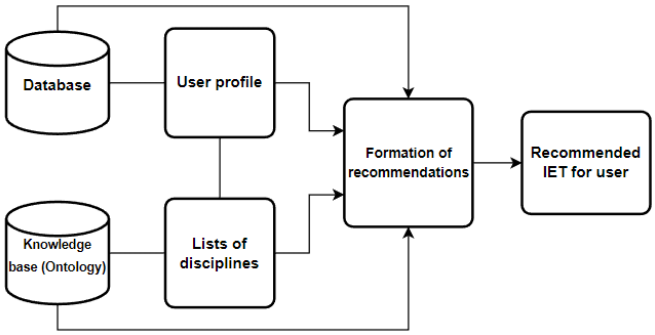


Fig. 1. General scheme of information system architecture

The corresponding model of the IS can be presented in the form of a three-element tuple:

$$S = \{A, V, R\}, \quad (1)$$

where $A = a_1, a_2, \ldots, a_n$ – a set of subjects (agents) of the recommender system, where students who use the system, teachers who form the knowledge base, and teachers who form IET act as agents; $V = v_1, v_2, \ldots, v_n$ – set of properties of agents, $R = r_1, r_2, \ldots, r_n$ – set of relations between agents (interaction) inherent in the subjects of the information system

The logic of the behavior of such agents is presented in the form of a graph of state transitions shown in Fig. 2 and reflects the process of forming IET:

1. Information system - Determines the behavior of the agent when using the system. The result of using the system is obtaining a list of necessary disciplines for the formation of IET.
2. Ontology - Defines the behavior of the agent when forming the knowledge base, which is used to form the list of disciplines (when determining the linguistic assessment of test results).
3. Individual educational trajectory - Determines the agent's behavior when forming it. The list of disciplines which will be included further, during formation of IET is obtained from the IS.

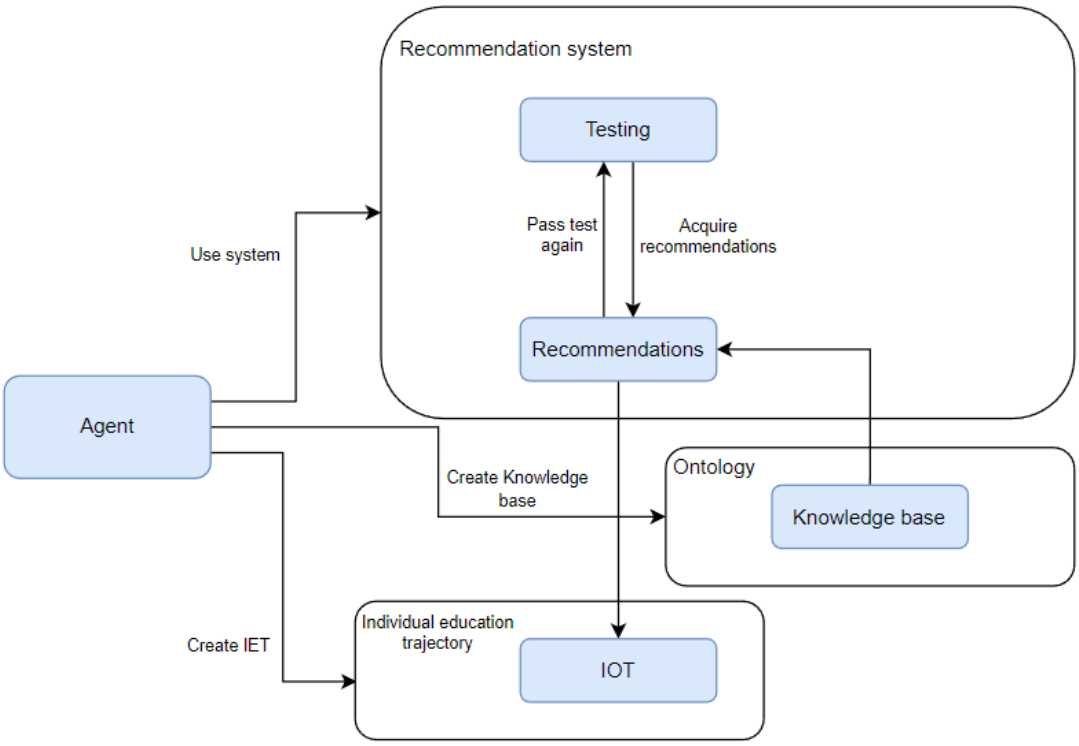


Fig. 2. State transition graph of IS agents

Accordingly, the following entities act as agents in IS: Student; the teacher who fills the database; the teacher who fills the Knowledge base.

All agents interact with each other through the processes that ensure the formation of IET. Formally, the interaction of agents can be presented in the form of a graph shown in Fig. 3.

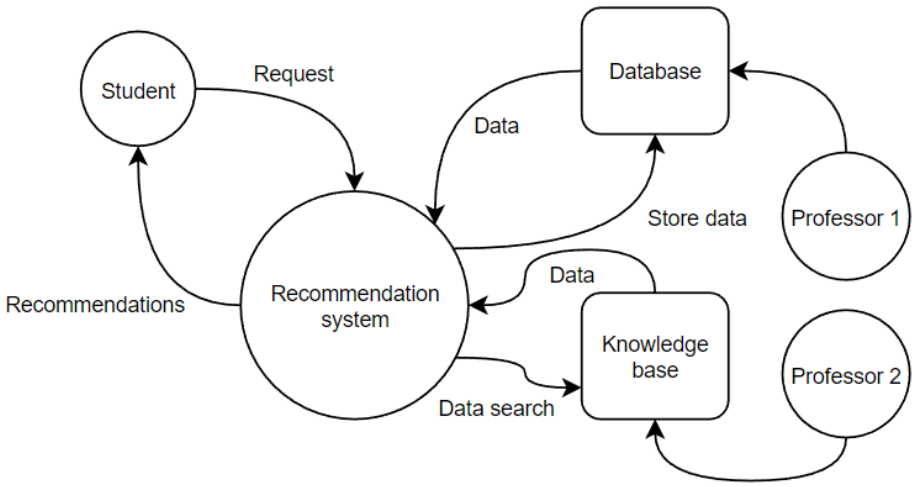


Fig. 3. Interaction of agents in the IS

With the interaction of agents in the system, we can proceed to an overview of the processes on which the system is based. For this, a diagram of the system activity was constructed, shown in Fig. 4.

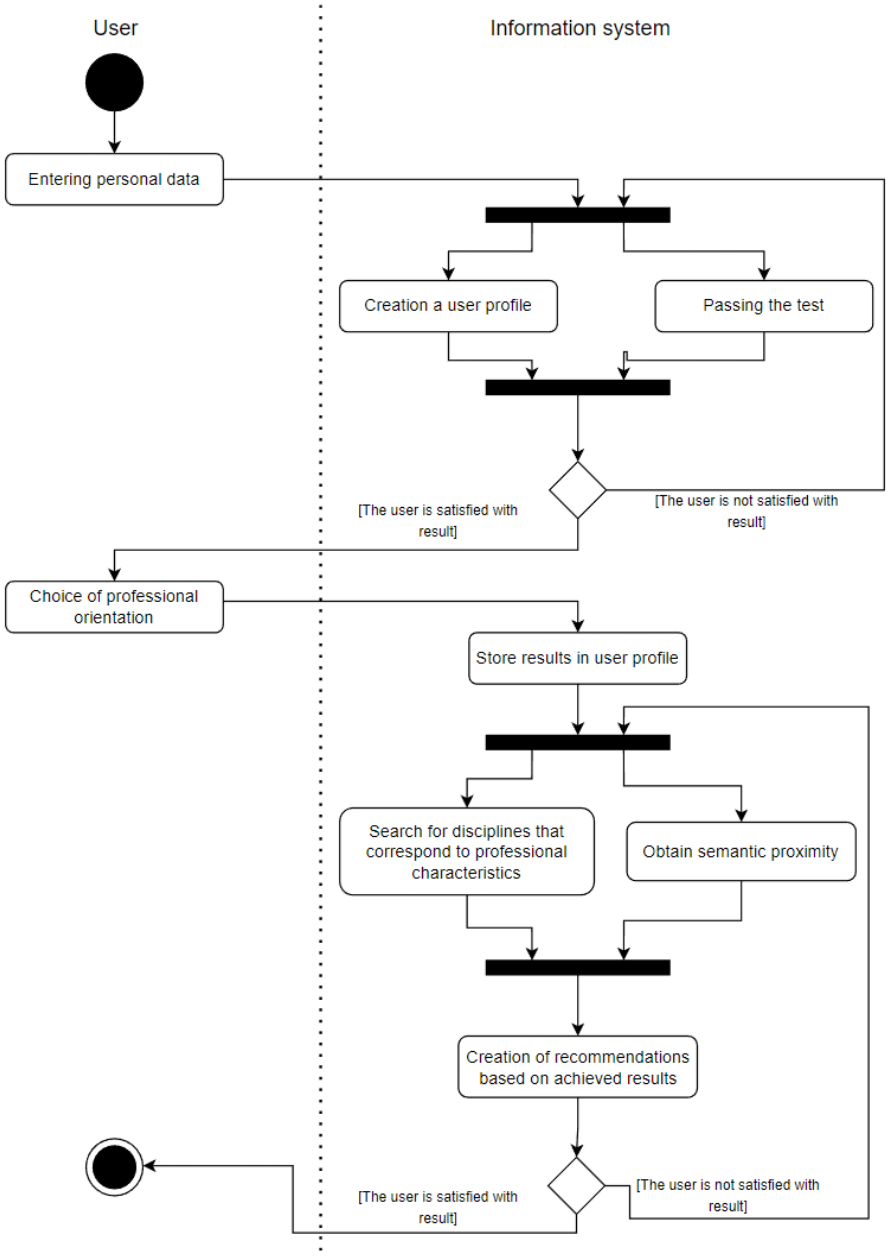


Fig. 4. Activity diagram of IS

In the process of performing its task, the IS uses three different tests to determine professional orientation. These tests offer the user (student) a number of questions to which he must provide an unambiguous answer (yes or no) or choose one of several answer options.

In general, the system uses the following tests to determine professional aptitudes:

- Questionnaire of professional orientation (QPO) of J. Holland [6, 7].
- Questionnaire of professional inclinations (QPI) of L. Yovaisha [8].
- Questionnaire for determining the type of profession (QDP) by E. Klimov [9–11].

J. Holland's method determines the degree of connection of an individual with the field of professional activity to which he has natural inclinations. There are six types of professional environment: realistic, intellectual, social, conventional, entrepreneurial, artistic [6].

L. Jovaisha's questionnaire of professional inclinations is aimed at identifying tendencies to work in various spheres, such as: sphere of art (man-artistic image); sphere of technical interests (man-technique); sphere of work with people (person-person); the sphere of mental work (inclinations to mental activity); the sphere of physical work (inclinations towards mobile, physical work); the sphere of material interests (production and consumption of material goods, planning and economic activity) [8].

The questionnaire for determining the type of future profession according to the methodology of E. Klimov is based on the theory that when choosing a profession, a person directs his thoughts first of all to what he will work with, i.e., to the subject of work, then to what he will do with it, i.e., for the purpose of work. Based on this, Klimov proposed to classify professions according to the following characteristics: subject, purpose, tools and working conditions [9–11].

Passing each test allows you to get a result in the form of a professional type of student. Next, the student is asked to choose one of the three professional types that were determined by the tests. A student can retake the test if he is not satisfied with the results. If he is satisfied, data is saved in the user profile, which is stored in the database of the recommendation system. The results of the test are professions that are available in the National Classifier of Professions. This will avoid ambiguity when receiving a result from three different sources and provide more accurate results if the user can choose what he likes best.

The professional type assigned to the student must be compared in terms of its compliance with the disciplines from DB and KB. The process of comparing these data is based on the definition of semantic proximity between words.

Semantic proximity is determined using the ontology in the developed IS. Using ontology is an option to prevent ambiguities, facilitate the implementation of sub-categories, and obtain more accurate results. Such advantages are caused by difficulties in structuring and systematizing data elements that meet the needs of the user.

Ontology is a detailed formalization of some domain of knowledge, presented with the help of a conceptual scheme. Such a scheme consists of a hierarchical structure of concepts, relationships between them, theorems and restrictions that are adopted in a certain software [12].

The ontology used in the work consists of keywords that correspond to disciplines from the work programs of courses in a higher education institution. The formal model of such ontology can be presented as follows:

$$O = \{B, C, X\}, \tag{2}$$

where B are terms of the subject area (discipline); C – the relationship between them (depends on educational and professional programs); X – interpretation functions (weight of disciplines assigned according to various criteria).

In general, ontologies are also defined as a knowledge base of a special kind, or as a “specification of conceptualization” of a subject area. The concept of a knowledge base is different from a database, as it operates on knowledge, not data. The difference between knowledge and data is that data is only a form of representation of knowledge, that is, knowledge is a much deeper and broader concept.

In this research, Levenshtein algorithm [13] was chosen to search for relevant concepts in the ontology for semantic similarity with the professional type assigned to the student. This algorithm allows to determine the minimum number of insertion, deletion and replacement operations necessary to transform one sequence of characters into another.

For the correct operation of the algorithm, it is necessary to obtain an ontological description of educational and professional programs and corresponding selective disciplines. The search and obtaining of the ontological description is carried out using the syllabus obtained from the website of the National University “Lviv Polytechnic”.

Also, it is necessary to convert the received professional inclination into appropriate professions. Dozens of different professions fall under each personality type defined in the test. Thus, there is an additional need to limit the number of professions that are given as inputs to the algorithm. To do this, you can offer the student to make a choice from those professions that he likes the most. Next, each of the professions chosen by the student must be broken down into concepts that describe the professions. The need to use such plurals for professional description is due to semantic ambiguity and limitations when directly comparing the names of professions with the elements of the ontological presentation of the content of the disciplines

After the actions described above, we calculate the measure of semantic closeness. Formally, the algorithm looks like this: let the given set be $P = p_1, p_2, \ldots, p_n$, where p is a profession obtained after student passed the career guidance test. Initially, the list of professions was larger, but later it was reduced to several professions, according to the student's choice. Next, for each element of P, we create a subset, for example, such subset would look like $p = c_1, c_2, \ldots, c_n$, where c is a concept that describe profession.

We conduct similar preparation with the ontology: the set $OP = op_1, op_2, \ldots, op_n$, where op is a discipline from the educational and professional program. Any educational and professional program has dozens of disciplines, even if limited only to selective ones. The ontological description of such disciplines is presented in the form of keywords (concepts), so we present each discipline as a set $D = d_1, d_2, \ldots, d_n$, where d is a keyword describing the discipline.

Then, with the algorithm at hands, we would perform following steps (in terms of using IS):

1. We perform calculations to determine the semantic distance between each element of P and OP using the Levenshtein algorithm;
2. Pairs of words, the numerical value of the distance between which is less than 3, are considered semantically close;
3. For the chosen educational and professional program, we proceed to the comparison of its disciplines with professions;
4. We calculate the distance between elements of P_n and D.
5. If the obtained numerical value of the distance is less than 3, we consider the discipline to which one of

the compared concepts belongs, semantically close to the profession keyword c. We repeat the process of calculating the distance until the disciplines end.

6. We record the received disciplines in the list and recommend the user to include them in an IET.

It is worth noting that the third step of the algorithm depends on the user's actions. After completing the first two steps of the algorithm, the user will be presented with a list of the most semantically relevant educational and professional programs. From this list, he should choose only one that he likes more.

We will conduct test calculations with random input data for a better understanding of the process. Suppose after user has passed the career guidance test, the system received the following set of professions: P = financier, logistician, IT specialist, economist, physicist. Relevant subsets of these professions:

- P_1 = finance, management, strategy, finance specialist.
- p_2 = logistics, management, systems, processes.
- P_3 = programming, computer engineering, software, computer systems.
- p_4 = economy, business processes, business development, economic system.
- p_5 = physics, nanomaterials, nanoelectronics, energy.

The set of educational and professional programs is unchanged and is obtained from the website of the National University "Lviv Polytechnic". The situation is similar with the disciplines, but it is worth noting that in the algorithm, as well as in the work, the main emphasis is placed on the selective components of the educational and professional program.

For test calculations, we will choose the following set of educational and professional programs (a random sample is limited to a few options for clarity and a simplified presentation of the algorithm's work). Also, for more accurate operation of the algorithm, in some cases, it is necessary to break the phrase into separate words:

OP = journalism, science of law, system programming, metallurgy, international economic relations.

Next, we calculate the distance between the descriptive words of the first profession and the first educational and professional program from the list according to the Levenshtein algorithm. The first educational program has the following keywords: text, communication, speech, dialog. Distance calculation:

- Distance between "finance" and "text" = 7.
- Distance between "management" and "text" = 8.
- Distance between "strategy" and "text" = 6.
- Distance between "specialist" and "text" = 8

According to the results of calculations, the considered pairs of concepts are not semantically close. We couldn't find a pair. Proceed with the next keyword:

- Distance between "finance" and "communication" = 11.
- Distance between "management" and "communication" = 11.
- Distance between "strategy" and "communication" = 11.
- Distance between "specialist" and "communication" = 10.

Similar results were obtained when comparing with the rest of the keywords. No semantic similarity was found. Let's move on to the comparison with the next educational and professional program "Science of law". This program is written with the following keywords: jurisprudence, legal system, legal space, humanization. Distance calculation:

- Distance between "logistics" and "jurisprudence" = 10.
- Distance between "management" and "jurisprudence" = 11.
- Distance between "systems" and "jurisprudence" = 11.
- Distance between "processes" and "jurisprudence" = 10.

The result is similar with the rest of the keywords, the semantic similarity has not been proven. We continue the comparison until we get a value that does not exceed the number of three. This value was obtained by comparing with the keywords of the educational and professional program "System Programming". Keywords are next: computer engineering, software engineering, system programming, system software, computer systems and networks, system software tools. The corresponding comparisons according to the Levenshtein algorithm:

- Distance between "programming" and "system" = 10.
- Distance between "programming" and "programming" = 1.
- Distance between "computer engineering" and "computer engineering" = 1.
- Distance between "software" and "system" = 6.
- Distance between "software" and "software" = 1.
- Distance between "computer systems" and "computer systems" = 1.
- Distance between "computer systems" and "networks" = 14.

Having received four semantically close keywords at once, the system enters this educational and professional program into the list for further recommendation to its user.

In a similar way, the semantic similarity with the educational and professional program "International Economic Relations" was determined. To continue the experiment with test data, it is necessary to simulate the user's choice between two educational programs.

Let's say, the student chooses an educational and professional program called "System Programming".

Then, consider the set of disciplines of this program with keywords:

- Designing operating systems, utilities and drivers = developing systems/utilities/drivers, designing systems/utilities/drivers, debugging systems/utilities/drivers, improving systems/utilities/drivers.
- Technologies of parallel programming = multiprocessor systems, parallel programming, parallel computing, message passing system.
- Directions of research and development of system programming = system programming, programming research, programming development.
- Research and design of network operating systems = operating systems, administration tasks, software for automated systems, analysis of operating systems, web server performance.
- Parallel programming of high-performance computer systems = parallel programming, high-performance information systems, high-performance systems architecture, high-performance software.

An example of calculating the distance between the keywords of the profession “IT specialist” and the optional disciplines of the educational program “System programming”:

- Distance between “programming” and “developing” = 8.
- Distance between “programming” and “designing” = 8.
- Distance between “programming” and “debugging” = 8.
- Distance between “programming” and “systems” = 10.
- Distance between “programming” and “multiprocessor” = 13.
- Distance between “programming” and “parallel” = 8.
- Distance between “programming” and “programming” = 0.
- Distance between “programming” and “computing” = 7.
- Distance between “programming” and “research” = 9.
- Distance between “programming” and “software” = 10.
- Distance between “programming” and “automated” = 10.
- Distance between “programming” and “operating” = 6.
- Distance between “programming” and “high-performance” = 13.
- Distance between “programming” and “architecture” = 11.
- Distance between “programming” and “information” = 9.

According to the results of calculations, we get the following pairs of words, which can be considered semantically close:

- “programming” and “programming”.
- “systems” and “systems”.
- “software” and “software”.

Key words from the obtained word pairs belong to the disciplines “Directions of research and development of system programming”, “Parallel programming of high-performance computer systems” and “Technologies of parallel programming”. Accordingly, we can recommend these disciplines from the educational and professional program “System programming” for inclusion in the student's IET.

If the user is not satisfied with the recommendations received, he can take the test again and start the process of generating recommendations again. If the results suit the user, they will be formed in the form of a recommendatory list of disciplines. The user can then send the results obtained to any external service for the further aid in formation of IET.

Conclusions

The article analyzed the current scientific task of forming an IET, considered existing examples of solving the problem, and proposed a way to solve it in the form of an IS model for forming IET. During the research, information system with the use of ontology was developed. It was tested with random input data, which demonstrated high accuracy of the results

The scientific novelty of obtained results is that the ontology was used in the development of information system. The peculiarities of the problem of generating recommendations for an individual trajectory require not the data filtering tool used in most recommender systems, but a powerful semantic basis for the selection and search of disciplines that satisfy the student. Such a tool can be considered an ontology of keywords belonging to selective disciplines in educational and professional programs.

The practical significance of obtained results is that the information system for the formation of recommendations was developed. The conducted test calculations demonstrated the high accuracy of the data selection and search process for the formation of recommendations, which was achieved thanks to the use of the ontology.

Prospects for further research will be directed to the modification of the algorithm for determining semantic proximity, use of additional tools to increase recommendation accuracy even more and the practical implementation of the IS. It is planned to use web technologies to ensure relevance, availability and uninterrupted operation of the system.

Література

1. Про освіту : Закон України від 05.09.2017 № 2145-VIII. URL: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2145-19.

2. Любович А. А. Сучасні інформаційні технології в освіті / А. А. Любович, О. Г. Єсіна // Інформатика та інформаційні технології : студ. наук. конф., 20 квітня 2015 р. – Одеса : ОНЕУ. – С. 118-120.

3. Інформаційна система формування індивідуальної освітньої траєкторії студентів. URL: https://www.researchgate.net/publication/354577447_Information_System_for_the_Formation_of_Students'_Individual_Educational_Trajectory.

4. Система інформаційного забезпечення процесу формування індивідуальної освітньої траєкторії студентів. URL: https://journal.iitta.gov.ua/index.php/itlt/article/view/1390/1062.

5. Система рекомендації навчальних матеріалів для персоналізації навчального шляху. URL: https://core.ac.uk/download/pdf/323532858.pdf.

6. Holland John L. Making vocational choices: A theory of careers. Prentice Hall, 1973.

7. Holland J.L., Gottfredson G.D., Bacer H.G. Validity of vocational aspiration and interests of inventories: Extended replicated and reinterpreted. Journal of Consulting Psychology. 1990. Vol. 37. P. 337-342.

8. Йовайши Л. Опитувальник професійних нахилів. URL: http://prevolio.com/tests/.

9. Климов Е. А. Как выбирать профессию / Е. А. Климов. – Москва : Просвещение, 1990. – 159 с.

10. Климов Е. А. Образ мира в разнотипных профессиях / Е. А. Климов. – Москва : Изд-во МГУ, 1995. – 224 с.

11. Резапкина Г. В. Психология и выбор профессии: программа предпрофильной подготовки : [учеб.-метод. пособие для психологов и педагогов] / Г. В. Резапкина. – Москва: Генезис. 2005. – 208 с.

12. Gruber T. A translation approach to portable ontologies. Knowledge Acquisition. 1993. № 5 (2). P. 199–220.

13. Відстань Левенштейна. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Відстань_Левенштейна

References

1. Law of Ukraine "On Education" dated 05.09.2017 No 2145-VIII. URL: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2145-19.

2. Lyubovych A. A. Modern information technologies in education / A. A. Lyubovych, O. G. Yesina // Informatics and information technologies: stud. Sc. Conf., April 20, 2015: mater. Conf. – Odesa, ONEU. – P. 118-120.

3. Information system for forming individual educational trajectory of students. Available at: https://www.researchgate.net/publication/354577447_Information_System_for_the_Formation_of_Students'_Individual_Educational_Trajectory.

4. The information support system of the process of forming the individual educational trajectory of students. Available at: https://journal.iitta.gov.ua/index.php/itlt/article/view/1390/1062.

5. System of recommendation of educational materials for personalization of educational path. Available at: https://core.ac.uk/download/pdf/323532858.pdf.

6. Holland John L. Making vocational choices: A theory of careers. Prentice Hall, 1973.

7. Holland J. L. Validity of vocational aspiration and interests of inventories: Extended replicated and reinterpreted / Holland J.L., Gottfredson G.D., Bacer H.G. // Journal of Consulting Psychology. – 1990. – Vol. 37. – P. 337-342.

8. Questionnaire of professional inclinations of L. Yovaisha. http://prevolio.com/tests/.

9. Klimov E. A. How to choose a profession. Moscow: Enlightenment, 1990. 159 p.

10. Klimov E. A. The image of the world in different types of professions. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1995. 224 p.

11. Rezapkina G.V. Psychology and choice of profession: pre-profile training program: [learning method. manual for psychologists and teachers]. Moscow: Genesis. 2005. 208 p.

12. Gruber T. A translation approach to portable ontologies. Knowledge Acquisition. 1993. № 5 (2). P. 199–220.

13. Wikipedia. Levenstein distance. https://uk.wikipedia.org/wiki/Відстань_Левенштейна

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-103-107
УДК 544.77.051.62

ЄФІМОВА ВЕРОНІКА
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
https://orcid.org/0000-0003-2372-8398
e-mail: yefimovavg@gmail.com
ЛУЦЕНКО ТЕТЯНА
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
https://orcid.org/0000-0001-8467-7219

РОЗРОБКА СКЛАДУ ЛІКУВАЛЬНО-ПРОФІЛАКТИЧНОЇ ЗУБНОЇ ПАСТИ З ЕКСТРАКТОМ ШАВЛІЇ, ЯЛІВЦЮ ТА РОМАШКИ

В статті проведено розробку рецептури лікувально-профілактичної зубної пасти з використанням CO_2 екстракту шавлії, ромашки та ялівцю. У роботі було встановлено вплив технологічних режимів екстракції на склад готового продукту, а саме вплив температури. Визначено співвідношення екстрактів у готовому продукті, а також встановлено компоненти та їх співвідношення у основі зубної пасти шляхом визначення реологічних властивостей.

Ключові слова: CO_2, екстракт шавлії, ромашки та ялівцю, лікувально-профілактична зубна паста, в'язкість, кислотне число, екстракція.

YEFIMOVA VERONIKA, LUTSENKO TETYANA
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

DEVELOPMENT OF THE COMPOSITION OF THE MEDICAL AND PREVENTIVE TOOTHPASTE WITH EXTRACT OF SAGE, JUNIPER AND CHAMOMILE

Currently, the trend in the cosmetics industry is to produce natural, ecological products with the preservation of the most complete set of components of the raw materials. The work is devoted to the development of the composition of therapeutic and preventive toothpaste with CO_2 extracts of sage, chamomile and juniper. The extracts included in the toothpaste formulation were obtained using supercritical carbon dioxide extraction. In order to choose the optimal conditions for the extraction, we found out the influence of the technological modes of the process on the composition of the extracts. For this purpose, at the first stage, a series of studies on the dependence of the quantitative yield of extracts on pressure was carried out. On the basis of experimental data, the optimal conditions for supercritical fluid extraction were determined. At the second stage of the research, the influence of temperature on the composition of supercritical fluid extracts of sage was studied, which made it possible to determine the temperature parameter of the process. The optimal ratio of extracts in the composition of therapeutic-prophylactic toothpaste has been established.

The next stage of research was the selection of the base of the toothpaste, namely an abrasive component that combines a high cleaning capacity with a low abrasion capacity and a thickener (Blanose 7M3 IF). To determine the composition of the toothpaste base, the rheological characteristics of seven formulations of the base, which was obtained from an abrasive component, a thickener, and glycerin, were determined.

The toothpaste system is an emulsion-suspension, which during storage can excessively thicken or delaminate, therefore, in order to predict the stability of the rheological properties of the paste, we conducted experiments on the storage of the toothpaste base at a temperature of 25°C for 1.5 months. The work shows that the base of the toothpaste acquires indicators of constant viscosity on the 13-14th day from the moment of release.

As a result of the work carried out, a formulation of toothpaste for therapeutic and preventive purposes was developed. In order to confirm the quality of the finished cosmetic product, we examined it according to physic-chemical indicators, namely, appearance, color, smell, taste and hydrogen index (pH).

Keywords: CO_2 extract of sage, chamomile and juniper, therapeutic and preventive toothpaste, viscosity, acid number, extraction.

Вступ

Розробка нових технологій для виготовлення конкурентоспроможних косметичних виробів з високою споживчою, біологічною цінністю та тривалим терміном зберігання є найперспективнішим напрямком розвитку косметичної промисловості. З цього приводу найбільшу зацікавленість представляють вироби, що призначені для гігієни порожнини рота, які використовуються кожен день. Для забезпечення статусу зубної пасти як лікувально-профілактичного виробу необхідна актуалізація біологічного та лікувально-профілактичного складу даних виробів.

На теперішній час багато уваги приділяється пошуку нових біологічно активних компонентів. Пошук та порівняльне вивчення властивостей синтетичних та природних речовин, а також їх сумішей являє собою актуальну задачу.

Практичне значення при цьому набуває пошук та порівняльне вивчення властивостей, збереження первинної якості зубних паст на протязі всього строку придатності. Розробка та виготовлення косметичної продукції з визначеними лікувально-профілактичними властивостями полягає у обранні необхідного складу не тільки біологічно активних речовин, але і компонентного складу рецептури. Такій підхід до вирішення проблеми дає можливість отримати інноваційні косметичні продукти з новими властивостями.

Статус лікувально-профілактичної зубної пасти визначається не тільки основою продукту, але і наявністю в ній активних інгредієнтів зі специфічними біологічними властивостями. На теперішній час у косметичній галузі складається тенденція виробництва натуральної, екологічно чистої продукції зі збереженням максимально повного набору компонентів вихідної сировини.

Отже розробка рецептури лікувально-профілактичної зубної пасти з екстрактами корисних рослин є актуальною задачею.

Постановка завдання

Багато зубних паст мають у своєму складі CO_2 екстракти цілющих рослин, які чинять лікувально-профілактичний ефект. В цьому напрямку постійно відбуваються інноваційні розробки ефективних рецептур зубних паст, що містять їх у своєму складі. Тому метою нашої наукової роботи було:

1) розробка рецептури основи зубної пасти;
2) підбір CO_2 екстрактів та визначення їх співвідношення у рецептурі зубної пасти;
3) вивчення фізико-хімічних характеристик косметичного продукту, склад якого було розроблено.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Застосування лікувально-профілактичних зубних паст є самим розповсюдженим засобом гігієни порожнини рота. Зубні пасти забезпечують очищаючу дію, а також доставку різних активних інгредієнтів природного походження.

За даними наукових досліджень статус лікувально-профілактичного продукту, зокрема зубної пасти, визначається не тільки основним продуктом, але і наявністю у ньому активних інгредієнтів зі специфічними біологічними властивостями [1–3]. На теперішній час у косметичній галузі складається тенденція виробництва натуральної, екологічної продукції зі збереженням максимально повного набору компонентів вихідної сировини. Рослинні CO_2 екстракти найбільш повно відповідають цим вимогам, оскільки є джерелом функціональних інгредієнтів.

Аналіз стану і напрямок розвитку технологій обробки рослинної сировини [3, 4] показав, що найперспективнішим з цієї точки зору є використання CO_2 екстрактів цілющих рослин.

Мета і завдання дослідження

Розробка рецептури лікувально-профілактичної зубної пасти, що містить у своєму складі абразивні та загущуючи компоненти та CO_2 екстракти ромашки, шавлії та ялівцю та дослідження фізико – хімічних властивостей готового продукту.

Виклад основного матеріалу

У даному дослідженні ми використовували у якості біологічно активних речовин CO_2 екстракти, що були отримані за допомогою надкритичної вуглекислотної екстракції. Для роботи ми відібрали екстракти, які мають цільові біологічні функції, а саме кровоспинну і протизапальну дію, і як наслідок ранозагоювальну і регенеруючу властивості: екстракти ромашки, шавлії, ялівцю.

Для вибору оптимальних умов проведення екстракції необхідно було з'ясувати вплив технологічних режимів процесу на склад екстрактів. З цією метою спочатку було проведено серію досліджень залежності кількісного виходу екстрактів від тиску. На підставі експериментальних даних було визначено оптимальні умови проведення надкритичної флюїдної екстракції за тиску 400 атм.

У ході подальших досліджень було вивчено вплив температури на склад надкритичних флюїдних екстрактів шавлії. Дослідження здійснювалися в інтервалі температур від 40 до 80°С. В результаті проведених досліджень було встановлено, що екстракти, отримані за температур 40, 60 і 80°С є принципово різними комплексами. Показники якості та вміст основних біологічно-активних речовин екстракту шавлії наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Показники та склад екстракту шавлії, що отриманий за різних температур

Найменування показника і склад екстрактів	Температура екстракції		
	40 ^{0}С	60 ^{0}С	80 ^{0}С
Кислотне число, мг КОН/г	47,5-49,0	89,5-91,0	98,5-100,0
Показник заломлення	1,473-1,476	1,464-1,469	1,474-1,478
Токофероли (вітамін Е), мг %	41,2-42,3	37,8-38,9	21,8-22,4
Каротиноїди (провітамін А), мг %	1,41-1,45	0,95-1,0	0,78-0,99
Жирні кислоти, % до суми:	5,9	18,3	26,3
пальмітинова	1,8	1,4	1,3
стеаринова	40,6	33,4	31,5
олеїнова	3,0	27,3	31,7
лінолева	1,8	2,5	3,4
ліноленова			

Дані таблиці 1 свідчать, що температура 40 ^{0}С є мінімальною за якою здійснюється екстракція.

Отже на основі аналізу отриманих даних (табл. 1) для отримання CO_2 екстракту температурний параметр ведення процесу необхідно підтримувати на рівні 60 ^{0}С.

У таблиці 2 та 3 наведено якісні показники екстракту ромашки та ялівцю, які отримані при проведенні процесу екстракції за температури 60 ^{0}С.

Наступним етапом наших досліджень було вибір основи зубної пасти, яка складається з абразивного компонента та загущувача.

В даний час новий підхід до зубних паст, як до лікувально-профілактичних виробів визначив використання силікатних абразивних компонентів, які поєднують в собі високу очищувальну здатність

поряд з низькою здатністю до стирання. Силікати використовують для контролю реології складу зубних паст та для сприяння видаленню з поверхні зубів у процесі їх очищення зубного нальоту залишків їжі. Їхня аморфна структура, інертні поверхневі властивості, низький індекс заломлення, здатність до розподілу на окремі частини – все це зробило сполуки кремнію ідеальними для використання у зубних пастах. Вони мають високий рівень сумісності з іншими компонентами паст, особливо з їх активними інгредієнтами, можуть бути невидимі у прозорих складах. Фізико-хімічні показники силікату, який ми використовувала у наших дослідженнях наведено у таблиці 4.

При виборі загущувача для зубної пасти ми враховували наступні параметри: сумісність з іншими інгредієнтами пасти та вартість пасти. Для наших експериментів була обрана високоочищена карбоксиметилцелюлоза (КМЦ) харчового ґатунку. На наш ринок цей продукт поставляється численними фірмами. Нами було проведено порівняльні випробування даного продукту різних фірм на модельних основах зубних паст від 0,5 до 1,5%, де в якості абразивної складової використовувався діоксид кремнію у кількості 21,0%. У таблиці 5 наведено реологічні властивості індивідуальних розчинів КМЦ та основ зубних паст з різною концентрацією цього компоненту в основі.

Таблиця 2

Якісні показники CO_2 екстракту ромашки

Найменування показника і склад екстрактів	Значення показників
Кислотне число, мг КОН/г	45,5-47,0
Показник заломлення	1,475-1,479
Токофероли (вітамін Е), мг %	98,5-100,0
Ефірне число, мг КОН/г	76,5-79,3
Ефірне масло, %	5,3-6,3

Таблиця 3

Якісні показники CO_2 екстракту ялівцю

Найменування показника і склад екстрактів	Значення показників
Кислотне число, мг КОН/г	46,3-48,1
Показник заломлення	1,485-1,511
Токофероли (вітамін Е), мг %	97,3-98,8
Ефірне число, мг КОН/г	74,2-75,1
Ефірне масло, %	5,6-7,2

Таблиця 4

Фізико-хімічні показники діоксиду кремнію

Показник	Діоксид кремнію, SiO_2
Розмір частинок, мкм	1,0-1,5
Показник рефракційного індексу	1,46
Волога %	1,0
Показники, що контролюються в основі зубної пасти	
Вміст у рецептурі зубної пасти, %	20,0-21,0
Вязкість, Па·с	160-170

За результатами проведеного експерименту на модельних системах було визначено перспективну марку та концентрацію введення в рецептуру загусника. До подальшого дослідження було взято зразки під номером 2, 5 та 6, де концентрація загусника склала 1%, а критерієм вибору була порівняльна оцінка з еталоном, яким був основа зубної «М'ята» українського виробника DeLaMark, в'язкість якої на 24 години після виробництва становить 340-380 Па·с, яка за реологічними властивостям відповідає ДСТУ 2472–2006 та повинна зберігатися протягом усього терміну придатності. Система зубної пасти є емульсією-суспензією, яка у процесі зберігання може надмірно загущуватися або розшаровуватися, тому для прогнозування стабільності реологічних властивостей пасти, нами проведено досліди щодо зберігання основи зубної пасти за температури 25°С протягом 1,5 місяців.

Результати проведених досліджень показали, що зразки під номером 2 та 6 дали результати вище, ніж порівняльні і лежать в межах 550-750 Па·с, коли як для зразка 5 в'язкість не відповідає еталону і становить нижче 300 Па·с.

Таким чином, нами було встановлено, що основа зубної пасти набуває показників постійної в'язкості на 13-14 день з моменту випуску. Поряд з цим, зразок 6 до кінця терміну зберігання мав в'язкість понад 700 Па.с, що призводило до ускладнення видавлювання зубної пасти з індивідуального упакування. Також аналіз результатів показав перспективність використання в основі як Blanose 7M31F, так і Walocel CRT, проте враховуючи економічні аспекти, для цих робіт був обраний зразок Blanose 7M3 IF.

Як відомо, якість зубної пасти безпосередньо пов'язана з рецептурним складом основи. Отже основою зубної пасти ми обрали діоксид кремнію Blanose 7M3 IF та гліцерин. Для визначення оптимального складу основи зубної пасти нами було реалізовано один із планів дослідження залежності властивостей 3-х

компонентної системи від співвідношення компонентів. Як критерій оптимізації прийнята в'язкість суспензії у Па·с.

Таблиця 5

Вивчення реологічних характеристик індивідуальних розчинів КМЦ та основ зубних паст з введенням останнього

№ п/п	Торгова назва згущувача	Назва за INKI	Реологічні властивості розчинів			
			КМЦ, в'язкість розчину 2% за температури 25^0С мПА·с	Основа зубної пасти за температури 25^0С мПА·с		
				Концентрація,%		
				0,5	1,0	1,5
1	Blanose 7MF	Carboxymethyl cellulose sodium	400	240	340	420
2	Blanose7M31F	Carboxymethyl cellulose sodium	2300	300	500	700
3	Natrosol S	Hydroxyethyl cellulose	400	260	300	480
4	Natrosol 250MR	Hydroxyethyl cellulose	600	260	300	500
5	Natrosol R	Hydroxyethyl cellulose	800	280	340	500
6	Walocel CRT	Carboxymethyl cellulose sodium	600	260	360	480
7	Walocel HM	Hydroxypropylmethylprophyll cellulose	500	240	300	470

Дослідження показали, що основа зубної пасти буде мати наступний вміст компонентів: діоксид кремнію в межах 0,2 - 0,8; гліцерин в межах 0,2 - 0,25; Blanose 7M3 IF в межах 0,03 - 0,25.

Концентрація введення композиції біологічно активних речовин ($C0_2$-екстракти шавлії : ромашки : ялівцю = 0,5:1,0:0,5) в основу пасти визначено в кількості 1,6%, згідно з дозами, що застосовуються для профілактичних цілей. Рецептура зубної пасти представлена у таблиці 6.

Таблиця 6

Рецептура розробленої зубної пасти та її фізико-хімічні показники

Компоненти	Концен-трація, %	Фізико-хімічні показники		
		За ДСТУ 2472–2006	Норма	Дані, що отримані
Діоксид кремнію	18-20	Зовнішній вигляд	Однорідна маса, що утримується на поверхні зубної щітки, не проникаючи вглиб щетини	Відповідає
Гліцерин	16-19	Колір	Властивий кольору пасти даного найменування	Відповідає
Blanose 7M3 IF	0,5-0,8	Запах	Властивий кольору пасти даного найменування	Відповідає
Na лаурилсульфат (100%)	1,0-1,5	Смак	Властивий кольору пасти даного найменування	Відповідає
Консервант	0,3-0,6	Водневий показник (pH)	5,5-10,5	6,8
Двоокис титану пігментний	0,1-0,3	Масова частки суми важких металів, % не більш	0,002	0,001
Комплекс БАР	1,4-1,7	Масова частка фторида (в перерахунку на молярну масу фтору), %	0,05-0,15	0,1
Віддушка	0,15-0,25	Масова частка фторида (в перерахунку на молярну масу фтору), в одиниці упаковки, мг, не більш	300	300
Вода	До 100			

Висновки

В результаті проведеної роботи було розроблено рецептуру лікувально-профілактичної пасти, а саме, було обрано у якості біологічно активних речовин CO_2 екстракти ялівцю, шавлії та ромашки, а також встановлено їх співвідношення у складі зубної пасти. Визначено і обґрунтовано застосування основних компонентів основи у складі зубної пасти.

References

1. Senthilkumar S., Venkateswaran A. Formulation development and evaluation of novel herbal toothpaste from natural source. International Journal of Pharmaceutical Chemistry and analysis. 2022. Vol. 9(1). p. 17–21.

2. Phalke P.L., Rukari T. G., Jadhav A. S. Formulation and evaluation of toothpaste containing combination of aloe and sodium chloride. International Journal of Pharmaceutical Science and research. 2019. Vol. 10 (3). p. 1462–1467.

3. Hidayaturrahman A., Asidiki H., Sari N., Harismah K. Development of Herbal Toothpaste Formulation with Combination of Binahong and Stevia (Stevia Rebaudina) Leaves Extract and Lemon Juice. Journal of Nutraceuticals and Herbal Medicine. 2020. Vol. 3 (1). p. 15–22.

4. Priyal G., Maji J., Shruti N., Vidya P., Sudeendra P. Evaluation of efficacy of different tooth paste formulations in reducing the oral microbial load. An in vivo study, Biomedicine. 2021. Vol.41(2). p. 465-471.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-108-112
УДК 519.6:001.5

ЗАВГОРОДНІЙ ОЛЕКСІЙ
Державний біотехнологічний університет
https://orcid.org/0000-0003-2510-9160
e-mail: alexey.z.2014@gmail.com
ЛЕВКІН ДМИТРО
Державний біотехнологічний університет
https://orcid.org/0000-0002-1980-4426
e-mail: dimalevkin23@gmail.com
МАКАРОВ ОЛЕКСАНДР
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
https://orcid.org/0000-0002-9050-4987
e-mail: makarovifamily07@gmail.com
КОТКО ЯНА
Державний біотехнологічний університет
https://orcid.org/0000-0001-6611-8130
e-mail: kotkoyana@ukr.net

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРАХУНКОВИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

В теорії аналізу і синтезу технічних систем важливе місце посідають математичне моделювання і оптимізація багатошарових систем, які містять джерела дії фізичних полів. Це пов'язано з тим, що їх стан описується за допомогою крайових задач з багатовимірними диференціальними рівняннями. Для розв'язання крайових задач і реалізації процесу оптимізації технічних параметрів модельованих систем необхідно провести міждисциплінарні дослідження розрахункових і прикладних оптимізаційних математичних моделей. Виконання умов існування єдиного розв'язку крайових задач за умовчанням можливо лише, коли об'єкт дослідження – це одношаровий матеріал під дією джерел навантаження. Якщо ж потрібно здійснити розрахунок і оптимізацію технічних параметрів багатошарового матеріалу, на який діють джерела навантаження, тоді неможливо одразу гарантувати коректність розрахункових і прикладних оптимізаційних математичних моделей, адже потрібно отримати умови існування і єдиності розв'язку крайових задач з системами диференціальних рівнянь. Максимізація ж технічних параметрів джерел навантаження та усереднення характеристик шарів матеріалу призведе до отримання приблизних значень функції мети і технічних параметрів модельованої системи, що спонукає до нераціонального витрачення енергетичних, теплових ресурсів і неконтрольованих, марних втрат піддослідного матеріалу при забезпеченні технологічного процесу.

В статті отримані умови коректності багатоточкових крайових задач з багатовимірними диференціальними рівняннями, які описують стан багатошарового матеріалу під термічною дією. Наведені дослідження доцільно використати для обґрунтування коректності інших технічних і біотехнологічних систем, що дозволить збільшити точність реалізації прикладних оптимізаційних задач економіко-математичного моделювання.

Ключові слова: технічні системи, математичні моделі, крайові задачі, коректність.

ZAVGORODNIY OLEXIY, LEVKIN DMYTRO, KOTKO YANA
State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine
MAKAROV OLEXANDER
V.N. Karazin Kharkiv National University[3], Kharkiv, Ukraine

RESEARCH OF COMPUTATIONAL MATHEMATICAL MODELS FOR TECHNICAL SYSTEMS

In the theory of analysis and synthesis of technical systems, mathematical modelling and optimization of multilayer systems containing sources of physical fields occupy an important place. This is due to the fact that their state is described by means of boundary value problems with multidimensional differential equations. To solve the boundary value problems and implement the process of optimizing the technical parameters of the modelled systems, it is necessary to conduct interdisciplinary studies of computational and applied optimization mathematical models. Fulfilment of the conditions for the existence of a single solution to boundary value problems by default is possible only when the object of study is a single-layer material under the action of load sources. If it is necessary to calculate and optimize the technical parameters of a multilayer material subjected to load sources, then it is impossible to immediately guarantee the correctness of the calculated and applied optimization mathematical models, since it is necessary to obtain the conditions for the existence and uniqueness of solutions to boundary value problems with systems of differential equations. Maximizing the technical parameters of load sources and averaging the characteristics of material layers will lead to approximate values of the objective function and technical parameters of the modelled system, which leads to irrational consumption of energy and heat resources and uncontrolled losses, and useless losses of the test material in the technological process.

The article presents the conditions for the correctness of multipoint boundary value problems with multidimensional differential equations describing the state of a multilayer material under thermal action. It is advisable to use these studies to substantiate the correctness of other technical and biotechnological systems, which will increase the accuracy of the implementation of applied optimization problems of economic and mathematical modelling.

Keywords: technical systems, mathematical models, boundary value problems, correctness.

Постановка проблеми

В умовах економії енергетичних і виробничих ресурсів для забезпечення технологічного процесу теплопереносу в багатошаровому матеріалі актуальною є задача розробки нових і підвищення точності та швидкості реалізації існуючих математичних моделей, чисельних методів і обчислювальних пристроїв для розрахунку і оптимізації параметрів модельованих систем. Це можливо здійснити за рахунок збільшення рівня деталізації систем, що потребує обґрунтування коректності крайових задач, які описують їх стан. Відзначимо, що в основі розрахункової математичної моделі, яка описує теплофізичну систему «багатошаровий матеріал – джерело термічного навантаження» лежить багатоточкова крайова задача для системи диференціальних рівнянь теплопровідності. Для крайової задачі, де враховані особливості шарів матеріалу і теплові режими нагріву, неможливо гарантувати існування і єдиність розв'язку. Це означає, що необхідно визначити чи будуть вихідні дані визначати розв'язок в певних функціональних просторах і чи будуть незначним змінам вихідних даних в диференціальних рівняннях і в крайових умовах відповідати незначні (у відповідній метриці) зміни розв'язків, тобто обґрунтувати умови коректності крайової задачі.

Для знаходження умов коректності багатоточкової крайової задачі в багатошаровому середовищі доцільно використати теорію диференціальних і псевдодиференціальних операторів в функціональних просторах. В статті досліджена коректність багатоточкової крайової задачі технологічного процесу теплопереносу в багатошаровому матеріалі при термічній дії. Автори отримали результат, що умова рівномірної обмеженості фундаментальної функції розв'язків – це необхідна і достатня умова коректності неоднорідної крайової задачі в багатошаровому середовищі. Результати цієї статті доцільно застосувати для підвищення точності розрахунку і оптимізації параметрів інших технічних і біотехнологічних систем.

Аналіз останніх досліджень

Здійснивши всебічний, детальний аналіз структури і особливостей функціонування окремих елементів енергетичних систем в Україні та за кордоном, в публікаціях [1–4] відзначені методи підвищення їхньої ефективності керування в умовах ринкових відносин. Авторами публікацій [1, 2] розроблена методика для енергозбереження та збільшення точності прогнозування споживання вугілля і природнього газу в Україні в зимовий період. Вона включає до себе математичні моделі і методи, які застосовані для раціоналізації використання енергетичних ресурсів на виробництвах. Авторами публікації [3] сформована задача оптимального керування технологічним процесом випалювання вуглецевих виробів, розглянуті програмне керування та керування в реальному часі зазначеним технологічним процесом, проаналізовані недоліки програмного керування та запропоновані методи їх подолання в режимі керування технологічним процесом випалюванння вуглецевих виробів в реальному часі. Запропоновані математичні моделі для виявлення кіберзагроз та методи їх подолання в енергетичному секторі України [4].

В публікаціях [5, 6] розроблені коректні математичні моделі для певних технічних систем з розподіленими параметрами. Наведені математичні моделі і методи для розрахунку функції мети технічних систем з імпульсним впливом в фіксовані моменти часу в публікації [6]. Значну увагу авторів публікації [6] приділено умовам коректності лінійних неоднорідних систем з диференціальними рівняннями для окремих імпульсно-збурених систем. Запропоновані математичні моделі і методи для забезпечення керування систем з обмеженим невідомим збуренням [7]. Використавши економіко-статистичні методи та методи економіко-математичного моделювання, авторами публікації [8] здійснена оцінка динаміки обсягів видатків агропромислових підприємств за напрямами інноваційної діяльності в Україні, побудовані прогнози фінансування їх інноваційної діяльності в Україні.

Метою роботи є запропонувати і всебічно обґрунтувати умови існування єдиного розв'язку крайових задач процесу теплопереносу в багатошарових об'єктах.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо однорідну крайову задачу системи рівнянь теплопровідності:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u(x,t)}{\partial t} = A_1\left(\dfrac{\partial}{i\partial x}\right)u(x,t) \quad якщо \quad t \in [0;t_1]; \\ \dfrac{\partial u(x,t)}{\partial t} = A_2\left(\dfrac{\partial}{i\partial x}\right)u(x,t) \quad якщо \quad t \in [t_1;t_2]; \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ \dfrac{\partial u(x,t)}{\partial t} = A_n\left(\dfrac{\partial}{i\partial x}\right)u(x,t) \quad якщо \quad t \in [t_{N-1};T]. \end{cases} \tag{1}$$

Крайові умови в загальному виді:

$$B_0\left(\frac{\partial}{i\partial x}\right)u(x,0) + B_1\left(\frac{\partial}{i\partial x}\right)u(x,t_1) + \cdots + B_n\left(\frac{\partial}{i\partial x}\right)u(x,T) = \varphi(x)\ . \tag{2}$$

де $A_k\left(\dfrac{\partial}{i\partial x}\right)$ и $B_k\left(\dfrac{\partial}{i\partial x}\right)$ – псевдодиференціальні оператори.

Розглянемо неоднорідну крайову задачу системи рівнянь теплопровідності:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u(x,t)}{\partial t} = A_1\left(\dfrac{\partial}{i\partial x}\right)u(x,t) + f(x,t) \quad якщо \quad t \in [0;t_1]; \\ \dfrac{\partial u(x,t)}{\partial t} = A_2\left(\dfrac{\partial}{i\partial x}\right)u(x,t) + f(x,t) \quad якщо \quad t \in [t_1;t_2]; \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ \dfrac{\partial u(x,t)}{\partial t} = A_n\left(\dfrac{\partial}{i\partial x}\right)u(x,t) + f(x,t) \quad якщо \quad t \in [t_{N-1};T]. \end{cases} \tag{3}$$

Крайові умови в загальному виді:

$$B_0\left(\frac{\partial}{i\partial x}\right)u(x,0) + B_1\left(\frac{\partial}{i\partial x}\right)u(x,t_1) + \cdots + B_n\left(\frac{\partial}{i\partial x}\right)u(x,T) = 0\ . \tag{4}$$

Подіємо перетворенням Фур'є на крайову задачу (1)–(2):

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u(s,t)}{\partial t} = A_1(s)u(s,t) \quad якщо \quad t \in [0;t_1]; \\ \dfrac{\partial u(s,t)}{\partial t} = A_2(s)u(s,t) \quad якщо \quad t \in [t_1;t_2]; \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ \dfrac{\partial u(s,t)}{\partial t} = A_n(s)u(s,t) \quad якщо \quad t \in [t_{N-1};T]. \end{cases} \tag{5}$$

$$B_0(s)u(s,0) + B_1(s)u(s,t_1) + \cdots + B_n(s)u(s,T) = \varphi(s)\ . \tag{6}$$

Подіємо перетворенням Фур'є на крайову задачу (3)–(4):

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u(s,t)}{\partial t} = A_1(s)u(s,t) + f(s,t) \quad якщо \quad t \in [0;t_1]; \\ \dfrac{\partial u(s,t)}{\partial t} = A_2(s)u(s,t) + f(s,t) \quad якщо \quad t \in [t_1;t_2]; \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ \dfrac{\partial u(s,t)}{\partial t} = A_n(s)u(s,t) + f(s,t) \quad якщо \quad t \in [t_{N-1};T]. \end{cases} \tag{7}$$

$$B_0(s)u(s,0) + B_1(s)u(s,t_1) + \cdots + B_n(s)u(s,T) = 0\ , \tag{8}$$

де $u(s,t) = F_x u(x,t)$, $f(s,t) = F_x f(x,t)$, $\varphi(s) = F_x\varphi(x,t)$ – перетворення Фур'є відповідних функцій; $A_k(s)$, $B_k(s)$ – символи псевдодиференціальних операторів.

Розв'язок однорідної системи диференціальних рівнянь в загальному виді:

$$u(s,t) = \begin{cases} \exp\left(t\cdot A_1(s)\varphi_1(s)\right) \quad якщо \quad t \in [0;t_1]; \\ \exp\left(t\cdot A_2(s)\varphi_2(s)\right) \quad якщо \quad t \in [t_1;t_2]; \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ \exp\left(t\cdot A_n(s)\varphi_n(s)\right) \quad якщо \quad t \in [t_{N-1};T]. \end{cases} \tag{9}$$

Врахувавши безперервність розв'язку, отримали рівність:

$$\varphi_k(s) = \exp\left(t_1\cdot A_1(s) + (t_2 - t_1)\cdot A_2(s) + \cdots + (t_{k-1} - t_{k-2})\cdot A_{k-1}(s)\right)\varphi_1(s)\ . \tag{10}$$

Розв'язок крайової задачі (5)–(6):

$$u(s,t) = Q(s,t)\cdot\varphi(s)\ . \tag{11}$$

Фундаментальна функція розв'язку однорідної крайової задачі:

$$Q(s,t) = \begin{cases} \exp\left(t\cdot A_1(s)/\Delta(s)\right) \quad якщо \quad t \in [0;t_1]; \\ \exp\left(t\cdot A_2(s)/\Delta(s)\right) \quad якщо \quad t \in [t_1;t_2]; \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ \exp\left((t - t_{n-1})\cdot A_n(s) + \cdots + t_1\cdot A_1(s)\right)/\Delta(s) \quad якщо \quad t \in [t_{n-1};T], \end{cases} \tag{12}$$

де $\Delta(s) = B_0(s) + B_1(s)\exp t_1\cdot A_1(s) + \cdots + B_n(s)\exp\left(t_1\cdot A_1(s) + (t_2 - t_1)\cdot A_2(s) + \cdots + (T - t_{n-1})\cdot A_n(s)\right) \neq 0$.

Відзначимо, що фундаментальна функція $Q(s,t)$ обмежена зверху, тобто $\left|Q(s,t)\right| \le C\exp\left(-bp(t)\left|s\right|^h\right)$ за умови, що $b > 0$, $,h > 0$, а $\rho(t) = \min\limits_{0\le k\le n}\left|t - t_k\right|$. Обмеженість фундаментальної функції $Q(s,t)$ для системи однорідних диференціальних рівнянь (5)–(6) означає коректність однорідної

крайової задачі (1)–(2), що зумовило коректність неоднорідної крайової задачі (3)–(4) в просторі $C\left([0;T],H^{s}\right)$. Відзначимо, що в публікаціях [9, 10] розглянуті близькі прикладні задачі до досліджуваної тематики авторами цієї статті.

Висновки

У статті побудовані розрахункові математичні моделі теплопереносу в багатошаровому матеріалі при реалізації технологічного процесу термічної дії. Запропоновані методи для знаходження розв'язків вищевказаної крайової задачі та детально досліджені її особливості. Відзначимо, що особливу увагу авторів приділено знаходженню умов коректності багатоточкових крайових задач для систем диференціальних рівнянь, які застосовані для математичного моделювання технічної системи під дією джерел термічного навантаження. Це дозволило отримати висновок, що рівномірна обмеженість фундаментальної функції розв'язків – це необхідна та достатня умова коректності неоднорідної крайової задачі системи диференціальних рівнянь теплопровідності в багатошаровому середовищі. Наведені в статті розрахунки доцільно застосувати для обґрунтування коректності окремих розрахункових, прикладних оптимізаційних математичних моделей технічних і біотехнологічних систем, що дозволить підвищити точність і швидкість їх економіко-математичного моделювання.

Література

1. Маляренко О.Є. Уточнення методики прогнозування попиту на паливо з оцінкою структурного потенціалу енергозбереження в енергетичному секторі / О.Є. Маляренко, В.В. Станиціна // Проблеми загальної енергетики. – 2019. – № 1. – С. 19–23.
2. Кулик М.М. Аналіз стану розвитку систем теплопостачання в Україні / М.М. Кулик, Г.О. Куц, В.Д. Білодід // Проблеми загальної енергетики. – 2006. – № 14. – С. 13–24.
3. Жученко Л.К. Постановка задачі оптимального керування процесом випалювання вуглецевих виробів / Л.К. Жученко // Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – Київ, 2022. – Т. 33(72), № 5.– С. 81–85. https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/11
4. Куцан Ю.Г. Кіберзагрози в електроенергетичних системах України / Ю.Г. Куцан, В.О. Гурєєв, Є.М. Лисенко, О.В. Аветісян // Електронне моделювання. – 2019. – Т. 41. № 2. – С. 63–80.
5. Pavlichkov S. A small gain theorem for finite-time input-to-state stability of infinite networks and its applications / S. Pavlichkov // Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Ser. Mathematics, Applied Mathematics and Mechanics. – 2021. – Vol. 94. – P. 40–59. https://doi.org/10.26565/2221-5646-2021-94-03
6. Asrorov F., Sobchuk V., Kurylko O. Finding of bounded solutions to linear impulsive systems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 6. No. 4 (102): Mathematics and Cybernetics - applied aspects. P. 14–20. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.178635
7. Korobov V.I., Revina T.V. On perturbation range in the feedback synthesis problem for a chain of integrators system. IMA Journal of Mathematical Control and Information. 2021. Vol. 38. Issue 1. P. 396–416 https://doi.org/10.1093/imamci/dnaa035
8. Davydenko N., Ivanko A., Nehoda Y., Titenko Z. Prognostication of Financial Providing of Innovative Activities of Enterprises. Distributed Sensing and Intelligent Systems. Studies in Distributed Intelligance. 2022. P. 241-250. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64258-7_22
9. Levkin A., Abuselidze G., Berezhna N., Levkin D., Volkova T., Kotko Y. The Quality Function in Determining the Effectiveness of Example Bioeconomics Tasks. Rural Sustainability Research. 2022. Vol. 48. Issue 343. P. 91–102. DOI 10.2478/plua-2022-0019
10. Левкін Д.А. Архітектоніка розрахункових математичних моделей в умовах невизначеності / Д.А. Левкін // Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки». – Хмельницький, 2022. – Issue 3. Vol. 309. – С. 135–137. DOI 10.31891/2307-5732-2022-309-3-135-137

References

1. Maliarenko O.Ie. Utochnennia metodyky prohnozuvannia popytu na palyvo z otsinkoiu strukturnoho potentsialu enerhozberezhennia v enerhetychnomu sektori / O.Ie. Maliarenko, V.V. Stanytsina // Problemy zahalnoi enerhetyky. – 2019. – № 1. – S. 19–23.
2. Kulyk M.M. Analiz stanu rozvytku system teplopostachannia v Ukraini / M.M. Kulyk, H.O. Kuts, V.D. Bilodid // Problemy zahalnoi enerhetyky. – 2006. – № 14. – S. 13–24.
3. Zhuchenko L.K. Postanovka zadachi optymalnoho keruvannia protsesom vypaliuvannia vuhletsevykh vyrobiv / L.K. Zhuchenko // Vcheni zapysky Tavriiskoho Natsionalnoho Universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Seriia: Tekhnichni nauky. – Kyiv, 2022. – T. 33(72), № 5.– S. 81–85. https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/11
4. Kutsan Yu.H. Kiberzahrozy v elektroenerhetychnykh systemakh Ukrainy / Yu.H. Kutsan, V.O. Hurieiev, Ye.M. Lysenko, O.V. Avetisian // Elektronne modeliuvannia. – 2019. – T. 41. № 2. – S. 63–80.
5. Pavlichkov S. A small gain theorem for finite-time input-to-state stability of infinite networks and its applications / S. Pavlichkov // Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Ser. Mathematics, Applied Mathematics and Mechanics. – 2021. – Vol. 94. – P. 40–59. https://doi.org/10.26565/2221-5646-2021-94-03
6. Asrorov F., Sobchuk V., Kurylko O. Finding of bounded solutions to linear impulsive systems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 6. No. 4 (102): Mathematics and Cybernetics - applied aspects. P. 14–20. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.178635
7. Korobov V.I., Revina T.V. On perturbation range in the feedback synthesis problem for a chain of integrators system. IMA Journal of Mathematical Control and Information. 2021. Vol. 38. Issue 1. P. 396–416 https://doi.org/10.1093/imamci/dnaa035

8. Davydenko N., Ivanko A., Nehoda Y., Titenko Z. Prognostication of Financial Providing of Innovative Activities of Enterprises. Distributed Sensing and Intelligent Systems. Studies in Distributed Intelligance. 2022. P. 241-250. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64258-7_22

9. Levkin A., Abuselidze G., Berezhna N., Levkin D., Volkova T., Kotko Y. The Quality Function in Determining the Effectiveness of Example Bioeconomics Tasks. Rural Sustainability Research. 2022. Vol. 48. Issue 343. P. 91–102. DOI 10.2478/plua-2022-0019

10. Levkin D.A. Arkhitektonika rozrakhunkovykh matematychnykh modelei v umovakh nevyznachenosti / D.A. Levkin // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriia «Tekhnichni nauky». – Khmelnytskyi, 2022. – Issue 3. Vol. 309. – S. 135–137. DOI 10.31891/2307-5732-2022-309-3-135-137

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-113-119
УДК 621.039:621.89

ЗАЙЦЕВ СЕРГІЙ
Національний університет «Одеська політехніка»
https://orcid.org/0000-0002-1166-3243
e-mail: sdjavdet@ukr.net
ТІХЕНКО ВАЛЕНТИН
Національний університет «Одеська політехніка»
https://orcid.org/0000-0003-2804-2838
e-mail: vntikhenko@gmail.com

ДІАГНОСТУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ОЛИВИ В СИСТЕМАХ ОХОЛОДЖЕННЯ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

В статті досліджено фізико-хімічні та теплофізичні властивості експлуатаційної мінеральної турбінної оливи «Тп-30»; вплив температури рідинної екстракції антиокисної присадки «Іонол» на визначення її вмісту в цій експлуатаційній мінеральній турбінній оливі за методом газової хроматографії в інтервалі температур 15–75 ^{0}С (288–348 К); вплив хімічної природи екстрагента на здатність екстрагування присадки «Іонол» із цієї мінеральної турбінної оливи. Отримані результати можна використати для удосконалення процесів контролю мінеральної турбінної оливи «Тп-30» насосного агрегату системи циркуляції водного теплоносія обладнання другого контуру атомних електростанцій із водно-водним енергетичним реактором.

Ключові слова: мінеральна олива, фізико-хімічні властивості, антиокисна присадка, екстрагент.

ZAITSEV SERGEY, TIKHENKO VALENTIN
Odesa Polytechnic National University

DIAGNOSIS OF POWER OIL IN PUMPING UNITS COOLING SYSTEMS OF POWER PLANT EQUIPMENT

The article presents the results of improving the methods for diagnosing the energy oil "Tp-30" of the pumping unit of the NPP equipment coolant circulation system. When studying the physicochemical and thermophysical properties of this oil, it was found that: the indicators "acid number", "water content", "content of mechanical impurities", "content of the additive "Ionol", "flash point", "kinematic viscosity" correspond to the established standards. When determining the concentration of the additive "Ionol" in the sample of this oil: the method of adding the additive "Ionol" is used; in the obtained calculation formula, the values of the distribution coefficient for the additive "Ionol" in the system "turbine oil – additive "Ionol" – liquid extractant" are not used, which simplifies the study of the content of this additive in turbine oil. The water content in mineral turbine oil, determined by gas chromatography and coulometric titration with K. Fischer's reagent, exceeds the water content in this oil, determined by thermal extraction. When studying the effect of liquid extraction temperature on additives "Ionol" (when determining its content in a given oil), it was found by gas chromatography that: the dependence of the distribution coefficients K_i on temperature t in the temperature range 15–75 ^{0}C can be expressed by the equation $\ln K_i = A/(t+273) - B$; It is recommended to extract the Ionol additive from this oil at a temperature of (20 ± 2) ˚C or at a temperature of (65 ± 10) ˚C. When studying the effect of the chemical nature of the extractant on the ability to extract the "Ionol" additive from this oil, it was found that: ethanol, isopropanol, acetonitrile can be used as extractants of the "Ionol" additive, and the mixture "acetonitrile – water" cannot be recommended as such extractant. The results obtained can be used to improve the method of diagnosing mineral turbine oil "Tp-30" of the pumping unit of the coolant circulation system of the equipment of the second circuit of NPP with a pressurized water power reactor.

Keywords: mineral oil, physical and chemical properties, antioxidant additive, extractant.

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

Для забезпечення циркуляції охолоджувальної води в теплообмінному обладнанні атомних електростанцій (АЕС) України використовують водні насосні агрегати системи циркуляційного водозабезпечення АЕС, надійність яких в певній мірі забезпечує експлуатація мінеральних турбінних олив (далі – МТО) у вузлах підшипників цих насосних агрегатів [1]. Такі МТО використовують як інформаційне середовище, в якому присутність діагностичних компонентів (вода; антиокисна (далі – АО) присадка «Іонол»; механічні домішки) характеризує наявність в обладнанні дефектів в зонах поверхонь тертя під впливом точкової дії високих температур [2], вібрації [3], електричних струмів [4], водневого зношування [5]. Контроль показників фізико-хімічні та теплофізичні властивості МТО дозволяють своєчасно виконувати необхідні технічні заходи для забезпечення надійності енергетичного обладнання АЕС із системами циркуляції потоків МТО у вузлах змащення водних насосних агрегатів водопостачання градирень АЕС [6]. Так, у підприємстві «Рівненська АЕС» сталося аварійне відключення водного насосного агрегату водопостачання градирні, пов'язане з дефектами у вузлах підшипників зі змащенням циркулюючою МТО [7]. Це показало актуальність постійного підвищення надійності енергетичного обладнання АЕС за рахунок удосконалення контролю фізико-хімічних та теплофізичних властивостей МТО систем циркуляційного забезпечення цими оливами водних насосних агрегатів водопостачання градирень АЕС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В роботі [8] наведено методи визначення вмісту механічних домішок в ізоляційних оливах. В [9] досліджено процеси утворення шламу у процесі окиснення МТО. В [10] зазначено необхідність визначення для МТО таких показника, як «час деаерації» та «загальна стійкість до окислення базової оливи». В [11] досліджено протизносні властивості МТО, що містять композиції присадок, та складено математичну модель залежності протизносних властивостей МТО від концентрації в ній присадок, що дозволяє

встановити оптимальні концентрації присадок для забезпечення їхньої ефективної протизносної дії. В [12, 13] наведено методи визначення АО присадки «Іонол» у нафті та нафтопродуктах, в тому числі за методами ІЧ-спектрометрії, газової хроматографії (ГХ). Ці методи також застосовують для одночасного визначення в МТО вмісту присадок «Іонол», В15/41, Д-157 [14–19]. У роботі [20] наведені методи ГХ для визначення вмісту АО присадки «Іонол» в мінеральних енергетичних маслах (МЕО) з урахуванням значень показника «кислотне число (КЧ)», а також показано неможливість аналізувати МЕО при значенні КЧ ≥ 0,1 мг КОН на 1 г МЕО, так як продукти окиснення в МЕО вступають у хімічну взаємодію із АО присадкою «Іонол», що додається до МЕО, і це знижує точність результату ГХ вимірювання. Цей метод може бути застосовано і для визначення вмісту АО присадки «Іонол» в МТО із урахуванням специфіки виконання аналізів. У роботі [21] показано, що використання методу добавки твердої АО присадки «Іонолу» в МЕО не дозволяє візуально встановити факт досягнення повного розчинення твердої АО присадки «Іонол» в сильно забарвлених МЕО. В [6] зазначено залежність коефіцієнтів розподілу K_i від температури для розчиненого компоненту у системі «рідина – розчинений компонент – екстрагент». У зв'язку з цим експериментальне визначення значень коефіцієнтів розподілу K_i для АО присадки «Іонол» у широкому діапазоні температур його екстракції з МТО рідкими екстрагентами, а також розробка відповідної методики ГХ визначення K_i, мають практичне значення. В [22] наведено методи визначення вмісту ПО присадки «Іонол» в МТО, такі, як: а) експрес-метод із залученням процедур тонкошарової хроматографії. Цей метод є застарілим; б) метод високоефективної рідинної хроматографії. Цей метод потребує багато часу на його виконання та застосування складної апаратури і токсичних розчинників. Результати досліджень, що отримані в роботах [12–22], можуть бути корисними для визначення вмісту присадок в потоках циркулюючої МТО у вузлах підшипників водних насосних агрегатів системи циркуляційного водозабезпечення обладнання АЕС. Під час експлуатації МТО в обладнанні, виконують визначення вмісту води в МТО із застосуванням методів: а) візуального визначення наявності вільної води в МТО та якісного визначення наявності води в МТО з нагріванням МТО до 130 °С і спостеріганням за її станом із визначенням характерного потріскування під час нагрівання) [1, 22, 23]; б) кількісного визначення вмісту води в МТО у процесі видалення води з МТО під час її нагрівання в об`єм органічного розчинника, що не змішується з водою. Конденсований в спеціальному холодильнику розчинник і вода постійно поділяються в пастці, причому вода залишається в градуйованому відсіку пастки, а розчинник повертається в колбу (метод термічної екстракції). Цей метод потребує багато часу на його виконання та застосування складної апаратури і токсичних розчинників [22, 23]; в) кількісного визначення вмісту води в МТО із застосуванням методу кулонометричного титрування з реактивом К. Фішера [22]. Цей реактив є токсичним та взаємодіє з продуктами окислення (органічними кислотами, спиртами, фенолами) експлуатаційної МТО, що спотворює результати аналізу, завищуючи його [20]. Методи ГХ визначення вмісту води в органічних рідинах, в тому числі в МЕО, таких недоліків не мають [24, 25]. На даний час в Україні при визначенні в МТО вмісту води застосовують застарілі методи, що не відповідають сучасним вимогам відповідно до стандартів розвинених держав: Європейського союзу, США, Великобританії, Канади, Японії. Дослідження можливостей визначення АО присадки «Іонол» в МТО потребує виявлення впливу діючих факторів на спроможність застосування сучасних методів ГХ. Розробка нових або удосконалення існуючих методів визначення вмісту в МТО води та АО присадки «Іонол», наприклад, за методами ГХ, є актуальним, та відповідає сучасним вимогам у впровадженні стандартів Європейського союзу. Так, для визначення вмісту АО присадки «Іонол» в МТО за методами ГХ можуть бути застосовані газові хроматографи, що вже експлуатуються в лабораторіях АЕС України для визначення вмісту розчинених газів в ізоляційних оливах електричного обладнання. Застосування цього методу потребує визначення ефективних умов його виконання. **Метою роботи є** підвищення надійності енергетичного обладнання АЕС за рахунок удосконалення контролю фізико-хімічних та теплофізичних властивостей МТО марки «Тп-30» водного насосного агрегату системи циркуляції водного теплоносія обладнання другого контуру атомної електростанції із водно-водним енергетичним реактором ВВЕР-1000. Завданнями роботи є: дослідження фізико-хімічних та теплофізичних властивостей МТО «Тп-30»; дослідження впливу температури рідинної екстракції АО присадки «Іонол» на визначення її вмісту в МТО за методом ГХ в інтервалі температур 15–75 ˚С (288–348 К); дослідження впливу хімічної природи екстрагента на здатність екстрагування АО присадки «Іонол» із МТО.

Виклад основного матеріалу

При виконанні досліджень були застосовані проби рідких середовищ: експлуатаційна МТО марки «Тп-30» для циркуляційного змащення вузлів водного насосного агрегату системи циркуляції водного теплоносія обладнання другого контуру атомної електростанції із водно-водним енергетичним реактором ВВЕР-1000 Рівненської АЕС; градуювальні суміші АО присадки «Іонол» в етанолі і в МТО. Досліджувані фізико-хімічні і теплофізичні властивості експлуатаційної МТО: густина ρ, температура спалаху у відкритому тиглі t_f, кінематична в`язкість ν за температури 40 ˚С, кислотне число КЧ; вміст механічних домішок $C_m$; вміст води $C_w$ [1, 23]; вміст $C_i$ для АО присадки «Іонол» [13, 20]. Для дослідження МТО застосовано наступні засоби вимірювальної техніки: а) газовий хроматограф «Кисталл-2000М» із полум`яно-іонізаційним детектором – для визначення вмісту АО присадки «Іонол» C_i [13, 20]; б) газовий хроматограф «ЛХМ-80» із детектором за теплопровідністю – для визначення вмісту води C_w(ГХ) [24, 25]; титратор «Mettler-Toledo DL32» – для визначення вмісту води C_w(KF) за методом кулонометричного титрування із реактивом К. Фішера [1]; в) мембранні фільтри типу «Millipore» з діаметром 47 мм і порами

розміром 1,2 мкм, та мікроскоп МСХ-50 – при визначенні вмісту та типу (природи) механічних домішок [1, 8, 23]; г) шприци об`ємами 20 см^3 і термостат FED-53 – при дослідженні характеру впливу температури рідинної екстракції АО присадки «Іонол» на визначення її вмісту в МТО за методом ГХ [6]. Методи ГХ визначення вмісту АО присадки «Іонол» C_i в МТО засновані на застосуванні процедур екстракції аналізованого компонента з МТО відповідним екстрагентом і ГХ аналізі отриманого екстракту з використанням методу абсолютного градуювання газового хроматографа. Розрахункова формула має вигляд [21]:

$$C_i = \frac{S_k}{K_G} \cdot \left(K_i + \frac{V_1}{V_2} \right), \quad (1)$$

де C_i – концентрація АО присадки «Іонол» в аналізованому МТО; $S_к$ – площа хроматографічного піку для присадки «Іонол»; K_G – градуювальний коефіцієнт щодо АО присадки «Іонол» для газового хроматографа; V_1 і V_2 – об`єм рідкого екстрагента та аналізованого МТО відповідно; K_i – коефіцієнт розподілу для АО присадки «Іонол» в рівноважній екстракційній системі «МТО – розчинений «Іонол» – екстрагент», який визначають за методом ГХ шляхом послідовної дворазової екстракції розчиненої АО присадки «Іонол» з МТО однаковими обсягами чистого рідкого екстрагента та застосуванням розрахункової формули [6]:

$$K_i = \frac{S_1}{S_2 - S_1} \cdot \frac{V_1}{V_2}, \quad (2)$$

де S_1, S_2 – площі хроматографічних піків для АО присадки «Іонол» після першої та другої його екстракції з МТО, відповідно.

1. Результати дослідження фізико-хімічних та теплофізичних властивостей експлуатаційної МТО наведено в таблиці 1 (у дужках – нормовані значення за вимогами [1, 22]).

Таблиця 1

Результати дослідження фізико-хімічних та теплофізичних властивосте МТО «Тп-30»

КЧ, мг КОН на 1 г МТО (<0,6)	C_w, % маси (<0,03)	C_w*(ГХ)*, г/т (<300)	C_w*(KF)*, г/т (<300)	C_m, % маси (<0,005)	ν, мм^2/с (41,4–60,7)	t_f, °С (>185)	C_i, % маси (≥0,5)	ρ, г/см^3 (0,895)
0,025	відсутнє	465	450	0,0032	46,58	220	0,73	0,895

З Таблиці 1 випливає, що: а) всі показники фізико-хімічних та теплофізичних властивостей МТО «Тп-30» відповідають встановленим нормам [1, 22]; б) для МТО вміст води, визначений за методами ГХ (C_w*(ГХ)*) та кулонометричного титрування із реактивом К. Фішера (C_w*(KF)*), перевищує значення C_w, що визначено за методом термічної екстракції [1, 23]. Для накопичування інформації, додатково до регламентних вимірювань за [1, 23], рекомендовано виконувати наступні визначення вмісту в МТО: а) механічних домішок – за вимогами [8, 22, 23] із застосуванням мікроскопу для виявлення типу (природи) механічних домішок; б) води – за вимогами [24, 25] із застосуванням методу ГХ та за вимогами [1] із застосуванням методу кулонометричного титрування із реактивом К. Фішера; в) АО присадки «Іонол» – за вимогами [13, 20] із застосуванням методу ГХ. При виконанні досліджень встановлено, що: механічні домішки в МТО не є металами, волокнами або мікроорганізмами і схожі на твердий вуглець або оксиди металів; механічні домішки в МТО не мають магнітних властивостей; визначення вмісту механічних домішок у МТО за вимогами [8, 22, 23] із застосуванням мікроскопу дозволяє визначити тип (природу) цих домішок.

При визначенні концентрації C_i для АО присадки «Іонол» в пробі МТО застосовано метод додатку АО «Іонолу», який полягає в тому, що в об'єм V_2 порівняльної проби аналізованого МТО додають відому кількість АО присадки «Іонол», що міститься в рідкому екстрагенті об'єму V_1, а в об'єм V_2 робочої проби аналізованої МТО додають рідкий екстрагент об'ємом V_1, що не містить АО присадки «Іонол». Концентрацію C_i для АО присадки «Іонолу» в пробі МТО обчислюють за формулою [6, 21]:

$$C_i = \frac{C_3 \cdot V_1 \cdot C_1}{V_2 \cdot (C_2 - C_1)}, \quad (3)$$

де C_i – концентрація АО присадки «Іонол» у пробі МТО; C_1 – концентрація АО присадки «Іонол» у рідкому екстракті після виконання рідинної екстракції; C_3 – концентрація АО присадки «Іонол» в рідкому екстрагенті, що додається до МТО; C_2 – концентрація АО присадки «Іонол» у рідкому екстракті після виконання рідинної екстракції з проби МТО з додатком до неї АО присадки «Іонол» у вигляді його розчину в екстрагенті.

В розрахунковій формулі (3) значення коефіцієнта розподілу K_i для АО присадки «Іонол» не застосовуються, що спрощує виконання дослідження її вмісту в МТО.

2. Дослідження впливу температури рідинної екстракції АО присадки «Іонол» на визначення її вмісту в МТО за методом ГХ виконано за методикою [6] при використанні МТО із вмістом у ній АО присадки «Іонол» C_i = 0,73 % маси, газового хроматографа та етанолу у якості екстрагенту. Відношення $N = V_1/V_2$ = 0,2. Значення K_i при заданій температурі t екстракції АО присадки «Іонол» етанолом із МТО в

інтервалі температур 15–75 ^{0}C при точності термостатування $\Delta t = \pm 0{,}5$ ˚C для кожного заданого фіксованого значення температури t екстракції розраховано за формулою [6]:

$$K_i = \frac{C_i}{C_{et}} - \frac{V_1}{V_2}. \quad (4)$$

У формулі (4) значенню концентрацій АО присадки «Іонол» C_{et} в отриманому екстрагенті (етанолі) відповідає площа ГХ піку для АО присадки «Іонол» S_{et}, яка визначена за лінійною градуювальною характеристикою, отриманою методом абсолютного градуювання хроматографа з використанням градуювальних розчинів АО присадки «Іонол» в етанолі. Значення відносних ступенів екстракції АО присадки «Іонол» R_i, % відносний, з МТО екстрагентом із урахуванням значень K_i в інтервалі температур 15–75 ^{0}C розраховано за формулою:

$$R_i = 100 \cdot \left(1 + K_i \frac{V_2}{V_1}\right)^{-1}. \quad (5)$$

У таблиці 2 наведено залежність від температури t коефіцієнтів розподілу K_i, відносних ступенів екстракції R_i (% відносний) для АО присадки «Іонол» та її концентрації C_{et} (% масовий) в екстрактах.

Таблиця 2

Залежність від температури t коефіцієнтів розподілу K_i, відносних ступенів екстракції R_i для АО присадки «Іонол» та її концентрації в екстрактах

t, ˚C	15	18	20	22	26	32	40	45	55	65	75
K_i	3.0	2,7	2.5	2.4	2.1	1.8	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1
R_i,% відносний	6.3	6.9	7.3	7,7	8.6	10.0	12	13	14	15	15.5
C_{et}, % масовий	0,095	0,104	0.11	0,12	0.13	0.15	0.17	0.19	0.21	0.22	0.23

З таблиці 2 випливає: а) наближення температури екстракції до температури кипіння етанолу t_w =78,37 ˚C призводить до наближення коефіцієнта розподілу K_i до одиниці; б) при підвищенні температури екстракції відбувається зменшення значення K_i, збільшення ступеню екстракції АО присадки «Іонол» R_i та її концентрації C_{et} в екстракті; в) в ізотермічних умовах екстракції АО присадки «Іонол» із МТО ступінь екстракції R_i залежить від коефіцієнта розподілу K_i.

На рис. 1 наведено залежність коефіцієнту розподілу K_i від температури екстракції АО присадки «Іонол» із МТО етанолом в інтервалі температур 15–75 ˚C, аналогічно [6].

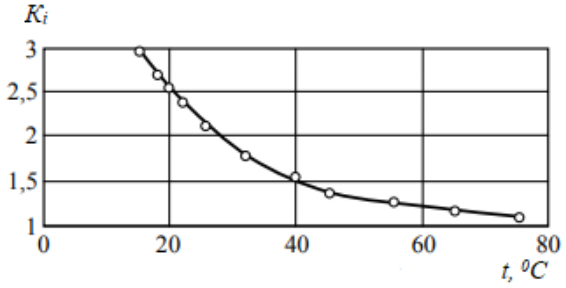


Рис. 1. Залежність коефіцієнту розподілу K_i від температури екстракції АО присадки «Іонол» із МТО етанолом: K_i – коефіцієнт розподілу для АО присадки «Іонол»; t – температура, ˚C

З таблиці 2 та рисунку 1 випливає, що: екстракцію АО присадки «Іонол» із МТО етанолом можна ефективно проводити при температурі: (20±2) ˚C (в інтервалі температур18–22 ˚C коефіцієнти розподілу K_i для АО присадки «Іонол» мають значення від 2,7 до 2,4, та відрізняються не більше, ніж на 11 % відносних); (65±10) ˚C (в інтервалі температур 55–75 ˚C коефіцієнти розподілу K_i для АО присадки «Іонол» мають значення від 1,3 до 1,1, та відрізняються не більше, ніж на 15 % відносних).

Залежність коефіцієнтів розподілу K_i від температури t може бути виражена рівнянням [6]:

$$\ln K_i = \frac{A}{(t + 273) - B}, \quad (6)$$

де A и B – коефіцієнти (таблиця 3).

У таблиці 3 наведено результати досліджень залежності усереднених значень коефіцієнтів розподілу K_i для АО присадки «Іонол» від діапазону температур її екстракції.

Таблиця 3

Результати досліджень залежності усереднених значень коефіцієнтів розподілу K_i для АО присадки «Іонол» від температури її екстракції

t, ˚C	A	B	K_i	t, ^{0}C	A	B	K_i	t, ^{0}C	A	B	K_i
15–32	2650	8,12	2,4	32–40	1626	4,76	1,7	40–75	985	2,76	1,3

Результати, що наведено в Таблиці 3, можуть бути застосовані для попереднього орієнтованого оцінювання значення концентрації АО присадки «Іонол» в МТО із застосуванням формули (1).

3. Дослідження впливу хімічної природи екстрагента на здатність екстрагування АО присадки «Іонол» із МТО виконані при температурі навколишнього повітря в інтервалі 18–22 ^{0}С і $N = V_1/V_2 = 0,2$. За градуювальною характеристикою, отриманою із використанням градуювальних сумішей АО присадки «Іонол» в екстрагенті, визначені концентрації АО присадки «Іонол» в екстракті після її екстракції із МТО. Як показник здатності екстрагента екстрагувати АО присадку «Іонол» із МТО прийнято площу S_i для хроматографічного піку: чим більше її значення, тим вище здатність даного екстрагента екстрагувати АО присадку «Іонол» з МТО (таблиця 4). У таблиці 4 наведено значення площин хроматографічних піків S_i, мВ·хв, для АО присадки «Іонол», що отримані при її екстракції із МТО різними екстрагентами при температурі екстракції 20 ^{0}С та концентрації C_i = 0,73 % маси АО присадки «Іонол» в МТО; коефіцієнти розподілу K_i при використанні застосованого екстрагенту; відношення «n» площі хроматографічного піку для АО присадки «Іонол» при використанні даного застосованого екстрагенту до площі хроматографічного піку для АО присадки «Іонол» при використанні екстрагенту – етанолу.

Таблиця 4

Значення площин хроматографічних піків для АО присадки «Іонол» при її екстракції різними екстрагентами із МТО

Екстрагент	S_i, мВ·хв	n	K_i	Екстрагент	S_i, мВ·хв	n	K_i
Етанол	6200	1	2,1	Ацетонітрил	7880	1,3	1,62
Ізопропанол	7400	1,2	1,7	Ацетонітрил/вода = 1/1	150	0,024	-

З таблиці 4 випливає, що для досліджених екстрагентів, крім суміші «ацетонітрил – вода»: значення «n» близькі один до одного та значення «S_i» близькі один до одного. Суміш «ацетонітрил – вода» не може бути рекомендована для використання: наявність води в екстрагенті знижує здатність даного екстрагента екстрагувати АО присадку «Іонол» з МТО. Встановлено, що похибки результатів вимірювань вмісту АО присадки «Іонол» залежать від її концентрації в МТО, і в інтервалі концентрацій від 0,05 до 0,80 % масових, розрахункові відносні похибки результатів вимірювань зменшуються від 28,0 до 1,6 % відносних, відповідно.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. При дослідженні фізико-хімічних та теплофізичних властивостей МТО «Тп-30» встановлено, що всі показники фізико-хімічних та теплофізичних властивостей МТО «Тп-30» відповідають встановленим нормам. При визначенні концентрації C_i для АО присадки «Іонол» в пробі МТО застосовано метод додатку АО присадки «Іонол», який полягає в тому, що в об'єм V_2 порівняльної проби аналізованого МТО додають відому кількість АО присадки «Іонол», що міститься в рідкому екстрагенті об'єму V_1, а в об'єм V_2 робочої проби аналізованої МТО додають рідкий екстрагент об'ємом V_1, що не містить АО присадки «Іонол». Отриманий екстракт аналізують за методом ГХ. В розрахунковій формулі при визначенні концентрації C_i для АО присадки «Іонол» в пробі МТО, значення коефіцієнту розподілу K_i для АО присадки «Іонол» не застосовуються, що спрощує виконання дослідження її вмісту в МТО. Вміст води в МТО, визначений за методами ГХ та кулонометричного титрування із реактивом К. Фішера, перевищує значення вмісту води в МТО, що визначено за методом термічної екстракції

2. При дослідженні впливу температури рідинної екстракції АО присадки «Іонол» на визначення її вмісту в МТО за методом ГХ встановлено, що залежність коефіцієнтів розподілу K_i від температури t в інтервалі температур 15–75 $^\circ$С може бути виражена рівнянням $\ln K_i = A/(t+273) - B$ (де A и B – коефіцієнти); екстракцію АО присадки «Іонол» з МТО рекомендовано виконувати при температурі (20±2) $^\circ$С, або при температурі (65±10) $^\circ$С.

3. При дослідженні впливу хімічної природи екстрагента на здатність екстрагування АО присадки «Іонол» із МТО встановлено, що: в якості екстрагентів АО присадки «Іонол» із МТО можуть бути застосовані такі екстрагенти, як етанол, ізопропанол, ацетонітрил, а суміш «ацетонітрил – вода» не може бути рекомендована у якості такого екстрагенту.

Отримані результати можна використати для удосконалення процесів контролю мінеральної турбінної оливи «Тп-30» насосного агрегату системи циркуляції водного теплоносія обладнання другого контуру атомних електростанцій із водно-водним енергетичним реактором ВВЕР-1000.

Література

1. Турбинні оливи для енергетичного обладнання АЕС. Правила експлуатації: СОУ НАЕК 085:2020. – Київ : НАЕК «Енергоатом», 2020. – 53 с.

2. Ляшенко Я.А. Трибологическая система в режиме граничного трения под периодическим внешним воздействием / Я.А. Ляшенко // Журнал технической физики. –2011. – Том 81. № 6. – С. 125–132.

3. Serdobintsev Yu.P. Development of experimental techniques for determine friction modes of sliding bearings in high-speed machines / Yu.P. Serdobintsev, D.V. Marchuk, M.Yu. Kharkov, Kuach Suan Nam // Modern high technologies. – 2016. – № 6. – P. 295–298.

4. Кухарев И.Е. Влияние электромагнитного состояния турбоагрегата на работоспособность его узлов. Диагностика, демагнитезация / И.Е. Кухарев, А.С. Боряк // XIII Международная научно-техническая

конференция «Гервикон-2011», Международный форум «Насосы-2011», Семинар «Эккон-11», 6–9 сентября 2011. – Сумы : СумГУ, Украина. – С. 1–13.

5. Balitskii O.A. Hydrogen effect on the high-nickel surface steel properties during machining and wear with lubricants / O.A. Balitskii, V.O. Kolesnikov, A.I. Balitskii, J.J. Eliasz, M.R. Havrylyuk // Archives of Materials Science and Engineering. – 2020. – 104(2). – P. 49–57. – DOI: 10.5604/01.3001.0014.4894.

6. Зайцев С.В. Современные методы контроля энергетических масел и продуктов их деградации для обеспечения надежности эксплуатации маслонаполненного электрооборудования электрических станций и сетей: монографія / С.В. Зайцев, В.А. Кишневский, Г.А. Оборский, И.В. Прокопович. – Одесса : «Экология», 2019. – 304 с. – ISBN 978-617-7046-80-5

7. Kuznietsov P. Improvement of methods for controlling power oil of cooling tower recycling water supply units at Rivne nuclear power plant / P. Kuznietsov, A. Tykhomyrov, O. Biedunkova, S. Zaitsev // Scientific Horizon. –2022. – Vol. 25. No. 12. – P. 69–79. – DOI: 10.48077/scihor.25(12).2022.69-79

8. Insulating liquids. Methods for counting and sizing particles. IEC publication 60970-2007. Geneva, Switzerland. 2007. 37 p.

9. Yano A. Study on Sludge Formation during the Oxidation Process of Turbine Oils / Akihiko Yano, Shintaro Watanabe, Yasunori MiyazakI, Mitsuyoshi Tsuchiya, Yuji Yamamoto // Tribology Transactions. – 2004. – 47. – P. 111–122. – DOI:10.1080/05698190490278985

10. Игнарина Л.М. Новые требования к контролю турбинных масел / Л.М. Игнарина, Р.А. Низамеева, Н.А. Лыкова // Энергетика Татарстана. – 2012. – № 4. – С. 63–67.

11. Хужакулов А.Ф. Исследование противоизносных свойств турбинных масел с композицией присадок методом математического планирования / А.Ф. Хужакулов, Б.Н. Хамидов // Universum: технические науки: электронный научный журнал. – 2021. – 7(88). – С. 90–93. – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/12069

12. Иванова Л.В. ИК-спектрометрия в анализе нефти и нефтепродуктов / Л.В. Иванова, Р.З. Сафиева, В.Р. Кошелев // Вестник Башкирского университета. – 2008. – № 4. – С. 869-874.

13. ASTM Standard D 4768-96. Standard Test Method for Analysis of 2,6-Ditertiary-Butyl Para-Cresol and 2,6-Ditertiary-Butyl Phenol in Insulating Liquids by Gas Chromatography. ASTM International. 1996. 3 p.

14. Темердашев З.А. Хроматографическое разделение и определение функциональных присадок в турбинном масле / З.А. Темердашев, Ю.А. Иванова, И.А. Колычев, Е.С. Аверина, А.В. Руденко, И.И. Занозина // Журнал аналитической химии. – 2019. – Том 74. № 12. – С. 922–929. – DOI: 10.1134/S0044450219120132

15. Carneiroa G.F., Silva R.C., Barbosa L.L., Freitasa J.C.C., Sad C.M.S., Tose L.V., Vaz G.B., Romão W., de Castro E.V.R., Neto A.C., Lacerda V.Jr. Characterisation and selection of demulsifiers for water-in-crude oil emulsions using low-field H NMR and ESI–FT-ICR MS. Fuel. 2015. V. 140. P. 762–772. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.10.020

16. Johnson D.W. Applications of Mass Spectrometric Techniques to the Analysis of Fuels and Lubricants. Intech open: Mass Spectrometry. Chapter 7. 2017. P. 209–228. DOI: 10.5772/intechopen.68592

17. ASTM E2412-10(2018) Standard Practice for Condition Monitoring of In-Service Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry. ASTM International. 24 p.

18. Caitlyn Da Costaa, Samuel Whitmarshb, Tom Lynchb, Colin S. Creaser. The qualitative and quantitative analysis of lubricant oil additives by direct analysis in real time-mass spectrometry. International Journal of Mass Spectrometry. 2016. 405. P. 24–31. DOI: 10.1016/j.ijms.2016.05.011

19. Казьмина Е.В. Разработка инфракрасной спектрометрической методики определения антиокчидантной присадки АГИДОЛ-1 в растворах для ее введения в дизельное топливо / Е.В. Казьмина, А.Н. Смагунова, Н.П. Бутина, Е.Н. Коржова // Аналитика и контроль. – 2013. – Том 17. № 3. – С. 345–350. – DOI: 10.15826/аналитика.2013.17.3.012

20. Приймання, застосування та експлуатація трансформаторних масел. Норми оцінювання якості: СОУ-Н ЕЕ 43.101:2009. К. : КВІЦ: Міністерство палива та енергетики України, 2009. – 152 с.

21. Зайцев С.В. Разработка газохроматографического метода определения в энергетических маслах ионола и воды методом добавок / С.В. Зайцев, В.А. Кишневский, И. Д. Шуляк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 2/6(74). – С. 21–28. – DOI: 10.15587/1729-4061.2015.40896

22. Енергетичні оливи та оливні господарства підприємств енергетичної галузі України та підприємств, де застосовується аналогічне обладнання. Організація експлуатації та технічного обслуговування. Норми та вимоги: СОУ ВЕА.100.1/01:2015. К. : Стандарт «ВЕА», 2014. – 216 с.

23. Турбінні оливи для енергетичного обладнання ВП АЕС. Технічні вимоги до якості, умов приймання та зберігання: СОУ-Н НАЕК 006-2011. К. : НАЕК «Енергоатом», 2011. – 49 с.

24. Продукти хімічні органічні рідкі. Газохроматографічний метод визначення води. Загальні вказівки: ДСТУ 2572-94. К. : Держпоживстандарт України, 1995. – 7 с.

25. Експлуатація вимірювальних трансформаторів. Настанова: СОУ-Н ЕЕ 40.1-21677681-90:2013. К. : ОЕП «ГРІФРЕ», 2014. – 56 с.

References

1. Turbynni olyvy dlia enerhetychnoho obladnannia AES. Pravyla ekspluatatsii: SOU NAEK 085:2020. – Kyiv : NAEK «Enerhoatom», 2020. – 53 s.
2. Ljashenko Ja.A. Tribologicheskaja sistema v rezhime granichnogo trenija pod periodicheskim vneshnim vozdejstviem / Ja.A. Ljashenko // Zhurnal tehnicheskoj fiziki. –2011. – Tom 81. № 6. – S. 125–132.
3. Serdobintsev Yu.P. Development of experimental techniques for determine friction modes of sliding bearings in high-speed machines / Yu.P. Serdobintsev, D.V. Marchuk, M.Yu. Kharkov, Kuach Suan Nam // Modern high technologies. – 2016. – № 6. – R. 295–298.
4. Kuharev I.E. Vlijanie jelektromagnitnogo sostojanija turboagregata na rabotosposobnost' ego uzlov. Diagnostika, demagnitezacija / I.E. Kuharev, A.S. Borjak // XIII Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Gervikon-2011», Mezhdunarodnyj forum «Nasosy-2011», Seminar «Jekkon-11», 6–9 sentjabrja 2011. – Sumy : SumGU, Ukraina. – S. 1–13.
5. Balitskii O.A. Hydrogen effect on the high-nickel surface steel properties during machining and wear with lubricants / O.A. Balitskii, V.O. Kolesnikov, A.I. Balitskii, J.J. Eliasz, M.R. Havrylyuk // Archives of Materials Science and Engineering. – 2020. – 104(2). – R. 49–57. – DOI: 10.5604/01.3001.0014.4894.
6. Zajcev S.V. Sovremennye metody kontrolja jenergeticheskih masel i produktov ih degradacii dlja obespechenija nadezhnosti jekspluatacii maslonapolnennogo jelektrooborudovanija jelektricheskih stancij i setej: monografija / S.V. Zajcev, V.A. Kishnevskij, G.A. Oborskij, I.V. Prokopovich. – Odessa : «Jekologija», 2019. – 304 s. – ISBN 978-617-7046-80-5
7. Kuznietsov P. Improvement of methods for controlling power oil of cooling tower recycling water supply units at Rivne nuclear power plant / P. Kuznietsov, A. Tykhomyrov, O. Biedunkova, S. Zaitsev // Scientific Horizon. –2022. – Vol. 25. No. 12. – R. 69–79. – DOI: 10.48077/scihor.25(12).2022.69-79
8. Insulating liquids. Methods for counting and sizing particles. IES publication 60970-2007. Geneva, Switzerland. 2007. 37 r.
9. Yano A. Study on Sludge Formation during the Oxidation Process of Turbine Oils / Akihiko Yano, Shintaro Watanabe, Yasunori MiyazakI, Mitsuyoshi Tsuchiya, Yuji Yamamoto // Tribology Transactions. – 2004. – 47. – R. 111–122. – DOI:10.1080/05698190490278985
10. Ignarina L.M. Novye trebovanija k kontrolju turbinnyh masel / L.M. Ignarina, R.A. Nizameeva, N.A. Lykova // Jenergetika Tatarstana. – 2012. – № 4. – S. 63–67.
11. Huzhakulov A.F. Issledovanie protivoiznosnyh svojstv turbinnyh masel s kompoziciej prisadok metodom matematicheskogo planirovanija / A.F. Huzhakulov, B.N. Hamidov // Universum: tehnicheskie nauki: jelektronnyj nauchnyj zhurnal. – 2021. – 7(88). – S. 90–93. – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/12069
12. Ivanova L.V. IK-spektrometrija v analize nefti i nefteproduktov / L.V. Ivanova, R.Z. Safieva, V.R. Koshelev // Vestnik Bashkirskogo universiteta. – 2008. – № 4. – S. 869-874.
13. ASTM Standard D 4768-96. Standard Test Method for Analysis of 2,6-Ditertiary-Butyl Para-Cresol and 2,6-Ditertiary-Butyl Phenol in Insulating Liquids by Gas Chromatography. ASTM International. 1996. 3 p.
14. Temerdashev Z.A. Hromatograficheskoe razdelenie i opredelenie funkcional'nyh prisadok v turbinnom masle / Z.A. Temerdashev, Ju.A. Ivanova, I.A. Kolychev, E.S. Averina, A.V. Rudenko, I.I. Zanozina // Zhurnal analiticheskoj himii. – 2019. – Tom 74. № 12. – S. 922–929. – DOI: 10.1134/S0044450219120132
15. Carneiroa G.F., Silva R.C., Barbosa L.L., Freitasa J.C.C., Sad C.M.S., Tose L.V., Vaz G.B., Romão W., de Castro E.V.R., Neto A.C., Lacerda V.Jr. Characterisation and selection of demulsifiers for water-in-crude oil emulsions using low-field H NMR and ESI–FT-ICR MS. Fuel. 2015. V. 140. P. 762–772. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.10.020
16. Johnson D.W. Applications of Mass Spectrometric Techniques to the Analysis of Fuels and Lubricants. Intech open: Mass Spectrometry. Chapter 7. 2017. P. 209–228. DOI: 10.5772/intechopen.68592
17. ASTM E2412-10(2018) Standard Practice for Condition Monitoring of In-Service Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry. ASTM International. 24 r.
18. Caitlyn Da Costaa, Samuel Whitmarshb, Tom Lynchb, Colin S. Creaser. The qualitative and quantitative analysis of lubricant oil additives by direct analysis in real time-mass spectrometry. International Journal of Mass Spectrometry. 2016. 405. R. 24–31. DOI: 10.1016/j.ijms.2016.05.011
19. Kaz'mina E.V. Razrabotka infrakrasnoj spektrometricheskoj metodiki opredelenija antiokchidantnoj prisadki AGIDOL-1 v rastvorah dlja ee vvedenija v dizel'noe toplivo / E.V. Kaz'mina, A.N. Smagunova, N.P. Butina, E.N. Korzhova // Analitika i kontrol'. – 2013. – Tom 17. № 3. – S. 345–350. – DOI: 10.15826/analitika.2013.17.3.012
20. Pryimannia, zastosuvannia ta ekspluatatsiia transformatornykh masel. Normy otsiniuvannia yakosti: SOU-N EE 43.101:2009. K. : KVITs: Ministerstvo palyva ta enerhetyky Ukrainy, 2009. – 152 s.
21. Zajcev S.V. Razrabotka gazohromatograficheskogo metoda opredelenija v jenergeticheskih maslah ionola i vody metodom dobavok / S.V. Zajcev, V.A. Kishnevskij, I. D. Shuljak // Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij. – 2015. – № 2/6(74). – S. 21–28. – DOI: 10.15587/1729-4061.2015.40896
22. Enerhetychni olyvy ta olyvni hospodarstva pidpryiemstv enerhetychnoi haluzi Ukrainy ta pidpryiemstv, de zastosovuietsia analohichne obladnannia. Orhanizatsiia ekspluatatsii ta tekhnichnoho obsluhovuvannia. Normy ta vymohy: SOU VEA.100.1/01:2015. K. : Standart «VEA», 2014. – 216 s.
23. Turbinni olyvy dlia enerhetychnoho obladnannia VP AES. Tekhnichni vymohy do yakosti, umov pryimannia ta zberihannia: SOU-N NAEK 006-2011. K. : NAEK «Enerhoatom», 2011. – 49 s.
24. Produkty khimichni orhanichni ridki. Hazokhromatohrafichnyi metod vyznachennia vody. Zahalni vkazivky: DSTU 2572-94. K. : Derzhpozhyvstandart Ukrainy, 1995. – 7 s.
25. Ekspluatatsiia vymiriuvalnykh transformatoriv. Nastanova: SOU-N EE 40.1-21677681-90:2013. K. : OEP «HRIFRE», 2014. – 56 s.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-120-133
УДК 52-62:52-645:523:524:539:57.054:616-005

ЗАСПА ЮРІЙ
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0003-3274-172X
e-mail: zaspayuriy@gmail.com

ТРОЇСТІ МУЛЬТИПЛІКАТИВНІ ТЕРМОРЕЗОНАНСИ НА СПЕКТРАХ ОБМІННОГО ІНЕРЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ, ЗГЕНЕРОВАНОГО В НЕРІВНОВАЖНИХ СЕРЕДОВИЩАХ З КОНТАКТНИМИ РОЗРИВАМИ В ТЕХНІЧНИХ, КОСМІЧНИХ, ПСЕВДОЕЛЕМЕНТАРНИХ ТА БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМАХ У КОМПЛЕКСНОМУ ПРОСТОРІ З ТРИПЛЕТНИМ ПОРУШЕННЯМ АНТИСИМЕТРІЇ

Наведені розрахункові співвідношення, що кількісно описують властивості резонансних триплетів інерційного випромінювання, згенерованого в нерівноважних системах різних масштабів та рівнів організації. Виявлений мультиплікативний характер енергії резонансних складових, суттєво відмінний від адитивних принципів формування відомих триплетних структур. Встановлений механізм триплетного порушення антисиметрії комплексного простору, який забезпечує уникнення анігіляції енергії, створеної за принципом Creatio ex nihilo в топологічних контактних розривах між дійсним та уявним півпросторами. Відмічене розведення домінуючих енергетичних каскадів – прямого в уявному та оберненого в дійсному півпросторах. Проведений аналіз резонансних тріад на ядерних та колайдерних спектрах, пояснені та кількісно розраховані складові цих спектрів. Підтверджена мюонна структура адронів та обчислені параметри такої структури, а також параметри колайдерної протон-мюонної плазми, альтернативної щодо відомих моделей кварк-глюонної плазми. Зроблений розрахунок спектрів космічних променів низьких, середніх, високих та надвисоких енергій, який кількісно відповідає натурним даним. Виявлені та кількісно розраховані троїсті резонанси на спектрах випромінювання Сонця та на спектрах сонячної та геомагнітної активності. Показано, що сонячний спектр суттєво відрізняється від чорнотільного, а основні періоди активності Сонця визначаються резонансними тріадами в масштабах геліосфери. Розраховані параметри холодної зовнішньої фотосфери на периферії Сонячної системи, фонове мікрохвильове випромінювання якої зазвичай помилково відносять на рахунок «релікту» від т.з. Великого вибуху. Проведений аналіз резонансних триплетів на спектрах акустичних збурень в технічних системах. Відзначена синхронізація гравітаційних та електромагнітних мод, яка веде до аварійно-небезпечних бафтингових режимів. Встановлений взаємозв'язок геодинамічних, кліматичних та біологічних процесів на планеті з активністю кавітаційних топологічних розривів на периферії Сонячної системи. Виявлений механізм контактної капілярної термостабілізації тіла людини та відзначена мультиплікативна триплетна коронавірусна деструкція цього механізму.

Ключові слова: троїсті терморезонанси, принцип мультиплікативності, порушення антисиметрії, інерційне випромінювання, нерівноважне середовище, топологічний розрив.

ZASPA YURII
Khmelnytskyi National University

TRIPLE MULTIPLICATIVE THERMORESONANCES ON THE SPECTRA OF EXCHANGE INERTIAL RADIATION GENERATED IN NON-EQUILIBRIUM MEDIA WITH CONTACT GAPS IN ENGINEERING, COSMIC, PSEUDO-ELEMENTARY AND BIOLOGICAL SYSTEMS IN COMPLEX SPACE WITH TRIPLET VIOLATION OF ANTISYMMETRY

Calculated ratios that quantitatively describe the properties of resonance triplets of inertial radiation generated in non-equilibrium systems of various scales and levels of organization are given. The multiplicative nature of the energy of resonant components is revealed, which is significantly different from the additive principles of the formation of known triplet structures. The mechanism of triplet violation of the antisymmetry of the complex space is established, which ensures the avoidance of annihilation of the energy created according to the principle of Creatio ex nihilo in the topological contact gaps between the real and imaginary half-spaces. There is a marked dilution of the dominant energy cascades - direct in the imaginary and inverted in the real half-space. The analysis of resonant triads on nuclear and collider spectra was carried out, the components of these spectra were explained and quantitatively calculated. The muon structure of hadrons was confirmed and the parameters of this structure were calculated, as well as the parameters of the collider proton-muon plasma, alternative to the known models of the quark-gluon plasma. The calculation of the spectra of cosmic rays of low, medium, high and ultra-high energies was made, which quantitatively corresponds to natural data. Triple resonances in the spectra of the Sun's radiation and the spectra of solar and geomagnetic activity were detected and quantified. It is shown that the solar spectrum is significantly different from the blackbody spectrum, and the main periods of the Sun's activity are determined by resonant triads on the scale of the heliosphere. Calculated parameters of the cold outer photosphere at the periphery of the Solar System, the background microwave radiation of which is usually erroneously attributed to the account of a "relic" from the so-called Big bang. The analysis of resonant triplets on the spectra of acoustic disturbances in technical systems was carried out. Synchronization of gravitational and electromagnetic modes is noted, which leads to dangerous buffeting modes. The relationship between geodynamic, climatic and biological processes on the planet and the activity of cavitation topological gaps on the periphery of the Solar System has been established. The mechanism of contact capillary thermostabilization of the human body was revealed and the multiplicative triplet coronavirus destruction of this mechanism was noted.

Key words: triple thermal resonances, principle of multiplicativity, violation of antisymmetry, inertial radiation, non-equilibrium medium, topological discontinuity.

Актуальність проблеми

Широко представлений в багатьох розділах фізики (класичній механіці, термодинаміці, електромагнетизмі, оптиці, класичній та квантовій статистиках, квантовій механіці, квантовій теорії поля та ін.) принцип адитивності (суперпозиції) не може бути безпосередньо застосований у випадку нелінійних систем та потребує суттєвого доповнення принципом мультиплікативності, адекватним для описання нелінійних та нерівноважних фізичних систем. Нижче наводиться аналіз властивостей мультиплікативних троїстих терморезонансів, проявлених на спектрах обмінного інерційного випромінювання [1–3], згенерованого в нерівноважних гетерогенних середовищах з контактними розривами в природних системах різного рівня організації. Цей аналіз ґрунтується на комплексному розширенні дійсного простору та відповідному тривимірному розширенні часу, а також враховує порушення законів збереження (енергії, імпульсу та моменту імпульсу) в неоднорідному анізотропному просторі та часі . Такого роду неоднорідність та анізотропія характерні передусім для нерівноважних зон динамічної контактної взаємодії в матеріальних середовищах, відзначених розривами та турбулентністю. Слід відмітити також необхідність порушення антисиметрії комплексного простору задля уникнення анігіляції енергії, створеної за принципом Creatio ex nihilo в антисиметричних системах [2-3]. Це порушення, як показано нижче, має триплетний характер і мультиплікативну природу. Остання забезпечує розведення домінуючих енергетичних каскадів – обернений каскад (в бік великих часових та просторових масштабів) в дійсній частині комплексного простору та прямий каскад (в бік менших масштабів) в його уявній частині. Нерівноважний контакт обох частин має відносний мезоскопічний масштаб, залежний від рівня організації системи, котра зазвичай кусочно-квазірівноважна. Підміна домінуючого оберненого каскаду на прямий у відомих теоріях гідродинамічної турбулентності (Колмогорова-Обухова і т.п. [4]) обумовлює всі труднощі відповідного описання такої турбулентності. Адекватними тут є не відомі рівняння Нав'є-Стокса та їх спрощені аналоги, а рівняння Максвелла в гідродинамічно-хвильовому калібруванні потенціалів [3].

Контакт дійсного та уявного півпросторів є квазідвовимірним із закритою бульбашковою, або ж відкритою струменевою топологією [2, 3], що пояснює неадекватність сучасних нуль-мірних стандартних фізичних моделей в галузях мікро- та макрокосмосу: стандартної моделі фундаментальних взаємодій (SM) та стандартної космологічної моделі (Lambda-CDM). Перша побудована на хибних конструкціях точкових кварків-партонів, а друга – на ілюзорній ідеї космологічної сингулярності (т.з. Великого вибуху). Обидві моделі безпосередньо, або ж опосередковано апелюють до спеціальної та загальної теорій відносності Ейнштейна, самообмежених лишень дійсною частиною загального комплексного простору та рухом із досвітловими і світловими швидкостями. Зняття цих штучних обмежень, як показано нижче, дозволяє адекватно зрозуміти фізичні процеси в ієрархії космічних, технічних, псевдоелементарних та біологічних систем.

Основні розрахункові співвідношення

Гідродинамічно-хвильове калібрування потенціалів в рівняннях Максвелла та в їх аналогах для гравітомагнітного поля [3] приводить до наступного рівняння щодо вектор-потенціалів $\vec{V}$ інерційних збурень:

$$\vec{a} = \pm\upsilon_{co}\cdot(\Delta\vec{V} - \frac{1}{V_{ph}^2}\cdot\frac{\partial^2\vec{V}}{\partial t^2} - \frac{\vec{V}}{V_{ph}^2}\cdot(\Delta(\vec{\nabla})^2/2 - \frac{1}{V_{ph}^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}(\vec{V})^2/2)) \quad (1)$$

Тут $\vec{a}$, υ_{co}, V_{ph} – відповідно, повна похідна вектор-потенціалу за часом (з розмірністю прискорення), кооперативна в'язкість та фазова швидкість інерційних збурень:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + (\vec{V}\cdot\vec{\nabla})\vec{V}, \qquad \upsilon_{co} = \frac{Y}{m} = \frac{Q\cdot Y_B}{m},\ V_{ph} = \frac{V}{Q},\quad Q = \frac{Y}{Y_B}, \quad (2\text{-}5)$$

де Y, Y_B – розширений аналог сталої Планка $\hbar$ та його базове значення, m – інертна маса квантів збурень, V – їх групова швидкість (модуль вектор-потенціалу), Q – число кратності [3]. Знаки $\pm$ в (1) стосуються, відповідно, електромагнітного та гравітомагнітного полів.

Відшукуючи рішення (1) у вигляді [3]:

$$\vec{V} = \vec{V}_a\cdot e^{+i(\omega t\mp k_r\cdot r\mp|m|\cdot\varphi)}\cdot\Theta_{l,m}(\theta),\ \vec{V} = \vec{V}_a\cdot e^{-i(\omega t\mp k_r\cdot r\mp|m|\cdot\varphi)}\cdot\Theta_{l,m}(\theta), \quad (6,7)$$

де $\vec{V}_a$ – комплексна амплітуда, i – уявна одиниця, t – час, r – радіус-вектор, θ, φ – полярний та азимутальний кути сферичної системи координат, ω, k_r, m – циклічна частота, радіальне та магнітне (азимутальне) квантово-хвильові числа збурень, $\Theta_{l,m}(\theta)$ – полярна частина сферичних функцій, відповідна збереженню квадрату орбітального моменту імпульсу збурень та його проекції на довільну вісь, l – орбітальне квантове число, а також враховуючи резонансне занулення операторів д'Аламбера в правій частині (1), отримуємо наступні рівняння [3]:

$$(\mp \frac{2ik_r}{r} - k_r^2 - \frac{l(l+1)}{r^2} + \frac{\omega^2}{V_{ph}^2}) \cdot \vec{V} = 0 \ , \quad (\pm \frac{2ik_r}{r} - k_r^2 - \frac{l(l+1)}{r^2} + \frac{\omega^2}{V_{ph}^2}) \cdot \vec{V} = 0 \qquad (8,9)$$

Ці рівняння мають рішення, зокрема, за умови $k_r = 0$:

$$\frac{l(l+1)}{r^2} = \frac{\omega^2}{V_{ph}^2} \qquad (10)$$

Введемо позначення:

$$k_l^2 = \frac{l(l+1)}{r^2} \quad , \qquad (11)$$

за якого (10) перепишеться у вигляді:

$$k_l^2 = \frac{\omega^2}{V_{ph}^2} \ , \qquad (12)$$

характерному для рішень хвильових рівнянь. Опускаючи в подальшому індекс $l(k_l = k)$, домножимо (12) на розмірний параметр наступним чином:

$$\frac{Y^2 \cdot k^2}{m} = \frac{Y^2 \cdot \omega^2}{m V_{ph}^2} \qquad (13)$$

Введемо співвідношення:

$$\frac{Y^2 \cdot k^2}{m} = m V^2 \ , \qquad (14)$$

згідно з яким з (13) отримаємо:

$$m V^2 \cdot m V_{ph}^2 = (Y\omega)^2 \ , \qquad (15)$$

або ж:

$$Y\omega = m \cdot V \cdot V_{ph}, \quad Yk = mV \qquad (16, 17)$$

Мультиплікативна форма виразу (15) дозволяє ввести три взаємозалежних кванти інерційних збурень з відповідними енергіями:

$$E_M = m \cdot V \cdot V_{ph} = Y\omega \qquad (18)$$

$$E_E = m \cdot V_{ph}^2 = Y\omega / Q = Y \cdot \omega_E \qquad (19)$$

$$E_W = m \cdot V^2 = Y\omega \cdot Q = Y \cdot \omega_W \ , \qquad (20)$$

причому згідно з (15) виконується мультиплікативне співвідношення:

$$E_M^2 = E_E \cdot E_W \qquad (21)$$

Індекси M, E, W складових резонансного триплету умовно характеризують середню (Middle), «східну» (East) та «західну» (West) компоненти. Такого роду географія виправдана тим, що при $Q \prec 1$ «східна» компонента на енергетичному спектрі знаходиться правіше, а «західна» – лівіше середньої – подібно до географічних напрямів на карті.

З (16, 17) отримуємо наступний вираз для частоти середньої компоненти:

$$\omega_M = \frac{Y_B}{m} \cdot k_M^2 \qquad (22)$$

Вводячи аналоги виразу (17) для решти компонент, отримаємо також відповідні частотні аналоги для цих компонент:

$$\omega_E = \frac{Y_B}{m} \cdot k_E^2, \quad \omega_W = \frac{Y_B}{m} \cdot k_W^2 \ , \qquad (23, 24)$$

причому:

$$\omega_E = \omega_M / Q, \ \omega_W = \omega_M \cdot Q, \ \omega_M^2 = \omega_E \cdot \omega_W \qquad (25–27)$$

$$k_E = k_M / \sqrt{Q}, \quad k_W = k_M \cdot \sqrt{Q}, \quad k_M^2 = k_E \cdot k_W \qquad (28–30)$$

З використанням параметра υ_{co} енергії складових резонансних триплетів можуть бути записані також у вигляді:

$$E = \upsilon_{co} \cdot Y_B \cdot k^2 = Y_B \cdot k \cdot V \ , \qquad (31)$$

де хвильові числа відповідають співвідношенням (28–30).

Наведені вище співвідношення будуть використані для аналізу фактичних даних в різномасштабних фізичних системах Для повноти такого аналізу додамо також окремі співвідношення щодо суцільних складових спектрів інерційних збурень, згенерованих в нерівноважних системах з контактними розривами. Ці співвідношення по своїй фізичній суті отримані на основі принципу адитивності, який застосовується тут локально для окремих складових мультиплікативних триплетів. У випадку квантового хітонного газу [2, 3], враховуючи (31), отримаємо наступний енергетичний розподіл світимості:

$$\varepsilon_{he}(E) = \frac{E^2}{8\pi^2 \cdot Y_B^2 \cdot \upsilon_{co}} \cdot (e^{\frac{E}{T_{he}}} - 1)^{-1}, \tag{32}$$

де T_{he} – хітонна температура [2, 3]. На межі низьких енергій маємо характерну лінійну залежність світимості від енергії:

$$\varepsilon_{he}(E) \approx \frac{E}{8\pi^2 \cdot Y_B^2 \cdot \upsilon_{co}} \quad \text{при} \quad E \ll T_{he} \tag{33}$$

Для гетерогенної бульбашкової квантової системи інерційних (хітонних) збурень [2,3] доцільно розглянути енергетичний розподіл потужності випромінювання:

$$\frac{dP}{dE} = \varepsilon_{he}(E) \cdot 4\pi k^{-2} = \frac{E}{2\pi Y_B} \cdot (e^{\frac{E}{T_{he}}} - 1)^{-1} \tag{34}$$

На межі низьких частот цей розподіл виходить на характерний сталий рівень (сходинку), залежний від хітонної температури [2, 3]:

$$\frac{dP}{dE} \approx \frac{T_{he}}{2\pi Y_B} \quad \text{при} \quad E \ll T_{he} \tag{35}$$

Інтегральна енергетична світимість хітонного термокомплексу задається виразом:

$$R_{he}^* = \frac{\zeta(3) \cdot T_{he}^3}{4\pi^2 \cdot Y_B^2 \cdot \upsilon_{co}}, \tag{36}$$

де $\zeta(3) \approx 1,202$ – дзета-функція Рімана. Аналоги законів Віна тут мають вид [2, 3]:

$$E_{\max} = \gamma_{he} \cdot T_{he}, \quad \lambda_{\max}^2 = \frac{4\pi^2 \cdot Y_B \cdot \upsilon_{co}}{\beta_{he} \cdot T_{he}}, \tag{37, 38}$$

$$\text{де} \quad \gamma_{he} \approx 1,5936, \quad \beta_{he} \approx 3,3809 \tag{39, 40}$$

– характерні константи відповідних трансцендентних рівнянь [2, 3]. З вищенаведених співвідношень для хітонного газу також слідує:

$$\left(\frac{T_{he}}{\lambda_{\max}}\right)^2 = \frac{\beta_{he} \cdot Y_B \cdot R_{he}^*}{\zeta(3)} \tag{41}$$

Тут $\lambda_{\max}$ та $E_{\max}$ – довжина хвилі та енергія збурень в екстремумах відповідних спектрів.

Важливою для подальшого аналізу є густина ρ приєднаної маси M [1–3]. Остання визначається наступним чином:

$$MV^2 = 2k_Б \cdot T \tag{42}$$

де $k_Б, T$ – стала Больцмана та абсолютна температура в стані локальної термодинамічної рівноваги інерційних збурень з речовиною. При цьому $\lambda_{\max}$ задовільняє одночасно співвідношенню (38) та класичному закону Віна:

$$\lambda_{\max} = \frac{ch}{\beta \cdot k_Б \cdot T} \tag{43}$$

Тут c – швидкість світла у вакуумі, h – стала Планка, $\beta \approx 4,965$ – характерний корінь відповідного трансцендентного рівняння. Враховуючи вираз для густини приєднаної маси

$$\rho = \frac{3M}{4\pi R_{\max}^3} = \frac{3Mk_{\max}^3}{4\pi}, \quad R_{\max} = k_{\max}^{-1} = \frac{\lambda_{\max}}{2\pi}, \tag{44, 45}$$

з вищенаведених співвідношень отримаємо:

$$\rho = \frac{3\beta}{ch \cdot Q^2} \cdot \left(\frac{m \cdot k_Б \cdot T}{\hbar}\right)^2 = \frac{3\beta}{ch} \cdot \left(\frac{k_Б \cdot T}{\upsilon_{co}}\right)^2 \quad , \quad \rho = \frac{3c \cdot m^3 \cdot f(\lambda_{\max})}{\beta \hbar^2 \cdot Q^2} \qquad (46,47)$$

В останньому виразі фігурує характерна частота на спектрах інерційних збурень [1–3]. Слід зазначити, що на відміну від попереднього розгляду [2, 3], параметр Q тут не пов'язується з косинусом кута між імпульсом та груповою швидкістю квантів, оскільки за умов збереження квадрату моменту імпульсу та його проекції сам імпульс як такий не зберігається. Отже, параметр Q тут може бути як більшим, так і меншим за одиницю.

Вищенаведені співвідношення в системі електромагнітного поля в якості базового параметра Y_B включають сталу Планка $\hbar (Y_B = \hbar)$. Відповідний базовий параметр в системі гравітомагнітного поля вводиться через універсальне використання сталої тонкої структури α [2,3], як зазначено нижче. Гравітомагнітне поле, на відміну від електромагнітного, не має всталеного базового параметру Y_B (за типом $\hbar$), що споміж іншого знімає тут автоматичне падіння хітонної температури зі зростанням просторових масштабів, характерне для електромагнітного поля. Для хітонних систем гравітомагнітного поля параметр Y_B вводиться наступним чином [2,3]:

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{G \cdot M_g^2}{Y_B \cdot c}, \quad Y_B = \frac{G \cdot M_g^2}{\alpha \cdot c} \quad \text{(система СГС)} \qquad (48, 49)$$

де G – стала всесвітнього тяжіння, M_g – приєднана гравітаційна маса. Наведемо також ряд співвідношень [2,3], що будуть використані в процесі подальшого аналізу:

$$k^{-1} = R = \frac{Y_B \cdot C}{\beta \cdot T_g}, \quad M_g \cdot V^2 = 2T_g \qquad (50, 51)$$

$$(mc)^2 = \frac{\beta G \cdot Q^2 \cdot M_g^3}{2\alpha \cdot R} \quad , \qquad \omega^2 = 4\pi / \tau^2 = \frac{2G \cdot M_g}{\alpha\beta \cdot R^3} = \frac{8\pi G}{3\alpha\beta \cdot Q^2} \cdot \rho_g \qquad (52,53)$$

Врахуємо також співвідношення:

$$V^2 = \frac{2GM_g}{\alpha\beta R}, \qquad V \approx 7,43 \cdot (GM_g / R)^{1/2} \qquad (54, 55)$$

$$\tau^2 = \frac{2\pi^2 \alpha\beta Q^2}{GM_g} \cdot R^3 \approx \frac{Q^2}{55,2} \cdot \frac{4\pi^2}{GM_g} \cdot R^3, \; \tau = f^{-1}(\lambda_{\max}), \quad \tau / \tau_K \approx Q / 7,43 \qquad (56\text{-}58)$$

Тут R, τ – характерний розмірний параметр (радіус) та характерний період інерційних збурень, T_g – формально введена енергетична гравітаційна температура, ρ_g – густина приєднаної гравітаційної маси. Співвідношення (54-58) відображають відмінність швидкісних і часових параметрів корпускулярно-вихор-хвильового руху в космічних системах щодо відомих Кеплерових форм. Ця відмінність зазвичай невірно відноситься на рахунок т.з. темної енергії й прихованої маси [4].

Резонансні тріади на спектрах інерційних збурень у псевдоелементарних системах

Контактна генерація енергії за принципом Creatio ex nihilo потребує початкової порогової енергетичної накачки, яка із великим запасом забезпечується в колайдерних експериментах та в ядерній галузі. Відомий гігантський резонанс ядер (рис. 1) зазвичай хибно пояснюють колективними коливаннями ядерних протонів щодо нейтронів та штучно відділяють від низькоенергетичних та високоенергетичних збуджень [4,5]. В дійсності ж весь комплекс ядерних резонансів в діапазоні від одного до декількох сотень МеВ є проявом триплетної мультиплікативної резонансної структури інерційних збурень на ядерному рівні. На цю структуру, як видно з рис. 1, накладаються вужчі за шириною та діапазоном тріади з більшим значенням параметра Q. Зокрема, виходячи з даних рис. 1 для ядра титану при Q = 0,89 та $E_E \approx 16$ МеВ, $m = m_p$ (маса протона), $Y_B = \hbar$, за співвідношеннями (46,47) отримуємо характерний радіус зовнішньої оболонки резонансного термокомплексу 1,52 фм, близький до радіусу ядра гелію та приблизно вдвічі більший за радіус протона. При цьому вирахувана за співвідношеннями (46,47) густина приєднаної маси тут близька до густини середніх ядер. За даними рис. 1 для вширеної тріади збурень з $E_M \approx 20$ МеВ (гігантський резонанс) при Q = 0,067 , $m = m_p$ з (18, 22) отримуємо відповідно характерний радіус 0,37 фм .

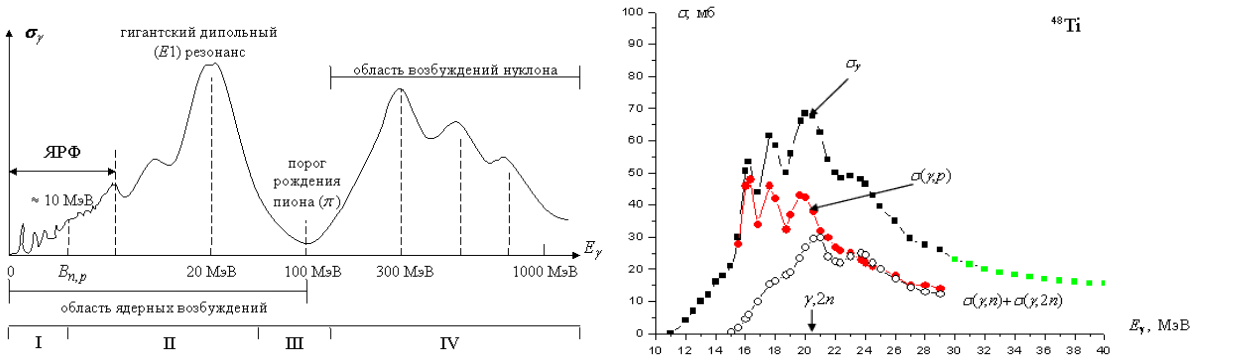


Рис. 1. Спектри ядерних резонансів [5]

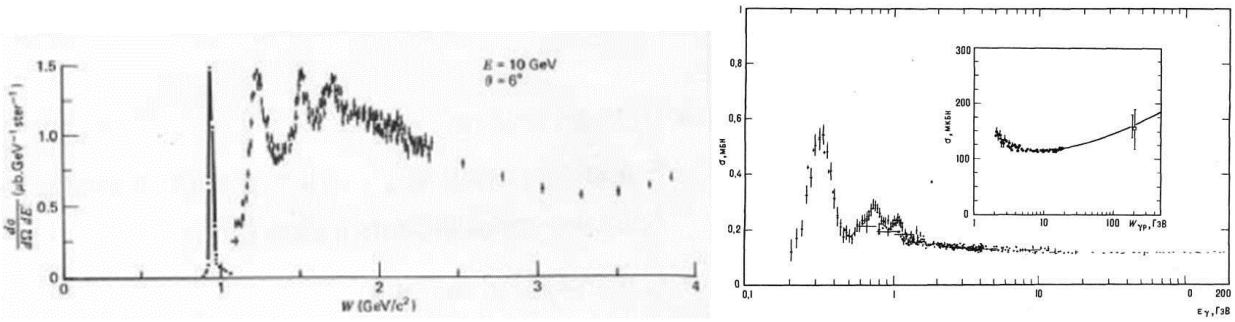


Рис. 2. Резонансні перерізи розсіяння електронів (зліва) та гамма-квантів (справа) на протонах [4, 6]

Для порівняння слід розглянути класичні результати щодо розсіяння електронів на протонах (рис. 2), які вельми подібні до ядерних резонансів на рис. 1. Вони, як видно, також містять звужену тріаду резонансів, накладену на вширений кластер. Це свого часу стало у витоках цілковито хибної кваркової моделі адронів [4]. Насправді ж резонансний триплет тут обумовлений термокомплексами на мюонах як складових адронів [2, 3]. При Q = 0,83 , $m = m_\mu$ за співвідношеннями (19, 23) отримуємо характерний зовнішній радіус цих термокомплексів 0.50 фм, який за попередньою аналогією співпадає з радіусом своєрідної мюонної α -частинки в структурі збудженого протона. Це дозволяє визначити, власне, радіус самого мюона як базової складової адронів, аналогічної нуклонним складовим ядра : 0,25 фм . Зазначений вище аналог альфа-частинки на мюонах у складі протону пояснює, споміж іншого, своєрідний антирезонанс, який спостерігається при розсіянні каонів на протонах (рис. 3) внаслідок близькості мас цієї частинки та каонів.

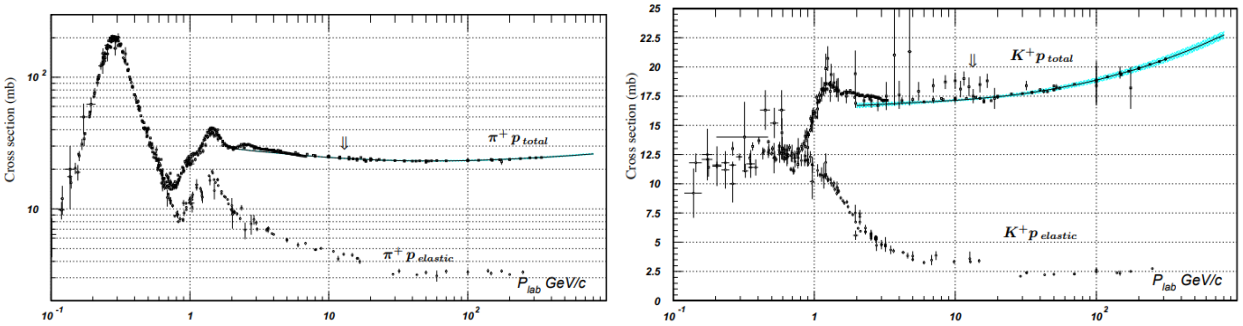


Рис. 3. Резонансні та антирезонансні перерізи розсіяння піонів (зліва) та каонів (справа) на протонах [6].

Відношення групової швидкості мюонних збурень в протоні (для зовнішньої «західної» оболонки) до швидкості світла у вакуумі становить згідно з (17, 23) величину близько 3,1 . На відміну від попереднього випадку ядерного резонансу на нуклонах, густина приєднаної маси тут у 5-6 разів вища за густину нуклонів, що свідчить про концентрацію маси мюонних складових нуклонів у відносно компактному об'ємі. Це пояснює відомі результати щодо глибоко непружного розсіяння на протонах та причини ілюзорного введення точкових кварків-партонів [4]. Вширений резонансний кластер на рис. 2 відіграє роль аналога гігантського ядерного резонансу на рис. 1. Слід звернути увагу на високоенергетичний обрив цього кластеру, обумовлений тунельними процесами в резонансних структурах [2].

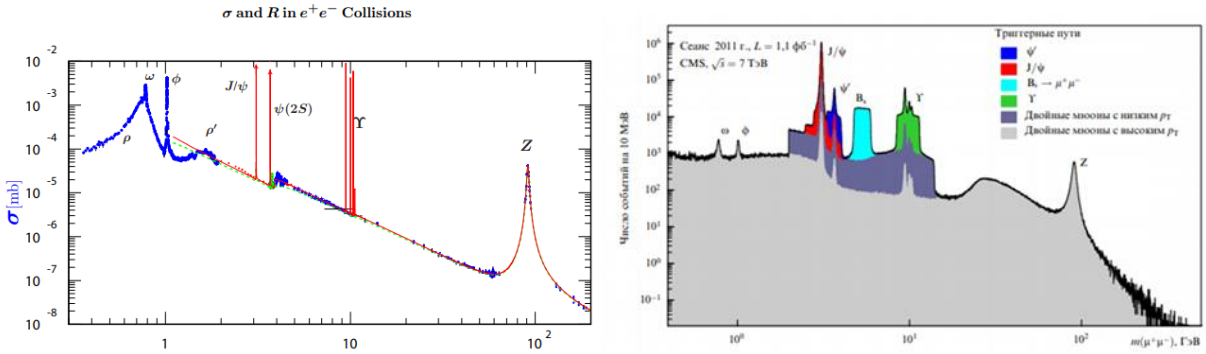


Рис. 4. Результати колайдерних експериментів у зустрічних електрон-позитронних (зліва) та протонних (справа) пучках [6]

Мюонна структура адронів, яка цілковито узгоджується з результатами вищенаведених розрахунків, дістає додаткового підтвердження в даних колайдерних експериментів – рис. 4. Між тим, домінуюча нині інтерпретація цих даних [6] лежить в руслі цілковито хибної стандартної моделі фундаментальних взаємодій (SM), яка штучно виділяє високоенергетичний z -резонанс на рис. 4 в особливий калібрувальний бозон електрослабкої взаємодії. В дійсності ж, на спектрах рис. 4 чітко виділяються резонансні тріади інерційних збурень – у т.ч. тріада з інертною масою мюона ($m = m_\mu$) у складі z -резонансу («східна» E -компонента), J/ψ -резонансу (середня M -компонента) та, власне, мюона («західна» W -компонента). Їх енергії, як вже відзначалось [2, 3], зв'язані мультиплікативним співвідношенням типу (21):

$$E_{J/\psi}^2 = E_Z \cdot m_\mu \cdot c^2 \tag{59}$$

Виходячи з даних рис. 4, знаходимо значення параметра $Q \approx 3,40 \cdot 10^{-3}$, за якого при $m = m_\mu$ з вищенаведених співвідношень отримуємо: $R_Z \approx 1,2 \cdot 10^{-17}$ м, $R_{J/\psi} \approx 6,4 \cdot 10^{-17}$ м, $V_Z / c \approx 5,4$, $V_{J/\psi} / c = 1$, $T \approx 3,93 \cdot 10^{13}$ °K . Остання величина характеризує температуру мюонної плазми, що виникає в результаті зіткнень прискорених частинок. Ця плазма цілком альтернативна ілюзорній кварк-глюонній плазмі, якою зазвичай оперують [4]. Як слідує з даних рис. 4, мюонна плазма містить також залишки протонів (лінії Υ -резонансів) та дейтонів (лінії B -резонансів). Енергії відповідних ліній менші за енергію z -резонансу у m_p / m_μ та m_d / m_μ разів. Разом з J/ψ -резонансом Υ - та B -резонанси, як видно, утворюють окрему (дещо асиметричну) тріаду. Крім того, на спектрі рис. 4 явно виділяється ніяк не відмічений теоретиками SM вширений хітонний кластер з енергією близько 29 ГеВ, який формує черговий триплет з Υ - та z -резонансами. Цей кластер аналогічний хітонному кластеру в технічній системі різання (рис. 12, $f \approx 300$ Гц), незважаючи на те, що відношення відповідних енергій тут становить 22 порядки величини. У низькочастотній області спектри рис. 4 виходять на вже зазначену «сходинку» у відповідності з співвідношенням (35) для гетерогенної системи інерційних збурень.

З іншого боку, низькоенергетичні краї резонансних кластерів на рис. 1,2 мають чітко виражений лінійний характер у відповідності з виразом (33) для хітонного квантового газу. Аналогічна лінійність характерна також для електронів β -розпаду та реакторних антинейтрино (рис. 5). Це дозволяє вважати β -розпад нейтрона та ядер результатом трансформації резонансної тріади хітонних збурень.

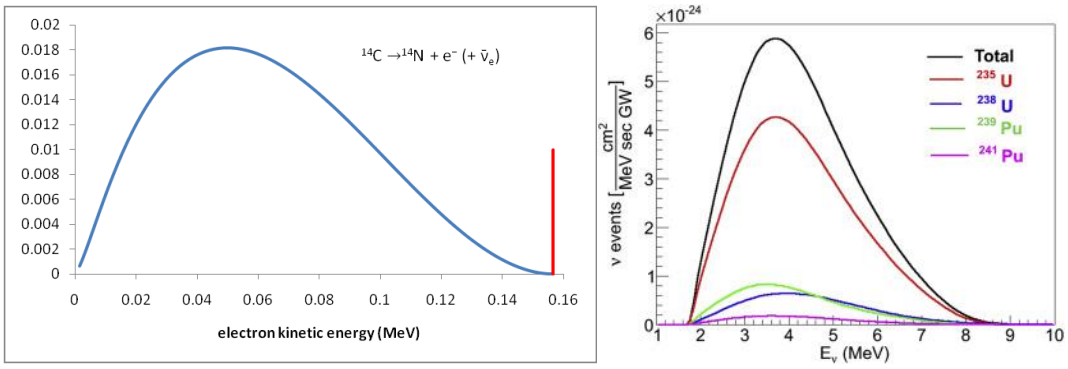


Рис. 5. Спектри електронів бета-розпаду та реакторних антинейтрино [7, 8]

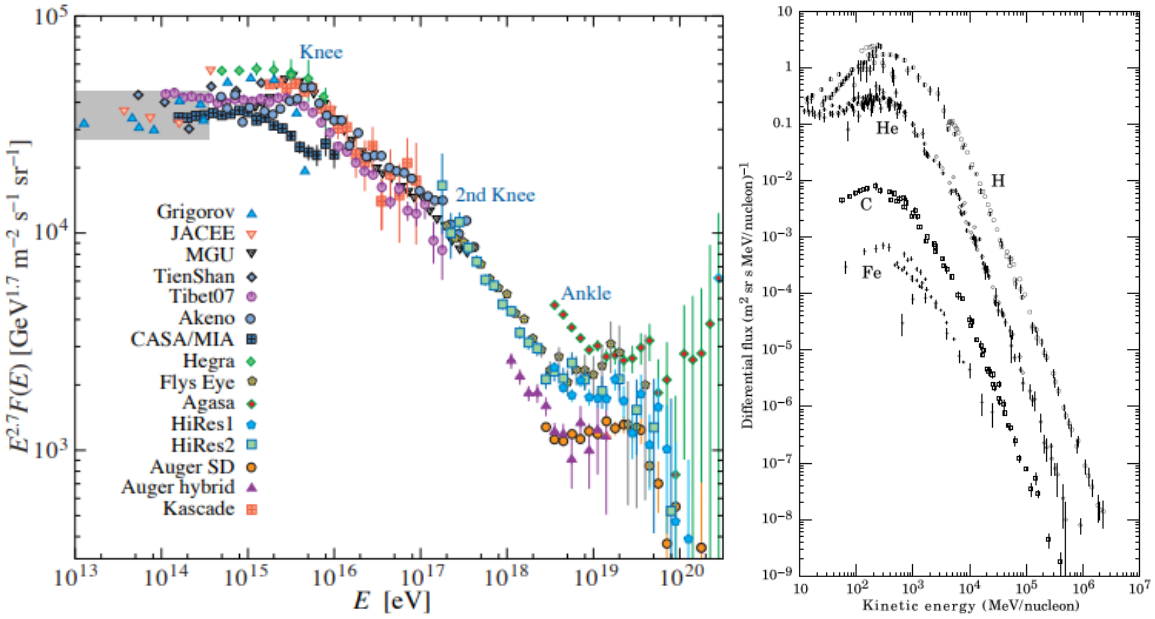


Рис. 6. Спектри космічних променів надвисоких та середніх енергій [6]

Із вищенаведених співвідношень маємо наступні взаємозв'язки :

$$M = \frac{2m^2 \cdot c^2}{\beta^2 \cdot k_Б \cdot T} \cdot \frac{1}{Q^2} = \frac{2m^2 c}{\beta \cdot (h \cdot m \cdot f(\lambda_{max}))^{1/2}} \cdot \frac{1}{Q^2} \quad (60)$$

$$E_E = Q \cdot h \cdot f(\lambda_{max}) = \frac{4m^3 \cdot c^2}{\beta^2 \cdot M^2} \cdot \frac{1}{Q^3} \quad (61)$$

В граничному випадку при $M = m$ з (61) слідує:

$$E_E = Q \cdot h \cdot f(\lambda_{max}) = \frac{4mc^2}{\beta^2} \cdot \frac{1}{Q^3} \quad (62)$$

При $Q \square 1$, як видно з (62), енергії згенерованого інерційного випромінювання значно перевищують енергії спокою відповідних частинок. За умови $M = m$ маємо:

$$k_Б \cdot T = \frac{2}{\beta^2} \cdot mc^2 \cdot \frac{1}{Q^2} = \frac{Q \cdot E_E}{2} \quad (63)$$

Це дозволяє контактно прискорювати частинки до надвисоких енергій при високих температурах за рахунок зменшення параметра Q. Зокрема, даним рис. 6 для космічних променів надвисоких енергій відповідають значення: $m = m_\mu$, $E_E \approx 5 \cdot 10^{19}$ еВ, $Q \approx 7,0 \cdot 10^{-5}$, $E_M \approx 3 \cdot 10^{15}$ еВ, $E_W \approx 2 \cdot 10^{11}$ еВ, $T \approx 2,0 \cdot 10^{19}$°K . Для космічних променів середніх енергій (рис. 6) при $m = m_p$ відповідно маємо: Q = 0,8 , $T \approx 9 \cdot 10^{11}$°K . Для сонячних космічних променів на електронах при Q = 0,5 отримуємо значення $T \approx 5 \cdot 10^8$°K .

З вищенаведених співвідношень також слідує:

$$\frac{V_E}{C} = \frac{\beta \cdot k_Б \cdot T}{mc^2} \cdot Q, \qquad \frac{V_E^2}{C^2} = \frac{2k_Б \cdot T}{Mc^2} \quad (64,65)$$

Для мюонних космічних променів при $T \approx 2,0 \cdot 10^{19}$°K тут маємо значення $V_E / c \approx 5,7 \cdot 10^3$ при $Q \approx 7,0 \cdot 10^{-5}$. Адекватність отриманих розрахункових результатів натурним даним (рис. 6) при надсвітлових швидкостях свідчить про відносність широко розтиражованої теорії відносності Ейнштейна, яка штучно накладає табу на рух з надсвітловими швидкостями. Для космічних променів середніх та низьких енергій на протонах та електронах маємо граничне відношення групової швидкості до швидкості світла у вакуумі, близьке до одиниці. Це виділяє мюони здатністю до руху з надсвітловими швидкостями та розкриває відому загадку $\mu - e$ -універсальності [4]. На відміну від електронів, мюони стабілізуються при надсвітлових швидкостях.

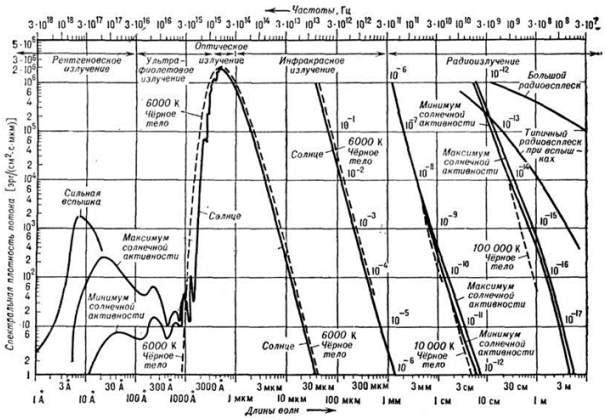
Для середньої та «західної» компонент мюонних космічних променів маємо відповідно $V_M / c \approx 4,8$, $V_W / c \approx 0,4$. Відсутність останньої на спектрах (рис. 6) свідчить про розпад досвітлових

мюонів. Зауважимо, що на відміну від Ейнштейнівського штампу, зв'язок енергії з масою та груповою швидкістю тут наступний:

$$E = m \cdot V^2 / Q \tag{66}$$

Це значно збільшує енергію мюонних частинок порівняно з mc^2 за рахунок суттєвого зменшення параметра Q .

Резонансні триплети на спектрах космічних систем



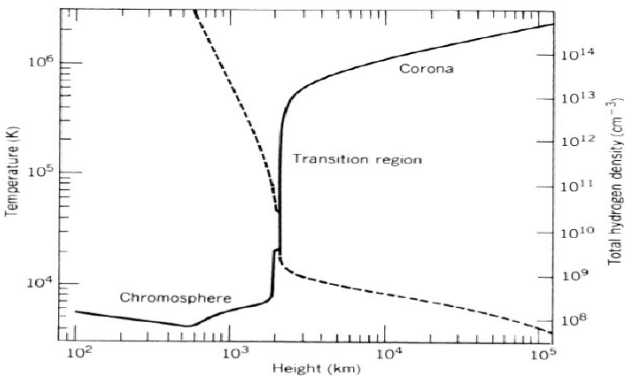
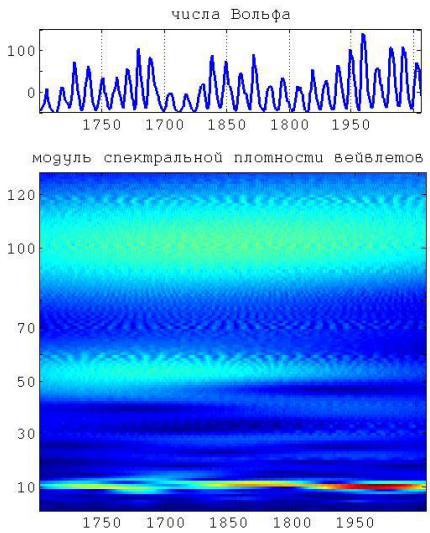


Рис. 7. Спектри електромагнітного випромінювання Сонця [4]
Рис. 8. Висотні залежності температури та густини в атмосфері Сонця [9]

Аналіз троїстих резонансів в системах космічних масштабів варто розпочати зі спектру випромінювання Сонця – рис. 7. Домінуючий тут E -резонанс лежить у видимій та інфрачервоній ділянці спектру в той час, як середній M -резонанс займає рентгенівську область. Високочастотний W -компонент триплету попадає в діапазон γ -випромінювання та реально фіксується лише в періоди сонячних спалахів [4]. При $\lambda_{\max} \approx 0,45$ мкм, $R^*_{he} \approx 6,28 \cdot 10^7$ Вт/м^2 з виразу (41) отримуємо значення хітонної температури Сонця $T_{he} / k_Б \approx 4,45 \cdot 10^3$ °К , вельми відмінне від значення $T \approx 6,44 \cdot 10^3$ °К , отримане з виразу (43) для закону Віна у спектрі класичного теплового випромінювання, а також від значення $T \approx 5,78 \cdot 10^3$ °К , отримане на основі закону Стефана–Больцмана [4]. Неспівпадання останніх двох величин підкреслює цілковиту неадекватність уявлень щодо чорнотільного спектру Сонця [4]. З врахуванням $\lambda_{\max}$ та T_{he} на основі (38) отримуємо значення кооперативної в'язкості хітонних термокомплексів Сонця: $\upsilon^S_{co} \approx 10,1$ м^2/с, звідки при $m = m_e$ (маса електрона) з виразу (3) знаходимо значення параметра $Q \approx 8,72 \cdot 10^4$. За такого значення вирахувана згідно (46,47) густина приєднаної маси відповідає густині електронної компоненти сонячної плазми у контактному шарі між хромосферою та короною Сонця – рис. 8. Врешті, з врахуванням параметра Q та виразу (28) отримуємо характерну довжину хвилі рентгенівської M -компоненти триплету: $\lambda_M \approx \lambda_{\max} / \sqrt{Q} \approx 16$ Å , що цілком відповідає натурним даним (рис. 7) та підтверджує адекватність проведеного розрахунку.

Аналогічні розрахунки можуть бути проведені для мікрохвильового фонового космічного випромінювання, хибно віднесеного на рахунок «релікту» від т.з. Великого вибуху [4]. В дійсності ж, це випромінювання з квазірівноважною температурою близько 2,7 градусів Кельвіна генерується кавітаційним топологічним розривом комплексного простору на периферії Сонячної системи [1-3]. Розрахована концентрація електронної компоненти космічної плазми на цьому розриві складає близько 0,001 частинок в кубічному сантиметрі. Він відділяє периферійну холодну фотосферу від периферійної корони Сонячної системи, максимум випромінювання якої з довжиною хвилі близько 0,12 мкм лежить в ультрафіолетовій ділянці спектру.



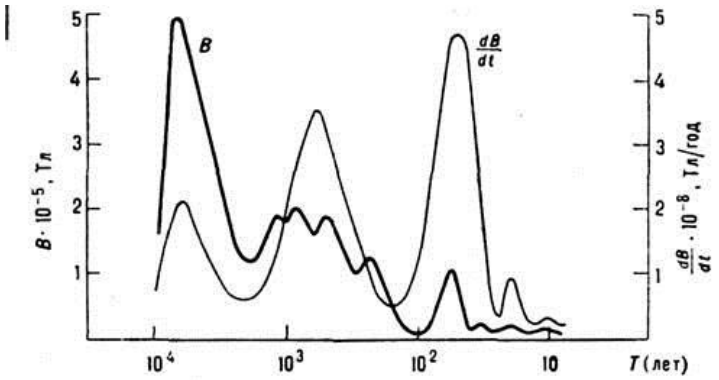


Рис. 9. Вейвлет-спектр періодів сонячної активності [10]
Рис. 10. Спектр часових варіацій геомагнітного поля [4]

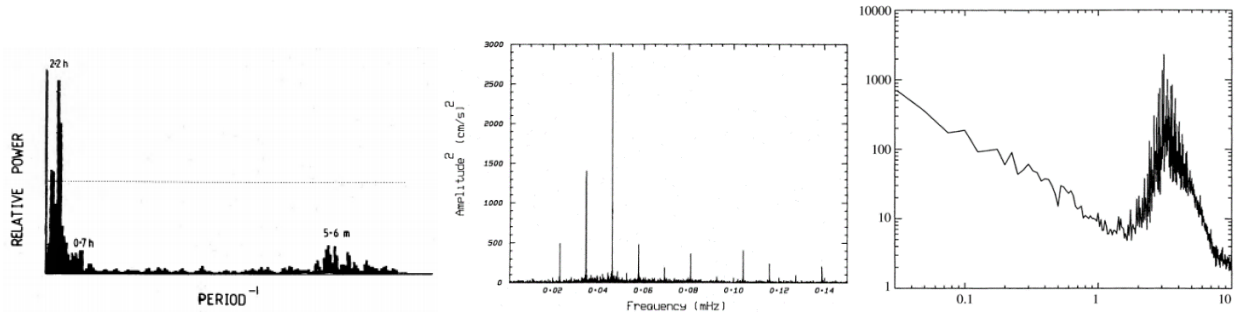


Рис. 11. Спектри варіацій яскравості сонячного диску [4]

Сонячна та геодинамічна активність також обумовлена значними часовими та просторовими масштабами – рис. 9,10. Резонансна тріада періодів сонячної активності (рис. 9) включає основний квазіодинадцятирічний період ($\tau_M \approx 10,85$ років), квазістолітній період ($\tau_W \approx 100$ років) та квазірічний період ($\tau_E \approx 1,1$ року), звідки визначаємо параметр $Q \approx 0,108$. За співвідношеннями (48-58) встановлюємо далі: $m / M_S \approx 2,2 \cdot 10^{-5}$, $\rho_g \approx 2,6 \cdot 10^{-10}$ кг/м^3, $R_M \approx 1,23 \cdot 10^{13}$ м ≈ 83 а.о. Остання величина практично співпадає з середнім радіусом т.з. границі ударної хвилі в геліосфері. Менш виражений на рис. 9 півстолітній цикл сонячної активності разом із столітнім та квазідвохсотлітнім циклами при Q = 1/2 утворюють додаткову тріаду із середнім радіусом близько 130 а.о., відповідним розміру геліопаузи.

Резонансний триплет періодів геомагнітної активності (рис. 10) включає величини: $\tau_E \approx 60$ років, $\tau_M \approx 600$ років, $\tau_W \approx 7000$ років, звідки $Q \approx 0,09$. У цьому випадку з (48-58) слідує: $m / M_3 \approx 2,9 \cdot 10^{-8}$, $\rho_g \approx 4,4 \cdot 10^{-16}$ кг/м^3. Радіус довготривалої складової тут практично рівний сонячному (для основної тріади), що підкреслює спільне космічне походження як сонячної, так і геомагнітної активності.

Для короткоперіодних циклів Сонця (рис. 11) при $\tau_E^{-1} = f(\lambda_{max}) \approx 3$ мГц, $f_M \approx 0,04$ мГц, $Q \approx 1,33 \cdot 10^{-2}$ за співвідношеннями (48-58) знаходимо: $R_E \approx 4,9 \cdot 10^9$ м $\approx 7,0$ R$_S$, $R_M \approx 4,2 \cdot 10^{10}$ м $\approx 0,28$ а.о. Остання величина близька до радіуса орбіти Меркурію, що споміж іншого пояснює відомі аномалії його перигелію, котрі зазвичай приписує собі загальна теорія відносності.

Для радіопульсарів при характерних значеннях $\tau_E \approx 6$ мс, $Q \approx 0,04$ за співвідношенням (53) знаходимо значення $\rho_g \approx 1,1 \cdot 10^{11}$ кг/м^3, вельми далеке від стійких та хибних уявлень про надщільні нейтронні зорі та чорні діри, котрі нібито обумовлюють активність пульсарів [4]. Насправді ж, рекордна стабільність періодів радіопульсарів пояснюється автосинхронізацією гравітаційних та електромагнітних мод інерційного випромінювання, контактно-згенерованого в надрах цих масивних космічних об'єктів.

Троїсті резонанси на спектрах інерційних збурень в технічних системах

Рис. 12. Спектри (вгорі) та акустограми (внизу) процесів різання за умови синхронізації гравітаційних та електромагнітних мод (зліва) та без такої синхронізації (справа)

На рис. 12-13 наведені спектри інерційних збурень в технічних системах, на яких виразно проступають характерні резонансні тріади. Параметр Q тут може бути безпосередньо визначений зі співвідношення частот (25–27) або ж виходячи з виразів (44–47) для густини приєднаної маси. Зокрема при $f(\lambda_{\max}) = 2,7$ кГц (рис. 12) $\rho \approx 7,8 \cdot 10^3$ кг/м^3 (сталь), $m = 3,34 \cdot 10^{-27}$ кг (дейтон) з (46,47) знаходимо значення $Q \approx 1,45 \cdot 10^{-2}$, звідки $f_M = f(\lambda_{\max}) \cdot Q \approx 39$ Гц, $f_W = f(\lambda_{\max}) \cdot Q^2 \approx 0,57$ Гц. Аналогічно при $f_E = f(\lambda_{\max}) = 5,6$ кГц (рис. 12) $m = 1,673 \cdot 10^{-27}$ кг (протон), $\rho \approx 7,8 \cdot 10^3$ кг/м^3 (сталь) тут маємо: $Q \approx 7,4 \cdot 10^{-3}$, $f_M = f(\lambda_{\max}) \cdot Q \approx 41$ Гц, $f_W = f(\lambda_{\max}) \cdot Q^2 \approx 0,31$ Гц. Як видно з рис. 12, знайдені таким чином частоти f_E, f_M є домінуючими на спектрах збурень (поряд з оборотною частотою енергетичної накачки $\approx 13,3$ Гц). Останню слід віднести на рахунок інфразвукових гравітаційних мод. Синхронізація цих мод з високочастотними електромагнітними модами веде до аварійно-небезпечних бафтингових режимів функціонування контактних технічних систем – рис. 12.

Рис. 13. Мультиплікативні троїсті резонанси в контактах різання (зліва) та кочення (справа)

Вищенаведений взаємозв'язок резонансних частот та довжин хвиль інерційних збурень з локальною термодинамічною температурою веде до динамічної саморегуляції температури в системах контактної взаємодії. До прикладу, у попередньому випадку (рис. 12) вона встановлювалась у зоні різання на рівні близько $340\ °K$.

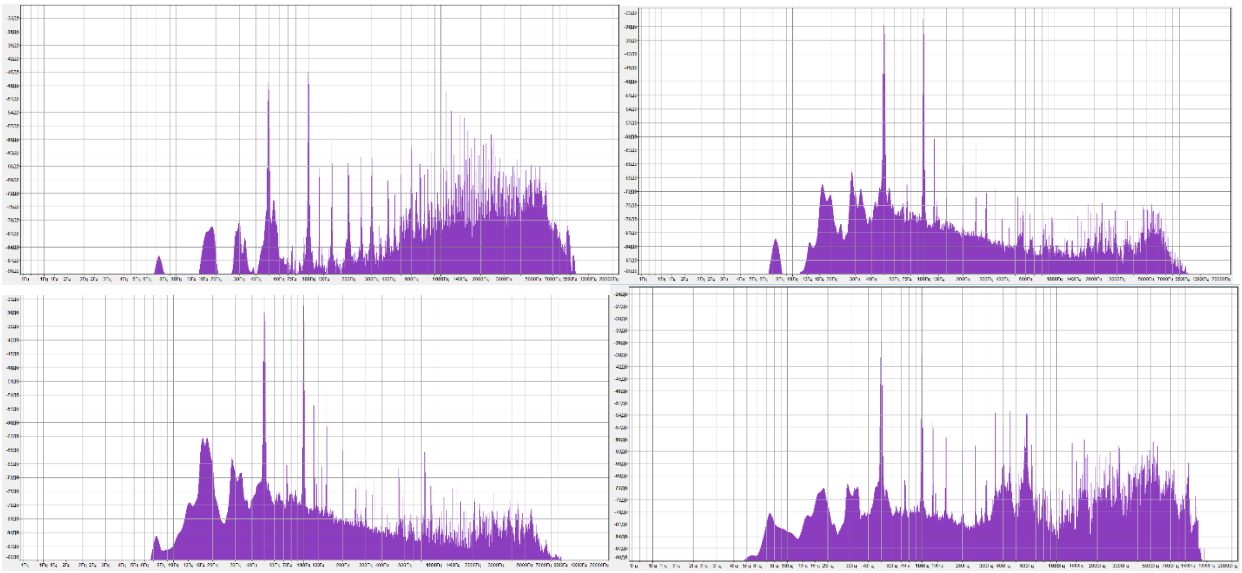


Рис. 14. Акустичні спектри контактного фретингу за умов: 6000 циклів (зліва вгорі), 90000 циклів (справа вгорі), 330000 циклів (зліва внизу), 528000 циклів (справа внизу)

На прикладі контактного фретингу (рис. 14) прослідковується залежність каскадного транспорту енергії інерційних збурень від режиму роботи контактного з'єднання. На початковому етапі припрацювання домінує прямий каскад – в бік менших просторових та часових масштабів, який обумовлює інтенсивне фретинг-зношування на фактичних мікроплямах контакту. Припрацьований режим характеризується оберненим енергетичним каскадом. Врешті на етапі катастрофічного фретинг-зношування з'являється чітко виражений резонансний триплет.

Високочастотні ультразвукові спектри та осцилограми сигналів акустичної емісії в контактних трибосистемах (рис. 15) якісно подібні до ядерних та колайдерних спектрів (рис. 1, 2) та містять звужені резонансні лінії на фоні вширених кластерів. Рис. 16 демонструє катастрофічний перехід від квазімонохроматичного режиму контактної взаємодії до мультиплікативного режиму з поєднанням високих локальних температур плавлення із різким глибинним зниженням температури. Це веде до схоплення, задирів та катастрофічного зношування.

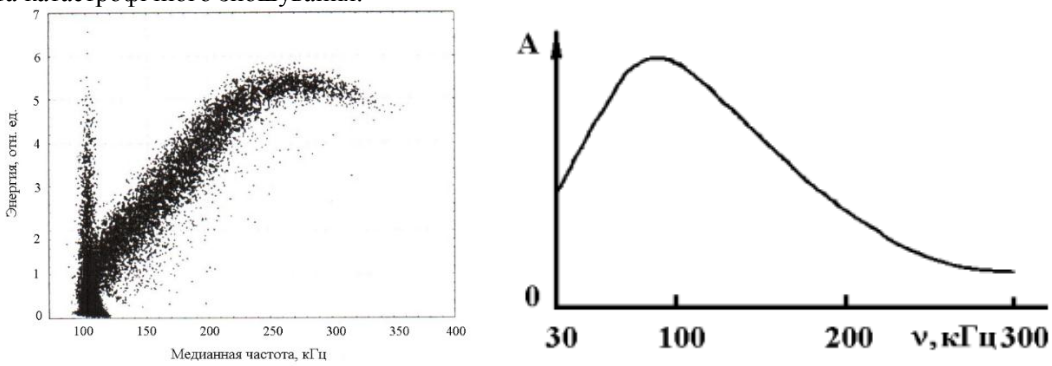


Рис. 15. Спектри акустичної контактної емісії в ультразвуковому діапазоні [11, 12]

Рис. 16. Осцилограми переходу від нормативного до аварійного режиму динамічної контактної взаємодії [12]

Резонансні тріади в геодинамічних та біологічних системах

Взаємозв'язок гравітаційних резонансних тріад з геодинамічними та регуляторними процесами в біосистемі Землі виявляється, зокрема, в циклічних масових вимираннях на планеті, що відбуваються з характерними періодами близько 26 млн. років та близько 250 млн. років (Q = 0,1) – рис. 17. Їм відповідають просторові радіуси гравітаційних мод близько 10000 а.о. та близько 30000 а.о. у Хмарі Оорта на периферії Сонячної системи. Зміна льодовикових періодів на глобальні потепління (рис. 17) регулюються гравітаційними тріадами в масштабах сотень, або ж тисяч астрономічних одиниць. Більш тривалі цикли

геодинамічної активності, відзначені рухом континентів з періодами 700-800 млн. років, обумовлені топологічними кавітаційними розривами комплексного простору з радіусами близько 0,8-0,9 світлових років щодо центру Сонячної системи. Такого роду масштаби та взаємозв'язки пояснюють, зокрема, парадоксальне на перший погляд відтворення земної географії на поверхні внутрішнього твердого ядра Землі [1].

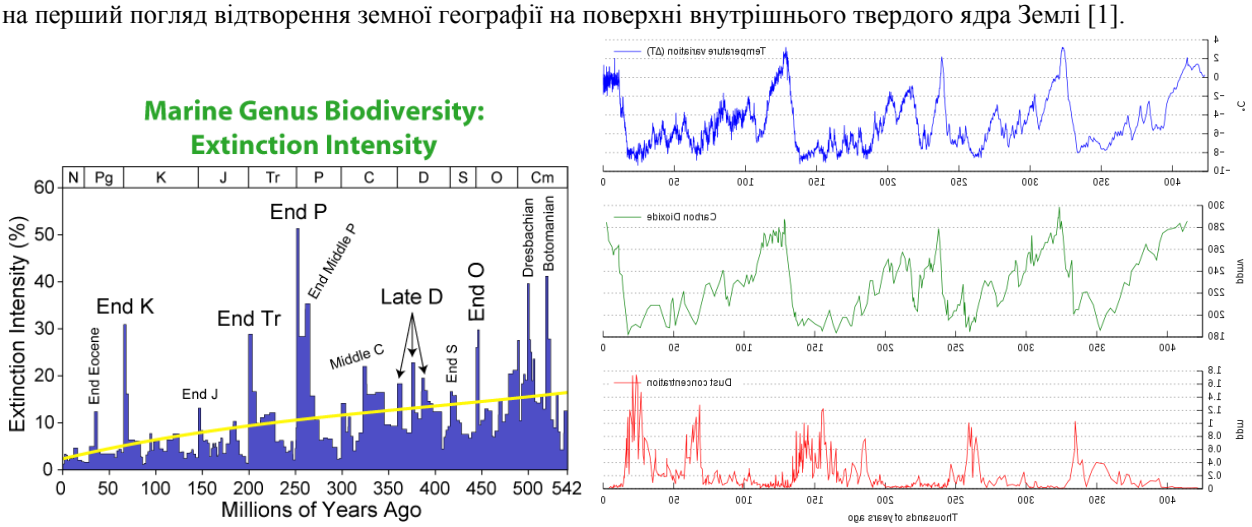


Рис. 17. Періодограми масових вимирань в історії Землі (зліва) [13] та середньотривалих варіацій температури, вмісту вуглекислого газу та пилу в атмосфері Землі (справа) [14]

Електромагнітні тріади в біосистемах на мезоскопічному рівні виявлені, зокрема в т.з. біологічній трансмутації ізотопів, мітогенетичному випромінюванні, в процесах сегрегації хромосом в анафазі мітозу та ін. [1-3]. Зупинимось тут лишень на контактній капілярній термостабілізації тіла людини та механізмах її порушення. Як уже зазначалось [1], температурі тіла 36,6 градусів за Цельсієм та густині крові близько 1,05 - 1,06 грам на сантиметр кубічний згідно вищенаведених співвідношень (46,47) при Q = 1 відповідають термокомплекси на основі іонів природного заліза-56, що характеризуються частотою 81,65 Гц. Деструкція цієї термостабілізації коронавірусами та іншими патологічними агентами має мультиплікативний троїстий характер – з появою сателітних високотемпературної та низькотемпературної складових щодо номінальної. Це порушує корпускулярно-вихор-хвильовий рух еритроцитів капілярами крові, руйнує останні та врешті веде до мікроінсультів та інших клінічних наслідків. Така деструкція в якісному відношенні подібна до переходу від нормативного до катастрофічного режиму динамічної контактної взаємодії в технічній трибосистемі, показаному на рис. 16.

Висновки

На основі проведеного аналізу слід зробити висновки про те, що наведені розрахункові співвідношення адекватно описують властивості троїстих мультиплікативних резонансів в технічних, космічних, псевдоелементарних, геодинамічних та біологічних системах.

Література

1. Заспа Ю.П. Корпускулярно-вихор-хвильові термокомплекси (тріони) в гетерогенних системах: технічних, космічних, псевдоелементарних, біологічних. Ядро Землі: чавун, рідкий вуглець та алмази. Великий адронний колайдер: гаряча трансформація протонів. Хмара Оорта: холодний колапсний генератор космічних променів надвисоких енергій та джерело мікрохвильового фонового випромінювання / Ю.П. Заспа // Вісник Хмельницького національного університету. – Технічні науки. – 2019. – № 4 (275). – С. 227–241.

2. Заспа Ю.П. Антисиметрія та кавітаційні топологічні розриви комплексного простору й інертної маси в основі ексимерних систем квантової генерації обмінного інерційного випромінювання. Мономерна рівновага та утворення речовини / Ю.П. Заспа // Вісник Хмельницького національного університету. – Технічні науки. – 2022. – № 5 (313). – С. 159–167.

3. Заспа Ю.П. Гідродинамічно-хвильове калібрування потенціалів в рівняннях Максвелла : нелінійна динаміка та когерентність, колапс, розширення та обмінна взаємодія інерційних дисипативно-колекторних збурень в нерівноважних середовищах у комплексному просторі. Спіральна турбулентність та когерентні структури тривимірного часу/ Ю.П. Заспа // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2022. – № 6 (315), т. 1. – С. 89–97.

4. Физическая энциклопедия : [в 5 т. / под ред. А.М. Прохорова]. – М. : Большая росс. энц., 1999. – 760 с.

5. Ишханов Б.С. Гигантский дипольный резонанс атомных ядер. Предсказание, открытие и исследование / Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов // УФН. – 2021. – Т. 191, № 2. – С. 147–162.

6. Review of Particle physics. Particle Data Group. URL: http://pdg.lbl.gov

7. Why is beta decay continuous? URL: https://socratic.org/questions/why-is-beta-decay-continuous

8. Kim Y. Detection of Antineutrinos for Reactor Monitoring. Nuclear Eng. Technology. 2016. V. 48, № 2. P. 285–292

9. Mayer F.J., Reitz J. Compton Composites Late in the Early Universe. URL: https://www.researchgate.net/publication/272646055_Compton_Composites_Late_in_the_Early_Universe

10. Кононович Э.В., Миронова И.В., Батурин В.А. Частотно-временной анализ рядов солнечной активности. URL: http://www.elibrary.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/MFTI/2006/182r.pdf

11. Колубаев Е.А. Особенности акустического излучения при трении стали Гадфильда / Е.А. Колубаев, О.В. Сизова, С.А. Пупынин // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319, № 2. – С. 62–66.

12. Баранов А.В. Ультразвуковой мониторинг работы трибосопряжений / А.В. Баранов, С.В. Тарасевич, В.А. Вагнер // Ползуновский вестник. – 2012. – № 1. – С. 23–27.

13. Масове вимирання. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/

14. Льодовикова ера. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/

References

1. Zaspa Yu.P. Korpuskuliarno-vykhor-khvylovi termokompleksy (triony) v heterohennykh systemakh: tekhnichnykh, kosmichnykh, psevdoelementarnykh, biolohichnykh. Yadro Zemli: chavun, ridkyi vuhlets ta almazy. Velykyi adronnyi kolaider: hariacha transformatsiia protoniv. Khmara Oorta: kholodnyi kolapsnyi henerator kosmichnykh promeniv nadvysokykh enerhii ta dzherelo mikrokhvylovoho fonovoho vyprominiuvannia / Yu.P. Zaspa // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. – Tekhnichni nauky. – 2019. – № 4 (275). – S. 227–241.

2. Zaspa Yu.P. Antysymetriia ta kavitatsiini topolohichni rozryvy kompleksnoho prostoru y inertnoi masy v osnovi eksymernykh system kvantovoi heneratsii obminnoho inertsiinoho vyprominiuvannia. Monomerna rivnovaha ta utvorennia rechovyny / Yu.P. Zaspa // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. – Tekhnichni nauky. – 2022. – № 5 (313). – S. 159–167.

3. Zaspa Yu.P. Hidrodynamichno-khvylove kalibruvannia potentsialiv v rivnianniakh Maksvella : neliniina dynamika ta koherentnist, kolaps, rozshyrennia ta obminna vzaiemodiia inertsiinykh dysypatyvno-kolektornykh zburen v nerivnovazhnykh seredovyshchakh u kompleksnomu prostori. Spiralna turbulentnist ta koherentni struktury tryvymirnoho chasu/ Yu.P. Zaspa // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. – Tekhnichni nauky. – 2022. – № 6 (315), t.1. – S. 89–97.

4. Fyzycheskaia эntsyklopedyia : [v 5 t. / pod red. A.M. Prokhorova]. – M. : Bolshaia ross. эnts., 1999. – 760 s.

5. Yshkhanov B.S. Hyhantskyi dypolnыi rezonans atomnыkh yader. Predskazanye, otkrыtye y yssledovanye / B.S. Yshkhanov, Y.M. Kapytonov // UFN. – 2021. – T. 191, № 2. – S. 147–162.

6. Review of Particle physics. Particle Data Group. URL: http://pdg.lbl.gov

7. Why is beta decay continuous ? URL: https://socratic.org/questions/why-is-beta-decay-continuous

8. Kim Y. Detection of Antineutrinos for Reactor Monitoring / Y. Kim // Nuclear Eng. Technology. – 2016. – V.48, №2. – P.285 – 292

9. Mayer F.J., Reitz J. Compton Composites Late in the Early Universe. URL: https://www.researchgate.net/publication/272646055_Compton_Composites_Late_in_the_Early_Universe

10. Kononovych Э.V., Myronova Y.V., Baturyn V.A. Chastotno-vremennoi analyz riadov solnechnoi aktyvnosty . URL: http://www.elibrary.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/MFTI/2006/182r.pdf

11. Kolubaev E.A. Osobennosty akustycheskoho yzluchenyia pry trenyy staly Hadfylda / E.A. Kolubaev, O.V. Syzova, S.A. Pupынyn // Yzvestyia Tomskoho polytekhnycheskoho unyversyteta. – 2011. T. 319, № 2. – S. 62–66.

12. Baranov A.V. Ultrazvukovoi monytorynh raboты trybosopriazhenyi / A.V. Baranov, S.V. Tarasevych, V.A. Vahner // Polzunovskyi vestnyk. – 2012. - №1. – S.23 – 27.

13. Masovi vymyrannia. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/ Masove¬_ vymyrannia

14. Lodovykova era. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/ Lodovykova_era

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-134-141
УДК 664.8.047

ЗУБКОВА КАТЕРИНА
Херсонський національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0002-8672-0855
Ekaterina_zubkova@ukr.net
СТОЯНОВА ОЛЬГА
Херсонський національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0002-6479-5936
stoyanova.olga@ukr.net
ШЕРСТЮК ВОЛОДИМИР
Херсонський національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0002-9096-2582
vgsherstyuk@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ СУШІННЯ ТОМАТНОЇ ПАСТИ ТА КОНТРОЛЮ БЕЗПЕЧНОСТІ ЗГІДНО З ПРИНЦИПАМИ НАССР

Сушіння фруктів та овочів – це процес, під час якого видалення вологи зупиняє діяльність мікроорганізмів, що викликають псування, а також діяльність ферментів, зберігаючи, таким чином, структуру, органолептичні характеристики та поживну цінність вихідного матеріалу. Умови сушіння та подрібнення при обробці порошків сильно впливають на якісні характеристики готового продукту. Забезпечення якості овочевих порошків потребує постійного вдосконалення відповідних технологій сушіння, що дозволять значною мірою зменшити тривалість обробки та підвищити якість готового продукту.

У роботі запропоновано технологічну схему сушіння томатної пасти методом розпилення для отримання порошку з покращеними споживчими властивостями, за рахунок збереження вітамінів, цінних макро- і мікроелементів. Наведено блок-схему контролю технологічного процесу виробництва та план НАССР (аналізу і упраління небезпечними чинниками) порошку із томатної пасти з встановленням на ній контрольних та контрольно-критичних точок, що дозволяють у повному обсязі постійно здійснювати контроль всього процесу виробництва безпечного харчового продукту згідно з принципами НАССР.

Ключові слова: томатна паста; томатний порошок; сушіння; НАССР; контрольні критичні точки; сухі речовини.

ZUBKOVA KATERYNA, STOYANOVA OLHA, SHERSTIUK VOLODYMYR
Kherson National Technical University

STUDY OF THE TECHNOLOGICAL SCHEME OF TOMATO PASTE DRYING AND SAFETY CONTROL ACCORDING TO THE PRINCIPLES OF HACCP

Drying fruits and vegetables is a process in which the removal of moisture stops the activity of microorganisms that cause spoilage, as well as the activity of enzymes, thus preserving the structure, organoleptic characteristics and nutritional value of the raw material. The conditions of drying and grinding during processing of powders strongly influence the qualitative characteristics of biological materials. Ensuring the quality of vegetable powders requires constant improvement of appropriate drying technologies, which will allow to significantly reduce the duration of processing and improve the quality of the finished product. Solving the problem of tomato powder production is possible by improving the technological scheme and drying by spraying. The main advantage of a vacuum-type dryer is the high quality of the finished product when drying heat-sensitive, easily oxidized raw materials.

The paper proposes a technological scheme for drying tomato paste by the spray method to obtain a powder with improved consumption properties, due to the preservation of vitamins, valuable macro- and microelements. A block diagram of the control of the manufacturing process and the HACCP plan (analysis and control of hazardous factors) of tomato paste powder with the establishment of control and control-critical points on it are given, which allow to fully control the entire process of the production of a safe food product in accordance with the principles of HACCP. The main advantage of a vacuum-type dryer is the high quality of the finished product. Dehydration of tomato paste granules, taking into account the maximum preservation of valuable nutrients in the product at different coolant temperatures, led to the high quality of the finished product.

Keywords: tomato paste; tomato powder; drying; HACCP; control critical points; dry matter.

Постановка проблеми

Томатний порошок – порошкоподібний концентрат томатної пасти, який використовується як харчова добавка в кулінарії для надання стравам характерного запаху та кольору. Розробка технології сушеної харчової продукції з овочевої сировини, використання її у складі інших продуктів харчування відкриває великі можливості для розвитку напрямку виробництва органічної продукції тривалого зберігання на Україні та за її межами [1]. Значний вплив на якість отримуваних органічних овочевих порошків чинить безпосередньо конструктивно-технологічна складова [2]. Сучасними способами виробництва овочевих порошків є сублімаційна сушка та сушка розпиленням [3]. Ліофілізаційне сушіння вважається найефективнішим у збереженні поживних речовин у порошкоподібних продуктах, але його промисловому застосуванню перешкоджають високі витрати на обладнання та високе енергоспоживання, а також низька продуктивність. Забезпечення якості овочевих порошків потребує постійного вдосконалення відповідних технологій сушіння, що дозволять значною мірою зменшити тривалість обробки. Разом з тим, в сучасних технологіях відсутні рекомендації з сушіння томатної пасти без додавання домішок (з погляду енергозбереження). Розв’язання проблеми виробництва томатного порошку можливе шляхом вдосконалення технологічної схеми та сушіння методом розпилювання.

Аналіз останніх джерел

В роботі [4] наведено огляд різних способів сушіння плодоовочевої сировини, а також проаналізовано вплив процесів подрібнення на загальну якість фруктових та овочевих порошків. Вважаємо, застосування способу чергування процесів подрібнення та сушіння є недоцільним, в зв'язку з високими витратами енергії та складністю проведення технологічного процесу.

Останнім часом все більше уваги приділяється вдосконаленню способу сушіння овочевих пасти з додаванням додаткових інгредієнтів. Відомий спосіб [5] одержання томатного порошку, коли із приготовленої пасти випаровують вологу в теплообмінних апаратах до вмісту сухих речовин 14...16 %, потім змішують з крохмалем, підігрівають до температури клейстеризації крохмалю, проводять процес сушіння, подрібнення, сепарації, фасують та пакують Доданий у томатну пасту крохмаль знижує прилипання суміші до поверхні сушіння. Одержаний таким способом томатний порошок з крохмалем має обмежене застосування в продуктах харчування, де крохмаль зайвий, а при відновленні порошку він гідролізується, утворюються гелеподібні речовини, які викликають помутніння, що знижує якість томатного порошку при відновленні. Також, недоліком контактних сушарок є обмеження температури гріючої поверхні.

Науковці пропонують спосіб одержання томатного порошку з добавкою [6], який включає процеси змішування компонентів, гранулювання, багатоступінчасте сушіння, подрібнення та розпилювання сушеного продукту, який відрізняється тим, що томатну пасту перед гранулюванням змішують з морквяним порошком до досягнення сумішшю вологості 47-53%. Даний спосіб потребує додаткової сушеної сировини (моркви), що значно збільшує вартість готового продукту. Разом з тим, даний спосіб є енергоємним, так як велика кількість енергії витрачається на перетирання вихідної сировини, нагрівання сушильного агента, а використання для сушіння гарячого повітря призводить до значних втрат корисних речовин при отриманні даних порошків.

В роботі [7] автори досліджують стабільність лікопіну під час розпилювального сушіння м'якоті томатів, вплив умов сушіння на вміст лікопіну в томатному порошку. Лікопін є основним пігментом, який міститься в помідорах, і він важливий не лише через колір, який він надає, але й через визнану користь для здоров'я, пов'язану з його присутністю. Деградація лікопіну впливає не тільки на привабливий колір кінцевих продуктів, але й на їх поживну цінність. Множинний регресійний аналіз був використаний для розробки прогнозного рівняння для остаточного вмісту лікопіну під час сушіння розпиленням. Зменшення вмісту лікопіну, про яке повідомляється тут, було спричинене фактичним розкладанням лікопіну, а не прогресивним перетворенням повністю транс-лікопіну в менш сильно забарвлену та менш інтенсивно поглинаючу *cis* -форму. Такий спосіб забезпечує одержання порошків із рослинної сировини із заданою дисперсністю, не відбувається комкування в процесі тривалого зберігання з максимальним збереженням у кінцевому продукті вітамінного складу та органолептичних властивостей рослинної сировини.

В роботі [8] підсумовуються сучасні тенденції сушіння фруктових і овочевих соків методом розпилення та нові розробки. Застосування ультразвукової техніки під час розпилення, вакуумної сушильної камери з контрольованою атмосферою та подачі осушеного повітря в сушильну камеру сушарки помітно підвищили потенціал технології сушінням. Ці досягнення сприятимуть подальшому вдосконаленню досліджень сушіння фруктових і овочевих соків за допомогою традиційних підходів, а також модифікованих методів сушіння розпиленням.

В роботі [9], автори провели аналіз якості томатного порошку, отриманого за чотирма технологіями кондуктивного сушіння, а саме вакуумну барабанну сушарку, барабанну сушарку, тонкоплівкову сушарку з перемішуванням і рефрактометричну сушарку. Науковці показали, що методи сушіння сильно вплинули на кінцеву морфологію порошку. Це дослідження можна вважати відправною точкою для вибору технологій кондуктивного сушіння для ефективного виробництва високоякісних томатних порошків та інших овочевих порошків. Проте використання кондуктивного способу є відносно повільним процесом для сушіння концентрованого томатного пюре, і тому має обмеження щодо потужності, а також збільшення часу теплової обробки має негативний вплив на сенсорні показники готового томатного порошку.

Вітчизняними вченими [10] проведені теоретичні та експериментальні дослідження, які дозволили одержати емпіричні співвідношення, необхідні для інженерного розрахунку конструктивних особливостей сушарки із псевдозрідженим шаром інертного носія для сушіння дисперсних харчових продуктів. У процесі дослідження розроблено конструкцію промислової сушильної установки безперервної дії для сушіння вичавок ядра волоського горіху, арахісу та фісташок. Запропонований у роботі спосіб сушіння має низку переваг над іншими способами, основними з яких є зниження енерговитрат і підвищення якості готової продукції. Але для томатних продуктів немає експериментальних даних.

Перспективним напрямком можна вважати технологію спрей-сублімаційного сушіння виморожуванням [11], яка дозволяє зберегти структуру продукту та біологічно активні речовини (БАР). Дослідження науковців доводять, що використати конвективний спосіб сушіння томатної пасти без добавок неможливо, так як адгезійні властивості при стиканні її з матеріалом сушильної поверхні мають негативну якість, висушений продукт прилипає до поверхні і важко його відокремити, подрібнити та просіяти, що впливає на якість одержаного продукту.

Таким чином, аналізуючи сучасні дослідження науковців щодо способів сушіння пюреподібних

продуктів, авторами прийнято рішення дослідити технологію сушіння томатної пасти (30% сухих речовин) методом розпилення. Сушка розпиленням є найбільш економною технікою, яка підтримує якість шляхом швидкого зневоднення. Даний метод забезпечує велику площу поверхні у вигляді дрібних крапель рідини шляхом розпилення в сушильній камері, що призводить до виробництва частинок порошку правильної та сферичної форми.

Метою дослідження є дослідження технологічної схеми сушіння томатної пасти методом розпилення для отримання порошку з покращеними споживними властивостями, за рахунок збереження вітамінів, цінних макро- і мікроелементів. Відповідно до мети досліджень було поставлено та вирішено наступні завдання: 1) розроблення технологічної схеми сушіння томатної пасти (30% сухих речовин); 2) дослідження режимів сушіння методом розпилення; 3) дослідження якості готового сушеного продукту і безпечності згідно системи НАССР.

Предметом дослідження є томатна паста (30% сухих речовин) вищого ґатунку (без солі) асептичного консервування, ТОВ «АгроФьюжен» (м. Гола Пристань, Херсонська обл.): сушений томатний порошок (готова продукція). Об'єктом дослідження є технологічні режими сушіння.

Для вирішення завдань застосовувались методи наукового дослідження: логічного узагальнення та абстрагування (теоретичні узагальнення, формулювання висновків); системного підходу, методу аналізу і синтезу; порівняльний аналіз; структурний аналіз. Для дослідження якості напівфабрикату (томатної пасти) і готового продукту (сушеного томатного порошку) застосовувалися стандартні загальноприйняті біохімічні, фізико-хімічні та органолептичні методи дослідження.

Виклад основного матеріалу

Сировиною для сушіння є томатна паста (30% сухих речовин) асептичного консервування. Для виробництва томатної пасти використовують свіжі томати за ДСТУ3246-95 [17]. Для виробництва сушеної томатної пасти запропоновано спосіб сушіння розпилюванням томатної пасти (30% сухих речовин) асептичного консервування, яка виготовлена за технологією Hot break. Під терміном Hot break розуміють процес подрібнення томатів при високій температурі від 85 до 90ºС. Продукт, який виготовлений способом Hot break більш в'язкий та густий, має в'язкість від 3,5 до 6,0 см/30с. Томатку пасту (Hot break) у подальшому використовують для виробництва кетчупів та соусів, така в'язкість пасти гарантує значне зменшення рецептурної кількості крохмалю у томатопродуктах. Процедура, що збільшує в'язкість завдяки високій температурі, називається ензимаційною інактивацією, зменшує ризик появи синерезису (відділення рідинної частини продукту від його волокнистої частини).

Для виробництва сухого порошку проведені дослідження томатної пасти (30% сухих речовин) за органолептичними і фізико-хімічним показниками, які наведені в таблиці 1 і 2.

Таблиця 1

Органолептичні показники

Найменування показника	Характеристика томатної пасти
Зовнішній вигляд	Однорідна концентрована маса, без темних включень, залишків шкірки, насіння та інших грубих частинок плодів.
Смак та запах	Концентрованої томатної пасти, без гіркоти, пригару та інших сторонніх присмаку та запаху
Колір	Червоний, помаранчево-червоний або малиново-червоний, рівномірний по всій масі

Таблиця 2

Фізико-хімічні показники

Найменування показника, %	Томатна паста
Масова частка сухих речовин (без хлоридів)	30
Хлориди	2,5
Домішки рослинного походження	Не допускаються
Частка мінеральних домішок	0,023
Сторонні домішки	Не допускаються

Технологічна схема включає такі процеси: зберігання в асептичних умовах (велика тара); розтарювання; інспекція; підігрівання до 80 °С; сушіння; фасування; вакуумування; зберігання.

Опис технологічної схеми: за допомогою спеціального пристрою томатна паста асептичного консервування вивантажується з бочок в ємність. Далі томатну пасту направляють в кожухотрубчастий підігрівач для нагрівання до 80 °С. Після підігрівання томатна паста подається в вакуумно-розпилювальну сушарку. Готовий сушений томатний порошок фасується на дозувально-фасувальному комплексі для порошків. Зберігати томатний порошок потрібно в герметичній тарі, у місцях без доступу вологи, так як продукт має високу гігроскопічність. Про псування свідчить втрата кольору, набуття сторонніх запахів, поява цвілі, утворення грудочок.

Основна перевага сушильної установки вакуумного типу – висока якість готового продукту при сушінні сировини, чутливої до нагрівання, що легко окислюється. За рахунок зниженого тиску в сушильній камері кипіння води відбувається за більш низької температури, як наслідок швидкість зневоднення збільшується. Фізичні властивості порошкоподібного продукту, тобто вміст вологи, насипна щільність і розмір частинок, суттєво залежать від температури сушіння та тепло агента [13]. Найбільш важливими факторами при сушінні методом розпилення є температура на вході та носій. Висока температура сушіння пошкоджує чутливі біологічно активні сполуки, носій захищає такі сполуки, а інші фактори, залучені до сушіння розпиленням, впливають на фізико-хімічні та мікроструктурні властивості продукту [14,15].

Процес сушіння методом розпилення дозволяє видалити вологу з початкового значення W_1= 70% до W_2=7-9 %, запобігти злипанню рослинних матеріалів. Перший етап процесу сушіння дозволяє видалити поверхневу вологу (видалення вологи W_1= 70% до W_2= 38%), запобігти злипанню рослинних матеріалів. На другому етапі інтенсифікується зовнішній і внутрішній тепло- і масообмін, скорочується тривалість процесу і виключається перегрівання сировини не тільки в першому періоді сушіння, але і після видалення вільної вологи (видалення вологи W_3= 38 % до W_4= 7-9%) в розпилювальній сушарці.

Обезводнювання гранул томатної пасти з врахуванням максимального збереження цінних поживних речовин у продукті за різними температурами теплоносія привело до результатів, які наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Технологічні режими сушіння томатної пасти методом розпилення

Показники	Томатна паста
1. Вологість, % : початкова кінцева	 70 7-9
2. Температура повітря, ^{0}C : На вході на виході	 від 170 ^{0}C до 185 ^{0}C від 90 ^{0}C до 92 ^{0}C
швидкість подачі продукту , л/год	4,0-5,0
Вихід готового продукту, %	15

За експериментальними дослідженнями отримані дані вологовмісту (кг/ кг) в залежності від тривалості сушіння для томатної пасти з підігріванням (до 80 ^{0}C перед сушінням) і без підігрівання (рисунок 1). Швидкість сушіння (до 6,5 хв) обґрунтовує доцільність процесу підігрівання томатної пасти перед процесом сушіння.

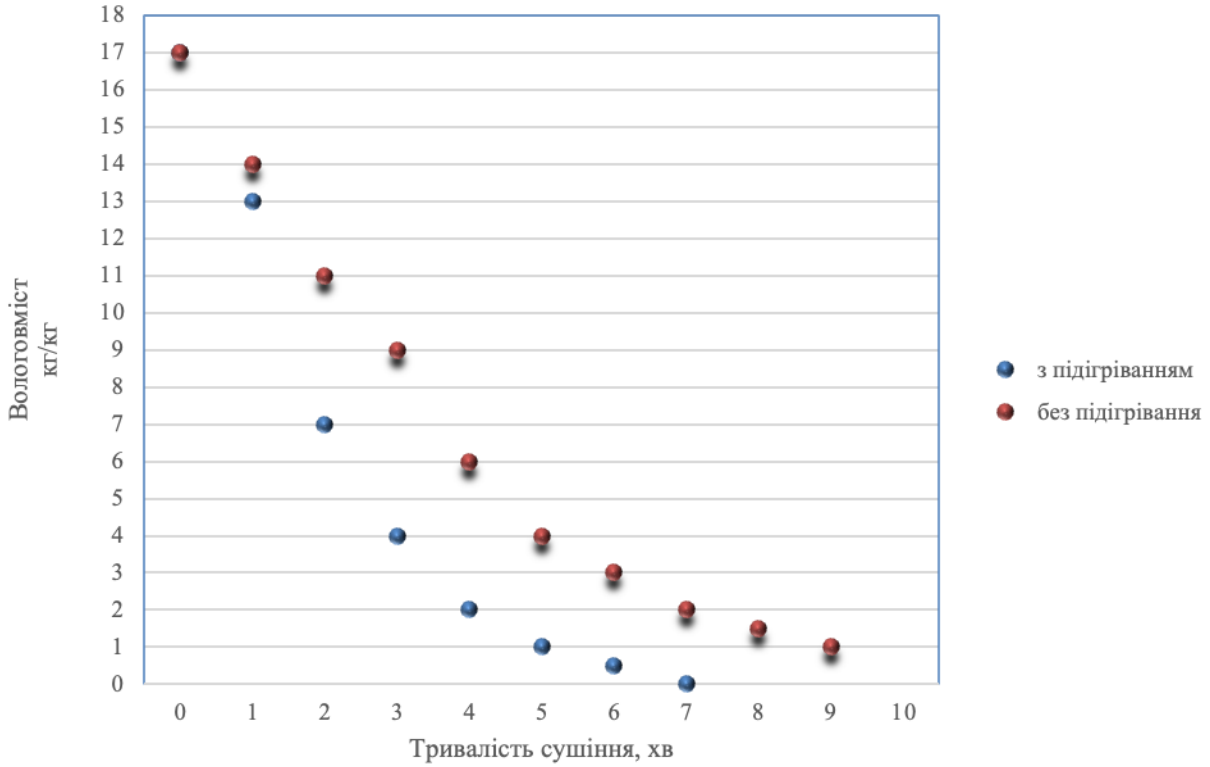


Рис. 1. Зміна вмісту вологи томатного порошку у процесі сушіння:
1 – з підігріванням , 2 – без підігрівання

Згідно розробленої технологічної схеми, було проведено аналіз небезпек на кожному етапі, які є значущими для споживачів і можуть з великою часткою ймовірності принести їм шкоду або викликати захворювання, якщо ці небезпеки не контролюються і не виправляються. Критичні контрольні точки розташовуються в тих місцях процесів, де появу небезпеки може бути припинено, або створює загрозу яку можна усунути, або вона може бути знижена до прийнятного рівня. Системи безпеки харчових продуктів засновані на принципах НАССР. Застосування цих принципів дозволяє ідентифікувати небезпеки та керувати ними, до того як вони створять загрозу споживачам харчової продукції. Система НАССР у всіх промислово розвинених країнах є найбільш ефективною системою, здатною довести безпеку виробленої продукції [16,17].

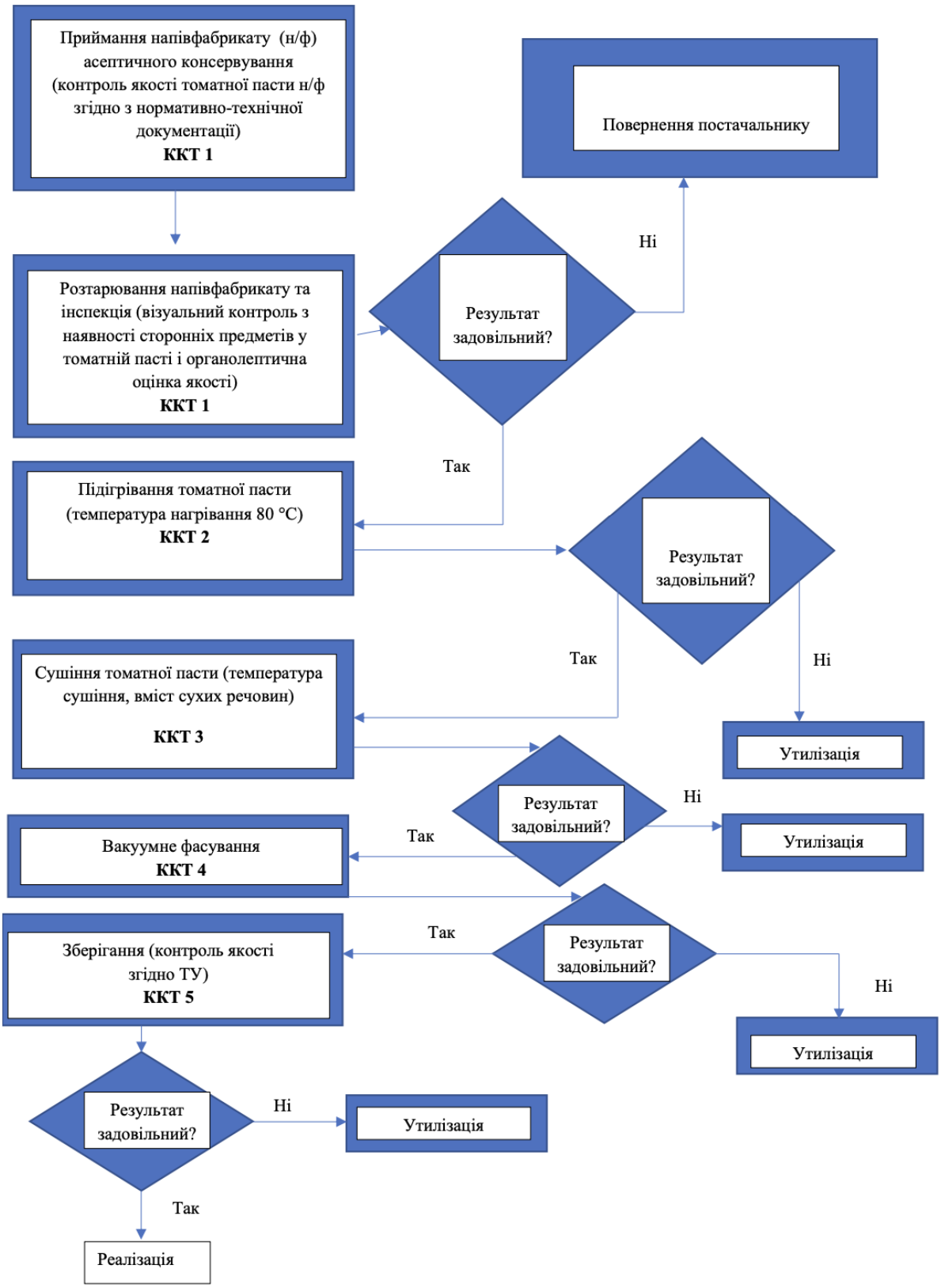


Рис. 2. Блок-схема процесу виробництва порошку з томатної пасти (етапи і контрольні критичні точки)

В Україні вимоги щодо розробки та впровадження систем управління безпечністю харчової продукції за принципами НАССР задекларовані ДСТУ 4161-2003 «Система управління безпечністю харчових продуктів. Вимоги» та ДСТУ ISO 22000:2019 «Системи управління безпечністю харчових продуктів. Вимоги до будь-якої організації в харчовому ланцюзі».

На підставі пункту 2 частини 2 ст. 20 Закону України «Про основні принципи та вимоги до безпечності та якості харчових продуктів» (No 771/97- ВР від 23.12.1997 року, зі змінами та доповненнями), особи, які займаються виробництвом або введенням в обіг харчових продуктів, повинні застосовувати системи НАССР та/або інші системи забезпечення безпечності та якості під час виробництва та обігу харчових продуктів.

Впровадження системи НАССР у виробництві порошку із томатної пасти дозволить отримати гарантію безпечності даного виду продукту.

На основі наведеної блок-схеми процесу виробництва порошку з томатної пасти розроблено план аналізу і управління небезпечними чинниками згідно представлених ККТ.

Таблиця 4

План НАССР (аналізу і управління небезпечними чинниками)

No ККТ	Критичні межі	Моніторинг – процедури та періодичність проведення	Протоколи НАССР	Верифікація – процедури та періодичність проведення	Коригувальні дії
1	2	3	4	5	6
ККТ 1 Приймання і розтарю-вання напівфаб-рикату асептич-ного консер-вування (томатної пасти)	Кожну партію повинен супроводжувати сертифікат постачальника, що підтверджує відповідність продукту вимогам нормативно-технічної документації	Приймальники перевіряють кожну партію на предмет наявності сертифіката.	Журнал приймання Журнал коригува-льних дій	Кожну партію контролер якості повинен запитувати у компаній-постачальників сертифікати.	Продукт без сертифікату не приймається. Якщо постачальник не витримує стандартів, йому буде відмовлено в співробітництві доти, доки його продукт не буде відповідати стандартам.
ККТ 2 Підігрі-вання томатної пасти	Температура нагрівання - 80°С. Тривалість і температура повинні бути достатніми для надання продукту більш рідкої консистенції і пришвидшення подальшого процесу висушування.	Контролер з якості проводить моніторинг параметрів часу/ температури для підтвердження досягнення критичних меж. Постійна реєстрація температур для кожної партії, із зазначенням ПІБ відповідальної особи	Журнал часу/ температур Таблиця реєстрації температур Журнал температур продукту Журнал калібрування термометра Журнал коригуваль-них дій	Начальник відділу з контролю якості 1 раз у зміну проводить спостереження за тим, як контролер якості здійснює моніторинг. Начальник відділу технічного обслуговування перевіряє точність таблиці реєстрації температур 1 раз у зміну. Контролер якості щодня перевіряє точність всіх термометрів, що використовуються для моніторингу та верифікації і, за необхідності, їх калібрує.	Контролер якості відсортовує та утримує пошкоджений продукт. Головний технолог дає рекомендації щодо рівня невідповідності продукту; на підставі його рекомендації, продукт піддають повторній обробці або визнаний бракованим. Контролер якості визначає причину відхилення та приймає запобіжні заходи, щоб попередити повторення ситуації. Фахівець із технічного обслуговування перевіряє роботу підігрівача і, за необхідності, проводить його налагодження.
ККТ 3 Сушіння томатної пасти	Тривалість і температура повинні бути достатніми для збереження органолептичних	Контролер якості проводить моніторинг параметрів часу/ температур для підтвердження	Журнал часу/ температур/вмі сту сухих речовин. Таблиця реєстрації	Начальник відділу з контролю якості 1 раз у зміну проводить спостереження за тим, як контролер	Контролер якості відсортовує та утримує пошкоджений продукт. Контролер якості повинен пересвідчитись, що причина

	показників якості та для досягнення вмісту сухих речовин 91-93%.	досягнення критичних меж. Контролю вмісту сухих речовин. Постійна реєстрація температур і зміни вмісту сухих речовин для кожної партії, із зазначенням ПІБ відповідальної особи. Наприкінці висушування контролер якості повинен виміряти і зафіксувати вміст сухих речовин у готовому продукті. Також зазначається часовий проміжок при зміні вмісту сухих речовин.	температур. Журнал температур продукту, вмісту сухих речовин. Журнал калібрування термометра, рефрактометра. Журнал Корегуваль-них дій.	якості здійснює моніторинг. Начальник відділу технічного обслуговування перевіряє точність таблиці реєстрації температур 1 раз у зміну. Контролер якості щодня перевіряє точність всіх термометрів, рефрактометрів, що використовуються для моніторингу та верифікації, і, за необхідності, їх калібрує.	невідповідності виявлена, і, що продукт було повторно оброблено або відбраковано у відповідності з рекомендацією головного технолога. Перевіряють роботу сушильного апарату та графік планового ремонту, за необхідності, відкореговують. Якщо в ході корегувальних дій було виявлено холодні місця, їх визначають для проведення постійного моніторингу, а перед випуском кожної партії готового продукту буде перевірятися їх температура.
ККТ 4 Вакуум-не фасу-вання	Тиск при вакуумуванні продукту, щільність пакування, наявність сторонніх домішок.	Візуальний контроль якості пакування і вмісту сторонніх домішок	Журнал виявлення сторонніх домішок Журнал Коригуваль-них дій.	Контролер якості спостерігає за тим, як персонал пакувального цеху проводить візуальний огляд; контролер якості перевіряє протоколи в журналі.	У випадку виявлення сторонніх домішок, весь продукт утримується для проведення перевірки за допомогою металодетектора. Необхідно встановити причину відхилення і здійснити запобіжні заходи для попередження повторення даної ситуації.
ККТ 5 Збері-гання готового продукту	Температура в приміщенні для зберігання готового продукту не перевищує 25° С, вологість – більше 75%.	Співробітники відділу технічного обслуговування проводять моніторинг температур у приміщенні для зберігання готового продукту кожні 8 годин і реєструють його результати.	Журнал температур у приміщенні. Журнал калібрування термометра. Журнал коригуваль-них дій.	Начальник відділу технічного обслуговування один раз у зміну перевіряє точність вимірювання температур, зазначених у Журналі температур у приміщенні. Контролер якості щодня перевіряє точність всіх термометрів, що використовуються для моніторингу та верифікації і, за необхідності, їх калібрує. Контролер якості один раз у зміну контролює, як співробітники відділу технічного обслуговування перевіряють приміщення для зберігання	Якщо мало місце відхилення від критичної межі, будуть розпочаті наступні коригувальні дії: 1. Виявити і усунути причину підвищення температури (якщо температура піднялась більше ніж на 4°С). 2. Моніторинг ККТ необхідно проводити щогодини, щоб переконатися в тому, що ККТ перебуває під контролем. 3. Коли буде виявлена причина відхилення, необхідно вжити запобіжні заходи для попередження повторення ситуації. Наприклад, якщо причина - несправність устаткування, то програму планово-попереджувального ремонту потрібно вивчити і, за

				готового продукту.	необхідності, переглянути. 4. Якщо температура в приміщенні перевищує критичну межу, головний технолог проводить оцінку відхилення часу/температурі для перевірки того, чи достатня наявна температура для перешкоджання розвитку патогенних мікроорганізмів перед відвантаженням.

Висновки

Технологічна схема передбачає підігрівання томатної пасти до 80 °С, що дозволяє зменшити час сушіння продукту та знизити енерговитрати.

Проведення процесу сушіння методом розпилення забезпечує зниження вологості томатної пасти з 70% до 7-9 %, підвищення концентрації лікопіну в сушеному продукті (порошку) з 5 до 10–15 мг% та збереження харчової цінності та органолептичних властивостей порошків.

Використання нового енергоощадного обладнання забезпечить збереження початкових властивостей сировини (напівфабрикату) та надасть конкурентоспроможності готовій продукції. В свою чергу, це забезпечить термічну і стабілізуючу дії процесу та енергоефективність технологічного обладнання, що дозволить отримати високоякісний готовий продукт.

Розроблена блок-схема контролю технологічного процесу виробництва та план НАССР (аналізу і управління небезпечними чинниками) порошку із томатної пасти з встановленням на ній контрольних та контрольно-критичних точок (всього встановлено 5 ККТ), дозволяють у повному обсязі постійно здійснювати контроль всього процесу виробництва безпечного харчового продукту згідно принципів НАССР.

Наступні дослідження потребують вивчення впливу технологічних режимів сушіння на вміст лікопіну в готовому сухому продукті, на визначення втрат лікопіну в залежності від температури на вході в сушильний апарат.

Література

1. Пилипенко О. Є. Розвиток харчової промисловості України. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2017. № 23 (3). С. 15–25.

2. Jiang H., Adhikar B. Fruit and vegetable powders. Handbook of Food Powders. Processes and Properties.Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. 2013. P. 532-552. DOI: https://doi.org/10.1533/9780857098672.3.532

3. Mella C., Vega-Gálveza A., Uribeac E., Pastena A., Mejiasa N., Quispe-Fuentesa I. Impact of vacuum drying on drying characteristics and functional properties of beetroot (Beta vulgaris). Applied Food Research. Volume 2, Issue 1. 2022. P. 100-120. DOI: https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100120

4. Céleste Karam M., Petit J., Zimmer D., Baudelaire E. Djantou, Scher J. Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders. Journal of Food Engineering. V. 188. 2016. P. 32-49. DOI: https://doi.org/ 10.1016/ j.jfoodeng.2016.05.001

5. 5 Kiptelaya L., Zagorulko A. Improvement of equipment for manufacture of vegetable convenience foods. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2015. № 2 (10 (74)). С. 4–8. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.39455

6. Патент на винахід № 30756 України. МПК А23В7/02. Спосіб одержання томатного порошку / Снєжкін Ю.Ф., Хавін О.О., Шапар Р.О., Макарова С.І., Дабіжа Н.О. ; заявний і патентовласник Інститут технічної теплофізики національної академії наук України. № а 98052256; заяв. 04.05.1998; опуб. 15.12.2000, Бюл. № 7.

7. Goula A. M., Adamopoulos K. G. Stability of lycopene during spray drying of tomato pulp. LWT-Food Science and Technology. 2005. Т. 38. №. 5. С. 479-487.

8. Rezaul M., Shishir I., Chen W. Trends of spray drying: A critical review on drying of fruit and vegetable juices. Trends in Food Science & Technology. 2017. V. 65. P. 49-67. DOI: https://doi.org/10.1016/ j.tifs. 2017.05.006

9. Jun Qiua, Parag Acharyab, Doris M., Jacobsb Remko M., Boom aMaarten, Schutysera A.I. A systematic analysis on tomato powder quality prepared by four conductive drying technologies. Innovative Food Science & Emerging Technologies. Volume 54, 2019, Pages 103-112. doi: https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.03.013

10. Sabadash S., Savchenko-Pererva M., Radchuk O. Design development of a continuous industrial drying plant for drying pomace of walnuts, peanuts and pistachios. Technology Audit and Production Reserves. 2019. № 6/1(50). P. 32-35.

11. Younis M., Abdelkarim D., Zein El-Abdein, Saudi A. Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices. Journal of Biological Sciences. 2018. № 25(2). P. 332–338. DOI: https://doi.org/ 10.1016/j.sjbs.2017.06.01

12. Burdo O., Bezbakh I., Kepin N., Zykov A., Yarovyi I., Gavrilov A., Bandura V., Mazurenko I. Studying the operation of innovative equipment for thermomechanical treatment and dehydration of food raw materials. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. № 5/11(101). С. 24–32. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.178937 (дата звернення: 14.10.2022).

13. Панасюк С.Г., Лисик О.В. Дослідження впливу температури та методів попередньої обробки сировини на процес сушіння. Сільськогосподарські машини. 2014. Вип. 27. С. 85–89.

14. Потапов В.О., Гриценко О.Ю. Аналіз енергоефективності процесу сушіння в тепломасообмінному модулі за умови підвищеного тиску. Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі. 2014. № 1. С. 133–141.

15. Контролюємо безпечність продуктів за системою HACCP. URL: https://www.pedrada.com.ua/ article/2674-kontrolyumo-bezpechnst-produktv-za-sistemoyu-nassr-pro-stare-po-novomu

16. Сім принципів HACCP при розгортанні системи. URL: https://certificant.org/uk/sim-principiv-haccp-pri- rozgortanni-sistemi/

References

1. Development of the food industry of Ukraine. Scientific works of the National University of Food Technologies. 2017. № 23 (3). P. 15-25.

2. Jiang H., Adhikar B. Fruit and vegetable powders. Handbook of Food Powders. Processes and Properties.Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. 2013. P. 532-552. DOI: https://doi.org/10.1533/9780857098672.3.532

3. Mella C., Vega-Gálveza A., Uribeac E., Pastena A., Mejiasa N., Quispe-Fuentesa I. Impact of vacuum drying on drying characteristics and functional properties of beetroot (Beta vulgaris). Applied Food Research. Volume 2, Issue 1. 2022. P. 100-120. DOI: https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100120

4. Céleste Karam M., Petit J., Zimmer D., Baudelaire E. Djantou, Scher J. Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders. Journal of Food Engineering. V. 188. 2016. P. 32-49. DOI: https://doi.org/ 10.1016/ j.jfoodeng.2016.05.001

5. 5 Kiptelaya L., Zagorulko A. Improvement of equipment for manufacture of vegetable convenience foods. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2015. № 2 (10 (74)). С. 4–8. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.39455

6. Snezhkin Y.F., Khavin O.O., Shapar R.O., Makarova S.I., Dabizh N.O. Patent for invention No. 30756 of Ukraine. IPC A23B7/02. Method for obtaining tomato powder; applicant and patentee Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine. No. a 98052256; declared. 04.05.1998; pub. 15.12.2000, Bulletin No. 7.

7. Goula A. M., Adamopoulos K. G. Stability of lycopene during spray drying of tomato pulp. LWT-Food Science and Technology. 2005. Т. 38. №. 5. С. 479-487.

8. Rezaul M., Shishir I., Chen W. Trends of spray drying: A critical review on drying of fruit and vegetable juices. Trends in Food Science & Technology. 2017. V. 65. P. 49-67. DOI: https://doi.org/10.1016/ j.tifs. 2017.05.006

9. Jun Qiua, Parag Acharyab, Doris M., Jacobsb Remko M., Boom aMaarten, Schutysera A.I. A systematic analysis on tomato powder quality prepared by four conductive drying technologies. Innovative Food Science & Emerging Technologies. Volume 54, 2019, Pages 103-112. doi: https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.03.013

10. Sabadash S., Savchenko-Pererva M., Radchuk O. Design development of a continuous industrial drying plant for drying pomace of walnuts, peanuts and pistachios. Technology Audit and Production Reserves. 2019. № 6/1(50). P. 32-35.

11. Younis M., Abdelkarim D., Zein El-Abdein, Saudi A. Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices. Journal of Biological Sciences. 2018. № 25(2). P. 332–338. DOI: https://doi.org/ 10.1016/j.sjbs.2017.06.01

12. Burdo O., Bezbakh I., Kepin N., Zykov A., Yarovyi I., Gavrilov A., Bandura V., Mazurenko I. Studying the operation of innovative equipment for thermomechanical treatment and dehydration of food raw materials. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. № 5/11(101). С. 24–32. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.178937 (дата звернення: 14.10.2022).

13. Panasiuk S.G., Lysyk O.V. Study of the influence of temperature and methods of pretreatment of raw materials on the drying process. Agricultural machines. 2014. Issue 27. P. 85-89.

14. Potapov V.O., Hrytsenko O.Y. Analysis of the energy efficiency of the drying process in the heat and mass exchange module under the condition of increased pressure. Progressive equipment and technologies of food production of restaurant business and trade. 2014. № 1. P. 133-141.

15. We control the safety of products according to the HACCP system. URL: https://www.pedrada.com.ua/ article/2674-kontrolyumo-bezpechnst-produktv-za-sistemoyu-nassr-pro-stare-po-novomu

16. Seven HACCP principles for system deployment. URL: https://certificant.org/uk/sim-principiv-haccp-pri- rozgortanni-sistemi

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-143-145
УДК 004.85

КАЛИТА ОЛЕГ
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0003-1868-8803
e-mail: oleg.kalytad@gmail.com

МОДЕЛЬ ПОДАННЯ МІМІЧНИХ ПРОЯВІВ ЕМОЦІЙНИХ СТАНІВ ЛЮДИНИ ДЛЯ СИСТЕМ ВІДЕОНАГЛЯДУ

Дана робота пропонує нову спрощену модель подання мімічних проявів емоційних станів людини для систем, що відповідають вимогам безпеки. У результаті обчислювальних експериментів було виділено основні ділянки обличчя, що впливають на відображення емоційних станів. До них належать ділянки обличчя з бровами, очима та ротом. Насамкінець, було виділено якісні характеристики зміщень точок. Форми групування станів, як відображення сукупності ознак, були визначені та формалізовані на основі методів візуальної аналітики. Як наслідок, груповані дані формалізували класи емоційних проявів. Перевагою розробленої моделі є невелика обчислювальна складність, що забезпечує розпізнавання змін емоційного стану людини за мімічними проявами за відеокамерами з низькою роздільною здатністю або на великій відстані. У підсумку, результати проведених експериментальних досліджень підтвердили, що запропонована модель забезпечує ефективну формалізацію мімічних проявів обличчя, що відображають емоційні стани людини, і може мати практичне застосування для покращення дотримання вимог безпеки в реальних середовищах.

Ключові слова: розпізнавання емоцій, виявлення обличчя, мімічні прояви, гіперплощинна класифікація, візуальна аналітика.

KALYTA OLEG
Khmelnytskyi National University

MODEL OF MIMIC EXPRESSIONS OF HUMAN EMOTIONAL STATES FOR THE VIDEO SURVEILLANCE SYSTEMS

The presented paper proposes a novel computational model for generating facial expressions that mimic human emotional states. The authors aim to create a system that can generate realistic facial expressions to be used in human-robot interactions. The proposed model is based on the Facial Action Coding System, a widely used tool for describing facial expressions. FACS is used in this study to identify the muscles involved in each facial expression and the degree to which each muscle is activated. Several machine-learning techniques were utilized to learn the relationships between facial muscle activations and emotional states. In particular, a hyperplane classification was employed in the system for facial expressions representing major emotional states. The model's primary advantage lies in its low computational complexity, which enables it to recognize changes in human emotional states through facial expressions without requiring specialized equipment, such as low-resolution or long-distance video cameras. The proposed approach is intended for use in control systems for various purposes, including security systems or monitoring drivers while operating vehicles. It was investigated that the proposed model could generate facial expressions similar to those produced by humans and that these expressions were recognized as conveying the intended emotional state by human observers. The authors also investigated the effect of different factors on the generation of facial expressions. Overall, the proposed model represents a promising approach for generating realistic facial expressions that mimic human emotional states and could have applications in improving security compliance in sensitive environments. However, carefully considering and managing potential ethical issues will be necessary to ensure the responsible use of this technology.

Keywords: emotion recognition, face detection, facial expressions, hyperplane classification, visual analytics

Вступ

У статті розглянуто модель для виділення основних критеріїв мімічних проявів емоцій на обличчі з можливістю реалізації розпізнавання без використання спеціалізованого обладнання, наприклад, для відеокамер із низькою роздільною здатністю або на великій відстані. З розвитком технологій комп'ютерного зору науковці все більше цікавляться можливістю машинного розпізнавання емоцій людей. У результаті з'являється все більше наукових праць [1, 2], які досліджують цю проблематику. Більшість із них спрямовані на виділення певних ознак, які допомагають визначити емоцію людини. Здебільшого такі дослідження використовують примітиви Хаара для виявлення особливостей на обличчі та виділяють такі ділянки, як брови та рот [3]. Також можна виділити роботи, де особливості позначені спеціальними маркерами на обличчі актора [4]. Проте на сьогодні майже немає досліджень, які пояснюють, як саме вони прийшли до якісних критеріїв оцінювання емоційних проявів.

Метою даної роботи є моделювання мімічних проявів емоційних станів людини за критеріями якісних змін у певних ділянках обличчя для отримання стійкого групування та розділення основних класів емоцій.

Аналіз ділянок обличчя, що відтворюють емоційну міміку

Одним зі способів визначення ділянок обличчя, які відповідають за емоційну міміку, є використання відеокамери Intel Real Sense [5], зображення з якої містять автоматично виявленні точки-особливості обличчя. Тобто можна проаналізувати зображення обличчя людей, з відтвореними на них основними емоційними станами та виділеними за допомогою відеокамери Intel Real Sense точками-особливостями (рис. 1).

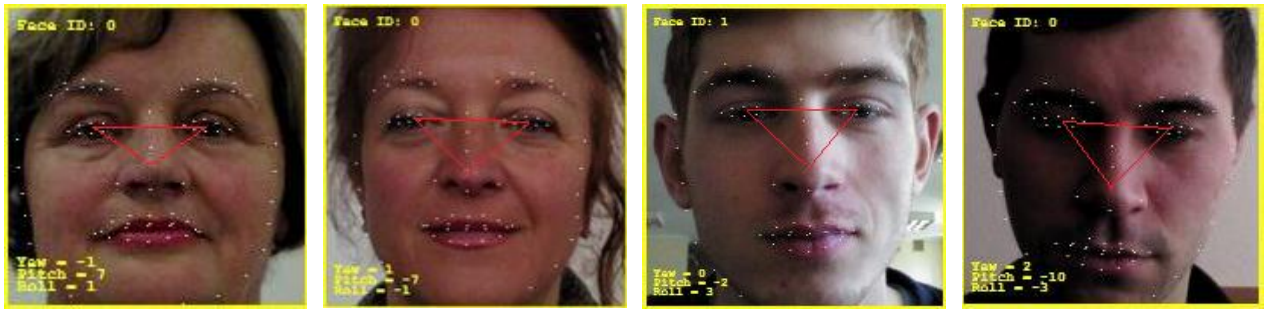


Рис. 1. Точки-особливості обличчя, що виділяє камера Intel Real Sense

Для аналізу зображень проведемо перетворення, приклад яких наведено на рис. 1. На першому кроці проводиться нормалізація зображення обличчя для їхнього порівняння в одному базисі. Для цього здійснюється центрування області обличчя та нормування за відстанню між очима. На другому кроці на підставі аналізу переміщення точок-особливостей у множині вхідних зображень виділяються інформативні точки, тобто ті, переміщення яких за емоційної міміки найбільш суттєве. На завершальному етапі (третьому кроці) визначаються ділянки обличчя, зміни яких формують візуальне сприйняття емоції з різним порогом переміщень. Для кожної виділеної ділянки формується множина можливих станів.

На рис. 2 наведено приклади графіків переміщення точок. Висновки, які можна зробити із цих графіків, полягають у тому, що найбільші переміщення при прояві різних емоцій зафіксовані в точок, які належать до наступних ділянок обличчя (за умови, що розглядалася лише одна половина обличчя): верх правої повіки, низ правої повіки, ліва сторона правої повіки, права сторона правої брови, ліва сторона правої брови, центр правої брови, права сторона носа, права сторона губ, центр верхньої губи та права сторона нижньої губи.

З рис. 2 видно, що деякі точки зміщуються більше при прояві відповідних емоцій, тому необхідно відстежувати зміщення лише найбільш інформативних точок. У результаті дослідження та обробки зібраних даних були виділені основні ділянки обличчя, зміни міміки яких прямо впливають на відображення емоційних станів. Це ділянки обличчя з бровами, очима та ротом (рис. 3).

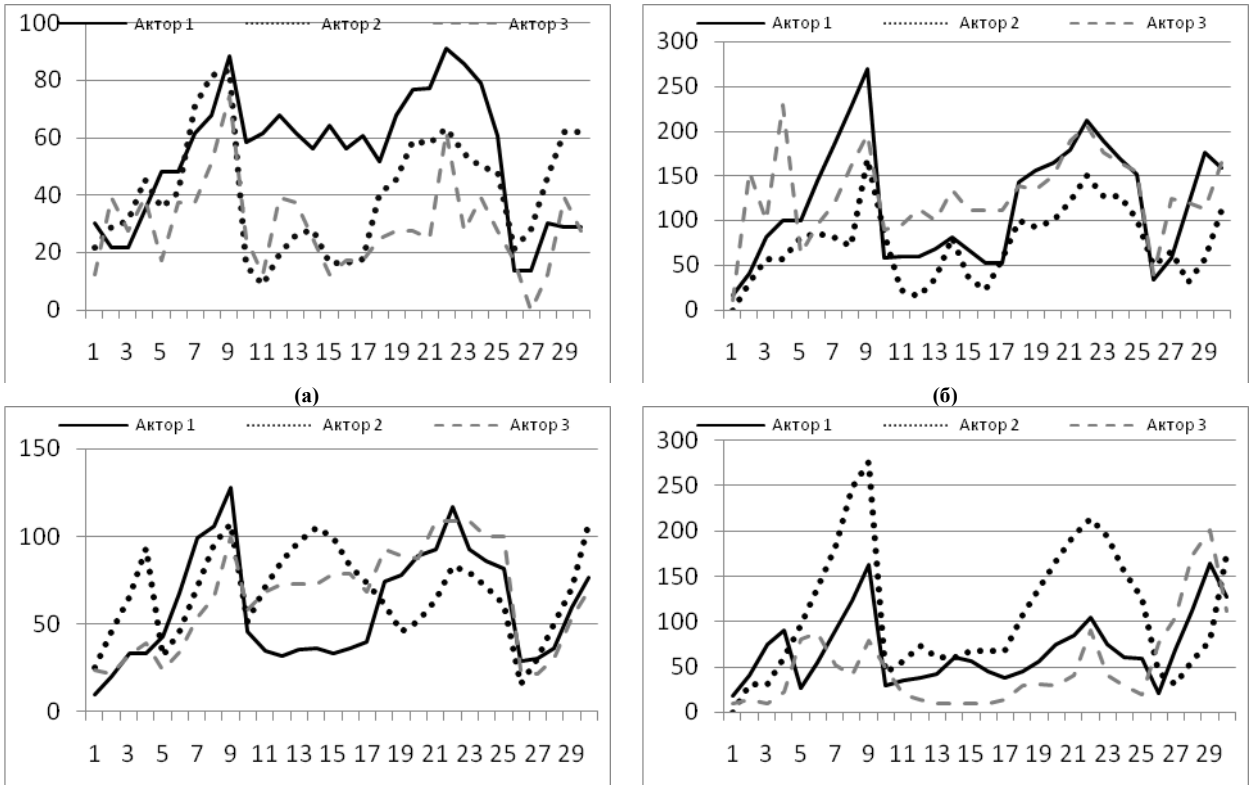


Рис. 2. Зміщення точок для емоцій: (а) злість, (б) сум, (в) радість та (г) страх

Останнім етапом дослідження стало виділення множин якісних характеристик зміщень точок або груп точок, які наведені у таблиці 1.

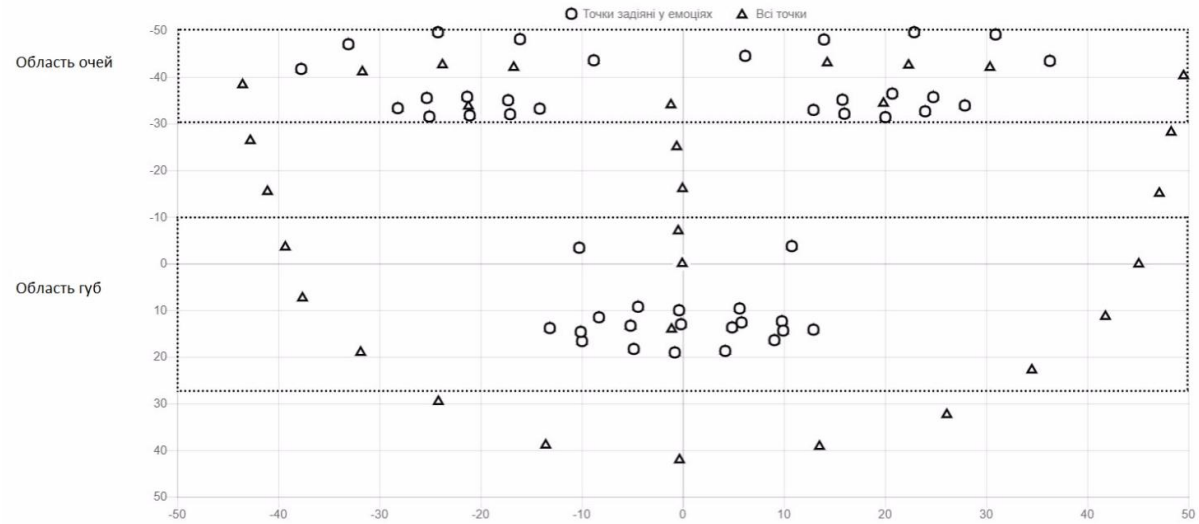
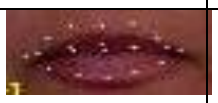
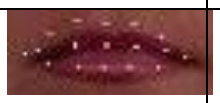
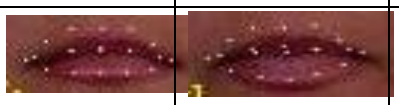
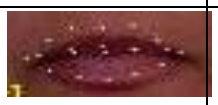
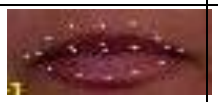


Рис. 3. Точки-особливості обличчя, що відповідають за міміку емоцій

Експериментальним шляхом досліджена поведінка точок-особливостей обличчя при прояві на ньому певних емоцій та виділені якісні показники для цих емоцій. За результатами наведеного дослідження можна запропонувати основні параметри моделі, виходячи з якісних критерії оцінки основних ділянок обличчя для визначення мімічного прояву емоцій.

Таблиця 1

Множина значень якісних характеристик для кожної ділянки обличчя

Ділянка обличчя		Якісні характеристики ділянок обличчя				
		Без змін	Злегка опущені	Опущені	Злегка підняті	Підняті
Брови	Вся брова		×			
Очі	Верхні повіки					
	Зовнішні кутики очей		×	×	×	
Губи	Кутик губ		×			
	Нижня частина верхньої губи					
	Верхня частина нижньої губи					

Формування моделі

З огляду на потреби детектування мімічних проявів засобами звичайних камер із невисокою роздільною здатністю або на великій відстані та за результатами з таблиці 1 введемо наступну градацію для ділянок обличчя: 1) очі: {розплющені, примружені, нормальні}; 2) губи: {розтягнуті, зжаті, нормальні}; 3) брови: {підняті, опущені, нормальні}. Отриманні у дослідженні мімічні прояви емоцій подаються за наведеною градацією в таблиці 2.

Таблиця 2

Подання мімічних проявів емоцій якісними характеристиками

Ділянки обличчя	Злість	Страх	Радість	Сум
очі	примружені	розплющені	нормальні	нормальні
губи	нормальні	нормальні	розтягнуті	зжаті
брови	опущені	підняті	підняті	опущені

Наведене у таблиці 2 подання мімічних проявів у розрізі емоційних станів слугуватиме основою для наступного синтезу моделі за якою буде проводитися детектування. Визначені емпіричним шляхом ознаки формально подамо наступним чином: 1) x_1 – ознака міміки ділянки обличчя з очами; 2) x_2 –ознака міміки ділянки обличчя з губами; 3) x_3 – ознака міміки ділянки обличчя з бровами.

$x_1, x_2, x_3 \in [0,1]$, причому $x_1 \in [0, 0.2]$ – для примружених очей; $x_1 \in [0.4, 0.6]$ – для нормальних очей; $x_1 \in [0.8,1]$ – для розплющених очей; $x_2 \in [0, 0.2]$ – для зжатих губ; $x_2 \in [0.4, 0.6]$ – для нормальних губ; $x_2 \in [0.8,1]$ – для розтягнутих губ; $x_3 \in [0, 0.2]$ – для опущених брів; $x_3 \in [0.4, 0.6]$ – для нормальних брів; $x_3 \in [0.8,1]$ – для піднятих брів. Існуючі у запропонованій синтетичній моделі проміжки, що не використовуються ($[0.2, 0.4]$, $[0.6, 0.8]$) служать для моделювання хорошої роздільності між різними емоційними станами при їх класифікації [6].

Валідність запропонованої моделі перевірялась на синтезованих даних, тому що реальні вхідні данні будуть належати тим же проміжкам, що і штучно створені.

За наведеними у таблиці 2 емоційними проявами і відповідними їм проміжками для згенеровано вхідні дані та візуалізовано їх у двомірному просторі з використанням багатовимірного шкалювання (рис. 4).

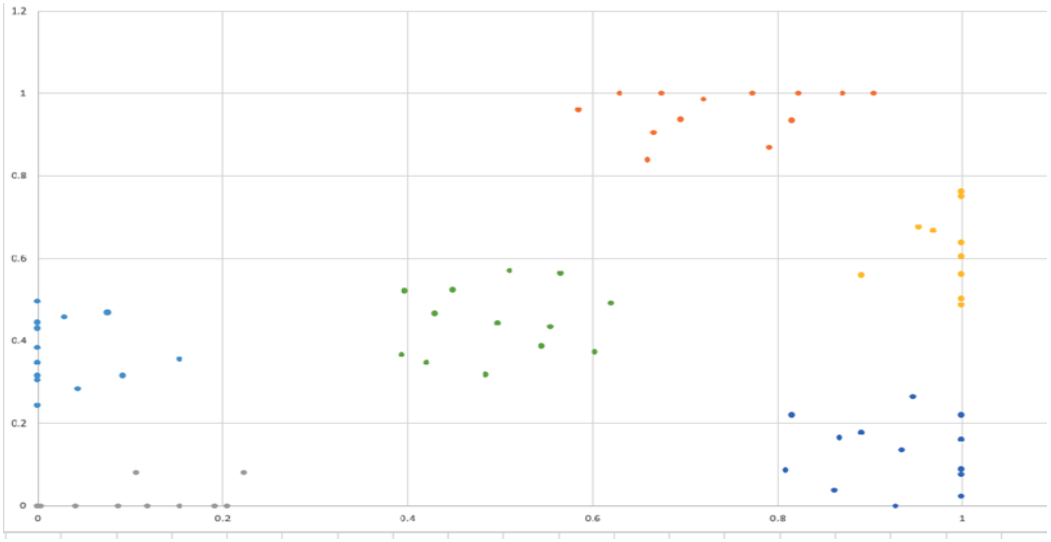


Рис. 4. Візуалізація емоційних станів

Як видно з рис. 4, синтезовані данні згруповані за емоціями, що підтверджує спроможність запропонованої моделі використовуватись для класифікації емоційних станів.

Модель зміни емоційного стану за мімічними проявами

Відповідно до результатів якісного аналізу ділянок обличчя (таблиця 2), сформовано множину якісних характеристик зміщень точок-особливостей або груп точок-особливостей (таблиця 3).

Таблиця 3

Якісні характеристики ділянок людського обличчя

Емоція / Область обличчя	Злість	Страх	Радість	Сум
Рот	закритий	привідкритий	привідкритий	закритий
Кутики губ	опущені	припідняті	або відкритий	опущені
Очі	розкриті або примружені	широко розкриті	підняті	примружені
Брови (перенісся)	зведені до перенісся	зведені до перенісся	розкриті або примружені	зведені до перенісся
Брови	нормальні	підняті вверх	нормальні	нормальні
Кутики брів зовнішні	нормальні	зовнішні підняті	підняті вверх	нормальні
Кутики брів внутрішні	нормальні	внутрішні підняті	зовнішні підняті	нормальні

З огляду на потреби ідентифікації зміни емоційного стану мімічних проявів засобами звичайних камер із невисокою роздільною здатністю та за результатами з таблиці 3 введено наступну градацію для ознак, які розташовані на ділянках обличчя: 1) рот: {відкритий / закритий / закритий або привідкритий}; 2) кутики губ: {опущені / підняті}; 3) очі: {широко розкриті / розкриті (норм) / примружені}; 4) брови (перенісся): {зведені до перенісся / нормальні}; 5) брови: {піднятті вверх / нормальні}; 6) кутики брів зовнішні: {підняті / нормальні}; 7) кутики брів внутрішні: {підняті / нормальні}.

Наведене вище подання мімічних проявів у розрізі емоційних станів є основою для синтезу моделі, за якою буде проводитися ідентифікація:

$$f : P \to \langle \mathbf{x}, \mathbf{w} \rangle, \tag{1}$$

де P – матриця пікселів вхідного відеозапису натовпу людей; $\mathbf{x}$ – вектор ознак мімічних проявів емоцій на обличчі людини, $\mathbf{x} = (x_i)_{i=1}^{7}$, $\mathbf{w}$ – вектор ваг моделі ідентифікації емоційного стану на обличчі людини.

Визначені емпірично ознаки, що формують вектор $\mathbf{x}$, формально подано так: x_1 – ознака міміки ділянки обличчя з ротом; x_2 – ознака міміки ділянки обличчя з кутиком рота; x_3 – ознака міміки ділянки обличчя з очима; x_4 – ознака міміки ділянки обличчя з переніссям між бровами; x_5 – ознака міміки ділянки обличчя з бровами; x_6 – ознака міміки ділянки обличчя із зовнішніми кутиками брів; x_7 – ознака міміки ділянки обличчя із внутрішніми кутиками брів.

Вектор ознак мімічних проявів у розрізі емоційних станів x_i, $i = \overline{1,7}$, описано в таблиці 4.

Таблиці 4

Якісна характеристика ознак мімічних проявів у розрізі емоційних станів

#	Якісна ознака	Злість	Критерій зміни	Страх	Критерій зміни
x_1	Рот	закритий	[0;0.3]	привідкритий	[0.3;0.7]
x_2	Кутики губ	припідняті	[0.3;0.7]	опущені	[0;0.3]
x_3	Очі	примружені	[0;0.2]	широко розкриті	[0.5;1]
x_4	Брови (перенісся)	зведені до перенісся	[0;0.3]	розведені	[0.7;1]
x_5	Брови	опущені	[0;0.3]	підняті вверх	[0.7;1]
x_6	Кутики брів зовнішні	опущені	[0;0.3]	зовнішні підняті вверх	[0.6;1]
x_7	Кутики брів внутрішні	опущені	[0;0.3]	внутрішні підняті вверх	[0.6;1]
#	**Якісна ознака**	**Радість**	**Критерій зміни**	**Сум**	**Критерій зміни**
x_1	Рот	привідкритий або відкритий	[0.6;1]	закритий	[0;0.3]
x_2	Кутики губ	підняті	[0.7;1]	опущені	[0;0.3]
x_3	Очі	примружені або розкриті	[0.2;0.5]	примружені	[0;0.3]
x_4	Брови (перенісся)	нормальні	[0.3;0.7]	зведені до перенісся або нормальні	[0.1;0.5]
x_5	Брови	припідняті вверх або нормальні	[0.3;0.7]	опущені або нормальні	[0.2;0.6]
x_6	Кутики брів зовнішні	припідняті вверх або нормальні	[0.3;0.7]	опущені або нормальні	[0.2;0.6]
x_7	Кутики брів внутрішні	припідняті вверх або нормальні	[0.3;0.7]	опущені або нормальні	[0.2;0.6]

Мімічні прояви природно мають граничні стани і зокрема характеризуються типовою сукупністю ознак зовнішніх проявів цих станів. Відповідно до цих принципів, у роботі [7] було емпірично визначено межі проявів ознак. Зазначимо, що існує природній розподіл, і вказані межі в таблиці 3 відповідають найбільш типовим проявам.

Порівняння якісних ознак моделі з системою класифікації виразів людського обличчя

Проведемо порівняння запропонованої моделі (1) з якісною характеристикою ознак ділянок обличчя (таблиця 4) та системи класифікації виразів обличчя людини FACS [8].

Система FACS містить 100 активних одиниць (з англ. action units, AUs) та характеризує ступінь вираженості зміни стану м’язів за 5-а рівнями: A – мінімальний, B – незначний, C – явний, D – сильний або екстремальний, E – максимальний.

У запропонованій моделі зміна емоційного стану визначається за наперед заданим стандартом, проти підходу з активними одиницями у роботі Екмана [8]. Тобто для різних емоцій визначено одні й ті ж ознаки, але з різними мімічними проявами. Для порівняння взято такі емоції:

1. Мімічний прояв емоційного стану «Злість» за FACS визначено так: опущені брови (AU4); припідняті верхні повіки (AU5); припідняті нижні повіки (AU7); стиснуті губи (AU23). В запропонованій моделі «Злість» характеризують: рот закритий; кутики губ припідняті; очі примружені; брови (перенісся) зведені; брови опущені; кутики брів зовнішні опущені; кутики брів внутрішні опущені.

2. Мімічний прояв емоції «Страх» за FACS визначено так: внутрішні частини брів підняті (AU1); зовнішні частини брів підняті (AU2); опущені брови (AU4); припідняті верхні повіки (AU5); припідняті нижні повіки (AU7); губи натягнуті (AU20); опущена щелепа (AU26). Запропонована модель визначає «Страх» як: рот привідкритий; кутики губ опущені; очі широко розкриті; брови (перенісся) зведені; брови опущені; кутики брів зовнішні опущені; кутики брів внутрішні опущені.

3. Мімічний прояв емоції «Радість» за FACS визначено так: щоки підняті (AU6); розтягнуті кутику губ (AU12). Спрощена модель визначає «Радість» як: рот привідкритий або відкритий; кутики губ підняті; очі примружені або розкриті; брови (перенісся) нормальні; брови припідняті вверх або нормальні; кутики брів зовнішні припідняті вверх або нормальні; кутики брів внутрішні припідняті вверх або нормальні.

4. Мімічний прояв емоції «Сум» за FACS визначено так: внутрішні частини брів підняті (AU1); опущені брови (AU4); опущені кутики губ (AU15). В запропонованій моделі «Сум» визначається як: рот закритий; кутики губ опущені; очі примружені; брови (перенісся) зведені до перенісся або нормальні; брови опущені або нормальні; кутики брів зовнішні опущені або нормальні; кутики брів внутрішні опущені або нормальні.

Порівняльний аналіз системи FACS та запропонованої моделі на основі визначення та вибору впливових ознак дає можливість реалізувати ідентифікацію змін емоційного стану мімічних проявів без зниження якісних результативних показників. Використання моделі дає змогу визначати сукупність необхідних емоційних станів та сформувати необхідну множину характерних ознак, які створюють емоційний прояв та характеризуються належними параметрами роздільності емоцій за мімічними проявами. Водночас уніфікація кількості структурних якісних ознак мімічних проявів показала свою ефективність через те, що визначаються значущі ознаки, які в сукупності створюють умови хорошого розділення цих груп і, отже, розділення емоційних станів.

Висновки

У роботі запропоновано нову спрощену модель відтворення мімічних проявів емоційних станів людини для систем, що відповідають вимогам безпеки. Модель використовує підхід гіперплощинної класифікації мімічних проявів основних емоційних станів. У роботі було виділено основні ділянки обличчя, що впливають на відображення емоційних станів, до яких належать ділянки обличчя з бровами, очима та ротом. Також було виділено якісні характеристики зміщень точок. Форми групування станів, як відображення сукупності ознак, були визначені та формалізовані на основі методів візуальної аналітики. Ці дані груповано та формалізовано в класи емоційних проявів. У результаті проведення експериментів встановлено, що запропонована модель ефективно формалізує мімічні прояви обличчя, що відображають емоційні стани людини, та може мати практичне застосування для покращення дотримання вимог безпеки в реальних умовах.

Література

1. Revina I. M., Emmanuel W. R. S. A survey on human face expression recognition techniques. Computer and Information Sciences. Journal of King Saud University. 2018. Vol. 33, No. 6. P. 619–628.

2. Naga P., Marri S. D., Borreo R. Facial emotion recognition methods, datasets and technologies: A literature survey. Materials Today: Proceedings. 2021. P. 1–5.

3. Gangopadhyay I., Chatterjee A., Das I. Face detection and expression recognition using Haar cascade classifier and Fisherface algorithm. In: Bhattacharyya S., Pal S., Pan I., Das A. (eds) Recent Trends in Signal and Image Processing. Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, Singapore. 2019. Vol. 922. P. 1–11.

4. Facial geometric feature extraction based emotional expression classification using machine learning algorithms. PLOS ONE. 2021. Vol. 16, No. 2. P. e0247131.

5. Zabatani A. Intel® RealSense™ SR300 coded light depth camera. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2020. Vol. 42, No. 10. P. 2333–2345.

6. Radiuk P., Pavlova O., Hrypynska N. An ensemble machine learning approach for Twitter sentiment analysis. CEUR-WS, ISSN. 1613–0073. 2022. Vol. 3171. P. 387–397.

7. Kalyta O., Krak Iu., Barmak O., Wojcik W., Radiuk P. Method of facial geometric feature representation for information security systems. CEUR-WS, ISSN. 1613–0073. 2022. Vol. 3156. P. 319–328.

8. Ekman P., Friesen W. V., Hager J. C. The facial action coding system: The manual. Salt Lake City, UT Research Nexus eBook. 2002. 527 p.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-149-153
УДК 004.02

КАРПОВ ІГОР
Національний університет «Львівська політехніка»
https://orcid.org/0000-0003-4885-5078
E-mail: ihor.a.karpov@lpnu.ua,
БУРОВ ЄВГЕН
Національний університет «Львівська політехніка»
https://orcid.org/0000-0001-8653-1520
E-mail: yevhen.v.burov@lpnu.ua,

ОНТОЛОГІЇ У ПРОЦЕСІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

Прийняття рішень є ключовою діяльністю для керівництва в будь-якій організації. Для сприяння цьому процесу використовуються кілька методів прийняття рішень, у тому числі багатокритеріальне прийняття рішень, особливо, коли рішення стосується кількох зацікавлених сторін і кількох критеріїв. Ці методи, які оцінюють кожну альтернативу за набором критеріїв, зазвичай носять суб'єктивний характер. Однак, незважаючи на те, що вони є суб'єктивними, слід переконатися, що особи, які приймають рішення, мають якомога більше знань про альтернативи. Це включало б розуміння всіх наслідків кожної альтернативи та всіх ефектів цих наслідків. Це вимагає глибокого розуміння сфери, у якій приймається рішення. Організаційна онтологія забезпечує таке розуміння. Онтологія визначає загальний словниковий запас для дослідників, яким потрібно обмінюватися інформацією в галузі. Онтології використовуються в кількох галузях, включаючи штучний інтелект. Оскільки мета штучного інтелекту полягає в тому, щоб зробити машини достатньо складними, щоб інтегрувати зміст інформації, організація знань є дуже важливим кроком на шляху до досягнення цієї мети. Цей крок породив інженерію знань, яка значною мірою покладається на онтології як засіб представлення та організації знань. Виявлення наслідків для кожної альтернативи є надзвичайно важливою складовою всього процесу прийняття рішень. Вкрай важливо, щоб особа, яка приймає рішення, враховувала не лише прямі наслідки, а й намагалася визначити непрямі наслідки. Один із способів зробити це - визначити всі бізнес-процеси, на які вплине кожна альтернатива, а потім детально вивчити ці бізнес-процеси, щоб визначити повний ступінь (тобто наслідки) впливу на бізнес-процес. Однак, щоб зробити це ефективно, потрібно проаналізувати предметну область, що, у свою чергу, вимагає, щоб знання про предметну область були представлені в структурі, яка полегшує цей аналіз.

Ключові слова: прийняття організаційних рішень, багатокритеріальне прийняття рішень, онтологія, процес прийняття рішення.

KARPOV IHOR, BUROV EUGENE
Lviv Polytechnic National University

ONTOLOGIES IN THE DECISION-MAKING PROCESS

Decision making is a key activity for management in any organization. Several decision-making techniques are used to facilitate this process, including multi-criteria decision-making, especially when the decision involves multiple stakeholders and multiple criteria. These methods, which evaluate each alternative according to a set of criteria, are usually subjective in nature. However, even though they are subjective, it is important to ensure that decision makers have as much knowledge as possible about the alternatives. This would include understanding all the consequences of each alternative and all the effects of those consequences. This requires a deep understanding of the area in which the decision is made. Organizational ontology provides such an understanding. An ontology defines a common vocabulary for researchers who need to exchange information in a field. Ontologies are used in several fields, including artificial intelligence. Since the goal of artificial intelligence is to make machines sophisticated enough to integrate information content, knowledge organization is a very important step towards achieving this goal. This move gave rise to knowledge engineering, which relies heavily on ontologies as a means of representing and organizing knowledge. Identifying the consequences for each alternative is an extremely important component of the entire decision-making process. It is imperative that the decision maker considers not only the direct consequences, but also tries to identify the indirect consequences. One way to do this is to identify all the business processes that will be affected by each alternative, and then examine those business processes in detail to determine the full extent (i.e., consequences) of the business process impact. However, to do this effectively, one must analyze the subject area, which in turn requires that knowledge about the subject area be represented in a structure that facilitates this analysis.

Keywords: organizational decision-making, multi-criteria decision-making, ontology, decision-making process.

Постановка проблеми

Процес прийняття рішення передбачає вибір із набору альтернатив. Особи, які приймають рішення, часто вивчають цілі, цінності та критерії при оцінці цього набору альтернативних рішень. Зазвичай існує кілька, часто суперечливих, критеріїв, які необхідно оцінити під час прийняття рішень. Розглядаючи альтернативи, особи, які приймають рішення, повинні зважити ці численні критерії, і щоб зробити це ефективно, вони повинні повністю розуміти наслідки кожного вибору. У багатьох випадках особи, які приймають рішення, використовують інтуїцію, щоб зробити свій вибір, однак для найбільш складних і важливих рішень на організаційному рівні стає важливим правильно структурувати проблему та гарантувати, що альтернативи чітко оцінюються з точки зору критеріїв.

Аналіз останніх джерел

Дослідники зосереджуються на наданні інструментів особам, які приймають рішення, щоб допомогти їм у процесі прийняття рішень. Існує кілька методів та інструментів, які допомагають особам, які

приймають рішення, наприклад, багатокритеріальне прийняття рішень (MCDM) і ціннісно-орієнтоване мислення (VFT). Чотири фази прийняття рішень це [1]:

1. Інтелект – на цій фазі визначається проблема або визначається ситуація, в якій необхідно прийняти рішення.
2. Проєктування – на цьому етапі розробляються та аналізуються можливі варіанти дій (тобто альтернативи).
3. Вибір – ця фаза передбачає вибір курсу дій із доступних.
4. Впровадження – на цьому етапі виконується план дій.

Інші моделі раціонального прийняття рішень визначають наступні кроки, коли стикаються з певною проблемою [2, 3]:

1. Уточнити цілі, цінності чи завдання, а потім проранжувати або впорядкувати їх.
2. Перелічити усі можливі способи досягнення цих цілей, цінностей або завдань, тобто альтернативні стратегії.
3. Визначити всі наслідки, які випливають із кожної з цих стратегій.
4. Порівняти наслідки кожної політики з цілями, цінностями чи завданнями.
5. Обрати той, який найкраще відповідає цілям, цінностям або завданням.

Загалом, прийняття рішень є складним процесом, який може бути полегшений за допомогою методів та інструментів, таких як багатокритеріальне прийняття рішень та ціннісно-орієнтоване мислення. Цей процес може бути розділений на чотири фази. Інші моделі раціонального прийняття рішень додатково вимагають уточнення цілей та цінностей, переліку можливих стратегій, оцінювання наслідків та порівняння їх з цілями, цінностями та завданнями, щоб обрати оптимальний варіант. Ці методи допомагають приймати рішення з більшою увагою до деталей та кращою оцінкою можливих наслідків.

Формулювання цілі статті

Метою даної статті є показати важливість врахування всіх можливих наслідків кожної альтернативи при прийнятті рішень в будь-якій організації, а також відзначити роль організаційної онтології та інженерії знань у забезпеченні глибокого розуміння предметної області та покращенні процесу прийняття рішень.

Виклад основного матеріалу

Прийняття рішень можна розуміти як акт вибору альтернативи в наборі можливих альтернатив або як більш широку перспективу процесу, що складається з різних фаз, таких як визначення проблеми, відкриття альтернативи, вибір альтернативи та прийняття рішення, оцінка. Важливими проблемами в цьому сценарії є складність і невизначеність ситуації прийняття рішення або існування кількох суперечливих цілей.

Багато робіт припускають, що особа, яка приймає рішення, є економічною людиною, тобто людиною, яка [4]:

1. Повністю поінформована.
2. Нескінченно чутлива.
3. Раціональна.
4. Здатна впорядковувати ситуації за певним критерієм, який має бути максимальним.

Однак це перспектива, яка перевищує реальні людські когнітивні можливості. Нам цікаво, як люди насправді приймають рішення. Тривіально показати, що реальна людина не має повного знання свого контексту та різних кінцевих станів, до яких вона може дійти в результаті своїх дій. Тому властивості економічної людини (1) і (2) відкидаються. Тут ми припускаємо, що властивості (3) і (4) все ще зберігаються. Стосовно (3) ми підкреслюємо, що бути раціональним не означає не мати емоцій, але бути здатним міркувати над помилками, заснованими на емоціях і цінностях. Нарешті, ми вважаємо, що ситуації з альтернативним результатом можуть бути впорядковані на основі його значень відповідно до переконань особи, яка приймає рішення.

Прийняття рішення [5, 6] – це процес логічного та усвідомленого вибору з доступних варіантів. Коли логічний вибір ґрунтується на ключових факторах, що визначають успіх конкретної орієнтованої на організацію стратегії, цей процес називається прийняттям стратегічного рішення. Стратегічні рішення важливі, тому що без них дії не будуть плануватися відповідно до стратегій організації.

Сьогодні методи прийняття рішень застосовуються в кількох сферах, таких як управління бізнесом та розробка програмного забезпечення. На додаток до цих прийомів існують інструменти, які допомагають особам, які приймають рішення, у процесі прийняття рішень. Прикладами цих інструментів є системи підтримки прийняття рішень, які допомагають приймати рішення, і стратегічні інформаційні панелі для перегляду стратегічних показників.

Спосіб забезпечення загальної базової мови, що об’єднує концепції для управління рішеннями та обробки стратегічних індикаторів, полягає у визначенні онтології. Ця онтологія дозволяє структурувати знання таким чином, щоб сприяти їх розумінню та комунікації, і, отже, її можна використовувати як основу для створення інструментів, що підтримують прийняття стратегічних рішень. Крім того, ця онтологія буде використовуватися в майбутніх версіях для забезпечення можливостей міркування, таких як пропозиції на вимогу.

Труднощі у прийнятті рішень виникають через невизначеність та/або недостатнє знання проблемної ситуації та наявних ресурсів, слабку структуру завдання та багатокритеріальний вибір [7]. Формалізацію

прикладної задачі, вибір процедури вирішення, організацію роботи особи, що приймає рішення, і експертів здійснює консультант-аналітик. Впровадження в процес прийняття рішень систем підтримки прийняття рішень (СППР) знижує рівень суб'єктивності шляхом вирішення проблем недостатності та невизначеності вихідної інформації.

Онтології корисні для представлення знань і дуже важливі для інженерії знань. Назва "онтологія" використовується більше двох десятиліть і стосується широкого кола галузей, таких як штучний інтелект. Онтологія повинна бути розроблена таким чином, щоб відповідати проблемам, які переважали в її розвитку. Наприклад, онтологія для обслуговування комп'ютера повинна відповісти на будь-яке питання, пов'язане з діагностикою збою комп'ютера на основі даних, наданих користувачем.

Загальне визначення онтології – це "явна та формальна специфікація спільної концептуалізації" [8]. Елементи цього визначення слід розуміти так:

- Концептуалізація: абстракція явища, отримана шляхом визначення понять, відповідних цьому явищу;
- Формальний: вказує на те, що онтології інтерпретуються машиною;
- Явна специфікація: це означає, що поняття онтології та обмеження, пов'язані з їх використанням, визначені декларативно;
- Спільний: стосується того факту, що онтологія фіксує консенсусне знання.

Розглянемо загальний погляд на основні типи онтологій [9, 10]:

- Онтологія високого рівня: цей тип онтології представляє концепції незалежно від контексту чи ситуації. При цьому, оскільки концепції поза контекстом, вони повинні бути загальноприйнятими людьми. За допомогою цього підходу можна представити все або майже все.
- Онтологія домену: як випливає з назви, цей тип онтології задуманий у певному контексті. Це система знань, пов'язаних із галуззю, якою можуть бути сільське господарство, тваринництво, цивільне будівництво тощо.
- Онтологія завдань: цей тип онтології використовується в контексті вирішення проблем для представлення концепцій, пов'язаних із конкретними завданнями, які виконуються. Це можуть бути завдання, пов'язані з дизайном, або ті, що пов'язані з хірургічною операцією.
- Онтологія програми: онтологія програми є досить специфічною, оскільки вона пов'язує дві конкретні онтології, одна з яких є онтологією домену, а інша – онтологією завдання. Іншими словами, це концептуалізація завдань, які виконують актори поля, коли вони працюють.

Прийняття рішення складається з наступних етапів:

- Підготовчий етап складається з визначення проблеми прийняття рішення згідно онтології. Іншими словами, необхідно визначити мету, область, поточний контекст проблеми, а також критерії та можливі обмеження.
- Фазу колективного розуміння проблеми можна розглядати як продовження фази підготовки. Дійсно, він складається з обміну загальним баченням проблеми з усіма учасниками та пошуку згоди щодо того, як реалізувати розроблений процес.
- Фаза створення рішення полягає у виробленні альтернативних ідей для вирішення проблеми.
- Фаза обговорення та конфронтації точок зору настає після фази генерації, щоб дозволити учасникам уточнити свої внески, аргументуючи їх, щоб заручитися підтримкою найбільшої кількості.
- Фаза прийняття рішення відбувається після фази переговорів і конфронтації рішень. Вона полягає у відборі відповідно до попередньо визначених критеріїв ідей, які були схвалені максимальною кількістю учасників або які досягли консенсусу в групі.
- Етап моніторингу охоплює весь процес прийняття рішень, щоб будь-яку проблему можна було вчасно усунути. Він також включає генерацію звіту про весь процес прийняття рішень і забезпечує їх виконання. Для цього наприкінці процесу прийняття рішення буде згенеровано документ, який стане основою для подальшої роботи.

Роботи, виконані Hernandez і Mothe і Lechchine, дозволяють виділити вісім етапів побудови онтології [11]:

Крок 1: Специфікація вимог до онтології: цей крок полягає у визначенні сфери знань онтології, її типу, цілей, на які вона спрямована, і її майбутнього використання. Він також визначає обсяг і методи, які повинні використовуватися для вилучення концепції.

Крок 2: Вибір корпусу: це вибір документів, з яких будуть витягнуті концепції.

Крок 3: Лінгвістичне дослідження корпусу для виділення термінів та їхніх зв'язків: цей крок дозволяє ідентифікувати терміни, що представляють домен, а також зв'язки, які їх пов'язують.

Крок 4: Нормалізація результатів кроку 3: полягає в ідентифікації та визначенні понять і семантичних зв'язків між поняттями та термінами.

Крок 5: Моделювання онтології: складається з використання мови онтології для формального представлення семантичної мережі, розгорнутої на кроці 4.

Крок 6: Побудова структури онтології: це складання ієрархії концепцій онтології без надмірностей і неоднозначності та можливих нових зв'язків.

Крок 7: Перевірка онтології експертом(ами) предметної області: робота попереднього етапу має бути схвалена фахівцями в галузі.

Крок 8: Оновлення онтології: оскільки будь-яка область підлягає змінам/еволюції, важливо, щоб відповідні онтології регулярно оновлювалися шляхом додавання нових концепцій або переформулювання інших.

Після встановлення процесу необхідно визначити п’ять основних параметрів:

1. Мета рішення.
2. Мета та обсяг прийняття рішення.
3. Кількість осіб, які приймають рішення.
4. Тривалість процесу.
5. Анонімність.

На основі цих параметрів були розроблені питання, на які має відповісти онтологія. Нижче наведено їх у порядку пріоритету:

1. Прийняття рішень є багатокритеріальним чи однокритеріальним?
2. Які моделі співпраці слід використовувати для цього процесу?
3. Які люди, які приймають рішення (навички, якості, характеристики і т.д.), повинні брати участь у цьому процесі?
4. Яка достатня кількість осіб, які приймають рішення?
5. Якою має бути тривалість процесу?
6. Чи потрібна анонімність для цього процесу?

Наведені вище запитання дозволяють зрозуміти, що причиною розробки онтології є “необхідність розрізняти знання про поле та оперативні знання”.

Висновки

Процес прийняття рішень це складний процес, який починається із запитання та може призвести до вказівки на відповідь, яка є вирішенням початкової проблеми. Важливо відзначити, що прийняття рішення є чимось суттєво відмінним від рішення, яке є результатом процесу прийняття рішення. У більшості випадків етапи складаються з багатьох (одночасних або послідовних) дій, подій, процесів, пов’язаних зі збором інформації, обробкою, перевіркою тощо. У деяких випадках прийняття рішення можна розглядати як складний процес, що включає багато “підрішень”, що передує розпізнаванню вихідного рішення проблеми. Існує принципова онтологічна відмінність між процесом прийняття рішення та його результатом – рішенням. Крім того, надання більш еластичних меж прийняття рішень може призвести до того, що прийняття одного рішення матиме більше ніж одне рішення як результат.

Література

1. Іохов О. Ю. Застосування онтології задачі вибору для опису процесів взаємодії суб'єктів управління. 2021. URL: http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/52520

2. Карпов І., Буров Є. Особливості застосування онтологій в системах підтримки прийняття рішень: теоретичний та практичний аспект. Grail of Science. 12-13. 2022. С. 307-310. URL: https://archive.journal-grail.science/index.php/2710-3056/article/view/57

3. Bravo M. Methodology for ontology design and construction. Contaduría y administración. 64.4. 2019. URL: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0186-10422019000500015&script=sci_arttext

4. Haupt G. Hierarchical thinking: a cognitive tool for guiding coherent decision making in design problem solving. International Journal of Technology and Design Education. 28.1. 2018. P. 207-237. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s10798-016-9381-0

5. Insaurralde C.C. Uncertainty in avionics analytics ontology for decision-making support. Journal for Advances in Information Fusion. 2019. URL: http://confcats_isif.s3.amazonaws.com/web-files/journals/entries/Uncertainty%20in%20avionics%20analytics%20ontology%20for%20decision-making%20support.pdf

6. Lytvyn V. Methods of building intelligent decision support systems based on adaptive ontology. Second International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP). IEEE, 2018. URL: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8478500/

7. Song R. Context-aware BPM using IoT-integrated context ontologies and IoT-enhanced decision models. 21st Conference on Business Informatics (CBI). Vol. 1. IEEE, 2019. URL: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8808051/

8. Rahim, N. R., Nordin, S., & Dom, R. M. (2019). A Clinical Decision Support System based on Ontology and Causal Reasoning Models. Jurnal Intelek, 14(2), 187-197.

9. Euzenat, J., David, J., Locoro, A., & Inants, A. (2015). Context-based ontology matching and data interlinking.

10. Sánchez, D., Batet, M., Isern, D., & Valls, A. (2012). Ontology-based semantic similarity: A new feature-based approach. Expert Syst. Appl., 39, 7718-7728.

11. Hermann, H. (2006). Knowledge Representation and the Semantics of Natural Language.

References

1. Iokhov O.Y. Application of the ontology of the choice problem to describe the interaction processes of management subjects. 2021. URL: http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/52520

2. Karpov I., Burov E. Peculiarities of using ontologies in decision support systems: theoretical and practical aspects. Grail of Science. 12-13. 2022. P. 307-310. URL: https://archive.journal-grail.science/index.php/2710-3056/article/view/57

3. Bravo M. Methodology for ontology design and construction. Contaduría y administración. 64.4. 2019. URL: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0186-10422019000500015&script=sci_arttext

4. Haupt G. Hierarchical thinking: a cognitive tool for guiding coherent decision making in design problem solving. International Journal of Technology and Design Education. 28.1. 2018. С. 207-237. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s10798-016-9381-0

5. Insaurralde C.C. Uncertainty in avionics analytics ontology for decision-making support. Journal for Advances in Information Fusion. 2019. URL: http://confcats_isif.s3.amazonaws.com/web-files/journals/entries/Uncertainty%20in%20avionics%20analytics%20ontology%20for%20decision-making%20support.pdf

6. Lytvyn V. Methods of building intelligent decision support systems based on adaptive ontology. Second International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP). IEEE, 2018. URL: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8478500/

7. Song R. Context-aware BPM using IoT-integrated context ontologies and IoT-enhanced decision models. 21st Conference on Business Informatics (CBI). Vol. 1. IEEE, 2019. URL: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8808051/

8. Rahim, N. R., Nordin, S., & Dom, R. M. (2019). A Clinical Decision Support System based on Ontology and Causal Reasoning Models. Jurnal Intelek, 14(2), 187-197.

9. Euzenat, J., David, J., Locoro, A., & Inants, A. (2015). Context-based ontology matching and data interlinking.

10. Sánchez, D., Batet, M., Isern, D., & Valls, A. (2012). Ontology-based semantic similarity: A new feature-based approach. Expert Syst. Appl., 39, 7718-7728.

11. Hermann, H. (2006). Knowledge Representation and the Semantics of Natural Language.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-154-162
UDC 666.9.03; 666.942; 666.942.4/.7; 666.946.4

KOVALENKO YURII
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
https://orcid.org/0000-0003-0714-3816
e-mail: kovalenko91993@gmail.com
TOKARCHUK VOLODYMYR
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
https://orcid.org/0000-0001-8620-954X
e-mail: tokarchuk.volodya@ukr.net
KOVALEKO SVITLANA
E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (PWI)
https://orcid.org/0000-0001-5012-3437
e-mail: Aklimenko@ukr.net

INFLUENCE OF SULFATE ION ENVIRONMENT ON THE CEMENT MATRIX MODIFIED BY REDISPERSIBLE POLYMERS

Injection of sulfate ions into the cement matrix with water by wet spraying due to high moist in the environment is the reason of the deterioration acceleration and durability decrease with time. The effects of introduction of redispersible polymers (RP) and calcium formate on the increasing of the durability and decreasing of the deterioration effect caused by sulfate ions on the cement matrix were studied. Vinyl-acetate/versatate, vinyl-acrylic copolymer and calcium formate were mixed into nine separate cement mixtures at a concentration of additives 1 %, 3 % and 5 % respectively. Three different sulfate ion environment were sprayed through the fog environment at high moist concentration using a salt spray device "Salt Fog Chamber". Test results showed that different additive in different sulfate environment has various affects both on the deceleration of the structure deterioration and the reduction of the strength of cement matrix. Vinyl-acetate/versatate and calcium formate in concentrations of 1% and 3% have high stability while maintaining strength at the level of exploitational properties of the matrix. While, vinyl-acrylic copolymer at 5 % has more resistance to strength loss after 168 days of withholding in an aggressive environment compared to 1 % and 3 %. Detailed observation of the structure formation of the cement matrix at 168 days shows formation that relate both to the hydrated cement minerals and complexes of organic salts. This formation allowed at the late age of the experiment to decrease the strength loss under intensive impact of SO_4^{2-} migration through the matrix due to the encapsulating of cement minerals at early ages of hydration in polymer films with RP and active early formation of $Ca(OH)_2$ for formate. This allowed the cement matrix to retain its shape for a long periods, become more stable, reduce the washing out of soluble cement components at early ages, and reduce the content of active Ca by bonding it into semisoluble compositions that cause the decreasing of the negative effect on cement matrix by SO_4^{2-}.

Key words: portland cement, dry ready-mixes, redispersable powders, calcium formate, corrosion resistance

КОВАЛЕНКО ЮРІЙ, ТОКАРЧУК ВОЛОДИМИР
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
КОВАЛЕНКО СВІТЛАНА
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

ВПЛИВ СУЛЬФАТ-ІОННОГО СЕРЕДОВИЩА НА МОДИФІКОВАНУ ЦЕМЕНТНУ МАТРИЦЮ РЕДИСПЕРГОВАНИМИ ПОЛІМЕРАМИ

Введення сульфат-іонів у цементну матрицю з водою шляхом вологого розпилення через високу вологість навколишнього середовища є причиною прискорення зносу та зниження довговічності з часом. Досліджено вплив введення редиспергованих полімерів (РП) і форміату кальцію на підвищення довговічності та зменшення впливу сульфат-іонів на цементну матрицю. Вінілацетат/версатат, вініл-акриловий сополімер і форміат кальцію змішували в дев'ять окремих цементних сумішей з концентрацією добавок 1%, 3% і 5% відповідно. Три різні середовища сульфатних іонів розпорошували через туманне середовище при високій концентрації вологи за допомогою пристрою для розпилення солі «Камера соляного туману». Результати випробувань показали, що різні добавки в різних сульфатних середовищах по-різному впливають як на уповільнення руйнування структури, так і на зниження міцності цементної матриці. Вінілацетат/версатат і форміат кальцію в концентраціях 1% і 3% мають високу стабільність при збереженні міцності на рівні експлуатаційних властивостей матриці. При цьому вініл-акриловий сополімер при 5% має більшу стійкість до втрати міцності після 168 днів витримки в агресивному середовищі порівняно з 1% і 3%. Детальне спостереження за формуванням структури цементної матриці через 168 днів показує утворення, які стосуються як гідратованих мінералів цементу, так і комплексів органічних солей. Таке утворення дозволило на пізньому терміні експерименту зменшити втрату міцності під інтенсивним впливом міграції SO_4^{2-} через матрицю за рахунок інкапсуляції цементних мінералів на ранніх термінах гідратації в полімерних плівках з РП та активного раннього утворення $Ca(OH)_2$ для форміату. Це дозволило цементній матриці тривалий час зберігати форму, стати більш стабільною, зменшити вимивання розчинних компонентів цементу на ранніх термінах, а також знизити вміст активного Ca шляхом зв'язування його в напіврозчинні композиції, що спричиняє зниження негативних вплив SO_4^{2-} на цементну матрицю.

Ключові слова: портландцемент, сухі будівельні суміші, редиспергованi порошки, форміат кальцію, корозійна стійкість.

Literature review and problem statement

General development of dry building ready mix (DBRM) is based on the basics of main components such as bounder (cement, lime, gypsum), filler (microsilica or etc.) and additives such as redispersible polymers (RP) or other organic or inorganic dry powders to achieve the desired properties for project mix. Mainly DBRM are

presented as stucco, tiles glue, ready concrete mixes, and others. In Ukraine, the development of DBRM has its own market and high demand amongst consumers.

In the last ten years, DBRM found their application as repairing mixes for reconstruction and repairing damaged structures due to prolonged exposure under the influence of aggressive environment. Mostly this environment included sulfate (SO42–) ion that is mostly widespread due to its presence in soils, marine environment, underground water, products of combustion, etc. Even though sulfates attack the cement paste matrix, the value of their impact varies depending on the type of cement used in DBRM [1]. Moreover, in this consideration, pH levels of the environment were also noticed, due to the fact that the lower pH, the more deteriorative damage would be [2].

The main question of recent studies on the matter of these problems was considered mostly to the impact on cement mineral itself [3-5]. Moreover, recent examinations of the hydration behavior of cement pastes modified by RP [6-8] concluded that interactions between the environment and modifiers (RP and formates) are not possible. Such conclusions are made on the basis that with time, after 28 days of curing, any remains of polymer structures are decomposed [8, 9]. Yet by Kardon [10], it is stated that polymer formation in an alkaline environment may interact with cement components resulting in creating organic salts similar in structure to the hydrated cement minerals at late stages.

In the similar study [11] influence of sulfate ion environment on the cement matrix modified only with methyl hydroxyethyl cellulose ethers, the question of influence was limited only by the strength coparesment. Moreover, most studies [7, 11-13] emphasise the influence of RP and formates only on the stated characteristics such as work (setting) time, viscosity, water retention, adhesion activity and hydration mechanism [14].

Film formation of RP described by Kim [8], shows that injected in to the mix polymers form early structure that respond to lowering the strength of the cement matrix. Therefore, at early and later ages of curing, samples with RP gain much lower strength than the control one. Yet for formates such tendency is a bit different [7], the early curing time of the matrix shows an increase in strength because of the early formation of Ca(OH)2. Structurally, such difference is described by the process of filling of the voids in the cement matrix by calcium hydrate at the period of early hidratation. Therefore, developing early strength of samples and compacting the matrix occur. Including the information from Kardon [10], it can be assumed that every development and reaction that occurred along the hidratation processes in the cement matrix potentially can play role in the development of mixtures with improved resistance to the sulfate impact.

In this paper, redispersible powders (RP) of vinyl acetate/versatate, vinyl-acrylic copolymer and calcium formate were selected as widely spread organic additives in the production of repaired building ready mixes (RBRM). Sulfate environments with close to real impact were introduced through the “Salt Fog Chamber” (SFC) to prevent a high negative impact on the truthfulness of the results. Chambers were used to conduct the corrosion durability test under the action of sulfate spraying in fog environment on both cement and mixes with additives samples to prevent any deviation while compression strength tests. After compression strength, samples were observed with the electrical microscope to study changes in structure. The studies were conducted only to examine the impact of sulfate ion environment on the modified cement matrix with additives. Such a decision was made due to the lack of studies in this field and to provide a detailed analysis over the chemical reactions that may occur with components of the matrix with the application of chemical additives of organic derivation. This work will provide information on the possible solutions in the development of RBRM for environments with high impact of aggressive ions.

The aim and objectives of the study

The aim of this work is to identify the nature of the action of the three most common in the production of cement building mixtures of redispersed powders on the corrosion resistance application for DBRM. The data to be obtained will make it possible to conclude about not only the physical and mechanical nature of the effect on the cement matrix but also confirm or deny the presence of chemical transformations. The would-be results can be applied in practice in the production process to create new formulations of building mixtures, as well as in the production of new concrete compositions.

To accomplish the aim, the following tasks have been set:

– to investigate the effect of the amount of additive on the control strength at 28 days;

– to investigate the effect of the amount of additive in the mixtures under the influence of sulfate ion environment on the compressive strength after 168 days;

– to analyze the chemical interaction of additives with cement particles in a cement matrix in the sulfate medium based on the obtained data and photographs of structure formation.

The study materials and methods

Examined materials and equipment used in experiments

Standardized Portland cement of the PC I 500N brand were used for control samples and mixes. The object of the study was dry building ready mixes with redispersible additives, such as: copolymers of vinyl acetate/versatate (Neolith 4400) and vinyl-acrylic (Neolith 6700). Calcium formate (FormateCa) was chosen because of its widespread use in dry building mixes together with redispersible polymers.

The compressive strength indicators, were determined by methods represented in DSTU EN 196-1: 2007 (EN 196-1: 2005, IDT). The electron microscope (REM 106-I) with XDR was used to acquire the results of the interaction of additives on the structure formation of the cement matrix.

Compressive Strength of Cement Mixes.

According to the standards for cement and cement-based ready mix durability testing (EN 196-1 and EN 1015-11), the mixes were cured for 28 days before control measurement of the compressive strength test. For the test, the size of the samples were accepted accordingly to the method for "Determination of The Impact of Aggressive Environment" by Kind [14]. Each group of four 20 x 20 x 20 mm specimens were cured in a controlled environment accordingly for 28 days and later for 168 days, a total of 196 days

Structural analysis of sulfate impact on the modified cement matrix

Samples 2 x 4 mm (size depends on the observing surface of microscope) are previously dried before taking photos in full vacuum on the REM to ensure the absence of any possible remaining molecular water in structure. Such presence can be negatively reflected on the structural photograph of the sample by including the migration of dust particles which are disruptive to the receiving sensors.

Test Results and Discussion

Compressive strength before and after sulfate impact

Table 1 shows the resulting influence of the additives on the grade strength and strength of samples at the 168 days of durability test in aggressive environment. It is shown that plain cement has undeniably high strength value compared to modified mixes. Yet, the rapid decrease of the final date in the aggressive environment shows that plain cement is more influenced by the direct impact of sulfate ions rather than project mix. Moreover, it can be seen that along the 168 days of curing, most of the samples that remained in the water environment gained more strength. For mixes with calcium formate this increase is true for 3 % and 5 %, while for Neolith 4400 is 3 % and for Neolith 6700 is 3 % and 5 % of additive respectively.

Table 2

Change in strength (unit: MPa) of samples with and without additives at 28 days before and 168 days after sulfate impact

Name of mixes	28 days before sulfate impact	Control strength in water after 168 days	168 days after sulfate impact		
			Na_2SO_4	$MgSO_4$	$CaSO_4$
Plain cement	52	54.5	33.5	32.5	37
FormateCa 1 %	47.5	45	35.5	39	36.5
FormateCa 3 %	35	46	36.25	32.75	27
FormateCa 5 %	40	43.5	38	33.5	14
Neolith 4400 1 %	45.25	44.75	40	34	28.75
Neolith 4400 3 %	40	51.25	37.5	31	39.75
Neolith 4400 5 %	38.75	38.25	35	31.25	31.25
Neolith 6700 1 %	44	33.75	29.75	30	25
Neolith 6700 3 %	38	39.25	27.25	29	27.25
Neolith 6700 5 %	29.5	40.75	34.5	27.5	34.5

Influence of calcium formate on the sulfate durability of cement matrix.

Figure 1 graphically shows changes in the strength of the mixes that have in their compound Calcium Formate. Rapid strength fall for plain cement is seen at 168 days in all sulfate ion solutions. From Figure 3, the following can be seen:

(1) Strength of cement mixes modified by Formate Ca with 1 % are higher for both sodium and magnesium sulfate environments. Strength value of 1 % mix in both sulfate environments is higher compared to cement. For $CaSO_4$ solution, the strength value of 1 % mix is close to plain cement. Such difference can be explained by the amount of active calcium in the structure of the cement matrix.

(2) In general, with a calcium formate content of up to 1 wt. % loss of strength of the samples makes up from 6 to 10 MPa and 9 to 12 MPa, respectively, in sodium and magnesium sulfate solution compared to the initial values. Moreover, comparing the loss of strength with the plain cement, where the loss of strength is from 17 to 22 MPa in sulfate environments, it can be stated that calcium formate in general exhibits the character of an anticorrosion additive. This statement is confirmed by low indicators of loss of strength and for mixtures with an additive content of up to 3 wt. %

(3) Absence of calcium ions in sodium and magnesium sulfate solutions except the ones in the cement mix, do not quicken the processes of formation of nonsoluble calcium sulfate that are destructive for the cement matrix. Exceeding the amount of $CaSO_4$ of the third solution consisted of, quickens the formation of non-soluble crystals that are the reason of the decreasing of strength because of the character of the dissociation of formate.

(3) Free Calcium ions from formate group, calcium hydroxide, and the presence of dissociated sulfate ions are the reason of the active formation of the calcium sulfate that partially washes out. That is the main reason why 3 % and 5 % mix of $CaSO_4$ solution have lower strength.

(4) Moreover, the strength values for mixes with 1 % - 5 % of additive at sodium and Magnesium Sulfate environment and 1 % at Calcium Sulfate environment, respectively, indicate that Calcium Formate can be potentially used as an anticorrosion agent as well as its established antifreeze properties.

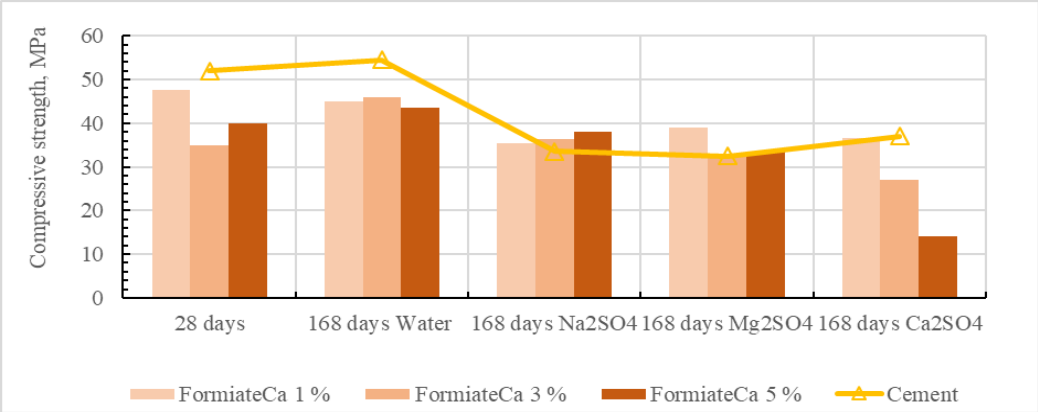
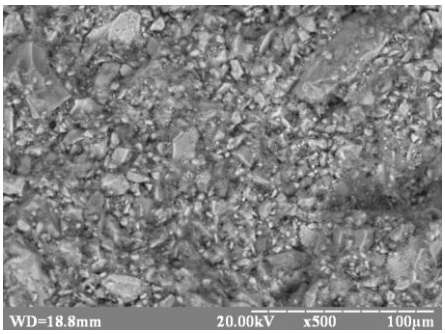


Figure 1: Comparison of the compressive strength of initial samples (28 days), nonimpacted samples (after 168 days), and impacted (after 168) by sulfate environment samples for FormiateCa mixes.

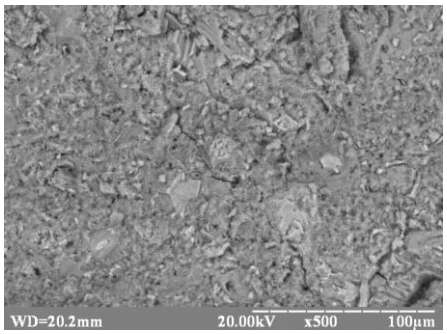
Figure 2 shows the difference between the structure of nonimpacted (a) at 28 days of curing and impacted (b) FormateCa 3 % samples in sulfate environment after 168 days:

(1) Figure 2 (a) shows an exceeding amount of C-S-H gel formation among the variety of $Ca(OH)_2$ crystallisation structures on the 28-th day of curing. Such amount of formation confirms the reason of increasing the strength value in non-aggressive environment and at the same time confirms the reason of strength decreasing in sulfate environment.

(2) Figure 2 (b) shows fully formed $CaSO_4$ crystal that are vertically oriented between the presence of vast formation of newly formed C-S-H gel. This are an indication that most of the previously formed $Ca(OH)_2$ were washed out and currently forming spikes of $CaSO_4$ are now replacing it causing the decrease in strength.



(a)



(b)

Figure 2: structure of non-impacted (a) at 28 days of curing and impacted (b) FormateCa 3 % samples in sulfate environment after 168 days

4.3. Influence of Neolith 4400 on the sulfate durability of cement matrix.

Figure 3 graphically shows changes in the strength of the mixes that have in their compound vinyl acetate/versatate (Neolith 4400) additive. From Figure 3, the following can be seen:

(1) Strength of cement mixes modified by Neolith 4400 with 1 % and 3 % have similar aspects as for FormateCa mixes for both sodium and magnesium sulfate environments. Exceptions are only for 3 % and 5 % in magnesium sulfate environment were the strength are a bit lower compared to plain cement. Strength value of 1 % mix in both sulfate environments is higher compared to cement.

(2) For $CaSO_4$ solution, the strength value of 2 % mix a bit higher compared to plain cement. Possible explanation for such anomalous behaviour of the strength jump for Neolith 4400 3 % mix may be explained by the hydrophobic behaviour of the versatate component of the additive itself.

(3) In total, the differences between non-impacted and impacted strength values of samples vary between 1-7 MPa for the initial values of the strength of control samples in water and 6-9 MPa for plain cement in solution of $CaSO_4$. This may be considered as the positive result to assume the possibility of using vinyl acetate/versatate as a sulfate retention agent in concentrations of 3 % and 5 % in RBRM.

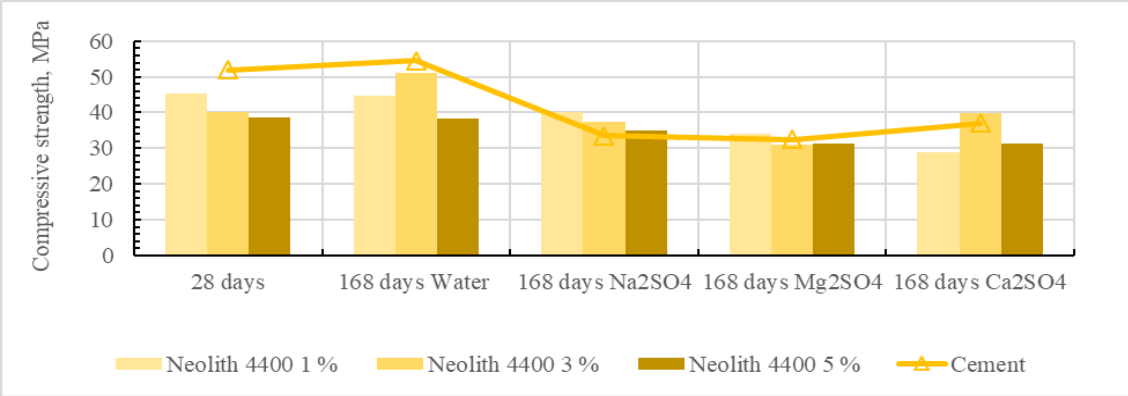
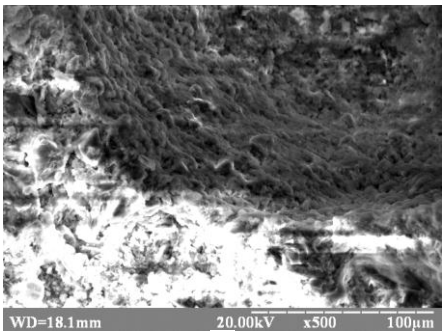


Figure 3: Comparison of the compressive strength of initial samples (28 days), nonimpacted samples (after 168 days) and impacted (after 168) by sulfate environment samples for Neolith 4400 mix

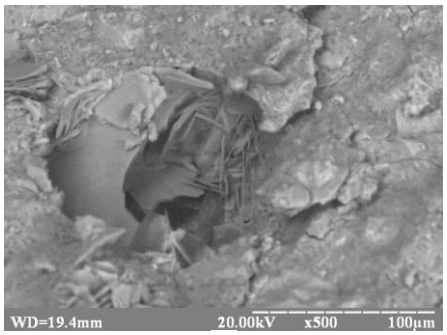
Figure 4 shows the difference between the structure of nonimpacted (a) at 28 days of curing and impacted (b) Neolith 4400 5 % samples in sulfate environment after 168 days:

(1) Figure 4 (a) shows the stable formation of polymer film of Neolith 4400 additive on the surface of the cement minerals can be observed in the porous part of the cement matrix. Formation of both C-S-H gel and $Ca(OH)_2$ can be observed on the edges of the pore structure of the matrix. Such formation on the 28-th day of curing shows that even after standard curing time, the cement matrix maintained its hydrophobic character applied by the versatate group of additives.

(2) Figure 4 (b) shows fully formed $CaSO_4$ crystal that are both vertically and horizontally oriented in the porous part of the cement matrix structure the same as in the structure itself. Amount of such formations not only presented in the voids of the cement matrix but also spread through all the volume of sample. Which is indicative of the presented cracks on the surface of samples with high inner pressure due to the high amount of nonsoluble formation which $CaSO_4$ are. This explains the low strength values for samples that were in $CaSO_4$ solution.



(a)



(b)

Figure 4: structure of nonimpacted (a) at 28 days of curing and impacted (b) Neolith 4400 5 % samples in sulfate environment after 168 days

4.4. Influence of Neolith 6700 on the sulfate durability of cement matrix.

Figure 5 graphically shows changes in the strength of the mixes that have in their compound vinyl-acrylic copolymer (Neolith 6700) additive. From Figure 5, the following can be seen:

(1) Vinyl-acrylic copolymer (Neolith 6700) affects the stability of cement samples similarly compared to the other two additives (Neolith 4400 and FormateCa). Despite the fact that the overall strength of the samples at 28 days (after curing) decreases with increased concentration of the additive, Neolith 6700 itself shows significant stability at 5 wt. % of additives in the mixture at 168 days of durability test in aggressive environments.

(2) It is also worth noting that the samples Neolith 6700 3 % and 5 %, after 28 days in the water environment continued to gain strength, which generally corresponds to the nature of the water-retaining agent.

(3) Neolith 6700 has the most stable values in terms of the difference in strength over the entire range of the studied mix durability under the influence of sulfate ion environments. This is reflected in the difference in the values of 1-5 MPa with the control values of the tested samples. This difference indicates that Neolith 6700 has a more pronounced characteristic of hydrophobicity, which is manifested during the curing of the cement matrix for 28 days. This, in turn, is reflected in the control values of the strength of the mixture with the additive at 168 days with 3 % and 5 % of additive where strength increases have had occurred. This indicates the possibility of the use of the additive as an anticorrosion agent.

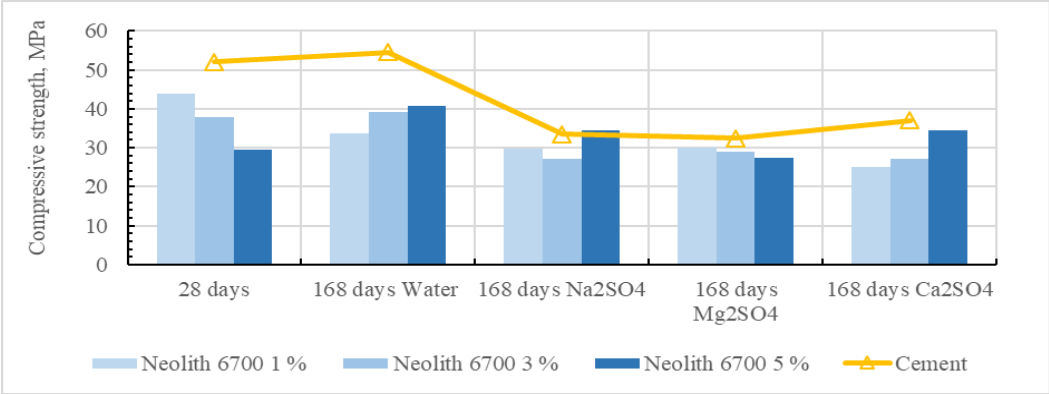


Figure 5: Comparison of the compressive strength of initial samples (28 days), non-impacted samples (after 168 days) and impacted (after 168) by sulfate environment samples for Neolith 6700 mix

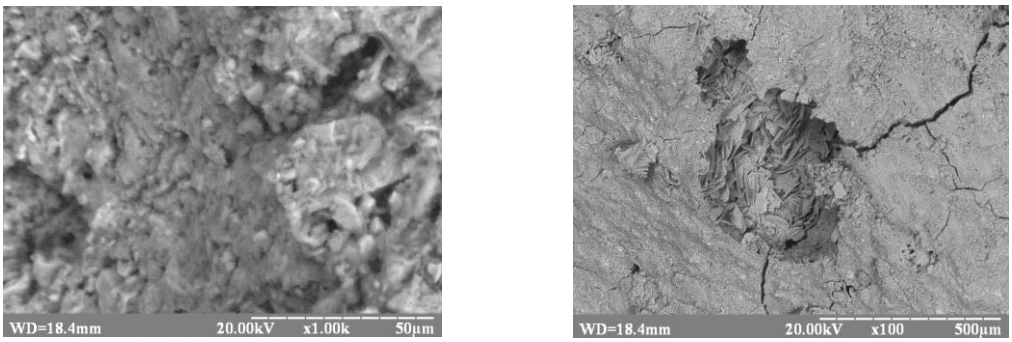
Figure 6 shows the difference between the structure of non-impacted (a) at 28 days of curing and impacted (b) Neolith 6700 5 % samples in magnesium sulfate environment after 168 days:

(1) Figure 6 (a) shows the formation of polymer film of Neolith 6700 similarly to Neolith 4400; the additive has high viscosity due to the hydrophilic character of acrylate group. Because of the high viscosity of the additive structures we have high porous content. Formed films of polymer can be observed on partially covered formations of both the C-S-H gel and $Ca(OH)_2$. Such porous formation on the 28-th day of curing explains the low strength values of the control samples.

(2) Figure 6 (a) shows the heterogeneous formation of the film that can be observed by the presence of clump formation over the structure of the cement components. This indicates that such formation of the structure of cement matrix will potentially cause a negative influence on the strength of the matrix by causing inner stresses over all matrix structures allowing the creation of a vast amount of nonsoluble components and intensive washing out of soluble minerals during which are not connected to samples that were in water for 168 days after curing.

(3) Figure 6 (b) shows the fully formed $CaSO_4$ structure in mix with $Ca(OH)_2$ and $Mg(OH)_2$; the high activity of chemical reaction between Magnesium Sulfate and Calcium Hydroxide explains such amount of Calcium Sulfate structures in the pores.

(4) Figure 6 (b) shows the complete absence of any kind of remaining organic composition. This shows that the durability of the modified cement matrix by RP is influenced by chemical-mechanical character due to the formation of structures that cause the inner stress of the cement matrix. This explains the negative impact of using RP additives as an anticorrosion agent for cements in the magnesium sulfate environment.



(a) **(b)**

Figure 6: structure of nonimpacted (a) at 28 days of curing and impacted (b) Neolith 6700 5 % samples in sulfate environment after 168 days

3.5. Chemical explanation of similarity between Neolith 4400 and Neolith 6700.

Both RP additives are copolymers and have similar basic vinyl acetate basis according to the production passport of RP presented by manufacturer. Thus explains such variability in strength values after sulfate ion impact on the modified cement matrix with these RPs. In these study, Calcium Formate were used as a comparative agent because of its antifreeze and potential anticorrosive characteristics that were proposed by Chen et al. [14], the second of which were confirmed during this study. As for RP Neolith 4400 and 6700 such statement somewhat inconsistent because of the chemical properties that have a place to occur after the observed structure formation of the mixes.

Because of Vinyl-Acetate basis present in both 6700 and 4400, during 28-day during test, three chemical reactions in the alkali environment of the cement matrix occurred. First reaction is presented in Figure 7.

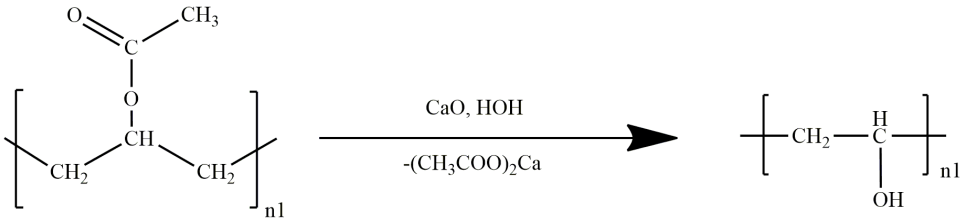


Figure 7: reaction of transformation of Vinyl-acetate group of copolymer in alkali environment

The formed fragment of polyvinyl alcohol as shown in Figure 7, is in nature good hydrophobic. It has the form of semitransparent gel as can be seen on Figure 8 (a) and fragments on Figure 7 (a). Because of this, it injects himself in a polymer film structure that gives additional hydrophobic characteristics for the matrix and simultaneously plays the role of water retention agent for Neolith 6700. As for Neolith 4400, this change begins later because of the big size of the versatate radical group that plays the role of hydrophobic agent. High compressive strength values are indicative of this.

By that, the reaction presented in Figure 7 may occur later after the process of deterioration of the versatate group for Neolith 4400. Thus, Neolith 4400 is more suitable for the role of anticorrosive agent. And yet, because of formation Calcium Acetate ($(CH_3COO)_2Ca$) that has similar dissociative character as Calcium Formate ($(CHCOO)_2Ca$) during the hidratation. Increase in strength of Neolith 6700 samples in water after 168 days for 3 % and 5 % mixes are indicatives of this statement. Moreover, the acetate radical, due to the nature of chemical bounds between acetate and alcohols, forms again vinyl acetate component. This reaction continues until the amount of vinyl acetate would be a bit lower than the acrylic component. After that, for Neolith 6700 comes the next two parallel reactions presented in Figure 8.

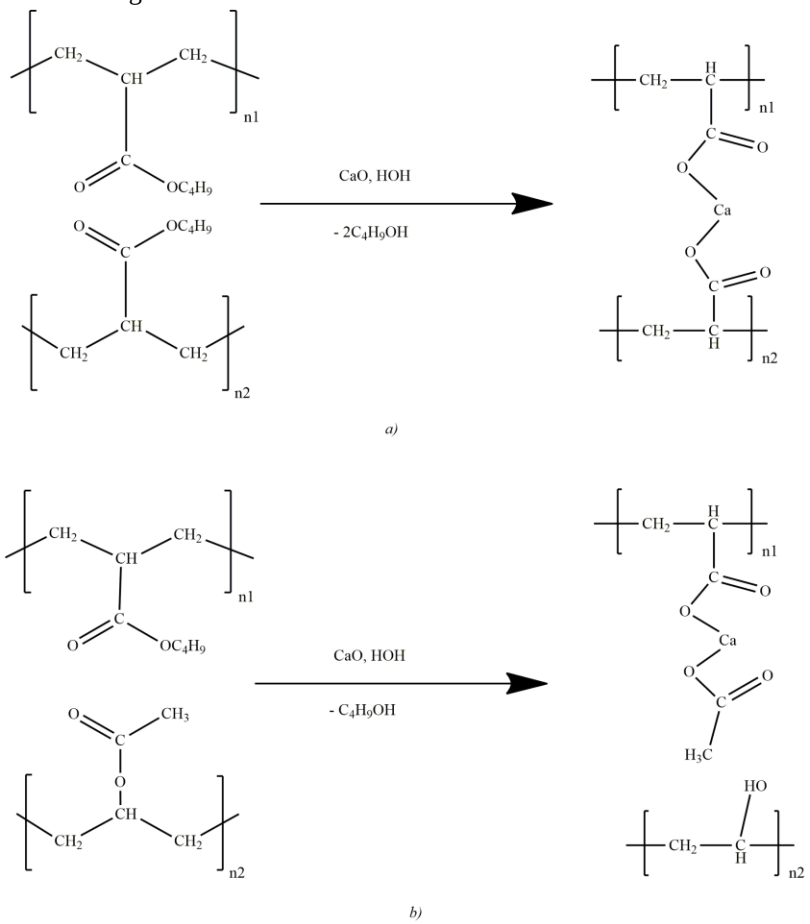


Figure 8: reaction of transformation of butyl-acrylic copolymer (a) and butyl-acrylic copolymer with remains of vinyl acetate copolymer (b) in alkali environment

Figure 8 (a) shows the reaction of the formation of two organic solutions: hard organic-based calcium salt and butanol alcohol. Figure 8 (b) shows the reaction of formation of two organic solutions: hard organic-based Calcium-acetate salt, polyvinyl alcohol and butanol alcohol. Possibility of formation of the similar salts described by Kardon [10]. The amount of butanol is so low that in the sulfates environment with remaining acetate groups forming the butyl acetate witch is washed by water from opened seams and pores of the cement matrix. Thus, the formed organic calcium salts collected in the seams and pores were polymer films were presented. Their number and size are thinner and sometimes smaller than $CaSO_4$, so their impact on the inner tension of cement matrix could be misinterpreted.

Conclusions

1. The 28 days compressive strength test shows that the usage of RP lowers the grade strength with the increasing of the amount of additives, respectively. Calcium Formate has similar effect yet due to the difference in grade strength results for 3 and 5 %% values are 35 MPa and 40 MPa, respectively, and it decreasing effect is questionable.

2. Further curing of samples in water environment after 168 days showed an increase in strength values for 3 % and 5 % for each additive, respectively. This indicates that all additive has water retention characteristics

3. Durability test of the impact of sulfate ion environment on the modified cement matrix with additives is different for each additive.

4. Calcium Formate shows more stable strength values to the impact of sodium and magnesium sulfate environment which resulted in lover difference between control values and project. Yet, for Calcium Sulfate the environment values were critically low. Structural analysis and strength results confirmed the possibility of using Calcium Formate as an anticorrosive agent. All studied concentrations are optimal for sodium and magnesium sulfate environment.

5. Potential of usage of Neolith 4400 additive is high enough due to the stable values of strength during the durability test. Moreover, structural analysis showed that polymer film formation occurs mostly on all cement components. Taking into account that Neolith 4400 has versatate radical in the polymer group, it gives the matrix hydrophobic properties. Such statement has its confirmation by the results of the durability test under the impact of sulfate ion environment in all environments.

6. Optimal concentration of Neolith 4400 as a corrosive resistant agent is 3 %

7. Neolith 6700 has the most rapid decrease in grade strength with increasing the amount of additive in mixture, respectively. After 168 days of prolonged curing in water environment for concentrations 3 and 5 %% growth of strength occurred.

8. Values of control strength and project strength after durability test show the potential usage of the additive due to its hydrophobic application because of the formation of polyvinyl alcohol during the chemical reactions that occur in the curing period.

9. During curing, there is possible formation of an organic salt compounds that similar in form to $CaSO_4$. Yet the amount of such formation are low and they mostly have minimal effect on the inner pressure strength of cement matrix.

10. The possibility of using Neolith 6700 spread on each concertation. Yet the mixture with vinyl-acrylic copolymer must not be used in Magnesium Sulfate environment due to its decreasing strength character with increasing of the concentration, respectively.

According to the research content of this work, the results can be further used in both manufacturing and scientific sectors. Yet, to better meet further improvements, next steps must be done:

1. This paper mostly focused on controlled environments and the resulting strength values of the durability test; in the actual test there is used more field environment (at a site) with the using of coarse fillers such as dispersed silica or other nonsoluble filler.

2. The influence of marine environment on durability must be also considered in further development and should be investigated the durability under bending load.

References

1. Kanaan D., Soliman A. M. and Suleiman A. R. Zero-Cement Concrete Resistance to External Sulfate Attack: A Critical Review and Future Needs. Sustainability, 14 (4), no. 2078, 2022. https://doi.org/10.3390/su14042078

2. Baldermann C., Baldermann A., Furat O. et al. Mineralogical and microstructural response of hydrated cement blends to leaching. Constr. Build. Mater., 229, 116902, 2019. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116902

3. Türker F., Aköz F., Koral S. et al. Effects of magnesium sulfate concentration on the sulfate resistance of mortars with and without silica fume. Cement and concrete research, 27(2), pp. 205–214, 1997. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00009-4

4. Ma Y., Qian J. Influence of alkali sulfates in clinker on the hydration and hardening of Portland cement. Construction and Building Materials, 180, pp. 351–363, 2018. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.196

5. Huang H., Fu Y., Li F. et al. Orderly self-assembly of new ionic copolymers for efficiently protecting copper in aggressive sulfuric acid solution. Chemical Engineering Journal, 384, 123293, 2020. https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123293

6. Zhang Y., Jiang Z., Zhu Y. et al. Effects of redispersible polymer powders on the structural build-up of 3D printing cement paste with and without hydroxypropyl methylcellulose. Construction and Building Materials, 267, 120551, 2021. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120551

7. Jo Y. K. Adhesion in tension of polymer cement mortar by curing conditions using polymer dispersions as cement modifier. Construction and Building Materials, 242, 118134. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118134

8. Min Ook Kim. Influence of Polymer Types on the Mechanical Properties of Polymer-Modified Cement Mortars. Applied Sciences, 10, 1061, 2020. https://doi.org/10.3390/app10031061

9. Knapen E., Van Gemert D. Polymer film formation in cement mortars modified with water-soluble polymers. Cement and Concrete Composites, 58, pp. 23–28, 2015. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.015

10. Kardon J. B. Polymer-modified concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, 9(2), pp. 85–92, 1997. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1997)9:2(85)

11. Kovalenko Y., Klymenko A., Tokarchuk V. et al. Effect of sulfate ion environment on physical and mechanical durability of cement products modified by cellulose ethers. Technology audit and production reserves, 6 (1), pp. 6–12, 2020. https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.218410

12. Wang R., Wang P. M. Action of redispersible vinyl acetate and versatate copolymer powder in cement mortar. Construction and building materials, 25(11), pp. 4210-4214, 2011. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.060

13. Zhang B., Jiang W., Xu Q. Experimental feasibility study of ethylene-vinyl acetate copolymer (EVA) as cement stabilized soil curing agent. Road Materials and Pavement Design, 1-22, 2020. https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1834442

14. Chen L., Jiang L., Liu X. Understanding the role of calcium formate towards hydration and deformation property of light-burned magnesia cement. Construction and Building Materials, 289, 122995, 2021. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122995

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-163-166
УДК 004.03

КОВАЛЕНКО ОЛЕКСАНДР.
Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»
https://orcid.org/0000-0003-1663-4799
e-mail: vicnbondarenko@gmail.com
БОНДАРЕНКО ВІКТОР
Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»
https://orcid.org/0000-0002-9237-8187
e-mail: nalbondarenko@gmail.com
БОНДАРЕНКО НАТАЛІЯ
Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»
e-mail: san.kovalenko@gmail.com

КОНТРОЛЬ І ПІДТРИМКА ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ У VOIP МЕРЕЖІ

Запропоновано підхід до контролю і підтримки якості обслуговування, який полягає у додаванні до моніторингу найбільш використовуваних показників якості ще одного – коефіцієнта ефективності мережі. Коефіцієнт ефективності мережі розроблений для того, щоб виключити поведінку користувачів і краще представляє чисту продуктивність мережі. Моніторинг цього показника підвищує достовірність визначення інтервалу часу, в якому відбувається наближення до критичного моменту динаміки зміни якості обслуговування. Погіршення показників якості обслуговування, яке свідчить про можливість настання критичного моменту, потребує виконання певних адміністративних дій. Одним з варіантів таких дій є запуск алгоритму вибору найкращого маршруту, що керує маршрутизацією викликів. Алгоритм потребує певного обсягу обчислень в реальному часі, що створює додаткове обчислювальне навантаження. Запропонований підхід за рахунок контролю додаткового показника підвищує рівень впевненості в тому, що динаміка змін показників якості потребує додаткових обчислень для зміни маршрутизації, що в свою чергу дозволяє підтримувати якість обслуговування на належному рівні.

Ключові слова: VoIP мережа, якість обслуговування, маршрутизація викликів

KOVALENKO OLEKSANDR, BONDARENKO VIKTOR, BONDARENKO NATALIIA
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

CONTROL AND SUPPORT OF THE QUALITY OF SERVICE IN THE VOIP NETWORK

An approach to the quality of service control and support is proposed, which consists in adding one more indicator to the monitoring of the most used quality indicators – the Network Effectiveness Ratio. The Network Effectiveness Ratio is developed to exclude user behavior and better represent the net performance of the network. Monitoring of this indicator increases the reliability of determining the time interval in which the critical moment of the dynamics of service quality changes is approaching. Missing a critical moment of performance degradation means losing the level of service quality that customers pay for. Therefore, the deterioration of service quality indicators, which indicates the possibility of a critical moment, requires the implementation of certain administrative actions. One of the options for such actions is to run the algorithm for choosing the best route, which controls call routing. The algorithm requires a certain amount of calculations in real time, which creates an additional computational load. The proposed approach due to the control of an additional indicator increases the level of confidence that the dynamics of changes in quality indicators require additional calculations to change routing, which in turn allows support the quality of service at the appropriate level.

Keywords: VoIP network; quality of service; call routing.

Вступ. В роботі запропоновано підхід до контролю і підтримки якості обслуговування, який полягає у додаванні до моніторингу найбільш використовуваних показників коефіцієнта ефективності мережі. Коефіцієнт ефективності мережі розроблений для того, щоб виключити поведінку користувачів і краще представляє чисту продуктивність мережі. Проведення попереднього аналізу і подальшого прогнозування поведінки якості в години високої інтенсивності викликів із застосуванням розширеного набору показників якості дозволяє підвищити достовірність визначення проміжків часу, в яких відбувається погіршення обслуговування. В кожному з вказаних проміжків за умов досягнення критичної межі одного або декількох показників запускається механізм зміни маршрутизації викликів у відповідності до визначених критеріїв. Це дає змогу уникати проблем з якістю обслуговування у випадку деградації показників якості на конкретному маршруті проходження виклику. Отже, метою роботи є дослідження динаміки поведінки показників якості для контролю і підтримки якості обслуговування у VoIP мережі.

Порівняльний аналіз. Дослідження показників якості потребує вхідних даних про використання послуг VoIP мережі клієнтами. Для постачальників послуг VoIP зв'язку такими даними є інформація про дзвінки у вигляді детального запису дзвінка (Call Detail Record – CDR). CDR збираються на регулярній основі для обробки, в ньому міститься інформація про використання і продуктивність роботи телефонії. Сервіс CDR документує різні атрибути виклику, здійсненого через телефонну систему (обсяг всіх дзвінків; дата і час дзвінка; тривалість дзвінка; причина завершення; вхідний або вихідний) [1]. Спеціалізоване апаратне та програмне забезпечення VoIP мережі забезпечує формування CDR.

З отриманих даних CDR можливо дослідити динаміку якості наданих послуг. Стандартно постачальниками відстежуються показники ASR та ACD (і надаються разом з тарифними планами). ACD

також позначають як ALOC або AVG [2]. Це загальноприйнята рекомендація від Міжнародної спілки електрозв'язку [3].

Завершені дзвінки є одним із найважливіших показників продуктивності мережі, а ASR (Answer Seizure Ratio) традиційно використовується як найбільш вагомий і корисний порівняльний показник. Це статистичний показник якості пропонованої послуги та зазвичай виражається у відсотках:

$$ASR = \frac{\text{Кількість викликів, що призводять до сигналу відповіді}}{\text{Всього викликів}} * 100\% .$$

Іншим показником, який надає корисні дані для порівняння, є середня тривалість розмови (ALOC – Average Length of Conversation або ACD – Average Call Duration) для завершених дзвінків на різних маршрутах. В рахунок беруться саме секунди розмови, які тарифікуються. Такий принцип розрахунку враховує те, що встановлення з'єднання в VoIP ще не гарантує того, що сама розмова відбудеться, наприклад, абонент не чує відповіді і завершує виклик.

$$ACD = \frac{\text{Тарифіковані секунди розмови}}{\text{Кількість викликів, що призводять до сигналу відповіді}} .$$

Обидва показники досліджуються на часових інтервалах (наприклад погодинно) і формують загальну картину, наприклад у вигляді графіків. На базі отриманих залежностей робиться висновок: при переході за межу (в бік зниження від рекомендованих граничних значень) виникає індикація можливих проблем на конкретному маршруті, що може привести в подальшому до змін маршрутизації [4].

Зміст дослідження. Додавання до порівняльного аналізу ще одного показника спрямовано на підвищення рівня впевненості в тому, що погіршення якості зв'язку потребує виконання адміністративних дій. Це важливо, оскільки такі "дії" можуть призвести до зміни маршрутизації, а хибні спрацювання пов’язані з невиправданим значним обсягом обчислень. Додатковим показником є коефіцієнт ефективності мережі NER (Network Effectiveness Ratio), який розраховується на базі CDR [5, 6].

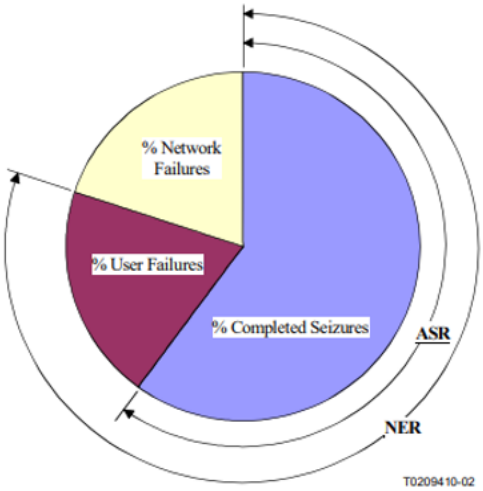


Рис. 1. Діаграма показника ефективності NER

NER призначений для виявлення здатності мережі доставляти виклики до кінця лінії в мережі і виражає співвідношення між сумою кількості викликів, результатом яких є або відповідь, або користувач зайнятий, або не знімає слухавку, і загальною кількістю викликів. На відміну від ASR, NER виключає наслідки поведінки клієнтів і поведінки терміналу.

$$NER = \frac{\text{Виклики, доставлені до дальнього кінця лінії мережі}}{\text{Всього викликів}} * 100\% .$$

За наявним CDR (окремих діб) стає можливим провести дослідження показників якості обслуговування, згаданих вище, і запропонувати підхід до їх контролю для визначення потреби запуску алгоритму втручання у заданий маршрут з оцінкою необхідності його зміни [7]. Для практичного дослідження важливим є вибір часового проміжку впродовж доби – найбільша інтенсивність викликів за проміжок часу, а саме робочий час. Нижче наведено приклад досліджень показників якості в робочий час однієї з діб.

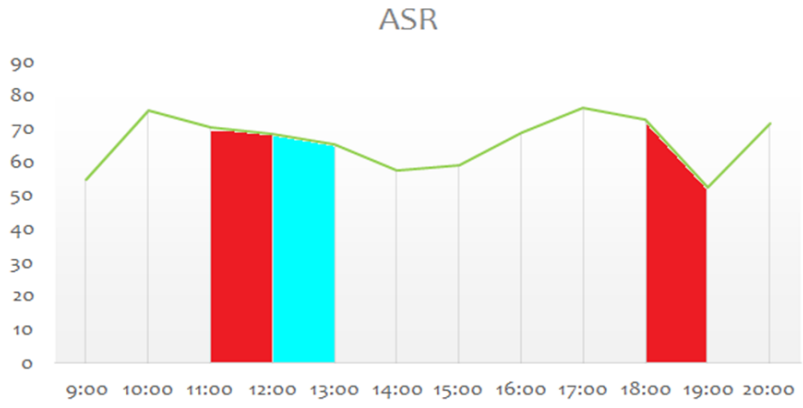


Рис. 2. Графік обрахованого ASR

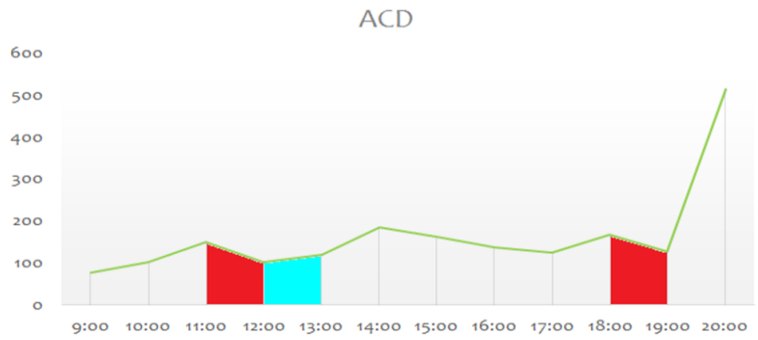


Рис. 3. Графік обрахованого ACD

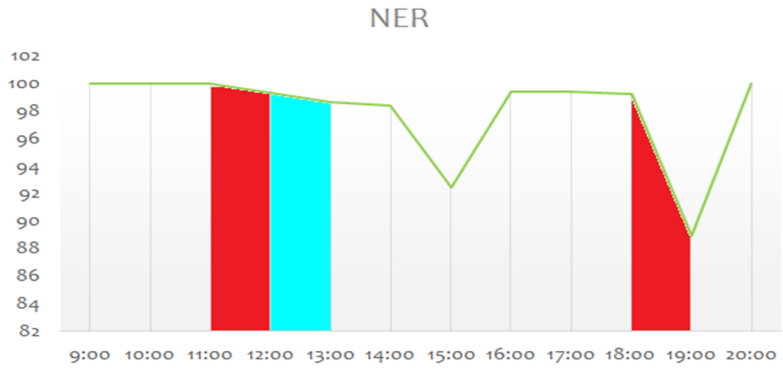


Рис. 4. Графік обрахованого NER

З наведеного прикладу видно, що починаючи з 11:00 всі показники спадають, при цьому ASR знаходиться на високому рівні (вище 60%) [8] і спадає повільно. Якщо покладатись тільки на динаміку двох показників, то з урахуванням зростання ACD після 12:00, не потрібно оцінювати необхідність внесення змін в маршрутизацію викликів. В той же час, третій показник NER продовжує спадати і це вказує на погіршення якості обслуговування, яке після 13:00 призводить до падіння ASR нижче 60%, що є критичним для певного рівня обслуговування. Таким чином, після 12:00 необхідно запускати алгоритм втручання у заданий маршрут з оцінкою необхідності внесення змін в маршрутизацію, незважаючи на зростання ACD. Починаючи з 17:00 спостерігаємо повільне падіння двох показників (ASR і NER), що знов вказує на погіршення якості обслуговування, яке після 18:00 призводить до падіння ASR нижче 60%. Таким чином, після 18:00 необхідно виконати оцінку необхідності внесення змін в маршрутизацію з залученням вказаного алгоритму, незважаючи на зростання ACD до 18:00. За умов відстеження динаміки традиційно використовуваних показників (ASR і ACD), їх одночасне зниження вказує на погіршення якості обслуговування. Також на погіршення якості обслуговування вказує одночасне зниження ASR і додаткового показника NER, незважаючи на зростання в тому ж інтервалі показника ACD. Таким чином, в результаті проведених досліджень динаміки змін показників якості підтверджено, що контроль додаткового показника підвищує рівень впевненості в тому, що в певному інтервалі часу спостерігається тенденція до зниження якості обслуговування і це, в свою чергу, потребує оцінки необхідності внесення змін в маршрутизацію з залученням алгоритму вибору найкращого маршруту виклику [7].

Висновок. В роботі запропоновано підхід до контролю і підтримки якості обслуговування у VoIP мережі шляхом розширення переліку показників якості, динаміка змін яких відстежується на базі сервісу CDR, реалізованому в апаратному та програмному забезпеченні VoIP мережі. На основі традиційно контрольованих показників ASR, ACD і тарифів, розрахунок порівняльних метрик провайдерів реалізовано у відповідному алгоритмі вибору найкращого маршруту виклику [7], за яким обчислюються метрики для кожного провайдера, призначеного для конкретного напрямку проходження виклику, і приймається рішення про вибір провайдера. Враховуючи велику кількість напрямків міжнародного телефонного зв'язку, обсяг обчислень метрик провайдерів є доволі суттєвим. Тому доцільно запускати зазначений вище алгоритм саме в певних критичних, з точки зору якості обслуговування, інтервалах часу. Індикатором початку таких інтервалів є динаміка змін показників ASR, ACD і додаткового показника NER. Пропустити критичний момент погіршення показників означає втратити рівень якості обслуговування, за який сплачують клієнти. В той же час, безперервний розрахунок порівняльних метрик провайдерів на базі контролю ASR, ACD призводить до невиправданих обсягів обчислень. В подальших дослідженнях доцільно приділити увагу поглибленому відстеженню динаміки змін показників якості, а саме: швидкості їх погіршення в часі.

Література

1. Call Detail Record. URL: https://roicallcentersolutions.com/glossary/call-detail-record/
2. InPhonex Telecom. URL: http://partners.varphonex.com/solutions/telecom-wholesalers.php
3. Рекомендація MCE-T E.437 SERIES E: OVERALL NETWORK OPERATION, TELEPHONE SERVICE, SERVICE OPERATION AND HUMAN FACTORS. Quality of service, network management and traffic engineering – Network management – Checking the quality of international telephone service. Женева, 1999. URL: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-E.437-199905-I!!PDF-E&type=items
4. Таран В. В. Апроксимаційна модель варіацій основних параметрів якості VoIP-зв'язку у часі. Електроніка-2017 : зб. статей 10-ї міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених. Київ : НТУУ «КПІ», 2017. С. 197–200.
5. Рекомендація MCE-T E.425 SERIES E: OVERALL NETWORK OPERATION, TELEPHONE SERVICE, SERVICE OPERATION AND HUMAN FACTORS. Quality of service, network management and traffic engineering – Network management – Checking the quality of international telephone service. Internal automatic observations. Женева, 1998. URL: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-E.425-200203-I!!PDF-E&type=items
6. Рекомендація MCE-T E.411 SERIES E: OVERALL NETWORK OPERATION, TELEPHONE SERVICE, SERVICE OPERATION AND HUMAN FACTORS. Quality of service, network management and traffic engineering – Network management – International network management. Женева, 2000. URL: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-E.411-200003-I!!PDF-E&type=items
7. Соловьев А. В., Бондаренко В. Н. Алгоритм выбора наилучшего маршрута вызова в VoIP сетях. Проблеми інформатизації та управління : зб. наук. пр. Київ : НАУ, 2015. Вип. 2(50). С. 102–108.
8. Рекомендація MCE-T E.426 SERIES E: TELEPHONE NETWORK AND ISDN QUALITY OF SERVICE, NETWORK MANAGEMENT AND TRAFFIC ENGINEERING. General guide to the percentage of effective attempts which should be observed for international telephone calls. Женева, 1992. URL: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-E.426-199210-I!!PDF-E&type=items

References

1. Call Detail Record. URL: https://roicallcentersolutions.com/glossary/call-detail-record/
2. InPhonex Telecom. URL: http://partners.varphonex.com/solutions/telecom-wholesalers.php
3. Rekomendatsiia MSE-T E.437 SERIES E: OVERALL NETWORK OPERATION, TELEPHONE SERVICE, SERVICE OPERATION AND HUMAN FACTORS. Quality of service, network management and traffic engineering – Network management – Checking the quality of international telephone service. Zheneva, 1999. URL: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-E.437-199905-I!!PDF-E&type=items
4. Taran V. V. Aproksymatsiina model variatsii osnovnykh parametriv yakosti VoIP-zviazku u chasi. Elektronika-2017 : zb. statei 10-yi mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii molodykh vchenykh. Kyiv : NTUU «KPI», 2017. S. 197–200.
5. Rekomendatsiia MSE-T E.425 SERIES E: OVERALL NETWORK OPERATION, TELEPHONE SERVICE, SERVICE OPERATION AND HUMAN FACTORS. Quality of service, network management and traffic engineering – Network management – Checking the quality of international telephone service. Internal automatic observations. Zheneva, 1998. URL: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-E.425-200203-I!!PDF-E&type=items
6. Rekomendatsiia MSE-T E.411 SERIES E: OVERALL NETWORK OPERATION, TELEPHONE SERVICE, SERVICE OPERATION AND HUMAN FACTORS. Quality of service, network management and traffic engineering – Network management – International network management. Zheneva, 2000. URL: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-E.411-200003-I!!PDF-E&type=items
7. Solov'ev A. V., Bondarenko V. N. Algoritm vybora nailuchshego marshruta vyzova v VoIP setjah. Problemi informatizacii ta upravlinnja : zb. nauk. pr. Kiïv : NAU, 2015. Vip. 2(50). S. 102–108.
8. Rekomendatsiia MSE-T E.426 SERIES E: TELEPHONE NETWORK AND ISDN QUALITY OF SERVICE, NETWORK MANAGEMENT AND TRAFFIC ENGINEERING. General guide to the percentage of effective attempts which should be observed for international telephone calls. Zheneva, 1992. URL: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-E.426-199210-I!!PDF-E&type=items

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-167-170
УДК 004.93, 004.8

КРИВЕНЧУК ЮРІЙ
Національний університет "Львівська політехніка"
https://orcid.org/0000-0002-2504-5833
e-mail: Yurii.P.Kryvenchuk@lpnu.ua
ВОВЧАК ЛЮБОМИР
Національний університет "Львівська політехніка"
e-mail: liubomyr.vovchak.knm.2019@lpnu.ua

ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕНДЕНЦІЙ АВТОМОБІЛЬНОГО РИНКУ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

В роботі наведено результати дослідження теми прогнозування тенденцій світового автомобільного ринку та розроблення системи для розв'язання такої задачі, з метою впровадження таких систем у відповідні сфери в Україні для подальшої завчасної підготовки до потенційних змін. Виділено та описано такі основні етапи: визначення тестових наборів даних, навчання нейронної мережі, передбачення тенденцій. Після проведення аналізу результатів було виявлено, що створення системи передбачення тенденцій світового автомобільного ринку є актуальним та доцільним завданням на сьогодні, а найефективнішим інструментом для цього є використання нейронних мереж.

Ключові слова: передбачення ринку, нейронні мережі, авто, ринок, тенденції.

KRYVENCHUK YURII, VOVCHAK LIUBOMYR
Lviv Polytechnic National University

CREATION OF AUTOMOTIVE MARKET PREDICTION SYSTEM

Automotive market prediction systems are becoming increasingly important in today's realities. They are used to predict the vector of changes in the world car market for example, the increase in the share of electric cars or the growing popularity of station wagons. These systems can help manufacturers better understand the needs of the buyer and make timely changes in their strategy as needed. Automotive market forecasting systems can also help to match specific changes to the markets of different countries according to their needs. Providing a more objective approach to determining the company's business plan, which will be based on the data that these systems will provide. And of course, salary forecasting systems can be useful for companies to make a business plan and calculate their finances, having a better understanding of further market changes, the company can make an appropriate budget, taking into account the costs of developing those changes that will be popular in the future. The practical value of this work is a system of forecasting automotive market trends, which can provide valuable information and help make more informed decisions that can bring the most benefit to the company. In addition, such a system will be very useful for investors. They will be able to know in advance the trends of the world market and invest in companies that are developing in a priority direction, which will greatly reduce investment risks. And, of course, such a program will greatly facilitate the life of the buyers themselves. Now the market will be regulated much faster and as soon as there is any need for changes - companies will be ready because they have been warned about this need for changes by our forecasting system. In this way, customers will be able to receive the most suitable product on time and without unnecessary costs for emergency development.

Keywords: automotive market trends prediction, neural networks.

Постановка проблеми

Автомобільний ринок розвивається і адаптується під потреби споживача дуже швидко та динамічно і тільки системи прогнозування можуть надати цінну інформацію, яка допоможе автомобільним компаніям завчасно приймати більш обґрунтовані рішення щодо подальшого розвитку та розробки технологічних інновацій.

Автомобільні концерни зможуть використовувати систему прогнозування тенденцій, щоб обрати для себе стратегію, яка з великою імовірністю стане популярною та принесе великі прибутки. Саме така «гра на випередження» зможе дати дрібним компаніям шанс на швидкий розвиток та отримання більших прибутків.

Аналіз останніх джерел

У статті [1] дослідження зосереджено на побудові математичної моделі, яка могла б передбачити ціну вживаного автомобіля на основі його поточних характеристик. Визначення ціни вживаного автомобіля є складним завданням, оскільки кілька факторів, таких як поточний пробіг, поточний стан, марка, рік тощо, можуть впливати на прогнозовану ціну автомобіля. І з точки зору людини, яка продає, точно передбачити ціну вживаного автомобіля стає дилемою. Таким чином, суть цього виклику полягає у вивченні моделей, які можуть правильно розраховувати ціну вживаного автомобіля насамперед на основі його можливостей. Завдяки цьому, у свою чергу, споживач може зробити більш усвідомлену покупку. Тому у статті впроваджено та досліджено різні методи машинного навчання з аналізом даних, щоб надати точне та просте у використанні рішення.

У дослідженні [2] представлена модель оцінки безпеки транспортного засобу, що проїжджає по мосту великого прогону на основі повнозв'язаної нейронної мережі (FCN). Першим кроком є дослідження реакцій великого прольоту моста на вітрове збудження за допомогою випробування в аеродинамічній трубі та моделі кінцевих елементів. Згодом наводяться типові моделі транспортних засобів і встановлюється система транспортний засіб – міст, враховуючи погодні умови. Оцінено типи аварійності транспортних

засобів з несприятливими погодними умовами. Зокрема, визначаються вхідні та вихідні змінні моделі оцінки безпеки транспортного засобу, і одночасно досягаються дані навчання, валідації та тестування. Було порівняно та проаналізовано 29 моделей за допомогою прихованого шару, початкової швидкості навчання, розміру партії, функції активації та методу оптимізації. Виявлено, що модель 4-15-15-4 має найкращу продуктивність прогнозування, і вона може забезпечити своєрідну корисність для управління дорожнім рухом і зменшити ймовірність аварій транспортних засобів на мосту.

Для того, щоб ефективно сприяти сталому розвитку транспорту, необхідно визнавати реальне споживання палива транспортними засобами. У дослідженні [3] проведено порівняльний аналіз шляхом побудови п'яти регресійних моделей для прогнозування реального рівня споживання палива легкими бензиновими транспортними засобами в Китаї на основі великих даних з точки зору факторів транспортних засобів, факторів навколишнього середовища, а також факторів водіння. Результати показують, що регресійна модель випадкового лісу працює найкраще серед п'яти моделей-кандидатів із середньою абсолютною похибкою 0,630 л/100 км, середньою абсолютною відсотковою похибкою 7,5%, середньоквадратичною похибкою 0,805, квадратом R 0,776, і 10-кратний бал перехресної перевірки 0,791. Крім того, охоплено найважливіші характеристики, що впливають на споживання палива серед 25 факторів з трьох вищевказаних точок зору. Відповідно до важливості кожного фактора в найоптимальнішій моделі три найважливіші фактори — це послідовність гальмування та прискорення, потужність двигуна та свідомість власників транспортних засобів щодо економії палива.

В дослідженні [3] було доведено, що поведінка водія є одним із головних факторів, які впливають на споживання палива автомобіля. Метою роботи [5] є вдосконалення баз даних моніторингу споживання палива на основі даних мобільних телефонів. На основі терміналів мобільного телефону та бортової діагностичної системи (OBD), встановлених у таксі, витягуються дані про поведінку водіння та дані про витрату палива відповідно. Зіставляючи дані про поведінку водіння, зібрані мобільним телефоном, із даними про витрату палива, зібраними OBD, досліджується кореляція між поведінкою водіння та споживанням палива, щоб можна було передбачити споживання палива автомобіля на основі даних мобільного телефону. Моделі прогнозування споживання палива будуються з використанням нейронної мережі зворотного поширення (BP), опорної векторної регресії (SVR) і випадкових лісів. Усі три моделі могли точно прогнозувати споживання палива з абсолютною відносною похибкою менше 10%. Доведено, що модель випадкового лісу має найвищу точність і працює швидше, що робить її придатною для широкого застосування. Цей метод закладає основу для моніторингу вдосконалення бази даних і точного управління споживанням палива міським транспортом.

Оскільки саме ціна є ключовим елементом автомобільного ринку – розвинемо тему, розкриту в статті [1]. Стандартні алгоритми машинного навчання використовуються для прогнозування витрат у кількох статтях. Однак люди рідко замислюються про ефективність окремих моделей і замість цього ігнорують менш відомі, але більш складні. В статті [5] представлено багатоперіодну теоретичну модель динамічного ціноутворення. У цьому аналізі розглянуто кілька найсучасніших моделей, використовуючи як традиційні, так і найсучасніші методи машинного навчання, щоб оцінити вплив функцій на стратегії прогнозування. Як додатковий бонус, це дослідження забезпечує надійну перевірку численних стратегій впровадження регресійної моделі, що обіцяє перспективне прогнозування цін на автомобілі в майбутньому.

Мета дослідження [6] полягає у дослідницькому аналізі даних конкретного набору даних, який складається зі специфікацій автомобілів протягом діапазону років, щоб знайти взаємозв'язки між цими характеристиками та кореляціями з характеристикою ціни, а також створити модель машинного навчання прогнозування ціни з порівнянням реальних цін і прогнозованих цін наприкінці дослідження. Дослідження проводиться за допомогою набору даних, зібраного з веб-сайту турецького продавця автомобілів arabam.com за допомогою веб-скрипта, написаного на Python. Техніка лінійної регресії використовується на етапі оцінки моделі. Виявлено, що прогнозовані ціни збігаються з реальними цінами з майже 75% успіхом. Деякі обмеження застосовуються як до набору даних, так і до функції ціни, щоб отримати кращі результати для показників середньої абсолютної помилки (MAE) і середньоквадратичної помилки (RMSE).

У статті [7] наведено аналіз ДТП. У ньому представлено еволюцію систем безпеки, починаючи з опису систем, що використовуються в транспортному засобі, з особливим акцентом на передбаченні засинання водія. У статті також пропонується власна система прогнозування сну на основі розпізнавання осіб водіїв. Виявлення орієнтирів обличчя представлено як двоетапний процес: алгоритм знаходить обличчя в цілому, а потім потрібно локалізувати ключові структури обличчя в області, що цікавить. У статті представлено роботу алгоритму виявлення засинання водія; метод виявлення та аналізу.

Правильна техніка прогнозування може дозволити компаніям отримати більший дохід і спростити планування політики у виробництві. У дослідженні [8] запропоновано інтеграцію експоненціального згладжування Холта-Вінтерса з оптимізацією параметрів золотого перерізу для прогнозування продажів автомобілів в Індонезії. Метод золотого перетину використовується для знаходження оптимальних параметрів як вхідних даних для методу експоненційного згладжування Холта-Вінтерса. Отримані параметри будуть використані для прогнозування продажів автомобілів в Індонезії. На основі експериментів на кожній марці автомобіля було отримано три різні параметри для отримання оптимального значення MAPE.

Дослідження [9] в основному представляє наступні аспекти: поточна ситуація інтелектуального виробництва в автомобільному виробництві, система інтелектуального виробництва та склад інтелектуальної виробничої системи для виробництва автомобілів, структурний дизайн мережі автомобільного інтелектуального виробництва, дослідження системи позиціонування автомобільного виробництва і точки проектування системи позиціонування UWB, а також метод впровадження аналізу великих даних автомобільного інтелектуального виробництва.

Стаття [10] будує модель даних та алгоритм прийняття рішень про витрати для спеціалізованих автомобілебудівних підприємств на основі калькуляції витрат об'єкта – стандарту – діяльності (OS-ABC) метод, який забезпечує підтримку даних для нього. На основі теорії дерева рішень у відношенні до спеціалізованих автомобілебудівних підприємств, стаття будує модель дерева рішень, висуває алгоритм генерації, який може перетворити цю модель на бінарне дерево, нарешті розробляє модуль визначення вартості.

Метою роботи є створення сучасної та якісної системи передбачення тенденцій автомобільного ринку за допомогою методів машинного навчання.

Виклад основного матеріалу

Огляд наборів даних

Проаналізувавши роботи у численних джерелах, було прийнято рішення для навчання моделей нейронної мережі обрати кілька наборів даних та об'єднати їх частини. У таблиці 1 наведено основні характеристики проаналізованих датасетів.

Таблиця 1 [1]

Огляд наборів даних, що містять інформацію про продажі авто в різних країнах

База даних	*Кількість прикладів*	*Локація*	*Параметри*
New Car Sales in Norway	4377	Norway	Year, Month, Make, Quantity, Ptc
Car Sale Advertisements	9576	Ukraine	Car, price, body, mileage, engV, engType, registration, year, model, drive
Used Cars Dataset	427 тис.	USA	id, url, atregion, region_url, price, year, manufacturer, model, condition, cylinders
Used Car Auction Prices	559 тис	USA	year, make, model, rim, body, transmission, vin, state, condition, odometer

Етапи процесу передбачення заробітної плати

Процес прогнозування тенденцій автомобільного ринку складається з наступних етапів:

• **Збір даних.** Початковий етап складається з пошуку даних з різних джерел та вибір ключових характеристик, від яких залежать тенденції ринку.

• **Підготовка даних.** На цьому етапі ми очищуємо та попередньо обробляємо дані, щоб забезпечити їх точність і якість

• **Розробка функцій.** Під час виконання даного етапу створюються нові функції з існуючих даних.

• **Вибір моделі.** Обираємо найбільш відповідний алгоритм машинного навчання для виконання поставленого завдання, а саме нейронну мережу. Пріоритетними нейронними мережами для прогнозування є RNN, FNN та MLP. Проаналізувавши численну кількість робіт, було прийнято рішення обрати кілька архітектур рекурентних та нейронних мереж прямого зв'язку та натренувати їх, після чого на основі швидкодії та точності результатів вибрати найоптимальнішу.

• **Навчання моделі.** Використовуючи підготовлені навчальні дані, налаштовуючи гіперпараметри та оцінюючи продуктивність за допомогою таких показників, як середня квадратична помилка або середня абсолютна помилка, навчаємо обрану вище модель.

• **Оцінка моделі.** На фінальному етапі оцінюємо продуктивність розгорнутої моделі на нових даних, для визначення її точності і внесення необхідних коректив.

Висновок

В результаті проведеної роботи було створено систему прогнозування тенденцій автомобільного ринку. Ця розробка дозволяє автомобільним компаніям та інвесторам завчасно скорегувати свою стратегію та бізнес-план з урахуванням імовірних змін попиту. Детальне дослідження цієї галузі показало, що автомобільний ринок дуже швидко змінюється, а автоконцерни не мають можливості динамічно реагувати на такі зміни, тому прогнозування тенденцій автомобільного ринку є доцільним та актуальним.

Впродовж дослідження доведено, що саме методи машинного навчання є ідеальним рішенням для задач такого плану, вони показують хороші результати в цій галузі, пропонуючи високий рівень точності та здатність обробляти складні та нелінійні зв'язки в даних.

Література

1. Santosh Kumar Satapathy; Rutvikraj Vala; Shiv Virpariya. An Automated Car Price Prediction System Using Effective Machine Learning Techniques. Date of Conference: 20-21 May 2022, doi: 10.1109/CISES54857.2022.9844350

2. Yang, Lin Yang, Bo Wu, Gang Yao, Hang Li, Soltys Robert, Safety Prediction Using Vehicle Safety Evaluation Model Passing on Long-Span Bridge with Fully Connected Neural Network. Date of Conference: 15 Oct 2019, doi: https://doi.org/10.1155/2019/8130240

3. Yushan Yang, Nuoya Gong, Keying Xie, Qingfei Liu Predicting Gasoline Vehicle Fuel Consumption in Energy and Environmental Impact Based on Machine Learning and Multidimensional Big Data. Date of Conference: 22 February 2022, doi: https://doi.org/10.3390/en15051602

4. Ying Yao, Xiaohua Zhao, Chang Liu, Jian Rong, Yunlong Zhang, Zhenning Dong, Yuelong Su Vehicle Fuel Consumption Prediction Method Based on Driving Behavior Data Collected from Smartphones. Date of Conference: 23 Mar 2020, doi: https://doi.org/10.1155/2020/9263605

5. Fadhil Muhammad Basysyar; Ferisanti; Maryam Wulandari; Indah Sucitra; Dian Ade Kurnia; Solikin Prediction of Automobiles Prices Using Exploratory Data Analysis Based on Improved Machine Learning Techniques. Date of Conference: 08-09 December 2022, doi: https://doi.org/10.1109/ICIC56845.2022.10006925

6. Mert Can Satioglu; Yilmaz Ar; Bulent Tugrul Automobile Price Prediction in Turkey Marketplace with Linear Regression. Date of Conference: 21-23 October 2021, doi: https://doi.org/10.1109/ISMSIT52890.2021.9604688

7. Radosław Wróbel, Gustaw Sierzputowski, Piotr Haller, Veselin Mihaylov, Radostin Dimitrov Automobile Price Prediction in Turkey Marketplace with Linear Regression. Date of Conference: 17 November 2022, doi: https://doi.org/10.19206/CE-142950

8. Mamluatul Hani'Ah; Ika Kusumaning Putri; Ariadi Retno Tri Hayati Ririd Parameter Optimization Of Holt – Winters Exponential Smoothing Using Golden Section Method for Predicting Indonesian Car Sales. Date of Conference: 14-15 September 2021, doi: https://doi.org/10.1109/IEIT53149.2021.9587379

9. Hao Xu; Jinzhou Lin; Lin Liu; Tao Zhao; Jian Wu; Xinzhu Liu Research on Intelligent Manufacturing of Automobile Production Based on Big Data. Date of Conference: 18-20 November 2022, doi: https://doi.org/10.1109/WCMEIM56910.2022.10021395

10. Hong-tao Yang Research on Cost Decision of Specialized-Automobile Manufacturing Enterprise Based on the Theory of Decision Tree. Date of Conference: 18-20 December 2020, doi: https://doi.org/10.1109/ICDMA.2010.464

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-171-174
УДК 004.93, 004.8

КРИВЕНЧУК ЮРІЙ
Національний університет "Львівська політехніка"
https://orcid.org/0000-0002-2504-5833
e-mail: Yurii.P.Kryvenchuk@lpnu.ua
ПИХНЕЙ ВЕРОНІКА
Національний університет "Львівська політехніка"
e-mail: veronika.pykhnei.knm.2019@lpnu.ua

ВЕБ-АПЛІКАЦІЯ З АНАЛІЗОМ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЄЮ МЕТРИК КРИПТОВАЛЮТ З ПЕРЕДБАЧЕННЯМ МАЙБУТНЬОЇ ЦІНИ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Популярність віртуальних валют зростає з кожним днем. Криптовалюта – це прогресивна інновація Fintech, яка у сучасному суспільстві стала всесвітньою точкою доступу. Проте такі інвестиції не завжди приносять прибуток. Адже будь-яке вкладання – це завжди певний ризик втратити усі кошти, якщо куплена криптовалюта знециниться. Рішення людей досить часто ґрунтуються на обмеженій інформації, короткострокових мотивах отримання вигоди та дуже мінливих і невизначених результатах. А основною проблемою таких невдалих вкладень є відсутність відповідних знань.

Основними метриками криптовалюти вважають реалізовану капіталізацію, балансовану ціну та дельта капіталізацію. Розуміння цих базових понять дозволяє людям приймати більш зважені рішення. Проте для цього необхідно мати певний багаж математичних знань та глибоке розуміння фінансів та економіки. Ці науки можуть бути неосяжними для великої аудиторії людей. Тому, веб-аплікація, яка надає аналіз та візуалізацію необхідних метрик, могла б спростити інвестування майбутнім вкладникам. Також невід'ємною частиною оцінки успішності криптовалюти буде передбачення ймовірної майбутньої ціни. За допомогою нейронної мережі буде здійснено даний прогноз, враховуючи усі проаналізовані метрики. Якщо брати до уваги, що цільова аудиторія буде досить великою, адже ринок інвестицій лише розширюється, то необхідність реалізації вищезгаданої аплікації є значною.

Ключові слова: криптовалюта, метрики, нейронна мережа.

KRYVENCHUK YURII, PYKHNEI VERONIKA.
Lviv Polytechnic National University

WEB APPLICATION WITH ANALYSIS AND VISUALIZATION OF CRYPTOCURRENCY METRICS WITH FUTURE PRICE PREDICTION USING NEURAL NETWORKS

The popularity of virtual currencies is growing every day. And accordingly, the number of people who want to become investors in cryptocurrency and make a profit is growing. However, any decision should be based on knowledge and calculations because there is a significant risk of losing everything invested. Therefore, there is a demand for a program that can perform all complex operations for investors. A web application that analyzes all the necessary metrics provides visualization, and specific recommendations can greatly simplify decision-making. The analysis, presented in graphs, charts, and histograms, will be understandable even to a non-specialist. And, of course, one of the main advantages will be a convenient interface that will make it easier to use.Moreover, a feature of this program will be the accessibility of content for people with disabilities. At the moment, this approach is a trend, and not all applications support it, but in the future, this trend will become a requirement, not an additional plus. Such functionality will significantly expand the target audience and open the world of investments to people with certain health defects. Such an application can save not only money but also time. After all, making decisions quickly in the investment market is essential. However, fast does not mean reckless. Since the main goal is the stable earning of money, not short-term profit, the program will also show you the possible future price, which has been predicted using a recurrent neural network. And based on all the calculations and with a known expected price, it will provide recommendations for purchasing the following currency. Of course, investment always means risk, but a decision based on calculations and analysis has a higher percentage of success. Therefore, a program that significantly reduces the risk will gain popularity among all people who invest their money in virtual currencies or want to start doing it.

Keywords: cryptocurrency, metrics, neural network.

Постановка проблеми

Світ інвестицій з кожним днем розширюється. Віртуальні валюти стрімко зростають, набирають популярності та капіталізації. У 2022 році близько 1 мільярда людей у всьому світі використовуватимуть криптовалюти. Близько 72 мільйонів американців володіють часткою біткойна. Якщо брати до уваги, що кількість населення в Америці становить майже 332 мільйони, то приблизно 22 % людей є власниками певної віртуальної валюти. За словами фінансових аналітиків, до 2025 року глобальний ринок блокчейнів зросте на 39,17 мільярдів доларів США. Для того, щоб кожне вкладення було успішним, необхідно проаналізувати всі ймовірні ризики, провівши безліч часу за обчисленнями. На ринку інвестицій кожна хвилина на вагу золота, тому аплікація, яка зробить весь необхідний аналіз за інвестора значно спростить вибір при майбутніх вкладеннях. Увесь аналіз буде візуалізовано різними графіками, такими як: гістограми, лінійні та кругові діаграми та точкові. Тому навіть людина без відповідних знань зможе дозволити собі так зване "беззбиткове інвестування" та зекономити час у пошуках необхідної інформації. Так, як популярність такого бізнесу росте, то й цільова аудиторія такої програми буде теж розширюватись.

Аналіз останніх джерел

У статті [1] дослідники Ісил Єнідоган та Айкут Чаїр розглянули алгоритм глибокого навчання (deep learning), який став відомим як Facebook Prophet, аби спрогнозувати ціну біткойна. Також для порівняння ефективності прогнозу було обрано алгоритм ARIMA з використанням платформи R analytics. Щоб зіставлення двох алгоритмів було об'єктивним, було обрано лише один набір даних. Вони використали техніку потрійного розподілу з урахуванням характеристик часових рядів набору даних для вибору модель в обох алгоритмах. Такий підхід дав оптимальні співвідношення для навчальних, валідаційних і тестових наборів. Після виконаного дослідження було зроблено висновок, що алгоритм глибокого навчання перевершив алгоритм ARIMA на 0,94-0,68 у значеннях R 2.

Автор статті [2] вирішив порівняти кілька алгоритмів глибокого навчання аби спрогнозувати ціну біткойна. Так як ринок інвестицій є досить нестабільним і ціни досить сильно коливаються, Теарасак Фаладісайло та його команда вирішили дослідити та виявити найефективнішу та найточнішу модель для прогнозування цін на біткойна за допомогою різних алгоритмів машинного навчання. Набір даних було обрано на всесвітньо відомій платформі Kaggle. А саме прогнозування цін було реалізовано за допомогою бібліотек Keras і scikit-learn. Вони експериментували з різними моделями регресії та виявили, що найкращі результати показують моделі LSTM та GRU, адже саме у цих моделях R-квадрат був рівним 99,2%.

У даній статті [3] було розглянуто стохастичні нейронні мережі для передбачення ціни на криптовалюти. Підхід, описаний в цій статті, базується на гіпотезі випадкового блукання, яка широко використовується на фінансових ринках для моделювання цін на акції. Запропонована модель індукує пошарову випадковість у спостережуваних активаціях функцій нейронних мереж для імітації волатильності ринку. Більше того, техніка для вивчення моделі реакції ринку також включена в модель прогнозування. Результати показують, що запропонована модель є кращою порівняно з детермінованими моделями.

Публікація [4] дослідників Іоанніс Е. Лівієріс, Нікі Кіріакіду, Ставрос Ставроянніс та Панайотіс Пінтелас описує підхід прогнозування майбутньої ціни криптовалюти за допомогою моделі глибокого навчання з декількома входами, яка є відомою як MICDL. Суть такого рішення полягає в тому, щоб використати дані кожної криптовалюти як вхідні дані в згортковий шар, за яким слідували шар об'єднання та шар моделі LSTM. Більше того, у цьому дослідженні було використано класичну структуру нейронної мережі глибокого навчання. Запропонована науковцями CNN із шаром моделі LSTM досягла 55,03% точності даних Bitcoin. Такий аналіз показує, що запропонована модель ефективно використовує змішані дані криптовалюти та зменшує вартість обчислень у порівнянні із звичайними повністю пов'язаними глибокими нейронними мережами.

У статті [5] науковцями подано дослідження прогнозу коливання обсягу транзакцій для кращої торгівлі та кращого управління блокчейн-платформами. Більше того, автори змогли показати, як вибір ядра впливає на ефективність прогнозування регресії опорного вектора (SVR) у передбаченні обсягу торгівлі криптовалютою. Розглядаються три загальні ядра, а саме лінійна, поліноміальна та радіальна базисна функція (RBF). Для вирішення даної задачі було розглянуто три загальні функції: лінійна, поліноміальна та радіальна базисна функція. Також для налаштування ключових параметрів SVR було використано метод байєсівської оптимізації. Проте точність результатів у даному дослідженні бажає кращого, адже згідно даних точність становить 74%.

Автори публікації [6] досліджують оцінку криптовалют та прогноз їхньої ймовірної ціни, враховуючи курси валют. За основу дослідження було взято модель авторегресії (AR), моделі ковзного середнього (MA) і авторегресії ковзного середнього (ARMA). Перед запровадженням моделі в дослідженні було використано метод сезонної декомпозиції в наборі даних. Після проведених експериментів було виявлено, що модель авторегресії є найточнішою для прогнозування ціни Bitcoin, Ethereum, Litecoin і Tether-token з точністю 97,21%, 96,04%, 95,8% і 99,91% послідовно. Проте такий підхід не буде працювати так само ефективно з даними в реальному часі, через особливості реалізації даної моделі.

У статті [7] автори проводять експерименти щодо підходу багатоваріантного прогнозування та трьох різних рекурентних нейронних мереж (RNN): довготривалу короткочасну пам'ять (LSTM), двонаправлену LSTM (Bi-LSTM) і рекурентну одиницю (GRU). Також досліджується проста трирівнева мережеву архітектури для завдання регресії. З результатів проведених експериментів на п'яти основних криптовалютах: Bitcoin (BTC), Ethereum (ETH), Cardano (ADA), Tether (USDT) і Binance Coin (BNB), можна помітити, що Bi-LSTM і GRU мають однакову ефективність, якщо брати до уваги результати з точки зору точності. Проте, якщо поглянути на час виконання LSTM та GRU показують досить схожі результати, де GRU трохи кращий і має в середньому нижчі результати варіації.

Публікація [8] показує розробку нечітких моделей для прогнозування цін на криптовалюти, використовуючи процедури нечіткого моделювання на основі даних. В загальному набір шарів, який керований даними – це новий метод нечіткого моделювання, адже він суттєво відрізняється побудовою та обробкою нечітких правил від лінгвістичного та функціонального моделювання. Модель на основі набору рівнів виводить середнє зважене вихідних функцій активних нечітких правил. Функції виводу відображають рівні активації нечітких правил безпосередньо у виходах моделі. Обчислювальні експерименти проводяться для оцінки методу набору рівнів у прогнозуванні цін на закриття криптовалют на один крок наперед. Порівняння проведено з авторегресійною інтегрованою ковзною середньою, багатошаровою нейронною мережею та наївним випадковим блуканням як еталоном для Cardano, Binance Coin, Bitcoin, Ethereum,

Chainlink, Litecoin, Tron, Stellar, Monero та Ripple. Результати свідчать про те, що випадкове блукання перевершує більшість методів, розглянутих у цій статті, підтверджуючи загадку Міза–Рогоффа для випадку цифрових монет, тобто складність перевершити наївне випадкове блукання при прогнозуванні валютних курсів. Однак, коли продуктивність вимірюється напрямком зміни ціни, нечітке моделювання на основі набору рівнів працює найкраще серед інших методів.

Мета статті [9] полягала у моделюванні мережі та аналізі записів транзакцій віртуальних валют як поширеними методами аналізу даних блокчейна. Дослідники змогли проаналізувати графіки атрибутів, які можуть надати інформацію про різні економічні показники, незаконну діяльність і загальну безпеку в Інтернеті, зокрема. Відповідно, ця стаття має на меті узагальнити та проаналізувати літературу про дані транзакцій криптовалюти з точки зору складних мереж. Щоб забезпечити систематичне керівництво для дослідників, було запропоновано структуру аналізу даних блокчейну, засновану на введенні відповідного фону та розглянуто роботу з п’яти аспектів: модель даних блокчейну, отримання даних у блокчейні, існуючі інструменти аналізу, доступні ідеї та загальний аналіз методи.

Стаття [10] зосереджена на прогнозуванні волатильності криптовалюти. Волатильність фондового ринку є дуже впливовим аспектом, який впливає на широкий спектр рішень у бізнесі та фінансах. Прогнози щодо волатильності криптовалюти поступаються динаміці ринку. У цій статті розроблено відповідну модель для фіксації динаміки волатильності криптовалюти. Зокрема, було взято до уваги нейронну мережу Джордану, яка є ощадливою рекурентною нейронною мережею, що демонструє більшу передбачуваність у порівнянні з іншими моделями, розробленими для часових рядів, моделями порогової авторегресійної моделі та нелінійними авторегресійними нейронними мережами. Емпіричні докази надані з використанням даних трьох найбільш популярних криптовалют, а саме Bitcoin, Ripple та Ethereum. Проте, модель, що використовується у даному досліді потребує значних ресурсів для ефективної роботи, тому потребує коригування.

Метою роботи є створення перш за все зручного у використанні веб-додатку, який надасть аналіз та візуалізацію метрик криптовалют, і рекомендації щодо подальших інвестицій, беручи до уваги прогнозовану ціну валюти на основі проведених досліджень.

Виклад основного матеріалу

Огляд наборів даних

Проаналізувавши роботи, було зроблено висновок, що більшість досліджень проводились на застарілих датасетах, що в свою чергу свідчить про ймовірну неефективність даних підходів аналізу та прогнозування цін криптовалют. Для отримання найбільш актуальних даних з платформи Binance було реалізовано сервіс-парсер. У результаті було отримано інформацію про більше ніж 10000 валют за останню декаду.

Етапи процесу виявлення карієсу

Прогнозування цін криптовалют є досить трудомістким завданням, оскільки точність передбачення повинна бути досить високою, аби вважатись ефективною. Першим і основним етапом є процес пошуку актуальних даних та їх препроцесинг. Адже від цього залежить результативність експерименту. Тому, як було згадано вище, створено сервіс-парсер, який і гарантуватиме актуальність нашого датасету.

На етапі препроцесингу, збережено дані у датафреймі pandas та визначено основні поля, по яким буде проводитись прогноз цін. А саме: поточна ціна, найвища та найнижча межа ціни та кількість проданих одиниць цієї валюти за певний період часу. Після цього необхідно розділити даний датасет на три набори: тренувальний, валідаційний та тестувальний у відношенні 60%/20%/20% відповідно.

Після препроцесингу потрібно нормалізувати дані. Тобто, підготувати дані для машинного навчання. Мета нормалізації полягає в тому, щоб змінити значення числових стовпців у наборі даних на загальну шкалу, не спотворюючи відмінності в діапазонах значень.

Отримавши нормалізовані дані, можна переходити до тренування моделі. Було обрано рекурентну нейронну мережу LSTM, адже вона надає широкий діапазон параметрів, таких як швидкість навчання та зміщення вхідних і вихідних даних. Отже, немає потреби в подальших налаштуваннях. Складність оновлення кожного вагового коефіцієнта зменшується до константної. Це є суттєвою перевагою над іншими нейронними мережами. Тепер перейдемо до побудови моделі, яка буде складатись з трьох видів шарів: вхідного, вихідного та прихованого. Як оптимізатор було використано алгоритм Адам, який застосовується для навчання моделей глибокого навчання. Для функції втрат було використано середню квадратичну помилку. Наступним важливим кроком є визначення параметрів: початкове число випадкових чисел, довжина вікна, розмір тестового набору, кількість нейронів у шарі LSTM, епохи, розмір батчу, втрати, випадання та оптимізатор. Після цього можна приступити до тренування моделі.

Отримавши результат тренувань можна приступити до їх візуалізації аби навіть нетехнічна аудиторія могла зрозуміти. Також на етапі візуалізації необхідно показати не лише результати передбачення цін, а й аналіз усіх метрик, аби можна було зробити висновки про дану криптовалюту та її рентабельність. Адже саме це лежить в ідеї створення програми для полегшення інвестицій.

Висновок

Отже, в результаті проведеної роботи було створено веб-аплікацію для аналізу та візуалізації метрик криптовалют з передбачення ймовірної ціни валюти за допомогою нейронної мережі. Адже рішення

повинні фокусуватись на довгостроковій перспективі, а не на короткочасному виграші. Ця розробка дозволяє відкрити світ інвестицій навіть людям без відповідних знань фінансів та економіки. Адже усі необхідні обчислення проведені замість інвестора, що значно економить час.

Врахувавши усі рекомендації щодо подальших інвестувань, які надає ця програма, можна досягти беззбиткових вкладень та зменшити ризики втрати коштів. Звичайно, що бізнес криптовалют - це завжди високий ризик втрат, проте система, яка зменшить цей ризик зацікавить усіх інвесторів.

Література

1.A. Cayir, O. Kozan, T. Dağ, I. Yenidoğan, and Ç. Arslan, *Bitcoin Forecasting Using ARIMA and PROPHET*. 2018. doi: 10.1109/UBMK.2018.8566476.

2.T. Phaladisailoed and T. Numnonda, "Machine Learning Models Comparison for Bitcoin Price Prediction," in *2018 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*, Jul. 2018, pp. 506–511. doi: 10.1109/ICITEED.2018.8534911.

3.P. Jay, V. Kalariya, P. Parmar, S. Tanwar, N. Kumar, and M. Alazab, "Stochastic Neural Networks for Cryptocurrency Price Prediction," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 82804–82818, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2990659.

4.I. E. Livieris, N. Kiriakidou, S. Stavroyiannis, and P. Pintelas, "An Advanced CNN-LSTM Model for Cryptocurrency Forecasting," *Electronics*, vol. 10, no. 3, p. 287, Jan. 2021, doi: 10.3390/electronics10030287.

5.S. Lahmiri, S. Bekiros, and F. Bezzina, "Complexity analysis and forecasting of variations in cryptocurrency trading volume with support vector regression tuned by Bayesian optimization under different kernels: An empirical comparison from a large dataset," *Expert Syst. Appl.*, vol. 209, p. 118349, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.eswa.2022.118349.

6.A. K. Bitto *et al.*, "CryptoAR: scrutinizing the trend and market of cryptocurrency using machine learning approach on time series data," *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 28, pp. 1684–1696, Sep. 2022, doi: 10.11591/ijeecs.v28.i3.pp1684-1696.

7.S. Hansun, A. Wicaksana, and A. Khaliq, "Multivariate cryptocurrency prediction: comparative analysis of three recurrent neural networks approaches," *J. Big Data*, vol. 9, Apr. 2022, doi: 10.1186/s40537-022-00601-7.

8.L. Maciel, R. Ballini, F. Gomide, and R. Yager, "Forecasting cryptocurrencies prices using data driven level set fuzzy models," *Expert Syst. Appl.*, vol. 210, p. 118387, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.eswa.2022.118387.

9.W. Song *et al.*, "Blockchain Data Analysis from the Perspective of Complex Networks: Overview," *Tsinghua Sci. Technol.*, vol. 28, no. 1, pp. 176–206, Feb. 2023, doi: 10.26599/TST.2021.9010080.

10. V. D'Amato, S. Levantesi, and G. Piscopo, "Deep learning in predicting cryptocurrency volatility," *Phys. Stat. Mech. Its Appl.*, vol. 596, p. 127158, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.physa.2022.127158.

References

1. A. Cayir, O. Kozan, T. Dağ, I. Yenidoğan, and Ç. Arslan, *Bitcoin Forecasting Using ARIMA and PROPHET*. 2018. doi: 10.1109/UBMK.2018.8566476.

2. T. Phaladisailoed and T. Numnonda, "Machine Learning Models Comparison for Bitcoin Price Prediction," in *2018 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*, Jul. 2018, pp. 506–511. doi: 10.1109/ICITEED.2018.8534911.

3. P. Jay, V. Kalariya, P. Parmar, S. Tanwar, N. Kumar, and M. Alazab, "Stochastic Neural Networks for Cryptocurrency Price Prediction," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 82804–82818, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2990659.

4. I. E. Livieris, N. Kiriakidou, S. Stavroyiannis, and P. Pintelas, "An Advanced CNN-LSTM Model for Cryptocurrency Forecasting," *Electronics*, vol. 10, no. 3, p. 287, Jan. 2021, doi: 10.3390/electronics10030287.

5. S. Lahmiri, S. Bekiros, and F. Bezzina, "Complexity analysis and forecasting of variations in cryptocurrency trading volume with support vector regression tuned by Bayesian optimization under different kernels: An empirical comparison from a large dataset," *Expert Syst. Appl.*, vol. 209, p. 118349, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.eswa.2022.118349.

6. A. K. Bitto *et al.*, "CryptoAR: scrutinizing the trend and market of cryptocurrency using machine learning approach on time series data," *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 28, pp. 1684–1696, Sep. 2022, doi: 10.11591/ijeecs.v28.i3.pp1684-1696.

7. S. Hansun, A. Wicaksana, and A. Khaliq, "Multivariate cryptocurrency prediction: comparative analysis of three recurrent neural networks approaches," *J. Big Data*, vol. 9, Apr. 2022, doi: 10.1186/s40537-022-00601-7.

8. L. Maciel, R. Ballini, F. Gomide, and R. Yager, "Forecasting cryptocurrencies prices using data driven level set fuzzy models," *Expert Syst. Appl.*, vol. 210, p. 118387, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.eswa.2022.118387.

9. W. Song *et al.*, "Blockchain Data Analysis from the Perspective of Complex Networks: Overview," *Tsinghua Sci. Technol.*, vol. 28, no. 1, pp. 176–206, Feb. 2023, doi: 10.26599/TST.2021.9010080.

10. V. D'Amato, S. Levantesi, and G. Piscopo, "Deep learning in predicting cryptocurrency volatility," *Phys. Stat. Mech. Its Appl.*, vol. 596, p. 127158, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.physa.2022.127158.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-175-180
УДК 621.382

КРИЛИК ЛЮДМИЛА
Вінницький національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0001-6642-754X
e-mail: lyudmila.krylik@gmail.com

ВИЗНАЧЕННЯ ЯКІСНОГО ВПЛИВУ ФАКТОРІВ НА ЧУТЛИВІСТЬ ЄМНІСНОГО СЕНСОРА ВОЛОГОСТІ ДВОШАРОВОЇ СТРУКТУРИ, ОСНОВАНОГО НА БАГАТОФАКТОРНОМУ ДИСПЕРСІЙНОМУ АНАЛІЗІ

Застосовано багатофакторний дисперсійний аналіз з метою якісного оцінювання впливу таких факторів: товщина вологочутливого шару; товщина полімерного покриття як захисного шару; концентрація розчину солі NaCl як адсорбуючого матеріалу та їх сумісний вплив на чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури. Розроблено багатофакторний план для випадку трьох якісних факторів. Використовуючи багатофакторний дисперсійний аналіз, доведено, що на відгук моделі, тобто на чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури, впливають фактори: товщина захисного шару, концентрація розчину солі NaCl, а також сумісний вплив таких факторів: товщина вологочутливого шару + концентрація розчину солі; товщина захисного шару + концентрація розчину солі, тобто різниця в значеннях відгуку моделі пов'язана зі зміною значення фактора і не може бути спричинена тільки її випадковим характером. Однак, суттєво впливає на відгук моделі сумісний вплив фактора – товщина захисного шару + концентрація розчину солі. В цьому випадку значення критерію Фішера, яке спостерігається в експерименті, значно перевищує критичне значення критерію Фішера $F > F_{кр}$ (13,01>4,49). Вплив таких факторів: товщина вологочутливого шару; товщина вологочутливого шару + товщина захисного шару; товщина вологочутливого шару + товщина захисного шару + концентрація розчину солі є несуттєвим, тобто різниця в значеннях відгуку моделі пов'язана з випадковим її характером. Використовуючи дисперсійний аналіз впливу фактора доведено, що на чутливість ємнісних сенсорів вологості впливає не тільки концентрація розчину солі NaCl, яка використовувалась для створення вологочутливого шару, але й конструктивне виконання сенсора.

Ключові слова: багатофакторний дисперсійний аналіз, фактор, відгук моделі, критерій Фішера, чутливість, ємнісний сенсор вологості.

KRYLIK LYUDMILA
Vinnytsia National Technical University

DETERMINATION OF THE QUALITATIVE INFLUENCE OF FACTORS ON THE SENSITIVITY OF THE CAPACITIVE HUMIDITY SENSOR OF A TWO-LAYER STRUCTURE BASED ON MULTIFACTOR DISPERSION ANALYSIS

A multifactorial dispersion analysis was applied in order to qualitatively assess the influence of the following factors: thickness of the moisture-sensitive layer; the thickness of the polymer coating as a protective layer; the concentration of the NaCl salt solution as an adsorbent material and their combined effect on the sensitivity of the capacitive humidity sensor of the two-layer structure. Capacitive humidity sensors of a two-layer structure, made on a sitall substrate, served as experimental samples. The copper film, which forms the covers of the capacitive humidity sensors, is applied to the surface of the sitall substrate in the form of a meander. In the developed design, the moisture-sensitive layer is hygroscopic salt, which performs the function of a dielectric. A moisture-absorbing film of polymethylmethacrylate serves as a protective layer. A multifactorial plan is developed for the case of three qualitative factors. Using multifactorial dispersion analysis, it was proved that the response of the model, that is, the sensitivity of the capacitive humidity sensor of the two-layer structure, is influenced by such factors as the thickness of the protective layer, the concentration of the NaCl salt solution, as well as the combined effect of factors such as the thickness of the moisture-sensitive layer + the concentration of the salt solution; the thickness of the protective layer + concentration of the salt solution. That is, the difference in the response values of the model is related to the change in the value of the factor and cannot be caused only by its random nature. However, the response of the model is significantly affected by the combined effect of the factor – the thickness of the protective layer + the concentration of the salt solution. In this case, the value of Fisher's criterion, which is observed in the experiment, significantly exceeds the critical value of Fisher's criterion $F > F_{kr}$ (13.01>4.49). The influence of such factors as the thickness of the moisture-sensitive layer; the thickness of the moisture-sensitive layer + the thickness of the protective layer; the thickness of the moisture-sensitive layer + the thickness of the protective layer + the concentration of the salt solution is insignificant, that is, the difference in the response values of the model is due to its random nature. Using the dispersion analysis of the influence of the factor, it was proved that the sensitivity of capacitive humidity sensors is affected not only by the concentration of the NaCl salt solution, which was used to create a moisture-sensitive layer, but also by the design of the sensor.

Keywords: multifactorial dispersion analysis, factor, model response, Fisher's criterion, sensitivity, capacitive humidity sensor.

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

Натепер серед первинних перетворювачів різного типу особливе місце у вимірювальній техніці займають сенсори вологості. Необхідність контролю вологості у промисловості, а також у побуті робить актуальною проблему розроблення та дослідження сенсорів вологості різних типів, принцип дії яких базується на зміні електрофізичних параметрів. Водночас, сучасний стан науки і техніки висуває підвищені вимоги до засобів вимірювання вологості, які пов'язанні з автоматизацією технологічних процесів. Питання вивчення, розроблення та виробництва засобів вимірювання вологості є актуальним, оскільки перетворення рівня вологості в електричний сигнал відомими вимірювальними засобами ускладнене [1–4].

Використання первинних перетворювачів вологості в частотних пристроях, в яких вологість перетворюється у частоту, дозволяє значно підвищити чутливість, точність вимірювання вологості, спростити схеми подальшої обробки інформації. В цьому випадку необхідно використовувати вологочутливий елемент у вигляді ємності, який є найоптимальнішим за сукупністю параметрів [2, 5, 6].

Крім того, застосування методів математичної статистики як інструменту дослідницької роботи суттєво спрятиме як систематизації, так і обробленню та аналізу експериментальних даних [7−16].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Технічний рівень сучасних сенсорних систем залежить як від конструктивного, так від технологічного виконання сенсорів фізичних величин та принципу їх дії. Крім того, створення нових чутливих елементів або вдосконалення існуючих потребує як проведення численних експериментальних досліджень, так і оброблення та аналізу результатів досліджень − експериментальних даних, ефективність та достовірність яких залежить від обраного метода математичної статистики. Нині, методи математичної статистики, до яких відносять: статистичні ряди розподілу, оцінювання параметрів розподілу, закони розподілу вибіркових характеристик, дисперсійний, регресійний, кореляційно-регресійний аналіз тощо, широко застосовуються в різноманітних галузях промислової індустрії.

Регресійний аналіз кількісно здійснює оцінювання впливу фактора на відгук моделі, тобто забезпечує оптимізацію параметрів фактора [7, 9−12, 16]. А дисперсійний аналіз спрямований на визначення впливу фактора на відгук моделі на рівні «впливає» або «не впливає», тобто дисперсійний аналіз сприяє визначенню значущих факторів моделі. Крім того, щоб проаналізувати експеримент всебічно і зробити статистично ґрунтовні висновки або знайти оптимальні рішення, доцільно застосовувати експерименти за багатофакторними планами з урахуванням сумісного впливу факторів [8, 13−16].

Отже, розробка багатофакторного плану експерименту у випадку якісних факторів натепер актуальна.

Постановка завдання

Метою роботи є оцінювання, за допомогою багатофакторного дисперсійного аналізу, якісного впливу на чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури таких факторів:

- товщина вологочутливого шару;
- товщина полімерного покриття, як захисного шару;
- концентрація розчину солі як адсорбуючого матеріалу;
- сумісного впливу: товщина вологочутливого шару + товщина захисного шару; товщина вологочутливого шару + концентрація розчину солі; товщина захисного шару + концентрація розчину солі; товщина вологочутливого шару + товщина захисного шару + концентрація розчину солі.

Для досягнення поставленої мети у роботі потрібно вирішити такі задачі:

1) провести аналіз наукових джерел та обґрунтувати доцільність застосування багатофакторного експерименту у випадку трьох якісних факторів;

2) розробити багатофакторний план експерименту у випадку трьох якісних факторів;

3) використовуючи дисперсійний аналіз впливу фактора провести оцінювання впливу таких факторів: товщина вологочутливого шару; товщина захисного шару; концентрація розчину солі (гігроскопічна сіль NaCl) та сумісного впливу: товщина вологочутливого шару + товщина захисного шару; товщина вологочутливого шару + концентрація розчину солі; товщина захисного шару + концентрація розчину солі; товщина вологочутливого шару + товщина захисного шару + концентрація розчину солі.

4) зробити висновки з проведених досліджень.

Виклад основного матеріалу

Досліджувалась залежність чутливості ємнісних сенсорів вологості двошарової структури від впливу таких факторів: товщина вологочутливого шару; товщина захисного шару; концентрація розчину солі (гігроскопічна сіль NaCl) та сумісного впливу: товщина вологочутливого шару + товщина захисного шару; товщина вологочутливого шару + концентрація розчину солі; товщина захисного шару + концентрація розчину солі; товщина вологочутливого шару + товщина захисного шару + концентрація розчину солі. Захисний шар створено з метою запобігання випадіння точки роси [3, 4].

Експериментальними зразками слугували ємнісні сенсори вологості двошарової структури (м. Вінниця, Україна, ВНТУ), які виготовлені на ситаловій підкладці розміром 0,7×0,9 мм. Плівка міді, яка утворює обкладки ємнісних сенсорів вологості, нанесена на поверхню ситалової підкладки у вигляді меандра. В розробленій конструкції вологочутливим шаром є гігроскопічна сіль NaCl, яка виконує функцію діелектрика. Для створення вологочутливої плівки використовувались розчини гігроскопічної солі NaCl з концентраціями 0,89 моль/л та 5,33 моль/л, які наносились на поверхню ємнісних сенсорів вологості товщинами 5,0 мкм та 10,0 мкм. Захисним шаром слугувала вологопоглинальна плівка поліметилметакрилату товщинами 40 мкм та 80 мкм.

Для розрахунків використаємо такі позначення: фактор A − товщина вологочутливого шару $d_{ВШ}$, мкм; A_1 − нижній рівень фактора A; A_2 − верхній рівень фактора A; фактор B − товщина захисного шару

$d_{ЗШ}$, мкм; B_1 – нижній рівень фактора B; B_2 – верхній рівень фактора B; фактор C – концентрація розчину солі NaCl, яка виконує функцію адсорбуючого матеріалу C, моль/л; C_1 – нижній рівень фактора C; C_2 – верхній рівень фактора C; AB – сумісний вплив фактора A та фактора B; AC – сумісний вплив фактора A та фактора C; BC – сумісний вплив фактора B та фактора C; ABC – сумісний вплив факторів A, B та C; відгук моделі y – чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури S_C, нФ/%.

Проведемо оцінювання впливу факторів A, B, C, AB, AC, BC та ABC на чутливість ємнісного сенсора вологості. В табл. 1 надано результати факторного експерименту.

Таблиця 1

Результати факторного експерименту

	$d_{ВШ} = 5,0$ мкм	$d_{ВШ} = 10,0$ мкм	$d_{ЗШ} = 40,0$ мкм	$d_{ЗШ} = 80,0$ мкм
$C = 0,89$ моль/л	0,38; 0,48; 0,54	0,75; 0,86; 0,91	0,42; 0,53; 0,6	0,83; 0,95; 1,25
$C = 5,33$ моль/л	0,57; 0,62; 0,75	0,97; 1,78; 2,82	0,68; 0,78; 0,82	1,89; 2,95; 3,78

Кожний фактор має два рівня, тобто $q = 2$ та дванадцять прогонів, тобто $p = 12$. В табл. 2 подано результати експериментів, які відповідають багатофакторному плану у випадку трьох якісних факторів.

Таблиця 2

Результати багатофакторного плану у випадку трьох якісних факторів

2^3	A_1		A_2		Дисперсійний аналіз	
	C_1	C_2	C_1	C_2	дисперсія	кількість ступенів вільності
B_1	0,38; 0,48; 0,54	0,75; 0,86; 0,91	0,42; 0,53; 0,6	0,83; 0,95; 1,25	фактор A фактор B фактор C фактор AB фактор AC фактор BC фактор ABC залишкова	1 1 1 1 1 1 1 23-7=16
B_2	0,57; 0,62; 0,75	0,97; 1,78; 2,82	0,68; 0,78; 0,82	1,89; 2,95; 3,78		
	$p = 12$		$N_{пр} = 24$		загальна	24-1=23

З метою оцінювання впливу факторів на відгук моделі, проведемо багатофакторний дисперсійний аналіз.

Значення факторної дисперсії $s_{факт}$, залишкової дисперсії $s_{залиш}$ обчислюють за такими формулами [16]:

$$S_{факт} = p \cdot \sum_{j=1}^{2} (\overline{y_j} - \overline{y})^2 , \tag{1}$$

$$S_{залиш} = \sum_{i=1}^{p} (y_{i1} - \overline{y}_1)^2 + \sum_{i=1}^{p} (y_{i2} - \overline{y}_2)^2 , \tag{2}$$

де y_j – спостереження відгуку моделі в j-му експерименті;

y_{i1}, y_{i2} – i-е спостереження відгуку моделі нижнього та верхнього рівня факторів.

За формулами (3) обчислюються середні значення спостережень [16]:

$$\overline{y_j} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^{p} y_{ij} , \qquad \overline{y} = \sum_{j=1}^{2} \overline{y_j} . \tag{3}$$

З врахуванням кількості ступенів вільності, факторна $d_{факт}$ та залишкова дисперсії $d_{залиш}$ обчислюються за формулами [16]:

$$d_{факт} = S_{факт} , \qquad d_{залиш} = \frac{S_{залиш}}{2 \cdot (p - 1)} . \tag{4}$$

У формулах (4) в знаменнику виразу стоїть кількість ступенів вільності. За величиною критерію Фішера проводять порівняння факторної та залишкової дисперсії, які спостерігаються в експерименті [16]:

$$F = \frac{d_{факт}}{d_{залиш}} . \tag{5}$$

Оцінювання впливу факторів A, B, C, AB, AC, BC та ABC за дисперсійним аналізом будемо проводити за виразами (1)−(5). Результати обчислень за формулами (1)−(5) подано в табл. 3.

Таблиця 3

Результати оцінювання впливу факторів за дисперсійним аналізом

Фактори							
A		B		C		AB	
$\overline{y_{A_1}}$	0,95	$\overline{y_{B_1}}$	0,71	$\overline{y_{C_1}}$	0,6	$\overline{y_{AB_1}}$	1,66
$\overline{y_{A_2}}$	1,29	$\overline{y_{B_2}}$	1,53	$\overline{y_{C_2}}$	1,65	$\overline{y_{AB_2}}$	2,82
$\overline{y_A}$	1,12	$\overline{y_B}$	1,12	$\overline{y_C}$	1,13	$\overline{y_{AB}}$	2,24
$S_{факт}$	0,6936	$S_{факт}$	4,0344	$S_{факт}$	6,6156	$S_{факт}$	8,0736
$S_{залиш}$	17,5513	$S_{залиш}$	14,1429	$S_{залиш}$	11,6515	$S_{залиш}$	31,6942
$d_{факт}$	0,6936	$d_{факт}$	4,0344	$d_{факт}$	6,6156	$d_{факт}$	8,0736
$d_{залиш}$	1,1	$d_{залиш}$	0,8839	$d_{залиш}$	0,7282	$d_{залиш}$	2,0
F	0,63	F	4,56	F	9,08	F	4,04
$F_{кр}$	4,49	$F_{кр}$	4,49	$F_{кр}$	4,49	$F_{кр}$	4,49

Фактори					
AC		BC		ABC	
$\overline{y_{AC_1}}$	1,55	$\overline{y_{BC_1}}$	1,31	$\overline{y_{ABC_1}}$	1,24
$\overline{y_{AC_2}}$	2,94	$\overline{y_{BC_2}}$	3,18	$\overline{y_{ABC_2}}$	1,01
$\overline{y_{AC}}$	2,25	$\overline{y_{BC}}$	2,25	$\overline{y_{ABC}}$	1,13
$S_{факт}$	11,5932	$S_{факт}$	20,982	$S_{факт}$	0,318
$S_{залиш}$	29,2028	$S_{залиш}$	25,7944	$S_{залиш}$	17,9245
$d_{факт}$	11,5932	$d_{факт}$	20,982	$d_{факт}$	0,318
$d_{залиш}$	1,8252	$d_{залиш}$	1,6122	$d_{залиш}$	1,1203
F	6,35	F	13,01	F	0,28
$F_{кр}$	4,49	$F_{кр}$	4,49	$F_{кр}$	4,49

Потрібно зазначити, що в знаменнику залишкової дисперсії (4) стоїть кількість ступенів вільності 16, а не 22, як в однофакторному дисперсійному аналізі.

Порівняння факторної та залишкової дисперсії проводилось за величиною критерію Фішера. Отже, використовуючи багатофакторний дисперсійний аналіз доведено, що на відгук моделі, тобто на чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури впливають: фактор B − товщина захисного шару, $F > F_{кр}$ (4,56>4,49); фактор C − концентрація розчину солі NaCl, $F > F_{кр}$ (9,08>4,49), а також сумісний вплив факторів AC − товщина вологочутливого шару + концентрація розчину солі, $F > F_{кр}$ (6,35>4,49) і факторів BC − товщина захисного шару + концентрація розчину солі, $F > F_{кр}$ (13,01>4,49), тобто різниця в значеннях відгуку моделі пов'язана зі зміною значення фактора і не може бути спричинена тільки її випадковим характером. Однак, суттєво впливає на відгук моделі сумісний вплив факторів BC, а саме товщина захисного шару + концентрація розчину солі. В цьому випадку значення критерію Фішера, яке спостерігається в експерименті, значно перевищує критичне значення критерію Фішера, в порівнянні з вище наведеними значеннями впливу факторів. Вплив факторів A, AB і ABC, а саме, товщина вологочутливого шару, сумісного впливу: товщина вологочутливого шару + товщина захисного шару; товщина вологочутливого шару + товщина захисного шару + концентрація розчину солі є несуттєвим, тобто різниця в значеннях відгуку моделі пов'язана з випадковим її характером і не пов'язана зі зміною значення фактора ($F < F_{кр}$).

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Встановлено, що методи математичної статистики доцільно використовувати для систематизації, оброблення та аналізу експериментальних даних, ефективність та достовірність яких залежить від обраного метода математичної статистики. В науково-дослідній роботі регресійний аналіз забезпечує оптимізацію параметрів фактора, тобто кількісно здійснює оцінювання впливу фактора на відгук моделі. Дисперсійний аналіз сприяє визначенню значущих факторів моделі, тобто він визначає вплив фактора на відгук моделі на рівні «впливає» або «не впливає». Крім того, щоб проаналізувати експеримент всебічно і зробити

статистично ґрунтовні висновки або знайти оптимальні рішення, доцільно застосовувати експерименти за багатофакторними планами з урахуванням сумісного впливу факторів.

2. Розроблено багатофакторний план для випадку трьох якісних факторів. Використовуючи багатофакторний дисперсійний аналіз доведено, що на відгук моделі, тобто на чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури впливають фактори: товщина захисного шару, концентрація розчину солі NaCl, а також сумісний вплив таких факторів: товщина вологочутливого шару + концентрація розчину солі; товщина захисного шару + концентрація розчину солі. Тобто різниця в значеннях відгуку моделі пов'язана зі зміною значення фактора і не може бути спричинена тільки її випадковим характером. Однак, суттєво впливає на відгук моделі сумісний вплив фактора − товщина захисного шару + концентрація розчину солі. В цьому випадку значення критерію Фішера, яке спостерігається в експерименті значно перевищує критичне значення критерію Фішера $F > F_{кр}$ (13,01>4,49). Вплив таких факторів: товщина вологочутливого шару; товщина вологочутливого шару + товщина захисного шару; товщина вологочутливого шару + товщина захисного шару + концентрація розчину солі є несуттєвим, тобто різниця в значеннях відгуку моделі пов'язана з випадковим її характером. Використовуючи дисперсійний аналіз впливу фактора доведено, що на чутливість ємнісних сенсорів вологості впливає не тільки концентрація розчину солі NaCl, яка використовувалась для створення вологочутливого шару, але й конструктивне виконання сенсора.

3. В подальших дослідженнях планується застосувати регресійний аналіз з метою оптимізації параметрів створення ємнісного сенсора вологості двошарової структури.

Література

1. Готра З. Ю. Мікроелектронні сенсори фізичних величин. Том 2 / З. Ю. Готра. – Львів : Ліга-Прес, 2003. – 595 с.

2. Осадчук В. С. Сенсори вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик. − Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 208 с.

3. Осадчук В. С. Дослідження ємнісних вологочутливих елементів / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, М. В. Євсєєва // Вісник ВПІ. − 2002. − № 5. − С. 65−71.

4. Осадчук В. С. Ємнісний сенсор вологості гребінцевої структури на основі полімерних матеріалів / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, М. В. Євсєєва // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. Міжнародний науково-технічний журнал. − 2006. − № 2(12).− С. 222−227.

5. Осадчук О. В. Математична модель мікроелектронного автогенераторного засобу для вимірювання вологості / О. В Осадчук, Л. В. Крилик, О. С. Звягін, Я. О. Осадчук // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2021. − Т. 32(71), № 4. – С. 289–296.

6. Осадчук О. В. Математична модель параметричного перетворювача вологості з частотним виходом / О. В Осадчук, Л. В. Крилик, Я. О. Осадчук // Прикладні питання математичного моделювання. – 2020. − Т. 3, № 2.1. – С. 206 –215.

7. Крилик Л. В. Застосування регресійного аналізу в процесі оцінювання впливу фактора на чутливість ємнісного сенсора вологості / Л. В. Крилик, М. В. Євсєєва // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2022. – № 4(311). – С. 119–124.

8. Крилик Л. В. Застосування багатофакторного дисперсійного аналізу з метою якісного оцінювання впливу факторів на чутливість ємнісного сенсора вологості / Л. В. Крилик // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки .– 2022. – № 5(313). – С. 122–127.

9. Ляшок А. В. Планування багатофакторного експерименту при дослідженні процесу ультразвукового розпилення в тонкому шарі / А. В. Ляшок // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. – 2013. − № 3. − С. 13–17.

10. Павлюк К. В. Методичні підходи до розроблення нормативів і оцінки науково-дослідної праці на основі багатофакторного кореляційно-регресійного аналізу / К. В. Павлюк // Наукові праці НДФІ. – 2020.− № 3(92). − С. 5−19.

11. Аксьончиков С. О. Регресійний аналіз тенденцій розвитку кібератак / С. О. Аксьончиков, І. В. Ємельянова, К. Д. Маркова, І. І. Сватовський // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія: Мат. моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. – 2017. − Вип. 36. − С. 5−13.

12. Кучернюк П. В. Модель загроз безпеки в інформаційно-комунікаційних системах на основі регресійного аналізу / П. В. Кучернюк, А. О. Довгаль // Інформаційні та телекомунікаційні системи та технології, захист інформації. – 2017. − Вип. 22, № 2.− С. 79−84.

13. Самарець Н. М. Використання інформаційних технологій у статистичному аналізі даних для аграрних підприємств / Н. М. Самарець, Є. М. Харченко, Н. О. Чорна // АГРОСВІТ. – 2013. − № 20. – С. 14−20.

14. Шуть О. Теоретико-методологічні аспекти статистичних досліджень / О. Шуть // Збірник наукових праць ДЕТУТ. Серія «Економіка і управління». – 2012. – Вип. 22−21, Ч. 2. – С. 305−311.

15. Єріна А. М. Поєднання моделей регресійного і дисперсійного аналізу в соціально-економічних дослідженнях / А. М. Єріна // Наукові записки НаУКМА. Серія: Економічні науки. – 2000. – Том 18. – С. 12−17.

16. Стеценко І. В. Моделювання систем / І. В. Стеценко. – Черкаси : ЧДТУ, 2010. – 399 с.

References

1. Hotra Z. Yu. Mikroelektronni sensory fizychnykh velychyn. Tom 2 / Z. Yu. Hotra. – Lviv : Liha-Pres, 2003. – 595 s.

2. Osadchuk V. S. Sensory volohosti / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, L. V. Krylyk. − Vinnytsia : UNIVERSUM – Vinnytsia, 2003. – 208 s.

3. Osadchuk V. S. Doslidzhennia yemnisnykh volohochutlyvykh elementiv / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, L. V. Krylyk, M. V. Yevsieieva // Visnyk VPI. − 2002. − №5. − S. 65−71.

4. Osadchuk V. S. Yemnisnyi sensor volohosti hrebintsevoi struktury na osnovi polimernykh materialiv / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, L. V. Krylyk, M. V. Yevsieieva // Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii. Mizhnarodnyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal. − 2006. − №2(12).− S. 222−227.

5. Osadchuk O. V. Matematychna model mikroelektronnoho avtoheneratornoho zasobu dlia vymiriuvannia volohosti / O. V Osadchuk, L. V. Krylyk, O. S. Zviahin, Ya. O. Osadchuk // Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Seriia: Tekhnichni nauky. – 2021. − T. 32(71), № 4. – S. 289–296.

6. Osadchuk O. V. Matematychna model parametrychnoho peretvoriuvacha volohosti z chastotnym vykhodom / O. V Osadchuk, L. V. Krylyk, Ya. O. Osadchuk // Prykladni pytannia matematychnoho modeliuvannia. – 2020. − T. 3, № 2.1. – S. 206 –215.

7. Krylyk L. V. Zastosuvannia rehresiinoho analizu v protsesi otsiniuvannia vplyvu faktora na chutlyvist yemnisnoho sensora volohosti / L. V. Krylyk, M. V. Yevsieieva // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriia: Tekhnichni nauky. – 2022. – № 4(311). – S. 119–124.

8. Krylyk L. V. Zastosuvannia bahatofaktornoho dyspersiinoho analizu z metoiu yakisnoho otsiniuvannia vplyvu faktoriv na chutlyvist yemnisnoho sensora volohosti / L. V. Krylyk // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriia: Tekhnichni nauky .– 2022. – № 5(313). – S. 122–127.

9. Liashok A. V. Planuvannia bahatofaktornoho eksperymentu pry doslidzhenni protsesu ultrazvukovoho rozpylennia v tonkomu shari / A. V. Liashok // Visnyk NTUU «KPI». Seriia mashynobuduvannia. – 2013. − №3. − S. 13–17.

10. Pavliuk K. V. Metodychni pidkhody do rozroblennia normatyviv i otsinky naukovo-doslidnoi pratsi na osnovi bahatofaktornoho koreliatsiino-rehresiinoho analizu / K. V. Pavliuk // Naukovi pratsi NDFI. – 2020. −№ 3(92). − S. 5−19.

11. Aksonchykov S. O. Rehresiinyi analiz tendentsii rozvytku kiberatak / S. O. Aksonchykov, I. V. Yemelianova, K. D. Markova, I. I. Svatovskyi // Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V. N. Karazina. Seriia: Mat. modeliuvannia. Informatsiini tekhnolohii. Avtomatyzovani systemy upravlinnia. – 2017. − Vyp. 36. − S. 5−13.

12. Kucherniuk P. V. Model zahroz bezpeky v informatsiino-komunikatsiinykh systemakh na osnovi rehresiinoho analizu / P. V. Kucherniuk, A. O. Dovhal // Informatsiini ta telekomunikatsiini systemy ta tekhnolohii, zakhyst informatsii. – 2017. − Vyp. 22, №2. − S. 79−84.

13. Samarets N. M. Vykorystannia informatsiinykh tekhnolohii u statystychnomu analizi danykh dlia ahrarnykh pidpryiemstv / N. M. Samarets, Ye. M. Kharchenko, N. O. Chorna // AHROSVIT. – 2013. − № 20. – S. 14−20.

14. Shut O. Teoretyko-metodolohichni aspekty statystychnykh doslidzhen / O. Shut // Zbirnyk naukovykh prats DETUT. Seriia «Ekonomika i upravlinnia». – 2012. – Vyp. 22−21, Ch. 2. − 305−311.

15. Yerina A. M. Poiednannia modelei rehresiinoho i dyspersiinoho analizu v sotsialno-ekonomichnykh doslidzhenniakh / A. M. Yerina // Naukovi zapysky NaUKMA. Seriia: Ekonomichni nauky. – 2000. – Tom 18. – S. 12−17.

16. Stetsenko I. V. Modeliuvannia system / I. V. Stetsenko. – Cherkasy : ChDTU, 2010. – 399 s.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-181-188
Удк 687.016.6: 687.122

КУЛЕШОВА СВІТЛАНА
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0003-2361-2950
e-mail: kuleshovas@khmnu.edu.ua
ЛУЩЕВСЬКА ОЛЕНА
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0003-2689-798X
e-mail: lushchevskao@khmnu.edu.ua
ЛЕБЕДИНСЬКА ОКСАНА
Хмельницький національний університет
e-mail: amihanamori@gmail.com
СЛОБОДЕНЮК ОЛЬГА
Хмельницький національний університет
КОВАЛЬСЬКА ДАРІЯ
Хмельницький національний університет

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ НАПРАЦЮВАНЬ З ПРОЄКТУВАННЯ АДАПТИВНИХ РЕАБІЛІТАЦІЙНИХ ВИРОБІВ

Стаття присвячена аналітичному огляду сучасного стану напрацювань з проєктування адаптивних реабілітаційних виробів легкої промисловості для покращення процесу психофізіологічної адаптації людей (військовослужбовців та цивільних) із травматичними ушкодженнями кінцівок.

Ключові слова: адаптивні реабілітаційні вироби, травматичне ушкодження кінцівок, психофізіологічна адаптація, функціонально-конструктивні елементи.

KULESHOVA SVITLANA, LUSCHEVSKA OLENA, LEBEDINSKA OKSANA,
SLOBODENIUK OLGA, KOVALSKA DARIA
Khmelnytskyi National University

ANALYTICAL REVIEW OF THE CURRENT STATE OF DEVELOPMENT IN THE DESIGN OF ADAPTIVE REHABILITATION GARMENTS

The article is devoted to an analytical review of the current state of development in the design of adaptive rehabilitation garments of light industry to improve the process of psychophysiological adaptation of people (military and civilians) with traumatic limb injuries. The need to design adaptive clothing for people with lost limbs has been determined, with the aim of increasing a person's independence, creating and maintaining his physical and psychological comfort, as well as ensuring his successful rehabilitation. On the basis of theoretical studies of existing varieties of adaptive products, the most rational structural and technological solutions of the constituent elements of adaptive rehabilitation shoulder and lumbar products were systematized and an information database was formed for the purpose of their informed choice for people (military and civilians) with traumatic limb injuries. Based on research in the field of harmonization of color relationships, taking into account the emotional and psychophysiological impact of color on consumers with traumatic limb injuries, a database and recommendations for the use of harmonious color combinations in adaptive rehabilitation clothing at the hospital and post-hospital stages have been developed. A series of sketches of new models of adaptive shoulder and waist products in the Sport-casual style for consumers with traumatic limb injuries for everyday use, taking into account the needs of aesthetics, ergonomics and socialization, are proposed. Further research is aimed at the production of experimental samples of adaptive products according to the provided sketches in the conditions of the Ukrainian brand ARTY Sport.

Keywords: adaptive rehabilitation garments, traumatic limb injury, psychophysiological adaptation, functional and constructive elements

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

За даними Генштабу ЗСУ, до 60% від усіх травм, яких зазнають на фронті, становлять саме поранення кінцівок від мінно-вибухових та осколкових травм, іноді ускладнених неможливістю вчасно отримати належну медичну допомогу. Україна з іноземними партнерами налагодила виготовлення протезів і можливе протезування за кордоном у рамках гуманітарної медичної допомоги. Держава забезпечує людей із ураженими кінцівками необхідним першочерговим комплексом реабілітаційних заходів. Однак під час реабілітації такі люди зустрічаються із проблемою самостійного обслуговування себе, сприйняття себе нового, що перешкоджає їх соціальній активності, мобільності та успішній адаптації до мирного життя. Одним із вагомих шляхів вирішення цих проблем є адаптивний одяг, який підлаштований під потреби людей із пошкодженими кінцівками, візуально не відрізняється від звичайного одягу, але дозволяє полегшити обслуговування себе, ушкодженої кінцівки, що в цілому дозволить зменшити соціальну та психологічну адаптацію людини. Однак на сьогодні в Україні відсутні науково-обґрунтовані розробки такого одягу, і люди із ураженими кінцівками змушені самостійно підбирати собі одяг, зазвичай спортивний, здатний хоча б частково відповідати їхнім вимогам. Саме тому пріоритетним є напрямок проєктування адаптивного одягу для людей із втраченими кінцівками, з метою підвищення самостійності людини, створення і підтримки її фізичного і психологічного комфорту, а також забезпечення її успішної реабілітації.

Аналіз останніх джерел

Аналіз літератури свідчить про невпинне зростання кількості осіб з ампутованими кінцівками внаслідок травматизму, прогресування судинної патології, гангренних інфекцій, а особливо поранень під час бойових дій в Україні [1]. Підвищення якості життя осіб із травмами кінцівок – це не тільки психологічна та фізична реабілітація, а також підтримання якості побутового життя таких осіб на високо комфортному рівні.

Ряд досліджень вітчизняних науковців – Супрун Н. П., Садретдінова Н. В., Березненко С. М., Колосніченко О. В., Пашкевич К. Л., Остапенко Н. В. [2–4] – та їх закордонних колег [5–7] направлені на створення виробів легкої промисловості для людей з обмеженими можливостями. Зокрема дослідження авторів [2, 3] направлені на створення адаптивного одягу, призначеного, в основному, для людей-візочників із функціональними порушеннями хребта. У дослідженнях розроблені конструктивно-технологічні підходи та модельні рішення костюму у спортивному стилі з матеріалів, що забезпечують комфорт та є безпечними, так як мають антибактеріальне покриття [2].

У дослідженні [4] обґрунтовано необхідність ергономічного проєктування швейних виробів, оскільки особи з травмами кінцівок часто відчувають труднощі під час одягання та знімання виробів, користування окремими елементами одягу. При цьому важливим є використання досягнень сучасності (інновацій) у сфері радіоелектоніки, нанотехнологій, 3D моделювання та проєктування для створенням комфортного і сучасного одягу, який дозволить вести повноцінне суспільне життя [5].

Авторами [3, 7, 8] розроблено ряд конструктивних та технологічних удосконалень для виготовлення різного асортименту адаптаційного одягу із спеціальними функціонально-конструктивними елементами для людей з інвалідністю. Однак дані вироби не призначені для прискорення процесу психологічної та фізіологічної реабілітації людей із травматичними ураженнями кінцівок, та не є складовою комплексу реабілітаційних заходів. Крім того вартість адаптивних виробів закордонних виробників [6, 7] є надвисокою для українського користувача. Авторами [8] навіть запропоновано новий напрямок моди – адаптивна мода для людей із особливими потребами.

У дослідженнях авторів [5–7] використано розумне поєднання людської ергономіки, новітніх текстильних матеріалів і сучасних технологій у розробці адаптивного одягу для окремих видів інклюзії. Також під час розробки адаптивного одягу дослідники використовують сучасні комп'ютерні методи моделювання одягу та 3D віртуальне прототипування одягу, для цього створюють аватари людей з обмеженими можливостями з асиметричним типом тіла. У роботі [7] поєднано ергономічні підходи до проектування одягу, сучасні текстильні матеріали і технології 3D-сканування тіла для створення аватарів людей з обмеженими можливостями та асиметричним типом тіла при розробці адаптивного одягу.

Усі вище зазначені дослідження формують потужний напрямок – проєктування адаптивних виробів, однак дослідження, направлені на розроблення виробів для людей із травматичними ураженнями кінцівок, є поодинокими та не містять комплексного психофізіологічного підходу до їх реабілітації та адаптації. Тому важливим є удосконалення наявних підходів до психологічної та фізичної реабілітації осіб після травм кінцівок на лікарняному та післялікарняному етапах шляхом створення зручних, сучасних, модних виробів легкої промисловості, що дозволять почувати себе більш впевнено та сприятимуть швидшій адаптації до мирного життя.

Формування цілей статті

Метою дослідження є аналітичний огляд сучасного стану напрацювань з проєктування адаптивних реабілітаційних виробів легкої промисловості для покращення процесу психофізіологічної адаптації людей (військовослужбовців та цивільних) із травматичними ушкодженнями кінцівок.

Об'єкт дослідження – процес проєктування адаптивних швейних виробів. Предмет дослідження – швейні вироби для психофізіологічної адаптації та реабілітації людей із травматичними ушкодженнями кінцівок. Для розроблення виробів легкої промисловості, призначених для психофізіологічної адаптації людей (військовослужбовців та цивільних) із травматичними ушкодженнями кінцівок, буде використаний комплексний підхід, в основу якого покладено парадигму цілісності людського організму, в котрій гармонійно поєднані психічна та фізична сфери.

Виклад основного матеріалу

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання: 1. Аналіз продукції провідних світових та вітчизняних компаній виробників та дослідження асортименту існуючого адаптивного плечового та поясного одягу. 2. Аналіз індивідуальних відчуттів споживачів в процесах сприйняття адаптивних швейних виробів. 3. Розроблення концепції проєктування адаптивних виробів легкої промисловості для психофізіологічної адаптації та реабілітації людей із ураженими кінцівками. 4. Розроблення ескізів адаптаційних виробів для психофізіологічної адаптації людей із різними ураженнями кінцівок (одягу різного асортименту та різного призначення: святкового, повсякденного).

Аналіз продукції провідних світових та вітчизняних компаній виробників адаптивних виробів

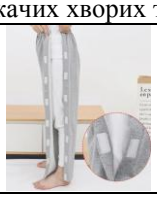
Завдяки сучасним досягненням науки на світовий ринок виходять зразки одягу (табл. 1) з особливими захисними, лікувальними та реабілітаційними властивостями, однак на відміну від світової практики асортимент українського лікарняного адаптивного одягу вкрай обмежений.

На основі аналізу умов експлуатації одягу в клініках і стаціонарах провідних компаній, що займаються виготовленням адаптивного одягу Mediset (Україна) [8], Silvert's Adaptive Clothing and Footwear

(Канада) [9], Care+Wear (США) [10], Reboundwear (США) [10] здійснено систематизацію конструктивно-технологічних рішень адаптивного одягу для пацієнтів за такими ознаками, як силует, покрій, оформлення верхнього та нижнього зрізів, за функціонально-конструктивними і конструктивно-декоративними елементами, типом застібок.

Таблиця 1

Конструктивно-технологічні рішення адаптивних виробів провідних компаній

Фірма	Плечові вироби		Поясні вироби	
Mediset (Україна)	Товари для догляду та реабілітації лежачих хворих та активних пацієнтів			
				
	Адаптивна кофта на липучках	Сорочка для лежачих хворих	Адаптивні штани на липучках	Адаптивні штани на блискавці
Silvert's Adaptive Clothing and Footwear (Канада)	Адаптивний одяг для реабілітації (Післяопераційний)			
	Футболка на блискавці	Футболка на кнопках	Штани на блискавці	Штани на кнопках
Care+Wear (США)	Інноваційний одяг для здоров'я			
	Чоловіча футболка на блискавці			
Reboundwear (США)	Адаптивний одяг для реабілітації			
	Адаптивна жіноча куртка на блискавці	Адаптивна чоловіча футболка на блискавці	Адаптивні чоловічі шорти на блискавці	Адаптивні чоловічі штани на блискавці

Таким чином, з позицій біомеханіки одягнена людина являє собою кінематичну систему «людина ↔ одяг». Кінематична взаємодія компонентів системи «людина ↔ одяг» здійснюється у сагітальній, фронтальній та горизонтальній площинах, характеризується нахилами та поворотами тулуба, рухами у суглобах верхніх та нижніх кінцівок. При цьому використовуються всі види та способи схватів із застосуванням різних комбінацій та додатком сил, що виробляються пальцями рук. Що стосується функціонування системи «адаптивні реабілітаційні вироби ↔ людина», то вона характеризується порушенням стереотипу, причиною якого є травматичне ураження кінцівок, що ускладнює або унеможливлює виконання самим споживачем необхідних дій при користуванні одягом.

Саме ці обставини і призводять до часткової чи повної залежності від послуг оточуючих [7–11].

Отже, при розробці адаптивних реабілітаційних виробів їх форма (пристрій) і функції (принцип дії) повинні визначати не тільки рівень і характер порушення діяльності опорно-рухового апарату, а й фізіологічні, статеві особливості людей із травматичними ураженнями кінцівок, а також конструктивно-функціональні можливості технічних засобів реабілітації, що використовуються: протезів, колясок та ін. Основні медико-технічні вимоги щодо розробки адаптивного реабілітаційного одягу повинні включати наступне:

Мета призначення адаптивного одягу за медичними показаннями:

Забезпечення часткової або повної незалежності від послуг оточуючих при взаємодії з одягом.

Полегшення дій осіб, зайнятих доглядом за споживачами з різними потребами.

Полегшення користування технічними засобами реабілітації.

Профілактика розвитку морфологічних деформацій.

Ілюзорне приховування дефектів фігури.

Мета призначення адаптивного одягу за соціальними показаннями:

Відновлення соціального статусу особистості.

Адаптація та інтеграція людей із травматичними ураженнями кінцівок до життя у суспільстві.

Гардероб одягу повинен складатися з предметів, що відповідають способу життя людей із пошкодженими кінцівками та дозволяють їм інтегруватися у звичне для них середовище, комплектація якого повинна відповідати медико-соціальним показанням такого споживача та складатися з одного або кількох предметів верхнього та натільного одягу, конструктивно підпорядкованих один одному.

Готовий адаптивний виріб повинен за зовнішнім виглядом, посадкою на фігурі, розміром та художнім оформленням відповідати вимогам до стандартного одягу, а за конструктивним рішенням – індивідуальним особливостям споживача відповідно до завдань формоутворення одягу для особливостей травматичних уражень кінцівок. Таким чином, конструктивне рішення має в одному випадку бути адаптованим до фізичних можливостей для осіб з різними травмами кінцівок, в іншому – полегшувати дії осіб, зайнятих їх обслуговуванням, а в третьому – забезпечувати безперешкодний доступ до використовуваних технічних засобів [7–11]. Ці положення покладено за основу при розробці адаптивних реабілітаційних виробів для зазначених груп споживачів відповідно до медико-технічних вимог до нього.

Аналіз індивідуальних відчуттів споживачів в процесах сприйняття адаптивних швейних виробів

Проблема комфортності сприйняття моделі адаптивного одягу для досягнення гармонійності системи «адаптивний виріб ↔ особистість ↔ зовнішність ↔ адресний споживач» безпосередньо пов'язана з якістю одягу і базується на відсутності претензій від споживачів. Претензії адресного споживача (військовослужбовців та цивільних) із травматичними ушкодженнями кінцівок до швейного адаптивного реабілітаційного виробу визначають зовнішні і внутрішні фактори. Зовнішні фактори ($F_{ЗВ}$) є основними, оскільки вони містять всю інформацію про особливості споживачів та їх враження від одягу і формують критерії претензій зовнішнього походження. Вони характеризують відповідність швейного виробу психологічним особливостям, а також визначеним вище вимогам за медичними та соціальними показаннями і відповідають вимогам психофізіологічної комфортності людини (*ПК*), як зазначено у [12]:

$$F_{ЗВ} = ПК \supset Оц^{поз} \cup B^{кф}_{ПФ} \cup П_{ПФ}, \quad (1)$$

де $Оц^{поз}$ – позитивна самооцінка зовнішності у виробі.

$$B^{кф}_{ПФ_i} = \left\{B^{кф}_{ЗР_i}, B^{кф}_{Т_i}, B^{кф}_{З_i}, B^{кф}_{Н_i}, B^{кф}_{С_i}\right\}, \; St = \{St_i\}; \; i=1\ldots3, \quad (2)$$

де $B^{кф}_{ПФ_i}$ – комфортні психофізіологічні відчуття: зорові ($B^{кф}_{ЗР_i}$), тактильні ($B^{кф}_{Т_i}$), звукові ($B^{кф}_{З_i}$), нюхові ($B^{кф}_{Н_i}$), смакові ($B^{кф}_{С_i}$) при ситуації St_1 – перше враження; St_2 – зручність при примірці; St_3 – зручність при експлуатації виробу на лікарняному та післялікарняному етапах.

$$П_{ПФ} = \left\{n^1_{ПФ}, n^2_{ПФ}, n^3_{ПФ}, n^4_{ПФ}, n^5_{ПФ}\right\}, \quad (3)$$

де $П_{ПФ}$ – психофізіологічне сприйняття; $n^1_{ПФ}$ – емоційні переживання; $n^2_{ПФ}$ – емоційні реакції; $n^3_{ПФ}$ – сприйняття образу з досвіду використання на лікарняному та післялікарняному етапах ; $n^4_{ПФ}$ – інтуїція; $n^5_{ПФ}$ – розумове осмислення.

Внутрішні фактори ($F_{ВН}$) підпорядковані вимогам художньої виразності моделі адаптивного реабілітаційного одягу. Вони складаються із системи масивів інформації адресного проєктування моделі одягу (АПО) для перетворення ідеї в реальний адаптаційний виріб, впливають на його естетичну якість (ЕЯ) і формують показники естетичної якості внутрішнього походження.

$$F_{ВН} \equiv АПО = \left\{АПО_{ея} \middle| ея \in ЕЯ\right\} \rightarrow АПО \cup ЕЯ. \quad (4)$$

Рішенню психофізіологічної комфортності адаптивного реабілітаційного одягу сприяють методи автоматизованого художнього проєктування одягу ($ХПО^м$): комбінаторика, модульне проєктування, деконструкція. Саме ці методи планується застосувати для адаптації та трансформації простої форми в складну чи більш зручну, для створення адаптивного реабілітаційного одягу простими засобами, при розробці нових технологічних прийомів за принципом спрощення для зручності використання адресним споживачем із травматичними ушкодженнями кінцівок.

Розроблення концепції проєктування адаптивних виробів легкої промисловості для психофізіологічної адаптації та реабілітації людей із ураженими кінцівками

Для покращення процесу психофізіологічної адаптації людей із травматичними ушкодженнями кінцівок особливе значення мають психофізіологічні властивості матеріалів, при цьому головну роль відіграє колір тканини і грамотне використання гармонійних колірних поєднань [12, 13]. Це дозволяє при проєктуванні адаптивного одягу скоригувати емоційний стан людини та підтримати рівень її психологічного комфорту [12].

На основі аналізу матеріалу в галузі впливу кольору на психологічний та фізичний стан людини [12, 13] та на основі результатів маркетингових досліджень [1–6] складені рекомендації у виборі основних та додаткових кольорів адаптивного реабілітаційного одягу на лікарняному та післялікарняному етапах (табл. 2).

Таблиця 2

Кольори та поєднання кольорів, рекомендовані для виготовлення адаптаційного реабілітаційного одягу

Основний / додатковий колір одягу	Опис лікувального впливу кольору на лікарняному та післялікарняному етапах	Рекомендоване відділення на лікарняному етапі
Зелений, блакитний / Жовтий, помаранчевий (у невеликих кількостях)	Зелений усуває збудження, занепокоєння, емоційну напругу, чинить снодійний ефект, стабілізує емоції, має слабку болезаспокійливу та бактерицидну дію, стабілізує артеріальний тиск та функції нервової системи. Блакитний заспокійливо діє на нервову систему, знижує біль, чутливість. Жовтий та помаранчевий послаблюють гальмівну дію синього та блакитного на темпи мислення та дрібну моторику.	Неврологічне
Синій, зелений, блакитний / Жовтий	Синій та блакитний надають болезаспокійливий, протизапальний вплив, сприяють зупинці кровотечі, швидкому рубцюванню та загоєнню ран. Жовтий колір послаблює гальмівну дію синього та блакитного на темп мислення та моторику. Зелений має снодійний ефект, слабку болезаспокійливу та бактерицидну дію, стабілізує емоції.	Хірургічне
Блакитний, зелений / Жовтий	Блакитний заспокоює, має бактерицидну дію, сприяє швидкому рубцюванню та загоєнню ран. Поєднання блакитного та жовтого кольорів не викликає гальмування вольових процесів та мислення. Зелений нормалізує артеріальний тиск, стабілізує емоції, має слабку болезаспокійливу дію.	Травматологічне
Зелений, блакитний, синій / Жовтий, помаранчевий	Блакитний та синій ефективні при болях у суглобах, запальних процесах, серцевій недостатності скорочувальної функції міокарда, підвищеному артеріальному тиску, знижують біль, чутливість. Зелений стабілізує артеріальний тиск, нормалізує діяльність серцево-судинної системи, позитивно діє на нервову систему, усуває напругу у кров'яних судинах. Жовтий та помаранчевий гармонійно поєднуються із зеленим та блакитним, послаблюють побічні дії блакитного (відчуття туги, холоду).	Терапевтичне

Розроблення ескізів виробів для психофізіологічної адаптації людей із різними ураженнями кінцівок комбінаторним синтезом морфологічних ознак моделей одягу

Рис. 1. Ескізи адаптивних жіночих виробів

В результаті аналізу та систематизації проведених досліджень [1–11] розроблено ескізні проєкти адаптивних жіночих виробів різних стильових напрямів з гнучкою морфологічною структурою. Основним завданням процесу проєктування такого адаптивного одягу є вибір таких конструктивно-технологічних рішень, які можуть комплексно забезпечити всі висунуті вимоги: захисні, функціональні, ергономічні, експлуатаційні, естетичні та техніко-економічні.

Базовим асортиментом для асортиментної групи жіночого спортивного костюма в стилі Sport-casual обрано куртку та штани. Технічна структура куртки є повною комбінацією конструктивних частин, які покривають основні ділянки тіла, і містить конструкцію стану (покриває грудну клітку), конструкцію рукава (верхні кінцівки), з’ємні каптури.

Розроблено базу даних уніфікованих функціонально-конструктивних та конструктивно-декоративних елементів плечових і поясних виробів, принтів і вимоги до матеріалів. Для візуалізації процесу дизайн-проєктування конкретної моделі одягу в стилі Sport-casual, що розробляється на основі комбінаторного синтезу, складено морфологічну матрицю (табл. 3, рис. 2, 3).

Усі варіанти реалізації розроблених прототипів морфологічних ознак виробів заданого асортименту, які представлені у морфологічній матриці, виконано графічно у вигляді технічних ескізів у середовищі графічного редактора PaintTool SAI [14]. Кожен варіант окремої морфологічної ознаки попередньо зашифровано у таблиці, представлено варіантами можливих комбінаторних поєднань, а також розміщено у окремому прошарку, рис. 3.

Таблиця 3

Морфологічна матриця ознак верхнього жіночого одягу

Варіант виробу	Варіанти реалізації морфологічних ознак						
	1. Комір	2. Кокетка пілочки	3. Пілочка	4. Рукав	5. Каптур	6. Кокетка спинки	7. Спинка
1	1.1	2.1	3.1	4.1	5.1	6.1	7.1
2	1.2	2.2	3.2	4.2	5.2	6.2	7.2
4	1.1	2.4	3.1	4.4	5.1	6.2	7.2

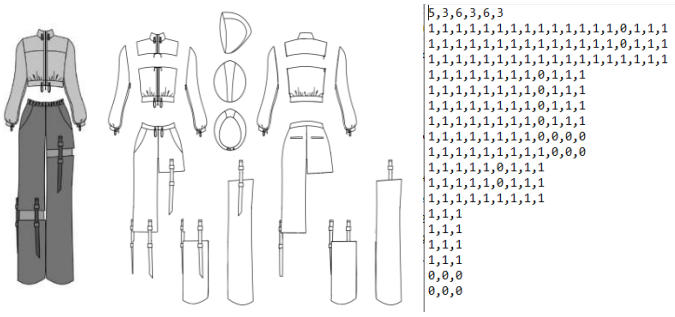


Рис. 2. Процес формування персоніфікованого виробу з готових елементів у середовищі PaintTool SAI

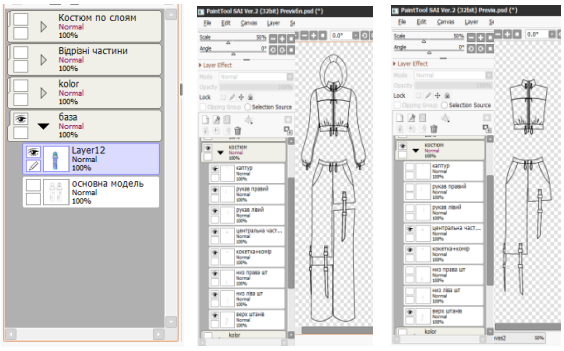


Рис. 3. Дерево шарів для розробки ескізу жіночого костюму комбінаторним синтезом в середовищі PaintTool SAI

Для організації роботи з морфологічними ознаками використано діалогове вікно «Layer». Вікно викликають на екран натисканням кнопки з відповідною назвою. На екрані «Layer» дають назву створеному прошарку – назва відповідає варіанту морфологічної ознаки. Усі прошарки представлені у вигляді ієрархічного дерева, у якому вищому рівню відповідає назва морфологічної ознаки, а нижчому – конкретний варіант її виконання (рис. 4). Шляхом перебору варіантів морфологічних ознак, вмиканням видимості (невидимості) прошарків, досягається можливість створення практично безкінечної кількості ескізів одягу заданого асортименту за умови постійного оновлення бази морфологічних ознак та занесення їх у відповідні прошарки як у ахроматичному, так і в колористичному вигляді, рис. 4. Підібрані і візуально продемонстровані готові гармонійні поєднання кольорів у адаптаційному реабілітаційному жіночому спортивному костюмі, що складається із куртки та штанів, виконано з урахуванням рекомендацій таблиці 1 (рис. 4).

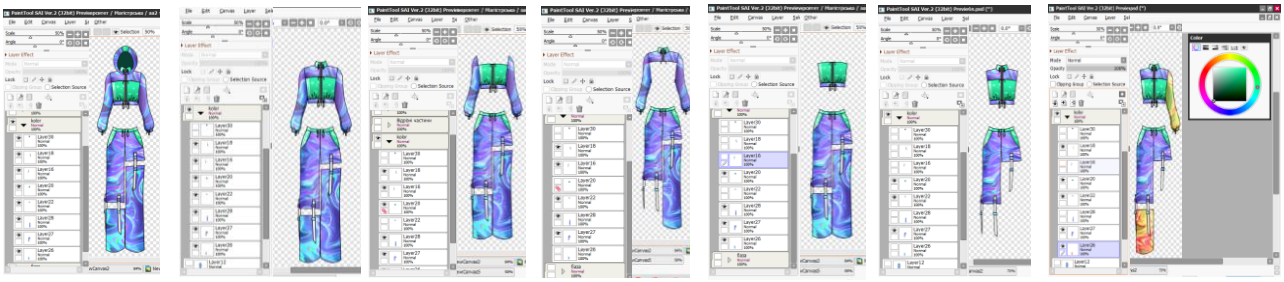
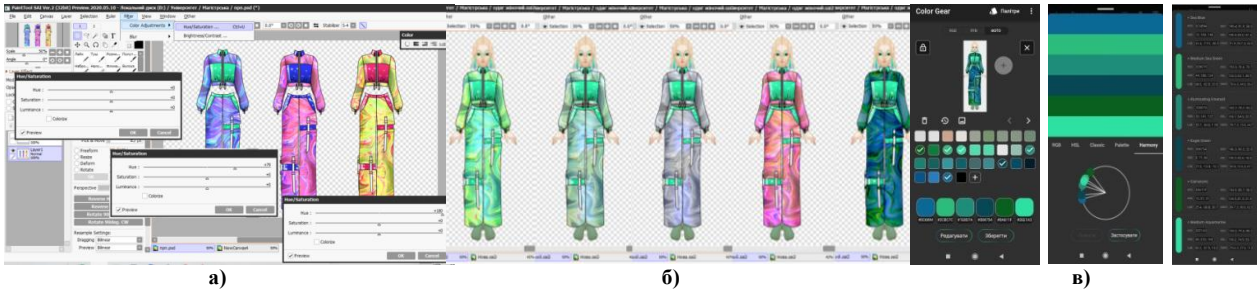


Рис. 4. Види варіантів колористичних трансформ виробу із готових елементів у середовищі PaintTool SAI

Наведений на рис. 4, 5 колірний баланс адаптивних моделей одягу базується на правилах гармонії кольорів в 12-секторному колі. Подальші дослідження направлені на виготовлення експериментальних зразків адаптивних виробів за наданими ескізами в умовах українського fashion-бренду ARTY Sport.

ARTY Sport – український fashion-бренд, що спеціалізується на виробництві спортивного одягу зі стильним і індивідуальним дизайном принтів, які виготовляються за допомогою сучасних технологій друку: сублімаційний друк, цифровий прямий друк на тканині, термотрансферний друк за технологією DTF [16].

Передові технології візуалізації, що застосовують на підприємстві, дозволяють максимально відтворити колористику розроблених ескізних проєктів. Ця технологія дозволяє передавати зображення будь-якої складності на тканину і досягати відмінної зносостійкості. Кольори принтів не зникають і не тьмяніють навіть після 10000 циклів прання. Для друку використовуються сертифіковані, екологічно чисті та гіпоалергенні фарби. Процес розробки та формування каталогу координат палітри кольорів для асортиментної серії адаптивного жіночого спортивного костюма в стилі Sport-casual з використанням сучасних кольоро-інформаційних технологій за допомогою мобільного додатку Color Gear представлено на рис. 5.



а) б) в)

Рис. 5. Візуалізація процесу розробки гармонійного проєктного колірного образу моделі одягу: а) аналіз зображення; б) перегляд у форматі «гармонія»; в) збереження палітри кольорів [15]

Для подальшого застосування сформованої палітри кольорів в умовах виробництва координати кольору представлено у вигляді 6 форматів: HEX, LAB, RGB, HSV, HSL, CMYK, таблиця 4.

Таблиця 4

Каталог кольорів

Назва кольору	Координати кольору					
	HEX	RGB	LAB	HSV	HSL	CMYK
Sea Blue	0C6894	12, 104, 148	41.4, -7.91, -30.9	199.4, 91.9, 58.0	199.4, 85.0, 31.4	91.9, 29.7, 0, 42.0
Medium Sea Green	2CBC7C	44, 188, 124	68.0, -52.0, 22.0	153.3, 76.6, 73.7	153.3, 62.1, 45.5	76.6, 0, 34.0, 26.3
Illuminating Emerald	1E8D7A	30, 141, 122	52.7, -34.6, 1.55	169.7, 78.7, 55.3	169.7, 64.9, 33.5	78.7, 0, 13.5, 44.7
Eagle Green	084754	8, 71, 84	27.3, -13.4, -13.1	190.3, 90.5, 32.9	190.3, 82.6, 18.0	90.5, 15.5, 0, 67.1
Camarone	0A611F	10, 97, 31	35.4, -38.8, 30.1	134.5, 89.7, 38.0	134.5, 81.3, 21.0	89.7, 0, 68.0, 62.0
Medium Aquamarine	2EE1A3	46, 225, 163	80.2, -57.5, 18.2	159.2, 79.6, 88.2	159.2, 74.9, 53.1	79.6, 0, 27.6, 11.8

Особливий підхід в організації виробничого процесу на ARTY Sport дозволить авторам розробити і виготовити адаптивний спортивний костюм в стилі Sport-casual, оскільки на підприємстві використовується спеціально розроблений текстиль, що містить високоякісні волокна таких марок, як: Advansa Coolmax, Advansa Thermolite, Meryl, Tactel. Ці тканини максимально підлаштовані під потреби людей із пошкодженими кінцівками та забезпечують високі гігієнічні та ергономічні властивості та високий рівень комфорту, оскільки мають підвищену повітропроність.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Визначено потребу в проєктуванні адаптивного одягу для людей із втраченими кінцівками, з метою підвищення самостійності людини, створення і підтримки її фізичного і психологічного комфорту, а також забезпечення її успішної реабілітації.

На основі теоретичних досліджень існуючих різновидів адаптивних виробів систематизовано найбільш раціональні конструктивно-технологічні рішення складових елементів адаптивних реабілітаційних плечових та поясних виробів і сформовано інформаційну базу даних з метою їх обґрунтованого вибору для людей (військовослужбовців та цивільних) із травматичними ушкодженнями кінцівок.

Сформована мета призначення одягу за медичними показаннями на лікарняному етапі та за соціальними показаннями на післялікарняному етапі.

На основі досліджень у галузі гармонізації колірних відносин з урахуванням емоційного та психофізіологічного впливу кольору на споживачів із травматичними ушкодженнями кінцівок, розроблено базу даних та рекомендації щодо використання колірних гармонійних поєднань в адаптаційному реабілітаційному одязі на лікарняному та післялікарняному етапах.

Розроблено матрицю морфологічних ознак для комбінаторного синтезу уніфікованих функціонально-конструктивних та конструктивно-декоративних елементів плечових і поясних адаптивних виробів.

Запропоновано ряд ескізів нових моделей адаптивних плечових та поясних виробів в стилі Sport-casual для споживачів із травматичними ушкодженнями кінцівок для повсякденного використання з урахуванням потреб естетики, ергономіки та соціалізації.

Подальші дослідження направлені на виготовлення експериментальних зразків адаптивних виробів за наданими ескізами в умовах українського бренду ARTY Sport.

Література

1. Герасименко О.С. Вплив фізичної реабілітації на якість життя осіб з наслідками ампутації нижньої кінцівки / О.С. Герасименко, Н.Р. Закаляк // Науковий часопис Національного педагогічного університету імені М. П. Драгоманова. Серія 15: Науково-педагогічні проблеми фізичної культури (фізична культура і спорт) : зб. наук. праць. – Київ : Вид-во НПУ імені М. П. Драгоманова, 2019. – Вип. 5 (113). – С. 26–30. – URL: http://enpuir.npu.edu.ua/handle/123456789/25503

2. Sadretdinova N., Bereznenko S., Bilotska L., Szafrańska H., Pawlowa M. Designing of casual wear for wheelchair users. Communications in development and assembling of textile products. 2022. №3 (2). P. 180–190. URL: https://doi.org/10.25367/cdatp.2022.3.p180-190

3. Супрун Н.П. Розробка сучасного одягу для людей з інвалідністю / Н.П. Супрун, Л.І. Зубкова, Г.М. Пожилов-Несміян, Ю.О. Ващенко // Індустрія моди. Fashion Industry. – 2019. – № 2. – С. 54–60.

4. Колосніченко О.В. Аналіз і систематизація різновидів проєктних рішень при виготовленні адаптивного одягу для пацієнтів / О.В. Колосніченко, К.Л. Пашкевич, Н.В. Остапенко, А.Г. Скрипченко, Н.Р. Люклян // Art and Design. – 2022. – № 2(18). – С. 94–107.

5. Feng Q.L., Hui C.-L. Clothing Needs for Wheelchair Users: A Systematic Literature Review. Advances in Aging Research. 2021. № 10. P. 1–30. URL: https://doi.org/10.4236/aar.2021.101001

6. Jeetah R. Making the Case for Disability Innovation: Opportunity at Concrete Change for the Disabled Community. Journal of Social Sciences. 2022. № 10. P. 111–125. URL: https://doi.org/10.4236/jss.2022.102007

7. Luu S. Optimizing 3D Fashion CAD Software for Physically Disabled Populations. 2021. URL: http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.35187.45607

8. Mediset. URL: https://mediset.com.ua/ua/

9. Silvert's. URL: https://www.silverts.com/

10. Care+Wear. URL: https://www.careandwear.com/

11. Reboundwear. URL: https://www.reboundwear.com/collections/adaptive-clothing

12. Kuleshova S., Zakharkevich O., Koshevko Y., Shvets G. Improvement of the methodology for assessing the clothing psychological comfort using semantic differential. Vlákna a textile. 2021. № 28(1). P. 45–55.

13. Кулешова С.Г. Колір в художньому проектуванні одягу : навч. посіб. / С.Г. Кулешова ; за ред. д.т.н., проф. А.Л. Славінської. – Хмельницький : ХНУ, 2016. – 395 с.

14. PaintTool SAI. URL: https://www.systemax.jp/en/sai/

15. Color Gear: палітра кольорів. URL: https://play.google.com/store/apps/details?id=design.vek.color_gear.lite&hl=uk

16. ARTY Sport. URL: https://www.arty-sport.com

References

1. Herasymenko O.S. Vplyv fizychnoi reabilitatsii na yakist zhyttia osib z naslidkamy amputatsii nyzhnoi kintsivky / O.S. Herasymenko, N.R. Zakaliak // Naukovyi chasopys Natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni M. P. Drahomanova. Seriia 15: Naukovo-pedahohichni problemy fizychnoi kultury (fizychna kultura i sport) : zb. nauk. prats. – Kyiv : Vyd-vo NPU imeni M. P. Drahomanova, 2019. – Vyp. 5 (113). – S. 26–30. – URL: http://enpuir.npu.edu.ua/handle/123456789/25503

2. Sadretdinova N., Bereznenko S., Bilotska L., Szafrańska H., Pawlowa M. Designing of casual wear for wheelchair users. Communications in development and assembling of textile products. 2022. №3 (2). P. 180–190. URL: https://doi.org/10.25367/cdatp.2022.3.p180-190

3. Suprun N.P. Rozrobka suchasnoho odiahu dlia liudei z invalidnistiu / N.P. Suprun, L.I. Zubkova, H.M. Pozhylov-Nesmiian, Yu.O. Vashchenko // Industriia mody. Fashion Industry. – 2019. – № 2. – S. 54–60.

4. Kolosnichenko O.V. Analiz i systematyzatsiia riznovydiv proiektnykh rishen pry vyhotovlenni adaptyvnoho odiahu dlia patsiientiv / O.V. Kolosnichenko, K.L. Pashkevych, N.V. Ostapenko, A.H. Skrypchenko, N.R. Liuklian // Art and Design. – 2022. – № 2(18). – C. 94–107.

5. Feng Q.L., Hui C.-L. Clothing Needs for Wheelchair Users: A Systematic Literature Review. Advances in Aging Research. 2021. № 10. P. 1–30. URL: https://doi.org/10.4236/aar.2021.101001

6. Jeetah R. Making the Case for Disability Innovation: Opportunity at Concrete Change for the Disabled Community. Journal of Social Sciences. 2022. № 10. P. 111–125. URL: https://doi.org/10.4236/jss.2022.102007

7. Luu S. Optimizing 3D Fashion CAD Software for Physically Disabled Populations. 2021. URL: http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.35187.45607

8. Mediset. URL: https://mediset.com.ua/ua/

9. Silverts. URL: https://www.silverts.com/

10. Care+Wear. URL: https://www.careandwear.com/

11. Reboundwear. URL: https://www.reboundwear.com/collections/adaptive-clothing

12. Kuleshova S., Zakharkevich O., Koshevko Y., Shvets G. Improvement of the methodology for assessing the clothing psychological comfort using semantic differential. Vlákna a textile. 2021. № 28(1). R. 45–55.

13. Kuleshova S.H. Kolir v khudozhnomu proektuvanni odiahu : navch. posib. / S.H. Kuleshova ; za red. d.t.n., prof. A.L. Slavinskoi. – Khmelnytskyi : KhNU, 2016. – 395 s.

14. PaintTool SAI. URL: https://www.systemax.jp/en/sai/

15. Color Gear: palitra koloriv. URL: https://play.google.com/store/apps/details?id=design.vek.color_gear.lite&hl=uk

16. ARTY Sport. URL: https://www.arty-sport.com

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-189-201
УДК 004.7:519

ЛЕМЕШКО АНДРІЙ
Державний університет телекомунікацій
https://orcid.org/0000-0001-8003-3168
АНТОНЕНКО АРТЕМ
Державний університет телекомунікацій
https://orcid.org/0000-0001-9397-1209
e-mail: artem.v.antonenko@gmail.com
ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ ОЛЕКСІЙ
Державний університет телекомунікацій
https://orcid.org/0009-0007-9995-0629
ЗАВАДСЬКИЙ В'ЯЧЕСЛАВ
Державний університет телекомунікацій
https://orcid.org/0009-0009-5167-1051

ОПТИМІЗАЦІЯ ЧАСУ РЕАГУВАННЯ ВЕБ СЕРВЕРУ APACHE

У цій статті досліджуються підходи до онлайн-оптимізації веб-сервер Apache, зосереджуючись на параметрі MaxClients (який контролює максимальну кількість працівників). Використовуючи як емпіричні, так і аналітичні методи, ми показуємо, що MaxClients має увігнутий висхідний вплив на час відгуку, і, отже, методи підйому на пагорб можна використовувати для визначення оптимального значення MaxClients. Ми досліджуємо два оптимізатори, які використовують підйом на гору — один на основі методу Ньютона, а другий — на основі нечіткого керування. Третя техніка – це евристика, яка використовує зв'язок між використанням вузьких місць і мінімізацією часу відгуку. У всіх випадках онлайн-оптимізація скорочує час відповіді в 10 або більше разів порівняно зі статичним значенням за замовчуванням. Компроміси між онлайн-схемами такі. Метод Ньютона добре відомий, але не дає узгоджених результатів для дуже мінливих даних, таких як час відгуку. Нечітке керування більш надійне, але сходиться повільно. Евристика добре працює в нашій системі-прототипі, але її може бути важко узагальнити, оскільки вона вимагає знання про вузькі місця ресурсів і вміння вимірювати їх використання. Тематика є актуальною в контексті швидко зростаючої кількості веб-додатків та високих вимог до продуктивності та ефективності роботи веб-серверів. Дана тема досліджує можливості покращення швидкості та часу відповіді Apache веб-серверу за допомогою різноманітних технік та налаштувань, таких як оптимізація налаштувань сервера, використання кешування, стиснення даних, оптимізація маршрутизації запитів та інших. Метою даного дослідження є покращення продуктивності та швидкості відповіді Apache веб-серверу, що може бути корисним для розробників та адміністраторів веб-додатків та сервісів. Швидкість та час відповіді веб-серверів є критичними факторами для задоволення потреб користувачів та досягнення бізнес-цілей веб-додатків та сервісів. Apache є одним з найпоширеніших веб-серверів у світі, тому оптимізація часу відповіді Apache серверу є важливим завданням для багатьох розробників та адміністраторів веб-додатків та сервісів. В даному дослідженні будуть розглянуті різні підходи та техніки для оптимізації часу відповіді Apache веб-серверу, зокрема налаштування параметрів сервера, використання кешування, стиснення даних, оптимізація маршрутизації запитів та інші. Результати дослідження можуть бути корисними для розробників та адміністраторів веб-додатків та сервісів, які мають справу з використанням Apache веб-серверу. Оптимізація часу відповіді Apache серверу може значно поліпшити продуктивність та ефективність веб-додатків та сервісів, що в свою чергу може призвести до задоволення користувачів та досягнення бізнес-цілей.

LEMESHKO ANDRII, ANTONENKO ARTEM, DOBROVOLSKYI OLEKSII, ZAVADSKYI VIACHESLAV
State University of Telecommunications

APACHE WEB SERVER RESPONSE TIME OPTIMIZATION

This article explores approaches to online optimization of the Apache web server, focusing on the MaxClients parameter (which controls the maximum number of workers). Using both empirical and analytical methods, we show that MaxClients has a concave-upward effect on response time, and hence hill-climbing techniques can be used to determine the optimal value of MaxClients. We investigate two optimizers that use hill climbing—one based on Newton's method and one based on fuzzy control. A third technique is a heuristic that exploits the relationship between bottleneck utilization and response time minimization. In all cases, online optimization reduces the response time by a factor of 10 or more compared to the static default value. The trade-offs between online schemes are as follows. Newton's method is well known but does not provide consistent results for highly variable data such as response times. Fuzzy control is more reliable but converges slowly. The heuristic works well in our prototype system, but it can be difficult to generalize because it requires knowledge of resource bottlenecks and the ability to measure their use. This topic is relevant in the context of a rapidly growing number of web applications and high requirements for the performance and efficiency of web servers. This topic explores how to improve the speed and response time of the Apache web server using various techniques and settings, such as optimizing server settings, using caching, data compression, optimizing request routing, and more. The purpose of this research is to improve the performance and response speed of the Apache web server, which can be useful for developers and administrators of web applications and services. The speed and response time of web servers are critical factors in meeting user needs and achieving business goals for web applications and services. Apache is one of the most widely used web servers in the world, so optimizing the response time of the Apache server is an important task for many developers and administrators of web applications and services. This study will examine various approaches and techniques for optimizing the response time of the Apache web server, including configuring server parameters, using caching, data compression, optimizing request routing, and others. The results of the study can be useful for developers and administrators of web applications and services that deal with the use of the Apache web server. Optimizing Apache server response time can significantly improve the performance and efficiency of web applications and services, which in turn can lead to user satisfaction and business goals.

Постановка проблеми

Проблема полягає в тому, що час відповіді Apache Веб-сервера може бути досить великим в залежності від навантаження та кількості запитів, що надходять до сервера. Це може призвести до погіршення користувацького досвіду та негативно впливати на продуктивність веб-сайту. Оптимізація часу відповіді Apache Веб-сервера може включати різноманітні стратегії, такі як кешування статичних файлів, налаштування рівня журналювання, покращення обробки запитів з використанням різних алгоритмів, налаштування опцій конфігурації сервера та оптимізація бази даних, якщо вона використовується. Результатом оптимізації може бути зменшення часу відповіді сервера та збільшення швидкодії сайту, що може позитивно вплинути на користувацький досвід та рейтинг сайту в пошукових системах.

Аналіз останніх джерел

Метою оптимізації часу відгуку веб-сервера Apache є підвищення продуктивності та ефективності веб-додатків і сервісів, які використовують цей веб-сервер. Для досягнення цієї мети слід розглянути різні підходи і методи оптимізації часу відгуку веб-серверів Apache, такі як конфігурація сервера, використання кешування, стиснення даних, оптимізація маршрутизації запитів і т.д. Оптимізація часу відгуку сервера Apache може значно підвищити продуктивність і ефективність роботи веб-додатків і сервісів, що призведе до задоволення потреб користувачів і досягнення бізнес-цілей.

Об'єктами дослідження для оптимізації часу відгуку веб-сервера Apache є сам веб-сервер, його конфігураційні параметри та взаємодія між клієнтами і серверними додатками. Дослідження повинно охоплювати такі параметри веб-сервера, як налаштування мережі, конфігурацію операційної системи, налаштування серверних програм, обробку запитів та відправку відповідей.

Предметом дослідження в роботі, присвяченій оптимізації часу відгуку веб-сервера Apache, є процес, за допомогою якого сервер відповідає на запити клієнтів, та його параметри. Завданнями дослідження є швидкість обробки запитів, час відгуку, кількість запитів за одиницю часу, кількість одночасних з'єднань та інші параметри, які можуть впливати на час відгуку сервера.

Виклад основного матеріалу

З поширенням систем електронної комерції якість обслуговування, зокрема час відгуку, привертає все більшу увагу. Однією з проблем у цьому контексті є адаптація систем до мінливих робочих навантажень шляхом їхньої оптимізації через онлайн-конфігурацію. У цій статті розглядаються такі підходи до онлайн-оптимізації на веб-серверах Apache, з акцентом на методах, які є менш інвазивними і можуть бути застосовані до широкого спектру конфігурацій і систем.

Розглянемо параметр Apache MaxClients, який визначає кількість запитів, що паралельно обробляються веб-сервером. У таблиці 1 наведено середній час відгуку, виміряний з різними конфігураціями MaxClients для різних робочих навантажень. Тестове середовище, яке використовувалося для збору цих даних, буде описано далі в цьому розділі.

Таблиця 1

Час відгуку для різних навантажень, сек.

MaxClients	Workload	
	Dynamic	Dynamic + Static
150	50	
650	1	15
900	30	2

Часто виявляється, що оптимальне значення MaxClients змінюється залежно від типу сторінок, які відвідує сайт. Оскільки реальні робочі навантаження можуть швидко змінюватися, оптимізація цих важливих параметрів в режимі онлайн може значно їх покращити. [1,2]

У цій статті описано загальний підхід до онлайн-оптимізації часу відгуку широко використовуваного веб-сервера Apache. Суміжною областю досліджень є диференційовані сервіси, які спрямовані на досягнення цілей часу відгуку для різних класів завдань. Автори використовують аналогово-інтегральний контролер для налаштування та диференціації часу відгуку. Для регулювання використання процесора і пам'яті сервера в межах заданого значення QoS використовується схема контролера з декількома входами і декількома виходами, а також описано підхід, який поєднує теорію черг і теорію управління для регулювання часу відгуку. На жаль, проблема управління, яку вирішує цей підхід, дуже відрізняється від проблеми оптимізації. [3,4] По суті, регулювання (наприклад, забезпечення цільових значень часу відгуку для золотих і срібних послуг) визначає, як "розрізати пиріг", а оптимізація (наприклад, мінімізація часу відгуку для класу послуг) - це те, чим вона займається. Було проведено кілька досліджень в області оптимізації онлайн-ресурсів в обчислювальних системах. Це дослідження описує реалізацію Apache, яка керує ресурсами веб-сервера на основі максимізації прибутку (наприклад, відповідь протягом 8 секунд, щоб не відштовхувати користувачів). Хоча результати є цікавими, цей підхід вимагає значних змін у схемі управління ресурсами Apache. Цей підхід враховує максимізацію вигоди в угодах про рівень обслуговування для ферм веб-серверів, але таким чином, що базується на точній аналітичній моделі

керованої системи. Нещодавно був запропонований нечіткий підхід до управління, що дозволяє мінімізувати час відгуку шляхом поєднання схеми управління зі зворотним зв'язком з якісним аналізом впливу параметрів конфігурації на QoS. На жаль, цей підхід має довгий час збіжності. [6]

На рисунку 1 показано запропоновану нами архітектуру. Цільова система (наприклад, Apache) надає один або декілька параметрів конфігурації (наприклад, MaxClients), які динамічно змінюються оптимізатором для оптимізації вимірюваної змінної (наприклад, часу відгуку). По-перше, показується, що MaxClients має висхідний ефект на час відгуку, і тому для визначення оптимального значення MaxClients можна використовувати метод сходження на гору. Досліджуються два оптимізатори, що використовують метод сходження на гору, один з яких базується на методі Ньютона, а інший - на нечіткому управлінні.

Третій метод - це евристичний метод, який використовує спостережуваний взаємозв'язок між завантаженням вузьких місць і мінімізацією часу відгуку. Метод Ньютона працює краще, ніж стандартний метод Apache, але дає непослідовні результати через різний час відгуку. Нечіткий контроль є більш надійним, але збігається повільно. Евристичні методи добре працюють в нашій прототипній системі, але їх важко узагальнити, оскільки вони вимагають знання вузьких місць і вміння вимірювати використання ресурсів. [2]

Apache зазвичай структурується як сукупність робітників, що обробляють HTTP-запити. У нашому дослідженні використовується версія 1.3.19, де працівники є процесами, але ми вважаємо, що основна ідея може бути застосована в широкому сенсі.

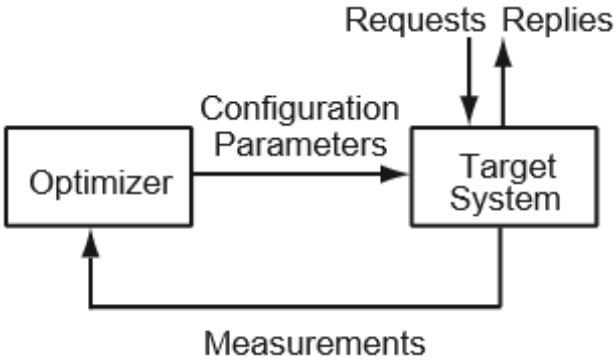


Рис.1 Загальна архітектура для онлайн оптимізації. Цільова система контролюється параметрами конфігурації, які динамічно змінюються оптимізатором у відповідь на зміну робочого навантаження

Потік запитів в Apache показано на рисунку 2. Запит потрапляє до черги прийняття TCP, де він чекає на працівника. Працівники обробляють запит до його завершення, після чого приймають новий запит. Кількість робочих процесів обмежується параметром MaxClients. [5]

Багато висновків у цій статті ґрунтуються на результатах експериментів. Всі експерименти проводилися на сервері Pentium III 600 МГц з 256 МБ оперативної пам'яті та серверним програмним забезпеченням Apache 1.3.19 з Linux 2.4.7 на тій самій машині, підключений до локальної мережі зі швидкістю 100 Мбіт/с; використовувався генератор синтетичного робочого навантаження, що працював на тій самій машині. Розподіл файлів за розмірами такий самий, як і у Webstone 2.5; використовувалися статичні та динамічні навантаження. Запити до динамічних сторінок оброблялися CGI-скриптами у Webstone 2.5. Для пояснення того, як генеруються запити, потрібні додаткові деталі.

Наша модель робочого навантаження представлена у WAGON. [9]

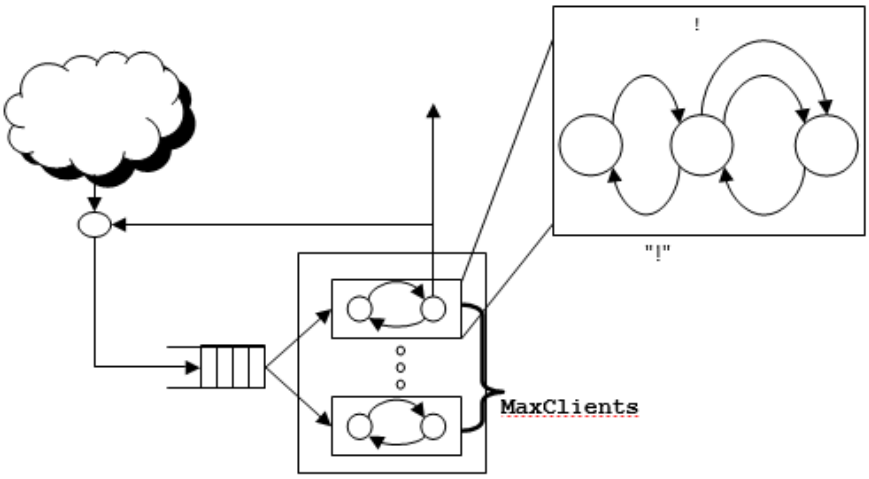


Рис. 2. Архітектура Apache та потік сеансу

Для того, щоб пояснити, як подати запит, потрібні додаткові деталі. Наша модель робочого навантаження базується на моделі WAGON, яка, як було доведено, може бути застосована до широкого спектру веб-запитів. Ця модель організовує робоче навантаження в сеанси (що представляють собою серію взаємодій користувача). Як показано на рисунку 2, сесія складається з декількох запитів до сторінок. Сторінка містить ряд вбудованих об'єктів, параметри яких визначаються довжиною пакета. Отже, параметрами навантаження є частота надходження сеансів, тривалість сеансу (кількість кліків або запитів сторінок у сеансі), довжина пакета (кількість об'єктів у пакеті) та час міркувань (час між послідовними кліками). Таблиця 2 підсумовує параметри, використані в цій роботі, і базується на даних, наданих загальнодоступним веб-сайтом, на основі синтетичного блогу, створеного з використанням моделі WAGON і з використанням httperf для здійснення HTTP/1.1 запитів.[10,11]

Таблиця 2

Параметри робочого навантаження

Parameter Nome	Distribution	Parameters
Session Rate	Exponential	Mean = 0.1
Session Length	Log Normal	Mean = 8, □ = 3
Burst Length	Gaussian	Mean = 7, □ = 3
Think Time (s)	Log Normal	Mean = 30, □ = 30

Показник, який ми вирішили мінімізувати, - це час відгуку на стороні сервера. Вимірювання часу відгуку на стороні клієнта є найбільш значущою метрикою для користувачів, але ця інформація зазвичай недоступна в режимі реального часу на веб-сервері. Крім того, хоча час відгуку на стороні клієнта можна приблизно визначити на основі вимірювань на стороні сервера і моделей TCP, на стороні сервера можна перевірити тільки час відгуку на стороні сервера.[12]

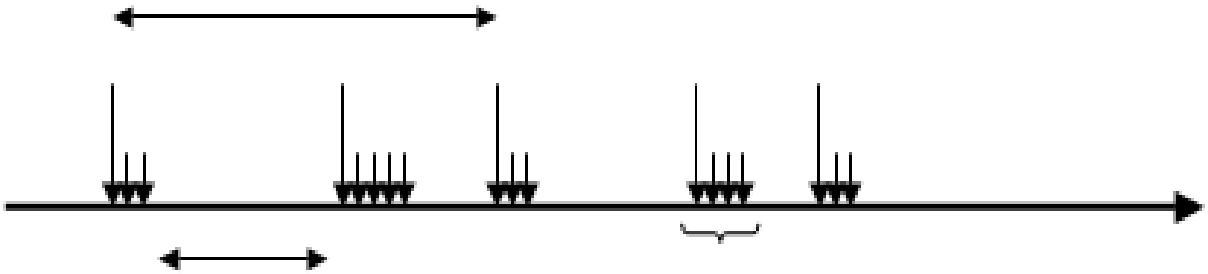


Рис. 3. Елементи моделі робочого навантаження WAGON

(Суцільні та пунктирні лінії позначають два сеанси. Довга стрілка вказує на HTML-текст веб-сторінки, тоді як коротка стрілка вказує на запит до об'єкта веб-сторінки).

У цій статті розглядається час відгуку на стороні сервера, а саме час відгуку сторінки (RT). Цей показник необхідно оцінити, оскільки доставка сторінки може включати декілька запитів. Для цього використовується наступна формула:

$$RT=AQT+BL^{x}ST \quad (1)$$

Час черги прийняття (AQT) походить з ядра Linux і додає інструмент для вимірювання середнього часу очікування з'єднань, що потрапляють в чергу прийняття протягом певного періоду часу. Час обслуговування (Service Time, ST) вимірюється шляхом вимірювання першого та останнього кроків циклу обробки запитів Apache (тобто, момент отримання запиту та відправлення відповіді). Середня кількість вбудованих запитів на сторінку, також відома як довжина пакета, позначається як BL. Її можна обчислити як кількість запитів, оброблених у всіх робочих процесах, поділену на кількість з'єднань, оброблених у черзі хоста TCP, оскільки через постійність з'єднань HTTP/1.1 існуюче TCP-з'єднання залишається відкритим між послідовними HTTP-запитами в пакеті, тільки перший запит повинен встановити TCP-з'єднання і потрапити в чергу хоста TCP. Це призводить до наведеного вище рівняння.

На рисунку 6 показано експериментальні результати Apache з різними налаштуваннями MaxClients. Колом показано середній час відгуку, а вертикальною лінією - середньоквадратичне відхилення. Зверніть увагу, що кругова лінія виглядає ввігнутою у верхній частині цієї кривої. Також ця крива показує, що MaxClients має більш ніж 10-кратний вплив на час відгуку для цього робочого навантаження.

Цю увігнутість можна пояснити з точки зору архітектури Apache: якщо значення MaxClients занадто низьке, буде велика затримка через очікування в черзі отримання TCP. Фактично, черга може переповнитися і запити можуть бути відкинуті. З іншого боку, якщо значення MaxClients занадто велике, ресурси будуть

перевантажені, що також знижує продуктивність. В екстремальних випадках перевищення ліміту кількості процесів може призвести до внутрішніх помилок сервера. Загальним результатом цих факторів є те, що час відгуку є увігнутою вгору функцією MaxClients. По суті, робочий процес можна розглядати як логічні ресурси, необхідні для обробки запиту. Однак для цього потрібні фізичні ресурси, такі як процесор, пам'ять та пропускна здатність вводу/виводу.

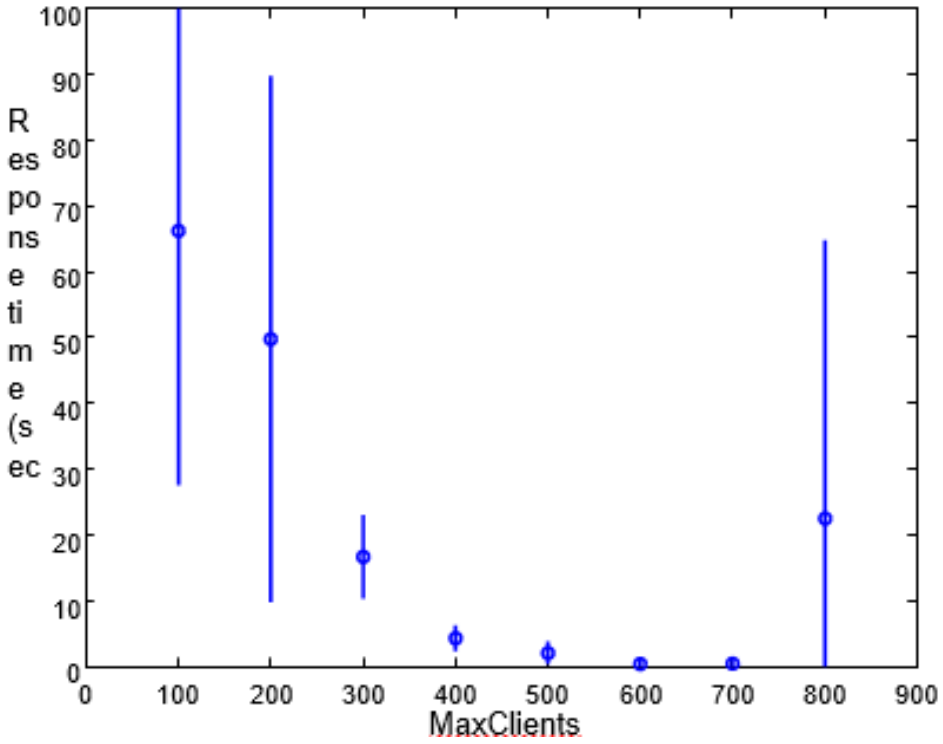


Рис. 4. Вплив MaxClients на час відгуку

Оскільки нас цікавить онлайн-оптимізація, нам потрібно динамічно змінювати MaxClients. Для цього було реалізовано механізм, схожий на Graceful Restart. Повідомляється, що цей механізм дозволяє змінювати MaxClients без зупинки Apache. Для цього потрібен агент в системі Apache. Цей агент також надає такі інструменти, як використання процесора, використання пам'яті та час відгуку на стороні сервера.

Хоча ця стаття зосереджена на MaxClients, ми вважаємо, що використаний підхід має більш широке застосування. Наприклад, зараз ми досліджуємо KeepAliveTimeOut, ще один параметр Apache, який визначає час, протягом якого сеанс може залишатися неактивним, коли використовується постійне з'єднання. Інші системи мають конфігураційні параметри, подібні до MaxClients, такі як кількість потоків сервлетів або потоків EJB на сервері додатків. [13]

Онлайн-оптимізація описує, як можна мінімізувати час відгуку шляхом динамічної адаптації MaxClients, виходячи з того, що час відгуку є увігнутим MaxClients. Розглянуто кілька методів, включаючи метод Ньютона, нечіткий контроль та евристичні методи. Ці методи порівнюються з точки зору мінімізації часу відгуку та швидкості збіжності до фіксованого значення. Перше є бажаним з точки зору покращення якості обслуговування. Другий важливий для адаптації до змін навантаження. Обидва вищезгадані підходи передбачають зворотній зв'язок. Тому MaxClients коригується на основі спостережуваного впливу на час відгуку або інші показники. Альтернативно можна використовувати метод прямого зворотного зв'язку, коли оптимальне значення MaxClients розраховується на основі аналітичної моделі. Цей метод прямого зворотного зв'язку є привабливим, оскільки він дозволяє уникнути проблем, пов'язаних зі стабільністю та швидкістю збіжності. Однак цей метод вимагає аналітичної моделі з вхідними даними, які а) відстежують виміряний час відгуку і б) можуть бути легко оцінені. Модель, розроблен, задовольняє пункт (а), але не (б). Наприклад, швидкість обслуговування μm залежить від кількості серверів, тобто $\mu m = f(m)$, але ми не знаємо цієї функції. Можна розробити модель, яка задовольняє (a) і (b), але за відсутності такої моделі ми звернемося до підходу зі зворотним зв'язком. [16,17]

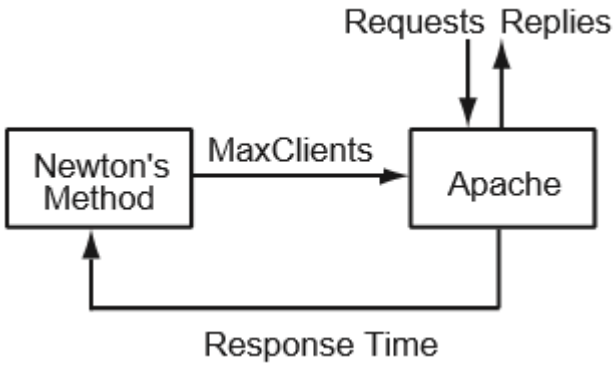


Рис. 5. Архітектура онлайн-оптимізації Apache з використанням методу Ньютона для динамічного налаштування MaxClients на основі вимірювань часу відповіді

На рисунку 5 показано архітектуру, де метод Ньютона використовується для оптимізації під час перегляду Apache в режимі онлайн за допомогою динамічної адаптації MaxClients.[14] Метод Ньютона - це широко використовувана техніка оптимізації, яка використовує нахил функцій, що мінімізуються (наприклад, рисунок 4), для оцінки значення MaxClients, яке мінімізує час відгуку. Наприклад, якщо у - час відгуку, *а x* - MaxClients, можна використати апроксимацію *y = f(x) ≈ a(x-x*)2+b*. Метод Ньютона представлений наступним рівнем.

$$x_{k+1} = x_k - (\nabla^2 f(x_k))^{-1} \nabla f(x_k) \tag{2}$$

де *xk* - значення x у дискретний момент часу *k*. Рівняння (3) починається з початкового значення *x0* при *k= 0*.

Його нахил (друга часткова похідна *f(x)*) обчислюється в точці *xk*; його від'ємне значення вказує на більш крутий напрямок спуску). Значення (другої частинної похідної *f(x)*) вказує на розмір кроку оновлення; введення частинних похідних другого порядку усуває локальний лінійний пошук і може призвести до швидшої збіжності. Однак цей алгоритм більш чутливий до шумів вимірювань.

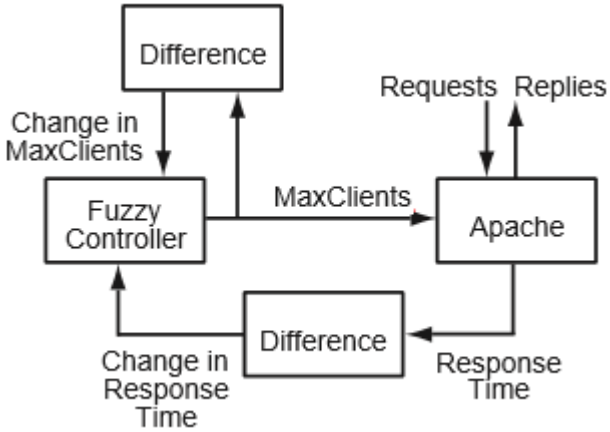


Рис. 6. Архітектура онлайн-оптимізації Apache з використанням Fuzzy Control для динамічного налаштування MaxClients на основі змін MaxClients і часу відповіді

Нечітке керування - це ще один підхід до онлайн-оптимізації. У цьому дослідженні розглядається саме цей підхід. На рисунку 6 показано архітектуру, яка використовує нечіткий контроль для оптимізації під час огляду Apache онлайн шляхом динамічної адаптації MaxClients. Нечіткий контролер використовує зміни в MaxClients і час перегляду для динамічної оптимізації MaxClients.

Поведінка нечіткого контролера керується набором правил IF-THEN. Наприклад, "ЯКЩО зміна MaxClients невелика і зміна часу відгуку незначна, ТО наступна зміна MaxClients незначна". Терміни changein-MaxClients і changein-response-time є лінгвістичними змінними, а neglarge - лінгвістичними значеннями. Лінгвістичні зміни - це природний спосіб впоратися з невизначеністю, яка створює теорію ймовірності в умовах комп'ютерних систем. Лінгвістичні змінні країни у формі, яка відповідає кількості змінних. Системи нечіткого керування забезпечують метод узгодження між числовими та лінгвістичними змінами (так звана нечітка фазифікація та розгортання). Для отримання додаткової інформації про нечітке керування див. Нечітке керування. [15,18]

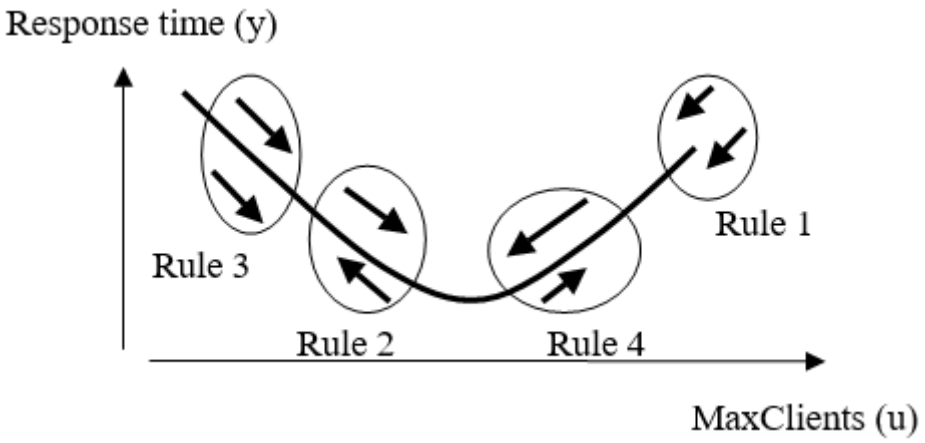


Рис. 7. Ілюстрація нечітких правил

Таблиця 3

Нечіткі правила

Rule	IF	THEN
	change in Max Clients AND change in Response Time	change in next Max Cleints
1	neglarge AND neglarge	neglarge
2	neglarge AND poslarge	poslarge
3	poslarge AND neglarge	poslarge
4	poslarge AND poslarge	poslarge

Оптимізаційну задачу, що розглядається, можна легко виразити у вигляді нечітких правил. Правила в Таблиці 3 організовані наступним чином (також показано на Рисунку 7, де пунктирна стрілка вказує на передумову IF, а суцільна стрілка вказує на наступну частину THEN): частина IF змінює позицію на кривий час огляду для оптимального значення MaxClients. Наприклад, правило 4 розглядає випадок, коли MaxClients збільшується, що збільшує час перегляду. Це означає, що ви знаходитесь праворуч від оптимального значення MaxClients; частина THEN показує, як ви змінюєте MaxClients, де neglarge - це зменшення, а poslarge - збільшення. Правила 1 і 3 вказують на позицію, коли час відгуку зменшується в результаті останньої зміни MaxClients у правильному напрямку. На противагу цьому, правила 2 і 4 стосуються ситуацій, коли час відгуку збільшився в результаті останньої операції, тобто "неправильної операції": кількість змін MaxClients змінюється швидкістю збіжності та ступеня коливання стаціонарного стану.

Очевидно, що якщо крива крутіша, то невеликі зміни в MaxClients є оптимальними. Для більш поступових градієнтів краще використовувати значні зміни. Евристичні методи оптимізації на основі насичення є стійкими до шуму та специфічні функції, що оптимізуються, і керуються прагненням до швидкої збіжності. Зі збільшенням MaxClients і завантаженням процесора на 100% час відгуку мінімізується. Це видно зі статичних і динамічних вимірювань навантаження на рисунках 10 і 11, де середній час очікування в черзі і час обслуговування виміряно для різних значень MaxClients, а час перегляду розраховано за допомогою рівня (1). Для моніторингу використання системних ресурсів також було виміряно використання процесора та пам'яті. на рис. 10 годин перегляду зменшується при збільшенні MaxClients з 200 до 480, після чого завантаження процесора становить приблизно 100%. на рис. 11 цей стан насичення настає, коли MaxClients досягає приблизно 800. [19,20]

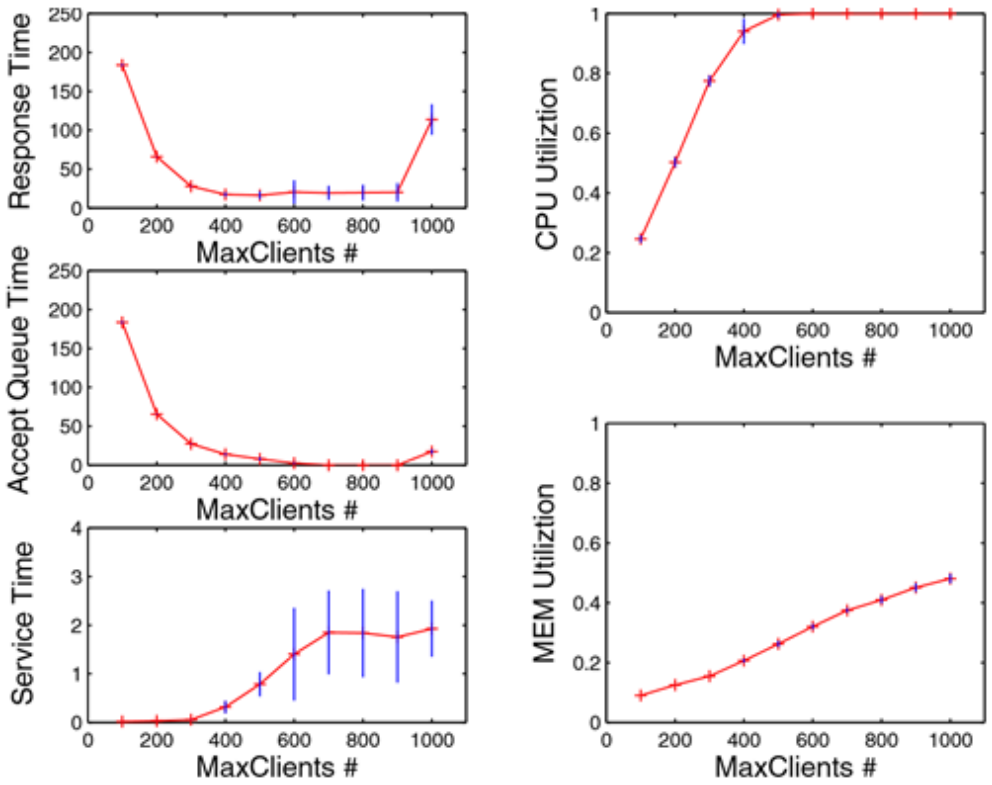


Рис. 8. Вимірювання Apache для динамічного навантаження

Наша інтуїція щодо того, чому це відбувається, полягає в наступному: MaxClients шукає набір логічних ресурсів, які називаються працівниками Apache. Ці логічні ресурси поділяються на фізичні ресурси, такі як процесор, пам'ять і пропускну здатність уводу/виводу. Збільшуючи MaxClients до тих пір, поки фізичні ресурси не будуть насичені, більше логічних ресурсів можуть працювати паралельно.

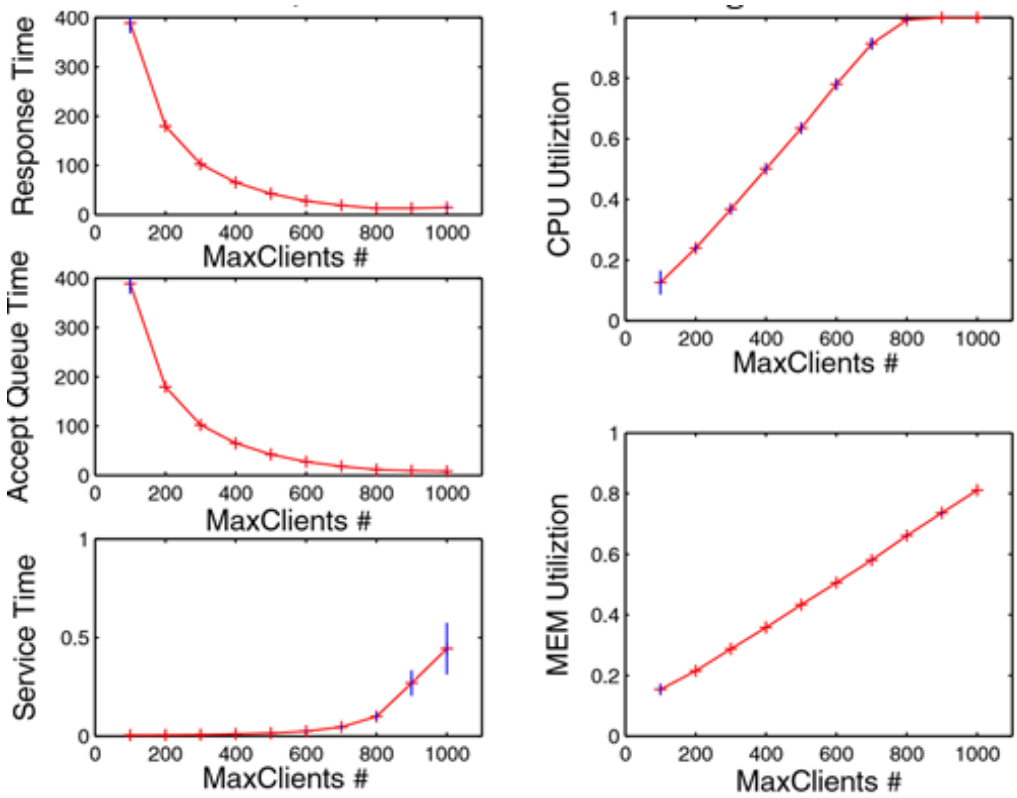


Рис. 9. Вимірювання Apache для статичного навантаження

Однак, як тільки фізичний ресурс насичується, подальше збільшення логічного ресурсу не відбувається збільшення паралелізму. Натомість таке збільшення додає накладні витрати (наприклад, через перемикання процесів).

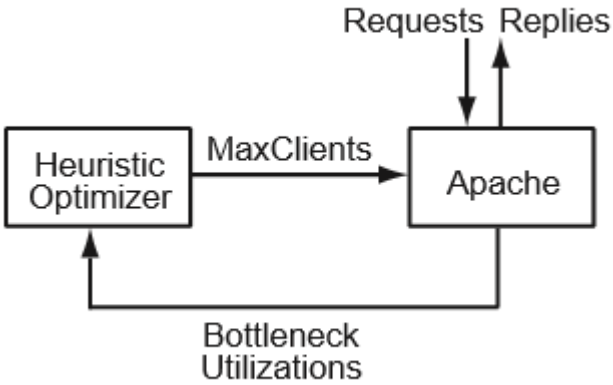


Рис. 10. Архітектура онлайн-оптимізації Apache з використанням евристики на основі насиченості для динамічного коригування MaxClients та змін у використанні вузьких місць

Експериментальні результати порівнює методи онлайн-оптимізації з точки зору мінімального значення досягнутого часу відповіді, швидкості конвергенції та стійкості. На рисунку 11 порівнюється продуктивність методу Ньютона зі схемою Apache за замовчуванням. Фігура містить три підфігури, кожна з яких має два сюжети. На кожному рисунку верхній графік показує траєкторію MaxClients, а нижній — відповідний час відповіді. Зверніть увагу, що метод Ньютона справді покращує час відповіді порівняно зі стандартною схемою Apache. Однак через мінливість часу відгуку різні прогони методу Ньютона можуть дати дуже різні результати. Це пояснюється тим, що отримання матриці Гессе вимагає трьох зразків для обчислення другої похідної на кожному кроці алгоритму. Це збільшує час конвергенції, а також алгоритм є більш чутливим до шуму при вимірюванні часу відгуку. На жаль, час відгуку зазвичай досить шумний, якщо він не усереднений для багатьох зразків (те, що зменшує швидкість, з якою контролер може реагувати на зміни робочого навантаження). Через таку чутливість до шуму ми не розглядаємо метод Ньютона в інших порівняннях.

Далі ми порівнюємо типову схему Apache з нечітким керуванням і евристичним методом, представленим раніше. На рисунку 13 показано результати для динамічного навантаження. (Результати структуровані так само, як на рисунку 11, 12, 13.) Ми бачимо, що евристика збігається зі своїм значенням MaxClients через 2 хвилини. Для нечіткого керування конвергенція займає приблизно 14 хвилин. З іншого боку, нечітке керування досягає меншого часу відгуку. На рисунку 14 показано результати для статичного навантаження. Знову ж таки, евристика сходиться швидше, ніж нечітке керування.

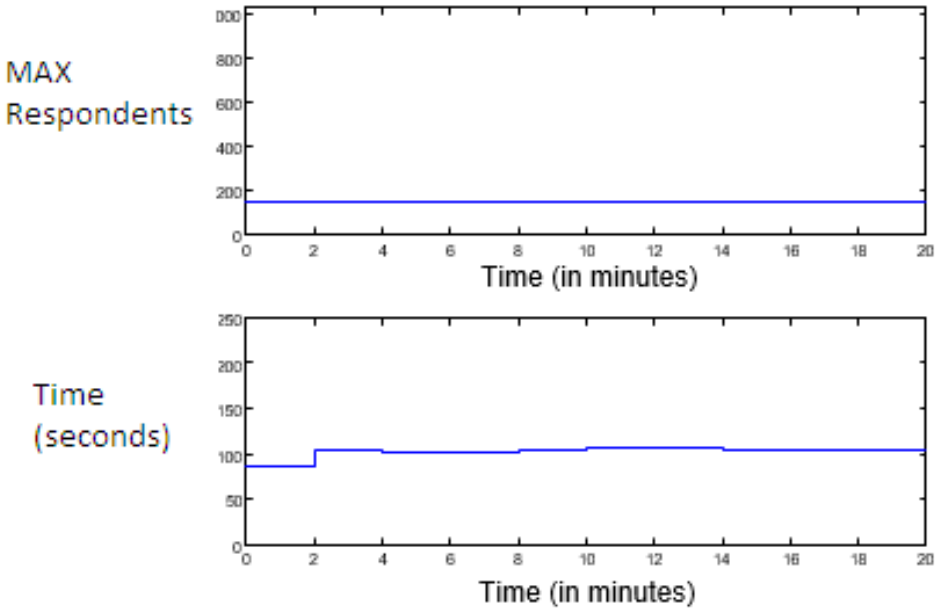


Рис. 11. Типова схема керування Apache

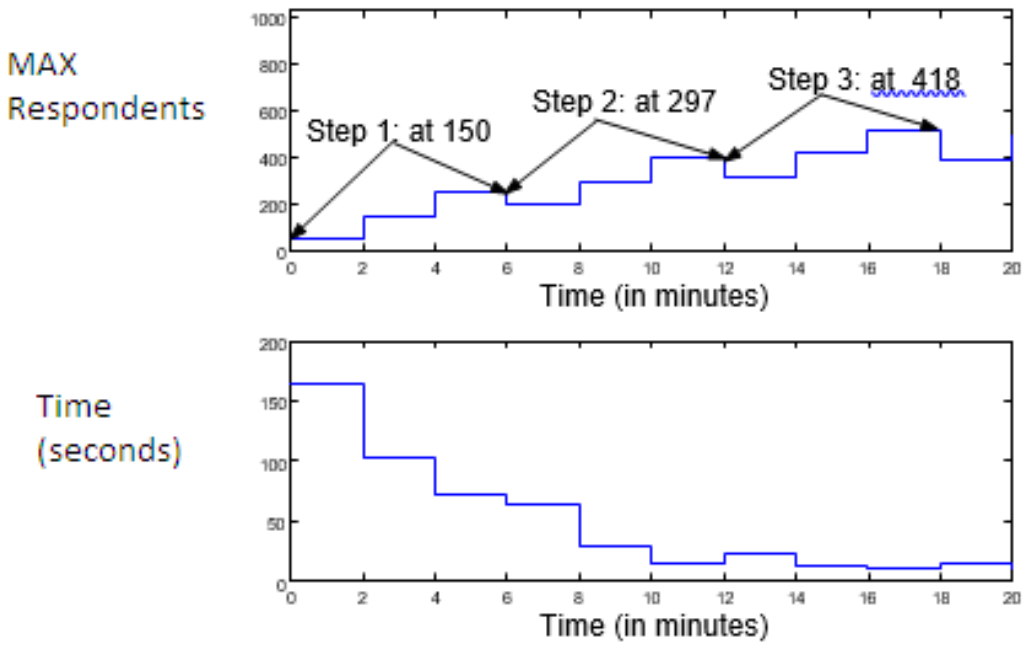


Рис. 12. Перший запуск

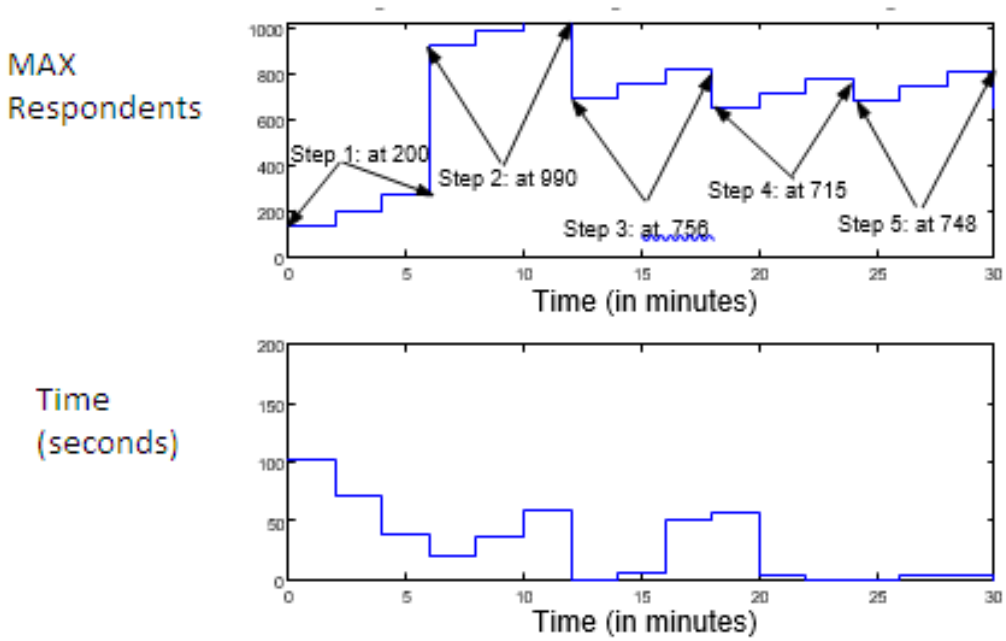


Рис. 13. Другий запуск

Порівняння стандартного методу Apache та методу Ньютона при динамічному навантаженні; метод Ньютона, безумовно, досягає меншого часу відгуку, але його поведінка є непослідовною через мінливість часу відгуку. Тут, однак, стаціонарний час відгуку, досягнутий евристичним методом, майже дорівнює часу відгуку, досягнутому не чітким керуванням.

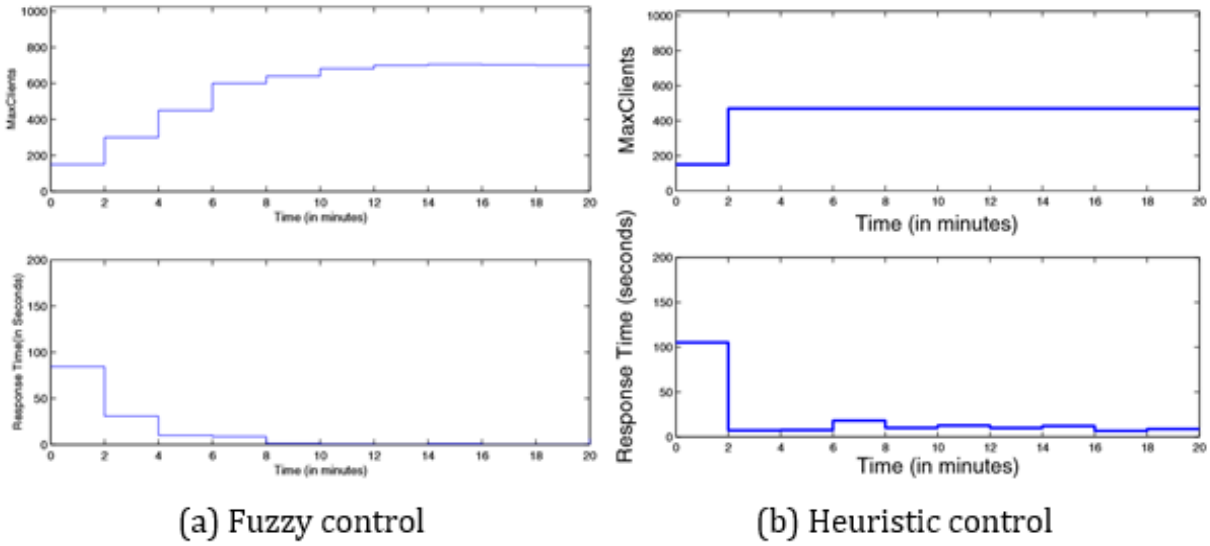


Рис. 14. Порівняння продуктивності схем онлайн-оптимізації при динамічному навантаженні

У таблиці 4 наведено якісне порівняння чотирьох сформованих систем. Система Apache обробляє точки мінімізації зору за час відгуку головним чином тому, що вона не була розроблена для цієї мети. Ньютонівський метод є кращим у цьому відношенні, але збігається повно і має погану завадостійкість. Нечіткий контроль є дуже стійким, після чого він мало припущений, але збігається повно. Наші евристичні методи забезпечують хорошу оптимізацію та швидку збіжність, але припущення про перевантаження ресурсів не завжди справджуються.

Таблиця 4

Якісні порівняння методик

	Optimization	**Speed**	**Robustness**
Default Apache	Poor	Fast	Good
Newton's Method	Fair	Slow	Poor
Fuzzy Control	Good	Slow	Good
Heuristic	Good	Fast	Fair

Висновки

У цій статті досліджено підхід до веб-оптимізації параметрів конфігурації веб-сервера Apache, зосереджуючись на методах, які є менш інвазивними і можуть бути застосовані до широкого спектру параметрів і систем. Ми зосереджуємося на параметрі MaxClients, який контролює максимальну кількість клієнтів. По-перше, ми показуємо, що MaxClients має висхідний ефект на час відгуку і що для визначення оптимального значення MaxClients можна використовувати методи сходження. Це було продемонстровано за допомогою вимірювань та аналітичного моделювання. Основна інтуїція полягає в тому, що MaxClients контролює компроміс між затримками в черзі отримання TCP і затримками через боротьбу за ресурси операційної системи. Нами досліджено два оптимізатори, що використовують метод сходження на гору (один заснований на методі Ньютона, а інший - на нечіткому управлінні); третій метод є евристичним, який використовує взаємозв'язок між завантаженням вузьких місць і мінімізацією часу відгуку. В обох випадках веб-оптимізація показала, що скорочення часу відгуку було більш ніж у 10 разів порівняно з використанням статичних значень за замовчуванням. Компроміси між онлайн-системами полягають у наступному. Метод Ньютона добре відомий, але він не забезпечує послідовних результатів з дуже мінливими даними, такими як час відгуку. Нечіткий контроль є більш надійним, але збігається повільно. Евристичний метод добре працює в нашій прототипній системі, але його може бути важко узагальнити, оскільки він вимагає знання вузьких місць і здатності вимірювати використання ресурсів. Майбутні виклики включають наступне. По-перше, оптимізація декількох параметрів одночасно. Це може включати інші параметри, які можна динамічно налаштовувати в Apache, такі як KeepAliveTimeOut (який визначає, як довго TCP-з'єднання повинно залишатися активним для клієнта, перш ніж воно розірветься). По-друге, хоча ми вивчали налаштування продуктивності веб-серверів Apache, існують більш складні системи, такі як сервери баз даних і сервери додатків, де онлайн-оптимізація може мати більш драматичний вплив на час відгуку кінцевого користувача.

Література

1. Y. Diao, J. L. Hellerstein, and S. Parekh, “Optimizing quality of service using fuzzy control,” in Proceedings of Distributed Systems Operations and Management, 2002.

2. Apache Software Foundation. http://www.apache.org.

3. Y. Diao, J. L. Hellerstein, and S. Parekh, “A business-oriented approach to the design of feedback loops for performance management,” in Proceedings of Distributed Systems Operations and Management, 2001.

4. C. Lu, T. Abdelzaher, J. Stankovic, and S. Son, “A feedback control approach forguaranteeing relative delays in web servers,” in Proceedings of the IEEE Real-Time Technology and Applications Symposium, 2001.

5. Y. Diao, N. Gandhi, J. L. Hellerstein, S. Parekh, and D. M. Tilbury, “Using MIMOfeedback control to enforce policies for interrelated metrics with application to the Apache web server,” in Proceedings of Network Operations and Management, 2002.

6. L. Sha, X. Liu, Y. Lu, and T. Abdelzaher, “Queuing model based network serverperformance control,” in Proceedings of the IEEE Real-Time Systems Symposium, 2002.

7. D. Menasce, V. Almeida, R. Fonsece, and M. Mendes, “Busines oriented resourcemanagement policies for e-commerce servers,” Performance Evaluation, vol. 42, pp. 223–239, Oct. 2000.

8. Z. Liu, M. S. Squillante, and J. L. Wolf, “On maximizing service-level-agreementprofits,” in Proceedings of the ACM Conference on Electronic Commerce (EC’01), 2001.

9. Mindcraft, “Webstone 2.5 web server benchmark,” 1998. http://www.mindcraft.com/ webstone/.

10. Z. Liu, N. Niclausse, C. Jalpa-Villanueva, and S. Barbier, “Traffic model and performance evaluation of web servers,” Tech. Rep. 3840, INRIA, Dec. 1999.

11. D. Mosberger and T. Jin, “httperf: A tool for measuring web server performance,”in First Workshop on Internet Server Performance (WISP 98), pp. 59—67, ACM, June 1998.

12. D. P. Olshefski, J. Nieh, and D. Agrawal, “Inferring client response time at the webserver,” in Proceedings of the ACM SIGMETRICS Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems, 2002.

13. S. S. Lavenberg, ed., Computer performance modeling handbook. Orlando, FL: Academic Press, INC, 1983.

14. L. Perssini, The Mathematics of Nonlinear Programming. Springer-Verlag, 1988.

15. K. M. Passino and S. Yurkovich, Fuzzy Control. Menlo Park, CA: Addison Wesley Longman, 1998.

16. Зайцев Є.О., Антоненко А.В., Березниченко В.О., Закусило С.А. Smart засоби визначення аварійних станів у розподільних електричних мережах міст. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки, 2022, (5).

17. Лемешко А.В., Антоненко А.В., Цвик О.С. Аналіз і особливості програмного забезпечення для контролю трафіку. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки, 2023, (1)

18. Лемешко А.В., Антоненко А.В., Балвак А.А., Новіченко Є.О. Актуальні засади створення алгоритмів обробки інформації для логістичних центрів. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки, 2023 (1)

19. Твердохліб А.О., Коротін Д.С., Антоненко А.В. Ефективність функціонування комп’ютерних систем при використанні технології блокчейн і баз данних. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки, 2022, (6)

20. Lei Song, Biswanath Mukherjee.On the Study of Multiple Backups and Primary-Backup Link Sharing for Dynamic Service Provisioning in Survivable WDM Mesh Networks / IEEE Journal on selected areas in Telecommunication, 2008. Vol. 26, No 6. pp. 84–91

References

1. Y. Diao, J. L. Hellerstein, and S. Parekh, “Optimizing quality of service using fuzzy control,” in Proceedings of Distributed Systems Operations and Management, 2002.

2. Apache Software Foundation. http://www.apache.org.

3. Y. Diao, J. L. Hellerstein, and S. Parekh, “A business-oriented approach to the design of feedback loops for performance management,” in Proceedings of Distributed Systems Operations and Management, 2001.

4. C. Lu, T. Abdelzaher, J. Stankovic, and S. Son, “A feedback control approach forguaranteeing relative delays in web servers,” in Proceedings of the IEEE Real-Time Technology and Applications Symposium, 2001.

5. Y. Diao, N. Gandhi, J. L. Hellerstein, S. Parekh, and D. M. Tilbury, “Using MIMOfeedback control to enforce policies for interrelated metrics with application to the Apache web server,” in Proceedings of Network Operations and Management, 2002.

6. L. Sha, X. Liu, Y. Lu, and T. Abdelzaher, “Queuing model based network serverperformance control,” in Proceedings of the IEEE Real-Time Systems Symposium, 2002.

7. D. Menasce, V. Almeida, R. Fonsece, and M. Mendes, “Busines oriented resourcemanagement policies for e-commerce servers,” Performance Evaluation, vol. 42, pp. 223–239, Oct. 2000.

8. Z. Liu, M. S. Squillante, and J. L. Wolf, “On maximizing service-level-agreementprofits,” in Proceedings of the ACM Conference on Electronic Commerce (EC’01), 2001.

9. Mindcraft, “Webstone 2.5 web server benchmark,” 1998. http://www.mindcraft.com/ webstone/.

10. Z. Liu, N. Niclausse, C. Jalpa-Villanueva, and S. Barbier, “Traffic model and performance evaluation of web servers,” Tech. Rep. 3840, INRIA, Dec. 1999.

11. D. Mosberger and T. Jin, “httperf: A tool for measuring web server performance,”in First Workshop on Internet Server Performance (WISP 98), pp. 59—67, ACM, June 1998.

12. D. P. Olshefski, J. Nieh, and D. Agrawal, “Inferring client response time at the webserver,” in Proceedings of the ACM SIGMETRICS Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems, 2002.

13. S. S. Lavenberg, ed., Computer performance modeling handbook. Orlando, FL: Academic Press, INC, 1983.

14. L. Perssini, The Mathematics of Nonlinear Programming. Springer-Verlag, 1988.

15. K. M. Passino and S. Yurkovich, Fuzzy Control. Menlo Park, CA: Addison Wesley Longman, 1998.

16. Zaitsev Ye.O., Antonenko A.V., Bereznychenko V.O., Zakusylo S.A. Smart zasoby vyznachennia avariinykh staniv u

rozpodilnykh elektrychnykh merezhakh mist. Tavriiskyi naukovyi visnyk. Seriia: Tekhnichni nauky, 2022, (5).

17. Lemeshko A.V., Antonenko A.V., Tsvyk O.S. Analiz i osoblyvosti prohramnoho zabezpechennia dlia kontroliu trafiku. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Ceriia: Tekhnichni nauky, 2023, (1)

18. Lemeshko A.V., Antonenko A.V., Balvak A.A., Novichenko Ye.O. Aktualni zasady stvorennia alhorytmiv obrobky informatsii dlia lohistychnykh tsentriv. Tavriiskyi naukovyi visnyk. Seriia: Tekhnichni nauky, 2023 (1)

19 Tverdokhlib A.O., Korotin D.S., Antonenko A.V. Efektyvnist funktsionuvannia kompiuternykh system pry vykorystanni tekhnolohii blokchein i baz dannykh. Tavriiskyi naukovyi visnyk. Seriia: Tekhnichni nauky, 2022, (6)

20. Lei Song (2008) Biswanath Mukherjee. On the Study of Multiple Backups and Primary-Backup Link Sharing for Dynamic Service Provisioning in Survivable WDM Mesh Networks / IEEE Journal on selected areas in Telecommunication. Vol. 26, No 6. pp. 84–91.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-202-212
УДК 004:94:53:616-073

МАРЦЕНЮК ВАСИЛЬ
Університет в Бєльсько-Бялій, Польща
https://orcid.org/0000-0001-5622-1038
e-mail: vmartsenyuk@ath.bielsko.pl
АНДРУЩАК ІГОР
Луцький національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0002-8751-4420
e-mail: 9000@lntu.edu.ua
КІТ НАТАЛІЯ
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
https://orcid.org/0000-0002-9096-4393
e-mail: natkakooo@gmail.com
КРАВЧИК ЮРІЙ
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0002-2780-5605
e-mail: yurii_kravchyk@khmnu.edu.ua
СВЕРСТЮК АНДРІЙ
Тернопільський національний медичний університет імені І.Я. Горбачевського
https://orcid.org/0000-0001-8644-0776
e-mail: sverstyuk@tdmu.edu.ua
ПАЛЯНИЦЯ ЮРІЙ
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
https://orcid.org/0000-0002-8710-953X
e-mail: palyanytsa_y@tntu.edu.ua

ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЧИСЕЛЬНОГО АНАЛІЗУ МОДЕЛЮВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНИХ БІОСЕНСОРНИХ СИСТЕМ

У статті проведено порівняння результатів чисельного моделювання математичних моделей кіберфізичних біосенсорних систем з використанням решітчастих різницевих рівнянь із запізненням на гексагональній та прямокутній решітках. Основну увагу приділено математичному опису динаміки дискретної популяції в поєднанні з динамічною логікою досліджуваних моделей. Для моделювання взаємодії антиген-антитіло в гексагональних і прямокутних біопікселях запропоновано решітчасті різницеві рівняння із запізненням. Аналогічно до явища дифузії розглянуті просторові оператори для моделювання взаємодії між біопікселями. У роботі наведено порівняння результатів чисельного моделювання процесів, які відбуваються у біопікселях кіберфізичних біосенсорних систем у вигляді зображення фазових площин та решітчастих зображень ймовірності зв'язків антигенів з антитілами. На основі отриманих експериментальних результатів проведено порівняльний аналіз стійкості математичних моделей з використанням решітчастих різницевих рівнянь на гексагональній та прямокутній решітках для кіберфізичних біосенсорних.

Ключові слова: різницеві рівняння, прямокутна решітка, гексагональна решітка, кіберфізична біосенсорна система, стійкість моделі.

VASYL MARTSENYUK
University of Bielsko-Biala, Poland
IGOR ANDRUSHCHAK
Lutsk National Technical University
NATALIIA KOZODII
Ternopil Ivan Pului National Technical University
YURII KRAVCHYK
Khmelnytskyi National University
ANDRIY SVERSTIUK
Horbachevsky Ternopil National Medical University
YURI PALANIZA
Ternopil Ivan Pului National Technical University

COMPARISON OF RESULTS OF NUMERICAL ANALYSIS OF SIMULATION OF CYBERPHYSICAL BIOSENSOR SYSTEMS

The article compares the results of numerical modeling of mathematical models of cyber-physical biosensor systems using lattice difference equations with time delay on hexagonal and rectangular lattices. The main attention is paid to the mathematical description of the dynamics of a discrete population in combination with the dynamic logic of the studied models. Lattice difference equations with delay are proposed for modeling the antigen-antibody interaction in hexagonal and rectangular biopixels. Similar to the diffusion phenomenon, spatial operators are considered to model the interaction between biopixels. The paper compares the results of numerical modeling of processes occurring in biopixels of cyberphysical biosensor systems in the form of phase plane images and lattice images of the probability of antigen-antibody bonds. Based on the obtained experimental results, a comparative analysis of the stability of mathematical models was carried out using lattice difference equations on hexagonal and rectangular lattices for cyberphysical biosensors.

Keywords: difference equations, rectangular lattice, hexagonal lattice, cyber-physical biosensor systems, stability of the model

Вступ. Стрімкий розвиток науки та техніки сприяє розробці кіберфізичних систем (КФС) для різних сфер людської діяльності. КФС розглядається як інтелектуальна система, яка об'єднує фізичні об'єкти, зовнішні пристрої, процесори, мережеве обладнання. Основним призначенням КФС є моніторинг поведінки фізичних об’єктів як компонентів таких систем у режимі реального часу. Це системи, в яких кібернетичні засоби (вимірювальні, обчислювальні, комунікаційні, керуючі, виконавчі) взаємодіють з фізичними процесами в довільних об’єктах [1].

Кіберфізичні системи ототожнюються з проявом четвертої індустріальної революції, що відбувається в сучасному світі [2]. Таким чином, існує також фізична можливість використання технологій «Інтернету речей» [3], де необхідно використовувати сигнали від давачів та вимірювальних пристроїв. Тому в літературі з’являється все більше публікацій [4], які привертають увагу до сучасних концепцій і пропонують інноваційні рішення. А. Платцер запропонував підхід, заснований на «динамічній логіці», який описує та аналізує кіберфізичні системи [5, 6]. У цих роботах використовуються гібридні програми (ГП) на простій мові програмування з простою семантикою. ГП дозволяють програмісту звертатися безпосередньо до фактичних значень змінних, які представляють реальні значення та визначають їх динаміку.

Із зростанням темпу життя та потреби у більш точних методах моніторингу різних параметрів у науці та промисловості зростає інтерес до кіберфізичних систем та біосенсорів як їх компонентів. Біосенсори є альтернативою добре відомим методам вимірювання, які характеризуються низькою селективністю, високою вартістю, поганою стабільністю, повільною реакцією та часто можуть виконуватися лише висококваліфікованим персоналом. Це нове покоління сенсорів, які використовують біологічний матеріал у конструкції, яка забезпечує дуже високу селективність і дозволяє швидко і просто вимірювати [7, 8].

Важливим етапом проектування кіберфізичних біосенсорних систем є розробка та дослідження їх математичних моделей, які адекватно відображають важливі аспекти просторової структури біопікселів, важливі з точки зору завдань дослідження. Адже від якості моделі біосенсора залежить ефективність методів його обробки в вимірювальних системах. Проектування кіберфізичних біосенсорних систем передбачає підбір параметрів, які б забезпечували стабільність їх роботи. Таке завдання, зокрема, постає при розробці біосенсора, який включає дво- і тривимірний масив біопікселів і полягає в пошуку відповідних параметрів, що описують біологічні та дифузійні процеси. Цю проблему можна вирішити шляхом розробки та дослідження стійкості відповідної кіберфізичної моделі біосенсорної системи на гексагональній та прямокутній решітках за допомогою різницевих рівнянь [9, 10].

Кіберфізична біосенсорна система. Розробка функціональної схеми дискретної динаміки КФБСС на гексагональній решітці з використанням решітчастих різницевих рівнянь із запізненням

Кіберфізична біосенсорна система (КФБСС). Визначення терміну «Кіберфізична сенсорна система (КФСС)» наведено в [6]. Це визначення було введено для промислового використання датчиків. Загальне визначення КФБСС передбачає «вищий ступінь поєднання, спільного використання систем, можливість використання вбудованих систем у сфері автоматизації та відповідність існуючим стандартам». Розглянутий підхід використовується для характеристики КФБСС, функціональна схема якого представлена на рис. 1 і дозволяє виконати чисельне моделювання досліджуваної системи.

Відповідно до [6] визначення та схеми для КФБСС використовуються для визначення КФС. КФБСС перетворює фізично виміряні імунологічні параметри в цифрову інформацію, що дозволяє їм обробляти сигнали в часі за допомогою певних алгоритмів. Також існує взаємодія з власними можливостями, вимогами, внутрішніми даними та внутрішніми завданнями в плані розподілу на той самий або вищий рівень ієрархії.

Функціональна схема КФБСС наведено на рис. 1.

В основі КБФСС (зовнішній прямокутник на рис. 1) використовується концепція КФС з урахуванням особливостей датчиків інтелектуального зображення. За допомогою додаткових навичок (пунктирна лінія на рис. 1) датчик поширюється на КФСС, що дозволяє отримати більше діагностичної інформації про досліджуваний об’єкт.

У біосенсорних пристроях використовуються чотири основних типи детектування: електрохімічне (потенціометричне, амперометричне або кондуктивне (ємнісне), оптичне та термометричне [10]). Усі типи сенсорів можна використовувати як прямі (не марковані) або непрямі (марковані) біосенсори чи імуносенсори. Прямі датчики здатні виявляти фізичні зміни під час формування імунного комплексу, тоді як непрямі використовують різні рівні згенерованого сигналу, що забезпечує більш розумне та універсальне виявлення в вимірювальних системах.

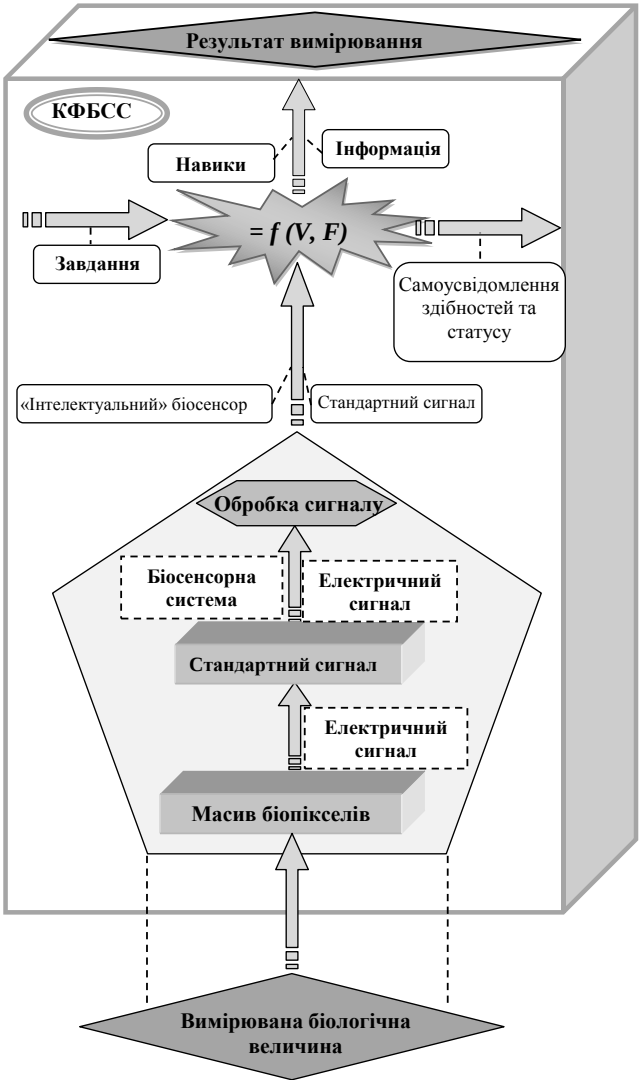


Рис. 1. Функціональна схема КФБСС

КФБСС відноситься до високоінтелектуальних інформаційних систем. Вони використовують доступний набір інтерфейсів, які дозволяють отримувати швидку та точну інформацію про стан і дані внутрішньої системи, які повинні бути доступні іншим КФС. Відповідно до [11] КФБСС як система, що самоорганізовується, потребує комплексного знання власної динамічної структури та інфраструктури загальної системи. Для цього необхідно визначити типи біосенсорних пристроїв з урахуванням їх функціонального застосування. Наприклад, біосенсори можна використовувати для оцінки критичних станів при серцево-судинних захворюваннях, значень інсуліну при вимірюванні рівня глюкози в крові та для визначення кількісних параметрів у деяких фармацевтичних препаратах.

У статті [11] запропоновано загальну структуру КФБСС. При застосуванні цієї схеми у випадку біосенсорів можна виділити три напрямки: загальні відомості про біосенсор; вимірювання біологічних параметрів і навичок щодо перетворення одиниць і калібрування; взаємодія з іншими біосенсорами. Таким чином описано певні методи, які дозволяють описати біосенсор. При дослідженні КФБСС. використовувалася мова програмування R. Незважаючи на велику різноманітність мов програмування, які використовуються при розробці КФС(Assembly, C, C++, D, Java, JavaScript, Python, Ada тощо [12]), мова R широко використовується в багатьох галузях, пов’язаних із машинним навчанням. та візуалізація даних.

Дискретна динаміка КБФСС на гексагональній решітці з використанням різницевих рівнянь решітки із запізненням. Для динаміки КФБСС використовується математичний опис за допомогою нелінійних різницевих рівнянь із запізненням [10].

Розглянуто модель біосенсора на основі гексагональної решітки. При цьому для нумерації біопікселів (i, j, k), $i, j, k = \overline{-N, N}$, $i + j + k = 0$ використовується кубічна система координат [12].

Нехай $V_{i,j,k}(t)$ – концентрація антигенів, $F_{i,j,k}(t)$ – концентрація антитіл в біопікселі (i, j, k); $i, j, k = \overline{-N, N}$, $i + j + k = 0$.

Модель ґрунтується на таких біологічних припущеннях для довільного біопікселя (i, j, k).

1. Антигени нейтралізує антитілами з деякою ймовірнісною швидкістю $\gamma > 0$.

2. Припускається, що коли колонії антитіл відсутні, колонії антигенів регулюються логістичним рівнянням із запізненням:

$$V_{i,j,k}(n+1) = (1+\beta-\delta_v V_{i,j,k}(n-r))V_{i,j,k}(n), \quad (1)$$

де β і δ_v – додатні числа і $r \geq 0$ середня затримка негативної відповіді колоній антигенів.

3. Введено константу народжуваності $\beta > 0$ для популяції антигенів.
4. Антигени з певною ймовірністю нейтралізуються антитілами $\gamma > 0$
5. Популяція антигенів прагне до деякої межі насичення зі швидкістю $\delta_v > 0$.
6. Маємо деяку дифузію антигенів з шести сусідніх пікселів $(i+1, j, k-1)$, $(i+1, j-1, k)$, $(i, j-1, k+1)$, $(i-1, j, k+1)$, $(i-1, j+1, k)$, $(i, j+1, k-1)$ (рис. 2) із швидкістю дифузії $D\Delta^2$, де $D > 0$ і $\Delta > 0$ є відстанню між пікселями.
7. Маємо деяку постійну смертності антитіл $\mu_f > 0$.
8. В результаті імунної відповіді збільшується щільність антитіл з ймовірнісної швидкістю $\eta\gamma$.
9. Популяція антитіл прагне до деякого рівня насичення зі швидкістю $\delta_f > 0$.
10. Імунна відповідь настає з деякою постійною запізненням в часі $r > 0$.
11. Розглянуто поверхневу дифузію (рух молекул по поверхні твердого тіла для іммобілізованих молекул).
12. Визначення умовного оператора дифузії використовується у випадку поверхневої дифузії з коефіцієнтом $n \in (0,1]$ дифузійного дисбалансу. Це означає, що лише частина піксельних антигенів (i, j) може бути включена в процес дифузії до будь-якого сусіднього пікселя через поверхневу дифузію.
13. Зв'язування антигену з антитілами призводить до флуоресценції пікселя. Вважається, що інтенсивність флуоресценції пропорційна числу контактів між антигенами і антитілами, тобто $k_{fl}V_{i,j,k}(n)F_{i,j,k}(n)$. Також припускається, що піксель (i, j) знаходиться у стані флуоресценції, якщо $k_{fl}V_{i,j,k}(n)F_{i,j,k}(n) \geq \Theta_{fl}$, де $\Theta_{fl} > 0$ є деяким пороговим значенням зв'язування, при якому відбувається явище флуоресценції.
14. Вихідний сигнал $s(n)$ пропорційний кількості пікселів у стані флуоресценції.
15. Інформація про кількість біологічних вимірювань значень розрахована на основі вихідного сигналу.

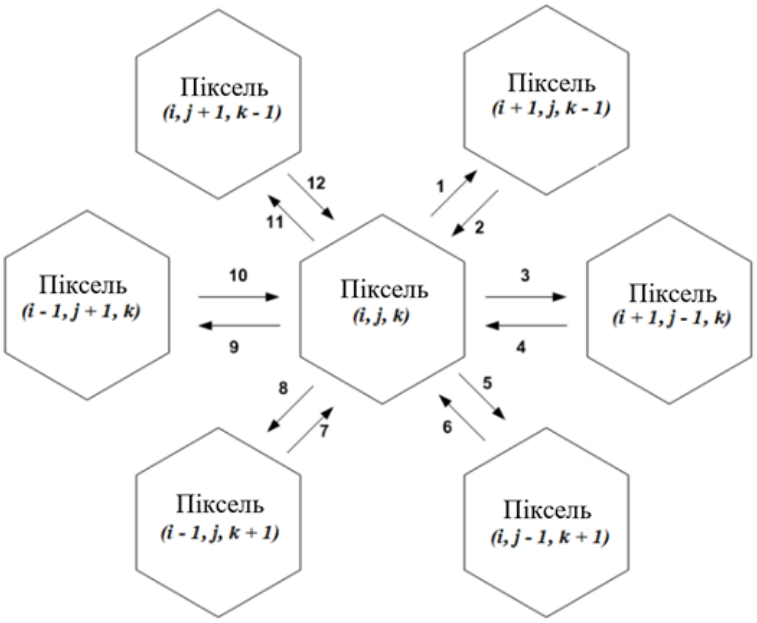


Рис. 2. Гексагональна решітка, яка пов'язує шість сусідніх пікселів в моделі з використанням кубічних координат

$$\mathbf{1, 3, 5, 8, 9, 11}\left(\frac{D}{\Delta^2}\nu_{i,j,k}(t)\right); \mathbf{2}\left(\frac{D}{\Delta^2}\nu_{i+1,j,k-1}(t)\right); \mathbf{4}\left(\frac{D}{\Delta^2}\nu_{i+1,j-1,k}(t)\right);$$

$$\mathbf{6}\left(\frac{D}{\Delta^2}\nu_{i,j-1,k+1}(t)\right); \mathbf{7}\left(\frac{D}{\Delta^2}\nu_{i-1,j,k+1}(t)\right); \mathbf{10}\left(\frac{D}{\Delta^2}\nu_{i-1,j+1,k}(t)\right); \mathbf{12}\left(\frac{D}{\Delta^2}\nu_{i,j+1,k-1}(t)\right).$$

На основі цього розглянуто дуже просту конструкцію моделі антиген-антитіло із запізненням для гексагонального масиву біопікселів, яка ґрунтується на добре відомій моделі Марчука [13-15] і використовує просторовий оператор $\hat{S}$, запропонований в [16].

$$\begin{aligned} V_{i,j,k}(n+1) &= V_{i,j,k}(n)\exp\left\{\beta - \gamma F_{i,j,k}(n-r) - \delta_{\upsilon} V_{i,j,k}(n-r)\right\} + \hat{S}\left\{V_{i,j,k}(n)\right\} \\ F_{i,j,k}(n+1) &= F_{i,j,k}(n)\exp\left\{-\mu_f + \eta\gamma V_{i,j,k}(n-r) - \delta_f F_{i,j,k}(n)\right\} \end{aligned}, \quad (2)$$

де $\hat{S}\left\{V_{i,j,k}\right\}$ є дискретною дифузією для просторового оператора $\hat{S}$.

$$\hat{S}\left\{V_{i,j,k}\right\} = \begin{cases} D\Delta^{-2}\left[V_{i+1,j,k-1} + V_{i+1,j-1,k} + V_{i,j-1,k+1} + V_{i-1,j,k+1} + V_{i-1,j+1,k} + V_{i,j+1,k-1} - 6nV_{i,j,k}\right] \\ i,j,k \in \overline{-N+1, N-1}, \quad i+j+k=0. \end{cases} \quad (3)$$

Дискретна динаміка КФБСС на прямокутній решітці з використанням різницевих рівнянь решітки. Прямокутна решітка, яка пов'язує чотири сусідні пікселі в моделі КФБСС на прямокутній решітці з використанням різницевих рівнянь наведена на рис. 3.

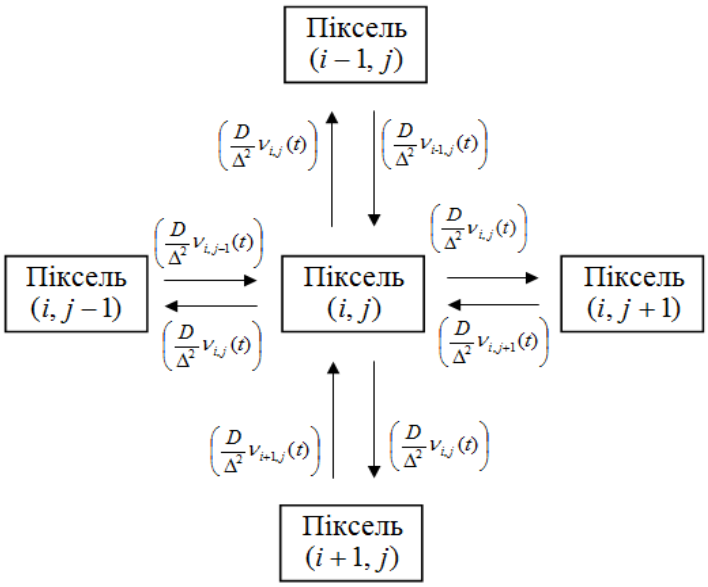


Рис. 3. Прямокутна решітка, яка пов'язує чотири сусідні пікселі в моделі біосенсора

Розглянемо просту конкуруючу модель антиген-антитіло для двовимірного біопіксельного масиву, яка була запропонована та досліджена в роботі [17].

$$\begin{aligned} \frac{dV_{i,j}(t)}{dt} &= (\beta - \gamma F_{i,j}(t-\tau) - \delta_{\upsilon} V_{i,j}(t-\tau))V_{i,j}(t) + \hat{S}\left\{V_{i,j}\right\} \\ \frac{dF_{i,j}(t)}{dt} &= (-\mu_f + \eta\gamma V_{i,j}(t-\tau) - \delta_f F_{i,j}(t))F_{i,j}(t), \quad t > 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Модель (4) задана початковими функціями (5)

$$\begin{aligned} &V_{i,j}(t) = V^0_{i,j}(t) \geq 0, \quad F_{i,j}(t) = F^0_{i,j}(t) \geq 0, \\ &t \in [-\tau, 0), \quad V_{i,j}(0),\ F_{i,j}(0) > 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Для прямокутного масиву $N \times N$ використовується дискретна дифузія для просторового оператора, який запропонований в роботі [18]:

$$\hat{S}\{V_{i,j}\} = \begin{cases} D\Delta^{-2}\left[V_{1,2} + V_{2,1} + V_{i,j-1} - 2n_{dsbn}V_{1,1}\right] & i,\ j = 1 \\ D\Delta^{-2}\left[V_{2,j} + V_{1,j-1} + V_{1,j+1} + V_{i,j+1} - 3n_{dsbn}V_{i,j}\right] & i = 1,\ j \in \overline{2,\ N-1} \\ D\Delta^{-2}\left[V_{1,N-1} + V_{2,N} - 2n_{dsbn}V_{1,N}\right] & i,\ j \in \overline{2,\ N-1} \\ D\Delta^{-2}\left[V_{i-1,N} + V_{i+1,N} + V_{i,N-1} - 3n_{dsbn}V_{i,N}\right] & i \in \overline{2,\ N-1},\ j = N \\ D\Delta^{-2}\left[V_{N-1,N} + V_{N,N-1} - 2n_{dsbn}V_{N,N}\right] & i = N,\ j = N \\ D\Delta^{-2}\left[V_{N-1,j} + V_{N,j-1} + V_{N,j+1} + V_{i,j+1} - 3n_{dsbn}V_{N,j}\right] & i = N,\ j \in \overline{2,\ N-1} \\ D\Delta^{-2}\left[V_{N-1,1} + V_{N,2} - 2n_{dsbn}V_{N,1}\right] & i = N,\ j = 1 \\ D\Delta^{-2}\left[V_{i-1,1} + V_{i+1,1} + V_{i,2} - 3n_{dsbn}V_{i,1}\right] & i \in \overline{2,\ N-1},\quad j = 1 \\ D\Delta^{-2}\left[V_{i-1,j} + V_{i+1,j} + V_{i,j-1} + V_{i,j+1} - 4n_{dsbn}V_{i,j}\right] & i,\ j \in \overline{2,\ N-1} \end{cases} \tag{6}$$

Кожна колонія піддається впливу антигенів, вироблених в шести сусідніх колоніях, які розділені рівними відстанями Δ .

Використовуємо граничну умову $V_{i,j} = 0$ для вузлів масиву $i,\ j = 0,\ N+1$.

Методи вибірки, дослідження сталості та стабільності, що використовуються в роботі, базуються на підході, розробленому в [19] для систем хижак-жертва.

Система (4) без дифузії апроксимується наступним диференціальним рівнянням з кусково-постійними аргументами.

$$\begin{aligned} \frac{dV_{i,j}}{dt} &= \left(\beta - \gamma F_{i,j}([t/h]h - [t/h]h) - \delta_\upsilon V_{i,j}([t/h]h - [t/h])\right)V_{i,j}(t), \\ \frac{dF_{i,j}(t)}{dt} &= \left(-\mu_f + \eta\gamma V_{i,j}([t/h]h - [t/h]h) - \delta_f F_{i,j}([t/h]h)\right)F_{i,j}(t) \end{aligned} \tag{7}$$

для $t \in [nh, (n+1)h],\ n \in N$.

Позначимо це $[t/h] = n,\ [t/h] = r \in N$.

Проінтегруємо останню систему (7) по $[nh, t)$, де $t < (n+1)h$, тоді (6) можна переписати так:

$$\begin{aligned} \frac{dV_{i,j}}{dt} &= \left(\beta - \gamma F_{i,j}(nh - rh) - \delta_\upsilon V_{i,j}(nh - rh)\right)V_{i,j}(t), \\ \frac{dF_{i,j}(t)}{dt} &= \left(-\mu_f + \eta\gamma V_{i,j}(nh - rh) - \delta_f F_{i,j}(nh)\right)F_{i,j}(t) \end{aligned} \tag{8}$$

Введено позначення $V_{i,j}(n) = V_{i,j}(nh)$, $F_{i,j}(n) = F_{i,j}(nh)$, що призводить до:

$$\begin{aligned} V_{i,j}(t) &= V_{i,j}(n)\exp\left\{\beta - \gamma F_{i,j}(n-r) - \delta_\upsilon V_{i,j}(n-r)\right\}, \\ F_{i,j}(t) &= F_{i,j}(n)\exp\left\{-\mu_f + \eta\gamma V_{i,j}(n-r) - \delta_f F_{i,j}(n)\right\} \end{aligned} \tag{9}$$

Розгляд $t \to (n+1)h$ може спростити систему (9), додавши до першого рівняння дифузію. Результатом є дискретна аналогова система неперервного часу (4) у вигляді:

$$\begin{aligned} V_{i,j}(n+1) &= V_{i,j}(n)\exp\left\{\beta - \gamma F_{i,j,k}(n-r) - \delta_\upsilon V_{i,j}(n-r)\right\} + \hat{S}\{V_{i,j}(n)\}, \\ F_{i,j}(n+1) &= F_{i,j}(n)\exp\left\{-\mu_f + \eta\gamma V_{i,j}(n-r) - \delta_f F_{i,j}(n)\right\} \end{aligned} \tag{10}$$

Модель (10) задана початковими функціями (11)

$$\begin{aligned} &V_{i,j}(n) = V_{i,j}^0(n) \geq 0, \quad F_{i,j}(n) = F_{i,j}^0(n) \geq 0, \\ &n \in [-r, 0), \quad V_{i,j}(0), F_{i,j}(0) > 0. \end{aligned} \tag{11}$$

Слід зазначити, що поведінка системи (10) може не співпадати з диференціальними рівняннями (4). Еквівалентність диференціальних різницевих рівнянь, отриманих за допомогою прямого перетворення Ейлера, зворотного перетворення Ейлера або центральних різницевих схем може бути використана тільки для невеликих інтервалів часу дискретизації [20].

Динамічне логічне моделювання КФБСС на гексагональній решітці з використанням решітчастих диференціальних рівнянь із запізненням. З метою математичного моделювання динамічної логіки КФБСС використано синтаксис, який запропонований А. Платцером для загальної КФС [5] у вигляді гібридної мови програмування. У випадку КФБСС перший рівень є динамічною програмою, яка визначається граматикою

$$a ::= V_{i,j,k}(n+1) = V_{i,j,k}(n)\exp\left\{\beta - \gamma F_{i,j,k}(n-r) - \delta_\upsilon V_{i,j,k}(n-r)\right\} + \hat{S}\left\{V_{i,j,k}(n)\right\},$$
$$F_{i,j,k}(n+1) = F_{i,j,k}(n)\exp\left\{-\mu_f + \eta\gamma V_{i,j,k}(n-r) - \delta_f F_{i,j,k}(n)\right\} \& \ \Phi_t \quad (11)$$

де Φ_t є еволюційним доменним обмеженням у вигляді формули логіки першого порядку

$$\Phi_t \overset{def}{\equiv} V^{\min} \le V_{i,j,k}(n) \le V^{\max}$$
$$\wedge\ F^{\min} \le F_{i,j,k}(n) \le F^{\max} \wedge i,j,k = \overline{-N,N} \wedge n > 0, i+j+k = 0 \quad (12)$$

Функціонування біопікселя (i,j,k) визначається двома станами. А саме, S_{fl} є станом флуоресценції та $S_{non\ fl}$ є одним із станів в якому не відбувається явище флуоресценції.

У синтаксисі логіки першого порядку використовується співвідношення задоволення $S \models L$ для формули логіки першого порядку L та стану S. Використовуючи дане співвідношення визначаються для конкретних біопікселів (i,j,k), $i,j,k = \overline{-N,N}$, $i+j+k=0$ стани S_{fl} і $S_{non\ fl}$, наприклад:

$$s_{ft}\Big| = k_{fl} V_{i,j}(n) F_{i,j}(n) \ge \Theta_{fl},$$
$$s_{nonfl}\Big| = k_{fl} V_{i,j}(n) F_{i,j}(n) < \Theta_{fl}. \quad (13)$$

Дискретні зміни відбуваються в комп'ютерних програмах, коли вони приймають нові значення для змінних. Така ситуація відбувається у випадку виникнення явища флуоресценції в пікселі (i,j,k), $i,j,k = \overline{-N,N}$. У стані флуоресценції змінній $S_{fl,i,j}$ присвоюється значення 1, але значення $S_{fl,i,j}$ миттєво змінюється та призводить до дискретної стрибкоподібної зміни. Таким чином ми отримуємо дискретну модель зміни $S_{fl,i,j,k:=1}$ за винятком моделі зміни (13).

Дослідження моделі стійкості КФБСС на гексагональній решітці. Постійні стани.

Загалом, стан рівноваги $\varepsilon_{i.j.k} \equiv \left(V_{i,j,k}, F_{i,j,k}\right)$, $i,j,k = \overline{-N,N}$, $i+j+k=0$ для системи (2) можна знайти як розв'язок алгебраїчної системи:

$$V_{i,j,k} = V_{i,j,k}\exp\left\{\beta - \gamma F_{i,j,k} - \delta_\upsilon V_{i,j,k}\right\} + \hat{S}\left\{V_{i,j,k}\right\}$$
$$F_{i,j,k} = F_{i,j,k}\exp\left\{-\mu_f + \eta\gamma V_{i,j,k} - \delta_f F_{i,j,k}\right\}. \quad (14)$$

Враховуючи $\left(V_{i,j,k}, F_{i,j,k}\right)$, $i,j,k = \overline{-N,N}$, $i+j+k=0$, маємо такі випадки.

Стійкий стан без антигенів і антитіл $\varepsilon^{0,0}_{i,j,k} \equiv \varepsilon^{0,0}(0,0)$, $i,j,k = \overline{-N,N}$, $i+j+k=0$.

Стійкий стан без антитіл $\varepsilon^{*,0}_{i,j,k} \equiv \varepsilon^{*,0}\left(\dfrac{\beta}{\delta_v}, 0\right)$, $i,j,k = \overline{-N,N}$, $i+j+k=0$.

Ідентичний ендемічний стаціонарний стан. У разі якщо $V_{i,j,k} \equiv V^{ident} > 0$, $i,j,k = \overline{-N,N}$ $i+j+k=0$, $\left(\hat{S}\left\{V_{i,j,k}\right\} \equiv 0\right)$, отримаємо стабільний стан $\varepsilon_{i,j,k} \equiv \varepsilon^{ident} = \left(V^{ident}, F^{ident}\right)$, де

$$V^{ident} = \frac{\beta\delta_f + \gamma\mu_f}{\eta\gamma^2 + \delta_v\delta_f},\ F^{ident} = \frac{-\mu_f\delta_v + \eta\gamma\beta}{\eta\gamma^2 + \delta_v\delta_f}$$

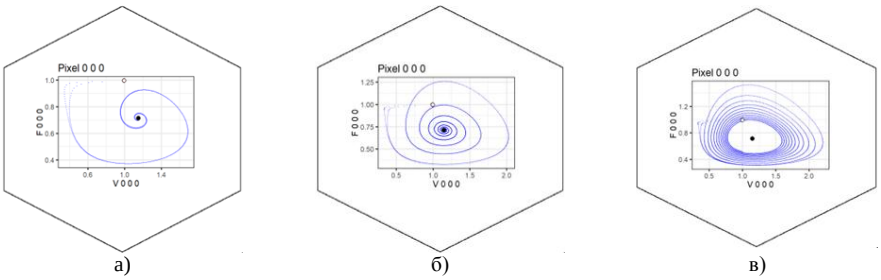
Отже, якщо $-\mu_f\delta_v + \eta\gamma\beta > 0$, тоді ε^{ident} є ендемічним станом.

Неідентичний ендемічний стійкий стан. У загальному випадку потрібно розв'язати алгебраїчну систему (14) і знайти ендемічний стійкий стан, який будемо називати нетотожним стаціонарним станом $\varepsilon^{non-ident} = \left(V^{non-ident}_{i,j,k}, F^{non-ident}_{i,j,k}\right)$, $i,j,k = \overline{-N,N}$, $i+j+k=0$. У випадку, коли всі $\left(V^{non-ident}_{i,j,k}, F^{non-ident}_{i,j,k}\right) > 0$, тоді $\varepsilon^{non-ident}$ є ендемічним станом. Значення V^{ident} і F^{ident} можуть бути використані як початкові наближення для чисельних методів розв'язування нелінійної алгебраїчної системи (14).

Чисельне моделювання КФБСС. Результати чисельного моделювання математичної моделі КФБСС на гексагональній решітці з використанням решітчастих різницевих рівнянь із запізненням

У роботі проведено аналіз дискретного аналога, який отримуємо за допомогою масштабування відповідних параметрів, що залежать від кроку дискретизації $h = 0.01^2$; $\beta = 2h$; $\gamma = 2h$; $\mu_f = h$; $\eta = 0.01184 \ / \gamma$; $\delta_\upsilon = 0.5h$; $\delta_f = 0.5h$; $D / \Delta^2 = 2.22\sqrt{h}$; $N = 4$.

Проведемо розрахунок стійких станів (класифікація ідентичних та неідентичних) для пікселів. Подібно до моделі на основі диференціальних рівнянь [17], в системі з дискретним часом при зміні значення часу затримки r спостерігаються якісні зміни в поведінці біопікселів і досліджуваної моделі в цілому. Чисельне моделювання виконується при значеннях наведених вище параметрів. У цьому випадку довготривала поведінка системи (2), яка описує гексагональний масив біопікселів при $N = 4$ для $r = 5$; $r = 17$; $r = 22$. Фазові діаграми популяцій антитіл і антигенів для пікселів і суміжних пікселів при різних значеннях показані на рис. 4–6.



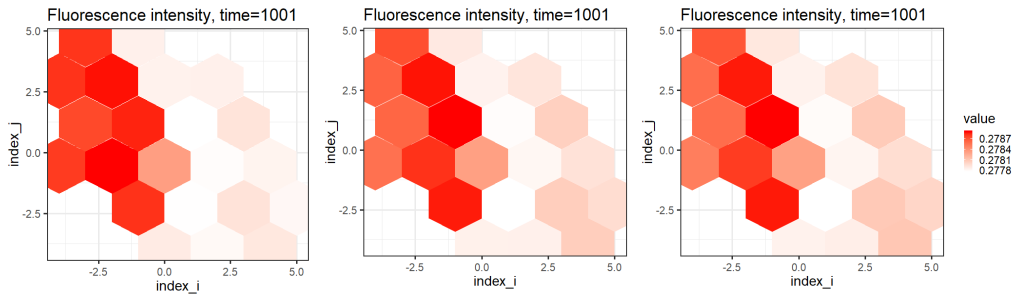
а) б) в)

Рис. 4. Результати чисельного моделювання системи (2) при $r = 5$ (а), $r = 17$ (б), $r = 22$ (в). **Зображення фазових площин в координатах** $(V_{i,j,k}, F_{i,j,k})$ **для пікселя** $(0,0,0)$ **і його шести суміжних пікселів. Позначення:** ◻ **– початковий стан, ○ – ідентичний стійкий стан, ● – неідентичний стійкий стан**

Таким чином при $r \le 17$ спостерігаються траєкторії, які відповідають стабільному фокусу для всіх пікселів (рис. 4 (а)). При значенні $r = 17$ (рис. 4 (б)) відбувається біфуркація Хопфа й наступні траєкторії відповідають стійким граничним циклам еліпсоподібної форми для всіх пікселів. Результати чисельного моделювання біфуркації Хопфа узгоджені з теоретичними результатами на основі теореми про біфуркацію Хопфа згідно з роботою [21], що підтверджує вигляд малих інваріантних циклів радіуса $O(\sqrt{h})$.

Як результат чисельного моделювання на рисунку 4 (в) для $r = 22$ наведено фазові діаграми, які являють собою граничні цикли з двома екстремумами (один локальний максимум і один місцевий мінімум).

Для чисельного моделювання кіберфізичної моделі біосенсора використовували решітчасті графіки. Спочатку були побудовані відповідні графіки, де для кожного пікселя вказувалася ймовірність контакту антиген-антитіло, як $V_{i,j,k} \times F_{i,j,k}$ при $r = 5$, $r = 17$, $r = 22$ (рис. 5 (а-в)).



а) б) в)

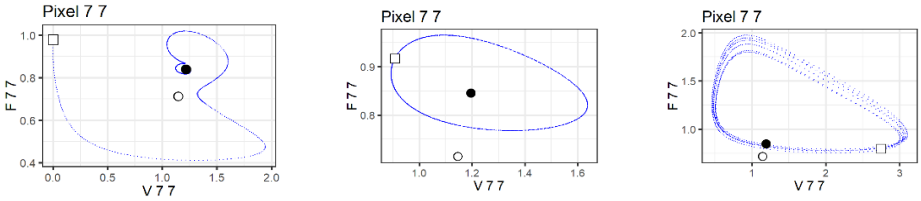
Рис. 5. Решітчасті зображення ймовірності зв'язків антигенів з антитілами в пікселях системи (2) при $r = 5$ (а), $r = 17$ (б), $r = 22$ (в)

Чисельний аналіз показав, що флуоресцентні стани в біопікселях змінюються за законами дискретної динаміки. Аналізуючи отримані результати, було зроблено висновок, що при зміні значень r якісно змінюється поведінка пікселів та КФБСС.

Результати чисельного моделювання математичної моделі КФБСС на прямокутній решітці з використанням решітчастих різницевих рівнянь із запізненням

Розглядаємо модель (10) при: $N = 16$, $\beta = 2\,\text{хв}^{-1}$, $\gamma = 2\,\frac{\text{мл}}{\text{хв}\cdot\text{мкг}}$, $\mu_f = 1\,\text{хв}^{-1}$, $\eta = \frac{0.8}{\gamma}$, $\delta_\upsilon = 0.5\,\frac{\text{мл}}{\text{хв}\cdot\text{мкг}}$, $\delta_f = 0.5\,\frac{\text{мл}}{\text{хв}\cdot\text{мкг}}$, $n = 0.9$, $D = 0.2$, $\Delta = 0.3$.

Результати чисельного моделювання для різних значень запізненням в часі r наведені на (рис. 6 (а – в).



а) б) в)

Рис. 6. Зображення фазових площин системи (10) для популяцій антитіл $F_{i,j}$ відносно популяцій антигенів $V_{i,j}$, як результат чисельного моделювання при $r = 8$ (а), $r = 12$ (б), $r = 16$ (в). Позначення: □ – початковий стан, ○ – ідентичний стійкий стан, ● – неідентичний стійкий стан

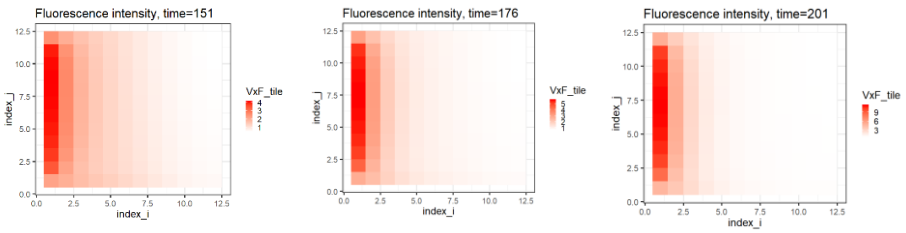
Результати чисельного моделювання, наведені на рисунках 6 (а – в), побудовані для $n \in [0, 5000]$. Як бачимо з рисунка 6 (а), розв'язок сходиться до неідентичного сталого стану, який є стійким фокусом.

На рисунку 6 (а), при $r \in [0, 12)$, видно траєкторії, які відповідають стійкому фокусу для всіх пікселів. Для значень $r = 12$ (рис. 6 (б)) виникає біфуркація Хопфа [21] і наступні траєкторії відповідають стійким граничним циклам еліпсоподібної форми для всіх пікселів.

Для $r = 12$ фазові діаграми показують, що рішення є граничним циклом із двома локальними екстремумами (один локальний максимум і один локальний мінімум на цикл).

При $r = 16$ (рис. 6 (в)) спостерігається хаотична поведінка, тобто відсутність жодної періодичної поведінки на великому інтервалі часу. Початкові умови були порушені, щоб перевірити чутливість системи, щоб переконатися, що рішення є хаотичним для $r = 16$. Порівняння розчинів для популяції антигенів $V_{1,3}$ з початковою умовою $V_{1,3}(t) = 1, V_{1,3}(t) = 1.001, n \in [-r, 0]$ і всі інші ідентичні початкові умови, демонструють хаотичну поведінку. А саме, у початковий момент два розв'язки здаються однаковими, але зі збільшенням часу між розв'язками з'являється різниця, що підтверджує висновок про хаотичність поведінки системи при $r = 16$.

Модель біосенсора аналізували за допомогою гратчастого графіка, що представляє ймовірність зв'язування антигенів з антитілами в пікселях системи (10) (рис. 7). Було прийнято, що $\Theta_{fl} = 1{,}5$.



а) б) в)

Рис. 7. Решітчасті зображення ймовірності зв'язування антигенів з антитілами в пікселях системи (10) при $r = 8$ (а), $r = 12$ (б), $r = 16$ (в)

Дослідження фазових діаграм і решітчастих зображень зв'язування антигенів з антитілами в пікселях системи (10) має сумісність з попередніми дослідженнями [9? 10] щодо стійкості масиву біопікселів у КФБСС.

Порівняльний аналіз результатів чисельного моделювання математичних моделей кіберфізичних біосенсорних систем на гексагональних та прямокутних решітках за допомогою решітчастих різницевих рівнянь

Наведено результати порівняльного аналізу чисельного моделювання досліджуваних математичних моделей КФБСС у вигляді фазових діаграм популяцій антигенів, антитіл (рис. 4(а), 6(а)) та гратчастих зображень зв'язування антигенів з антитілами з біопікселів досліджуваних систем. (рис. 5(а), 7(а)), що при

$r = 5$ (гексагональної решітки) та $r = 8$ (прямокутної решітки) розв'язки відповідних систем (2) та (10) прагнуть до неідентичних ендемічних станів, які в даному випадку є стійкими фокусами. Подібна залежність спостерігається для всіх біопікселів моделі КФБСС на гексагональній решітці для $r \in [0, 17)$ (рис. 4(а), 5(а), а у випадку використання прямокутної решітки спостерігався неідентичний ендемічний стан $r \in [0, 12)$ (рис. 6(а), 7(а).

За результатами фазових діаграм популяцій антигенів, антитіл та зображень решітки ймовірності зв'язування антигену з антитілом у біопікселях КФБСС можна зробити висновок, що для $r = 17$ (у випадку гексагональної ґратки (рис. 4(б), 5(б)) і $r = 12$ (у випадку прямокутної решітки (рис. 6 (б)) відбувається біфуркація Хопфа, і всі наступні траєкторії відповідають стабільним граничним циклам для всіх пікселів, рис. 4(в), 5(в), 6(в).

Результати чисельного аналізу ймовірності зв'язування антигенів з антитілами в біопікселях досліджуваних моделей змінюються за законами дискретної динаміки. Аналізуючи результати, зроблено висновок, що поведінка біопікселів і КФБСС якісно змінюється на прямокутній та гексагональній решітках із використанням решітчастих різницевих рівнянь.

Висновки

У роботі проведено порівняльний аналіз моделей КФБСС на гексагональних та прямокутних решітках з використанням різницевих рівнянь. Використано загальну схему кіберфізичної сенсорної системи, запропоновану в [11]. Базову модель модифіковано з урахуванням особливостей біосенсорів. Гратчасті зображення в біопікселях модифікуються за законами дискретної динаміки. Розроблені моделі враховують взаємодію біопікселів між собою шляхом дифузії антигену.

Математичний опис КФБСС містить дискретну популяційну динаміку, яка поєднується з динамічною логікою, що використовується для дискретних подій. У статті використовується клас різницевих рівнянь часової решітки, які моделюють взаємодію антигенів і антитіл у біопікселях. Просторові оператори моделюють взаємодію дифузійного типу між біопікселями. Динамічного математичного моделювання недостатньо для моделювання дискретної динаміки в досліджуваних системах. Щоб усунути цей недолік, ми використали синтаксис динамічної логіки, запропонований для кіберфізичних систем Платцера для опису дискретних станів біопікселя в результаті флуоресценції.

У статті представлено результати чисельного моделювання у формі зображень фазової площини та решітчастих зображень ймовірності зв'язування антигену з антитілом у біопікселях кіберфізичних біосенсорних систем для популяцій антитіл відносно популяцій антигенів. Отримані експериментальні результати дають змогу провести порівняльний аналіз стійкості математичних моделей кіберфізичних біосенсорних систем на гексагональній та прямокутній решітках.

Можна зробити висновок, що при дискретній величині запізнення $r = 17$ (у випадку гексагональної решітки) і $r = 12$ (у випадку прямокутної решітки) відбувається біфуркація Хопфа і всі наступні траєкторії відповідають стійким граничним циклам для всіх пікселів.

Підходи до отримання електричного сигналу в пакеті R для КФБСС розглянуто в роботі [22].

Отримані в роботі результати чисельного моделювання дають змогу провести аналіз стійкості та порівняння досліджуваних моделей з урахуванням часової затримки. У майбутніх дослідженнях планується вивчення кіберфізичних біосенсорних систем з використанням швидких динамічних бездротових мереж [23]. Також у міру накопичення записів у досліджуваних системах планується їх аналіз з метою оптимізації структури розподіленої бази даних, згідно з [24].

Література

1. Lee E. Cyber physical systems: Design challenges. In: International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing, 2008, p. 10.
2. Lee J., Bagheri B., Kao H. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. Manufacturing Letters, 2015, vol. 3, 18-23.
3. Krainyk Y., Davydenko Y., Tomas V. Configurable Control Node for Wireless Sensor Network. In: 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT), 2019, p. 258-262. IEEE Press, Lviv, Ukraine. https://doi.org/10.1109/AIACT.2019.8847732
4. Kim K.-D., Kumar P. Cyber–physical systems: A perspective at the centennial. In: Proceedings of the IEEE, 2012, vol. 100, p. 1287-1308.
5. Platzer A. Differential dynamic logic for hybrid systems. Journal of Automated Reasoning, 2(41), 2008, p. 143-189.
6. Platzer A. Logical Foundations of Cyber-Physical Systems. Springer International Publishing, 2018, p. 1-24.
7. Adley C. Past, present and future of sensors in food production. Foods, 3(3), 2014, p. 491-510.
8. Bahadır E., Sezgintürk M. Applications of commercial biosensors in clinical, food, environmental, and biothreat/biowarfare analyses. Analytical Biochemistry, 2015, vol. 478, p. 107-120.
9. Martsenyuk V., Sverstiuk A., Gvozdetska I. Using Differential Equations with Time Delay on a Hexagonal Lattice for Modeling Immunosensors. Cybernetics and Systems Analysis, 2019, vol. 55 (4), p. 625-636.

10. Martsenyuk V., Sverstiuk A. Cyber-physical model of the immunosensor system at the hexagonal lattice with the use of difference equations of the population dynamics. Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries. 2019. № 1. P. 75–83.

11. Berger C., Hees A., Braunreuther S., Reinhart G. Characterization of Cyber-Physical Sensor Systems. Procedia CIRP, 2016, vol. 41, p. 638-643.

12. Internet-resurs. https://www.redblobgames.com/grids/hexagons/.

13. McCluskey C. Complete global stability for an SIR epidemic model with delay – distributed or discrete. Nonlinear Analysis: Real World Applications, 1 (11), 2010, p. 55-59.

14. Nakonechny A., Marzeniuk V. Uncertainties in medical processes control. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 2006, vol. 581, p. 185-192.

15. Piotrowska M. An immune system–tumour interactions model with discrete time delay: Model analysis and validation, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2016, vol. 34, p. 185-198.

16. Prindle A., Samayoa P., Razinkov I., Danino T., Tsimring L., Hasty J. A sensing array of radically coupled genetic 'biopixels', Nature, 481(7379), 2011, p. 39-44.

17. Martsenyuk V., Kłos-Witkowska A., Sverstiuk A. Stability, bifurcation and transition to chaos in a model of immunosensor based on lattice differential equations with delay. Electronic Journal of Qualitative Theory of Differential Equations, 27, 2018, p. 1-31.

18. Sverstiuk A. Cyber-physical model of the immunosensor system in a rectangular lattice with the use of lattice difference equations of population dynamics. Scientific Journal of TNTU. 2018. Vol. 92. № 4. P. 112–125.

19. Liu L., Liu Z. Asymptotic behaviors of a delayed nonautonomous predator-prey system governed by difference equations. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2011, vol. 2011, p. 1-15.

20. Letellier C., Elaydi S., Aguirre L., Alaoui A. Difference equations versus differential equations, a possible equivalence for the Rossler system. Physica D: Nonlinear Phenomena, 2004, vol. 1-2(195), p. 29-49.

21. Hofbauer J., Iooss G. A hopf bifurcation theorem for difference equations approximating a differential equation, Monatshefte fur Mathematik, 2(98), 1984, p. 99-113.

22. Sverstiuk A. Numerical simulation of electric signal in a cyber-physic immunosensor system in a rectangle lattice in a package R. Scientific Journal of TNTU. 2019. Vol. 94. No 2. P. 96–103.

23. Burlachenko I., Zhuravska I., Davydenko Y., Savinov V. Vulnerabilities Analysis and Defense Based on MAS Method in Fast Dynamic Wireless Networks. In: 4th International Symposium on Wireless Systems within the International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS), 2018, p. 98-102. IEEE Press, Lviv, Ukraine. https://doi.org/10.1109/IDAACS-SWS.2018.8525692

24. Fisun M., Dvoretskyi M., Shved A., Davydenko Y. Query parsing in order to optimize distributed DB structure. In: 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), 2017, p. 172-178. IEEE Press, Bucharest, Romania. https://doi.org/10.1109/IDAACS.2017.8095071

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-213-214
УДК 004.7

МЕЛЬНИЧЕНКО ОЛЕКСАНДР
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0001-8565-7092
e-mail: oleksandr.melnychenko@live.com

МЕТОД ОБЧИСЛЕННЯ КІЛЬКОСТІ ОБ'ЄКТІВ У ФРУКТОВОМУ САДУ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

Дана робота пропонує новий метод обчислення кількості яблук у робочому середовищі фруктового саду, за допомогою якого стане можливим реалізувати інформаційну технологію для розпізнавання та обчислення кількості структурних об'єктів у режимі реального часу. Результати проведених експериментальних досліджень показують, що рівень достовірності автоматизованої системи складає: 1) у сонячну погоду – 92,11 %, 2) у похмуру – 90,76 % та 3) у сонячну погоду, але з високою затіненістю – 82,69 %. Отримані значення свідчать про високий показник ефективності автоматизованої системи для виявлення та обчислення фруктових плодів у реальних умовах. Такі результати свідчать про те, що за сонячних та похмурих погодних умов із низьким рівнем тіні автоматизована система демонструє високу точність та надійність у роботі. Зокрема через наявність у фруктовому саду значних візуальних шумів (прикриття плодів листям та гілками) ефективність роботи групи БПЛА зокрема та автоматизованої системи загалом у реальних умовах не може бути виконана на 100 %, що може слугувати перспективним завданням для подальших досліджень.

Ключові слова: обробка зображень, виявлення об'єктів, обчислення кількості об'єктів, YOLOv5, глибоке навчання.

MELNYCHENKO OLEKSANDR
Khmelnytskyi National University

METHOD OF COUNTING OBJECTS IN AN ORCHARD IN REAL TIME

The paper proposes a novel method for counting apples in an orchard using unmanned aerial vehicles (UAVs), also known as drones. The authors acknowledge that traditional methods of counting apples are time-consuming and labor-intensive and therefore propose a more efficient and accurate solution using a group of drones equipped with high-resolution cameras. The proposed method involves using a convolutional neural network (CNN) called YOLOv5-v1 to detect and count the apples in the images captured by the drones. YOLOv5-v1 was trained using a dataset of annotated images of apples in different lighting conditions and orientations and was found to be highly accurate in identifying and counting apples in test images. The proposed method was tested on two different orchards and was highly accurate. Specifically, the results of the experimental studies show that the model accuracy was: i) in sunny weather - 92.11%, ii) in cloudy weather - 90.76%, and iii) in sunny weather, but with high shading - 82.69%. Such results indicate that under sunny and overcast weather conditions with a low level of shade, the proposed approach demonstrates high accuracy and reliability in real-time operation. At the same time, it should be noted that due to the presence of significant visual noise in the orchard, such as the covering of fruits by leaves and branches, the efficiency of the UAV group and the automated system, in general, cannot be 100% fulfilled in natural conditions, which can serve as a promising task for further of research. Overall, the proposed method of counting structural objects provides an efficient and accurate solution for counting apples in orchards, which could save time and resources for farmers. The use of UAVs and CNNs in agriculture is a promising area of research, and this paper presents a practical application of these technologies in fruit counting.

Keywords: image processing, object detection, object counting, YOLOv5, deep learning.

Вступ

Яблука є однією з найбільших фруктових культур у світі, а Україна має найбільшу площу плантацій, що займає близько двох мільйонів гектарів і дає найвищий урожай у Європі. Центральні та південні регіони України мають ідеальні кліматичні та ґрунтові умови, сприятливі для вирощування яблуні [1]. Крім того, технологічні вдосконалення сільськогосподарської практики в Україні призвели до збільшення врожайності яблук і покращення якості.

Виявлення врожайності яблук за допомогою візуального розпізнавання є ефективним та інтуїтивно зрозумілим методом. Однак, оскільки кожне плодове дерево має різний ріст і кількість плодів, для досягнення більшої точності потрібне індивідуальне визначення врожайності [2]. У садах із великою кількістю дерев ефективність має вирішальне значення. Отже, необхідно мати модель виявлення яблук, яка є швидкою, точною та малою, що дозволяє швидше виявляти врожайність яблук під час роботи на різних вбудованих пристроях.

Моделі глибокого навчання (DL), зокрема згорткові нейронні мережі (CNN), мають можливість витягувати характеристики із зображень [3], що може призвести до автоматичного розпізнавання цілей і кращої адаптивності. За останні десятиліття методи DL [4] стали вкрай популярними для виявлення плодів фруктових дерев. Зокрема, нейронні мережі типу You Look Only (YOLO) [5] та Single-Shot Detector (SSD) [6] мають більш збалансовану продуктивність з точки зору швидкості та точності виявлення, що призводить до загальної кращої точності виявлення. Водночас попередні дослідження, такі як [7], не встановлювали однакові пріоритети щодо точності виявлення, швидкості та розміру моделі. Для виявлення об'єктів в режимі реального часу у цій роботі використано підхід YOLOv5-v1, який об'єднує YOLOv5 [8] із легкою нейронною мережею EfficientNet [9].

Отже, ця робота спрямована на підвищення точності розпізнавання та обчислення кількості плодів на деревах у фруктовому саду. Для досягнення цієї мети у статті запропоновано новий метод обчислення

кількості структурних об'єктів, що відповідають плодам на кожному кадрі відеоряду. Запропонований у роботі метод обчислення у вигляді вхідних даних отримує множину координат, що відповідають розташуванню структурних об'єктів на зображенні, та виводить кількість плодів, що були виявленні під час захоплення відеоряду.

Підхід до виявлення структурних об'єктів

Автоматичне виявлення фруктів на деревах відбувається в складному сітчастому середовищі, де фрукти ростуть на деревах, розташованих послідовними рядами. Під час робочої місії фрукти можуть бути зняті відеокамерою безпілотного літального апарату (БПЛА) [10] та подані на передньому плані робочого сегмента (плодове дерево), на задньому плані або на деревах інших рядів. Як наслідок, фрукти у відеокадрі можуть бути занадто малими, через що автоматизована система може їх помилково розпізнати, або вони можуть потрапити в різні відеокадри під час робочої місії, що призведе до кількох підрахунків однакових фруктів [11]. Крім того, мінливі погодні умови, зміна освітлення протягом дня, падіння листя та гілок у кадр можуть погіршити точність виявлення плодів. Тому, щоб запобігти та усунути проблеми, згадані вище, це дослідження запроваджує новий підхід до визначення структурних об'єктів точної природи дерев.

Вхідними даними є цифрове зображення структурних об'єктів, представлене у вигляді матриці чисел, кожне з яких відображає інтенсивність відповідного пікселя на зображенні. Модель цифрового зображення структурних об'єктів представимо у вигляді лінійного представлення:

$$f : I \to \left\langle C_{xy}, P^i_{h\times w}, B^i_{u\times v}, B^i_{h\times w} \right\rangle, \tag{1}$$

де $C_{xy} = \left(c_x, c_y\right)$ – ширина c_x та висота c_y координатної сітки C_{xy} координатної площини *XY*, сформованої для виявлення структурних об'єктів; $P^i_{h\times w} = \left(p^i_h, p^i_w\right)$ – висота p^i_h та ширина p^i_w рамки прив'язки *i*-го цільового структурного об'єкта в координатній площині *XY*; $B^i_{u\times v} = \left(b^i_u, b^i_v\right)$ – координати центру рамки прив'язки *i*-го цільового структурного об'єкта в координатній площині XY; $B^i_{h\times w} = \left(b^i_h, b^i_w\right)$ – висота b^i_h та ширина b^i_w обмежувальної рамки, що окреслює *i*-й цільовий структурний об'єкт у координатній площині *XY*.

Координати центра обмежувальної рамки *i*-го цільового конструктивного об'єкта в координатній площині *XY* розраховуються за формулою:

$$\begin{aligned} b^i_u &= \sigma^i\left(t^i_x + c_x\right); \\ b^i_v &= \sigma^i\left(t^i_y + c_y\right), \end{aligned} \tag{2}$$

де t^i_x та t^i_y – зміщення центру обмежувальної рамки *i*-го цільового структурного об'єкта відносно координатної сітки C_{xy}.

Висота (b^i_h) і ширина (b^i_w) обмежувальної рамки *i*-го цільового конструктивного об'єкта в координатній площині *XY* розраховуються за формулою:

$$\begin{aligned} b^i_h &= p^i_h e^{c_y}; \\ b^i_w &= p^i_w e^{c_x}. \end{aligned} \tag{3}$$

Подання зображення яблука як структурного об'єкту у вигляді математичних співвідношень (1)-(3) слугує вхідними даними для використаного механізму виявлення цих структурних об'єктів на зображення. Вихідними даними цього механізму є координати розташування структурних об'єктів на зображенні в режимі реального часу.

Метод обчислення кількості структурних об'єктів

Для успішного обчислення кількості плодів за відеопотоком необхідним є встановлення унікальності кожного плоду на двох послідовних відеокадрах, отриманих від БПЛА. Відстеження унікальних плодів є нетривіальним завданням, оскільки їхнє розташування та зовнішній вигляд можуть змінюватися на послідовних відеокадрах з огляду на умови проведення робочої місії, наприклад, зміна освітлення, повороти камери, зміна траєкторії роботи БПЛА тощо.

Визначення унікальності ґрунтується на характерних відмінних ознаках кожного об'єкта, їхньому положенні на послідовних кадрах через зміну траєкторії кожного БПЛА в групі та непередбачувані чинники довкілля. Тому особливістю нового метода обчислення кількості структурних об'єктів є встановлення залежностей між візуальними ознаками виявлених структурних об'єктів, що відображаються на послідовних відеокадрах. Схему метода обчислення кількості структурних об'єктів однієї природи надано на рис. 1.

Запропонований метод полягає в послідовному виконанні таких блоків: 1) попередня обробка вхідних даних у вигляді об'єднаних відеокадрів із накладеними обмежувальними рамками виявлених структурних об'єктів; 2) першочергове порівняння споріднених координат виявлених об'єктів між двома сусідніми кадрами; 3) присвоєння унікальних ідентифікаторів нововиявленим об'єктам; 4) обчислення кількості унікальних структурних об'єктів; 5) обчислення прогнозних значень координат розташування об'єктів для наступного кадру; 6) обробка вихідних даних, якими є обчислена кількість структурних об'єктів у робочому середовищі.

Блок 1. Попередню обробку вхідних даних виконано відповідно до впроваджених та модернізованих алгоритмів у методі виявлення, де необхідною є сегментація малих, середніх та великих структурних об'єктів. Малі об'єкти вважаються нецільовими для відстеження, тому вони не підлягають обчисленню. Поведінковою сигнатурою поточного блоку є фільтрування даних через вилучення обмежувальних рамок виявлених малих структурних об'єктів. Утворена нова структура даних передається на наступний блок.

Блок 2. Першочергове порівняння споріднених координат виявлених об'єктів між двома сусідніми кадрами. На основі отриманої чисельної інформації з блоку 1 формується стан виявлених структурних об'єктів на поточному відео кадрі, кожен із яких представляється у вигляді:

$$\left(x, y, \gamma, h, v_x, v_y, v_\gamma, v_h\right), \tag{4}$$

де (x, y) – координати центра виявленого об'єкта, γ – відношення ширини до висоти обмежувальної рамки виявленого об'єкта, v_x, v_y, v_γ, v_h – швидкість зміни відстежувальної рамки між послідовними відеокадрами.

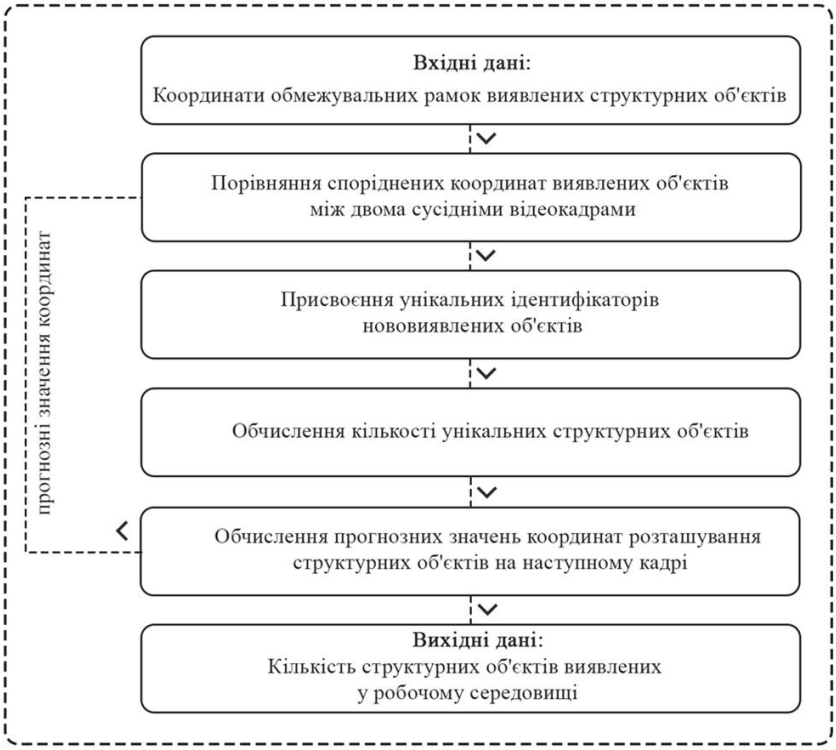


Рис. 1. Схема методу обчислення кількості структурних об'єктів однієї природи

Виявлених об'єктів на одному відеокадрі може бути багато, тому доцільним є формування групи ймовірностей розташування кожного виявленого об'єкта для наступному кадрі. Введення характерних груп (4), поданих у вигляді виявлених та відстежуваних структурних об'єктів, дає змогу формалізувати простір, у якому постійно формується нова група підмножин на основі алгебраїчних структур. Група підмножин, що відображає прогнозоване розташування кожного виявленого об'єкта, обчислене на попередньому кадрі, формується в результаті застосування фільтра Калмана [12]: стан руху кожного об'єкта на попередньому кадрі оцінює інформацію про модель руху структурного об'єкта на поточному відеокадрі, що дає можливість отримати оптимальну оцінку загального стану послідовності кадрів.

Позначимо через r_j матрицю характерних ознак кожного виявленого структурного об'єкта у відеокадрі, через R_j – стан усіх числових характеристик виявлених об'єктів із попередніх 100 кадрів. Відповідно мінімальну відстань між *i*-ю ознакою прогнозованого об'єкта з попереднього відеокадру та *j*-ю ознакою виявленого структурного об'єкта в поточному відеокадрі обрахуємо так:

$$d_{(i,j)}^{(1)} = \min\left\{1 - r_j^T r_i^{(k)} \middle| r_i^{(k)} \in R_i, k \in (1,100)\right\}. \tag{5}$$

Поєднання двох структурних об'єктів визначається перетином характерних ознак, що визначається за формулою з контрольним порогом $t^{(1)}$:

$$b_{(i,j)}^{(1)} = \begin{cases} 1, & d_{(i,j)}^{(1)} \le t^{(1)}; \\ 0, & d_{(i,j)}^{(1)} > t^{(1)}. \end{cases} \tag{6}$$

Результатом функції (6) є значення дисперсії 1, якщо характеристичні ознаки перетинаються, 0 – якщо такого перетину немає.

Значення та характеристики руху відстежувального об'єкта між послідовними відеокадрами в багатовимірному просторі виразимо через значення квадрата відстані Махаланобіса між прогнозованим та виявленим розташуванням структурного об'єкта на поточному кадрі:

$$d_{(i,j)}^{(1)} = \left(d_j - y_i\right)^T S_i^{-1}\left(d_j - y_i\right), \tag{7}$$

де y_i – прогнозні значення обмежувальної рамки *i*-ого об'єкта на поточному відеокадрі, d_j – обмежувальні рамки *j*-го цільового об'єкта на поточному відеокадрі, а S_i – коваріаційна матриця для *i*-го об'єкта на поточному відеокадрі.

Визначення процесу поєднання із встановленим контрольним порогом $t^{(2)}$ надамо за формулою:

$$b_{(i,j)}^{(2)} = \begin{cases} 1, & d_{(i,j)}^{(2)} \le t^{(2)}; \\ 0, & d_{(i,j)}^{(2)} > t^{(2)}. \end{cases} \tag{8}$$

Отримавши значення характеристики руху відстежувального об'єкта між послідовними відеокадрами (7)-(8), сформуємо чисельну матрицю, на основі відстані Махаланобіса [12], яка визначатиме чи перетинаються два показники у вибраній області інтересу

$$\begin{gathered} c_{i,j} = \lambda d_{(i,j)}^{(1)} + \left(1-\lambda\right) d_{(i,j)}^{(2)}; \\ b_{i,j} = \prod_{m=1}^{2} b_{(i,j)}^{(2)}. \end{gathered} \tag{9}$$

Чисельна матриця (9) є результатом блоку 2.

Відстеження в режимі реального часу відбувається відповідно до каскадного підходу, що полягає в ітеративному перевірянні відповідності між розташуванням прогнозованих та виявлених структурних об'єктів. Оцінювання процесу відстеження множини виявлених об'єктів на відеокадрі проводиться за показником IOU (intersection-over-union) [5].

Відстеження продовжується допоки значення IOU для кожного виявленого об'єкта набуває найвищого чисельного значення, $0 \le \mathrm{IOU} \le 1$. Процес відстеження в режимі реального часу ілюстровано на рис. 2.

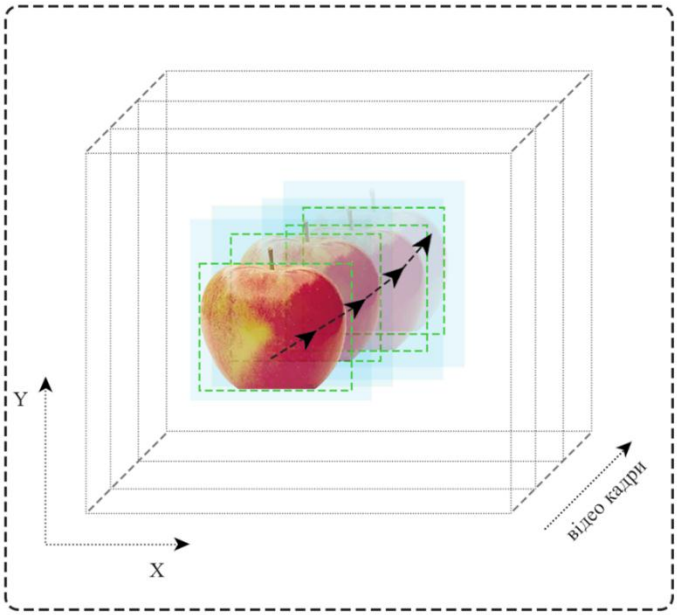


Рис. 2. Схема процесу відстеження структурного об'єкта в режимі реального часу

Результатом поточного блоку є матриця станів (9) відстежених об'єктів, що передається на наступний блок.

Блок 3. Присвоєння унікальних ідентифікаторів нововиявлених об'єктів. У цьому блоці відбувається додавання нового характерного стану унікальності кожного виявленого об'єкта до стану розташування виявлених об'єктів, отриманого з блоку 2.

Блок 4. Обчислення кількості унікальних структурних об'єктів. Блок отримує на вхід реєстр структурних об'єктів, яка містить тимчасові дані про відстежувальний об'єкт: його тип, рух, унікальний ідентифікатор, стан активності та час запису до реєстру. Допоки об'єкт перебуває в системі відстеження, він вважається "активним". Якщо об'єкт зникає з наступного відеокадру, система формує подію, за якої його стан змінюється на "неактивний" у системному реєстрі.

Блок 5. Обчислення прогнозних значень координат розташування об'єктів у наступного кадру. У поточному блоці формується множина прогнозних значень майбутнього розташування структурних об'єктів у наступних послідовних відеокадрах. Якщо об'єкт є присутнім на 100 наступних послідовних відеокадрах, у цьому часовому проміжку між початковим та кінцевим відеокадром об'єкт вважається ідентичним та унікальним.

Прогнозні значення обраховуються за лінійною модифікацією фільтра Калмана з дискретним часом. З огляду на складні умови відстеження структурних об'єктів у робочому середовищі, блок 5 може мати два випадки результуючих даних, а саме:

Випадок 1. Якщо блок 5 обробляє перший відеокадр, то множина всіх виявлених об'єктів обробляється фільтром Калмана для прогнозування розташування на наступному відеокадрі.

Випадок 2. На поточному кадрі та 50 наступних відеокадрах структурний об'єкт може бути виявлений помилково через наявність шумів. Оброблення цього випадку виконує програмний компонент, який фільтрує відеокадри так, щоб відстеження продовжувалося змінною траєкторією відеокадрів допоки метод не видалить відстеження раніше виявленого об'єкту та занесе його до загальної статистики робочої місії.

Результати експериментальних досліджень

Для підготовки та формування навчальних даних було використано робоче середовище сучасного плодового саду в Хмельницькій області, Городоцький район за координатами 49.265011 та 26.548304 відповідно. Відстань між рядами яблунь – 4 м, відстань між плодовими деревами – близько 1 м, висота дерев – близько 2 м. Також на дослідному полі встановлено базову кінематичну станцію реального часу, яка складається з GNSS-приймача та супутникової антени, яка посилає через GPRS-з'єднання сигнал для підвищення точності позиціонування звичайним супутником до 2,5 см. Ефективність детектора оцінювалася за допомогою показників precision, recall, mAP і F1. Відповідно до оціночної інформації Фермерського господарства "CAM+", кількість плодів, що росли на деревах фруктового саду на момент проведення експериментів, становила ~160 тисяч штук. Результати виявлення та обчислення кількості фруктових плодів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати експериментів автоматизованої системи щодо виявлення та обчислення кількості фруктових плодів

№	Погодні умови	Виявлено та обчислено шт.	Виявлено, але не обчислено шт.	Виявлено багатьма камерами, але обчислено одноразово шт.	Всього шт.
1	Сонце (сонце в зеніті)	147 382	72 143	5 743	~160 000
2	Похмуро	145 223	69 944	6 611	~160 000
3	Сонце (сильна затіненість)	132 304	69 336	8 442	~160 000

У результаті проведених експериментів було правильно виявлено та обчислено 147 382, 145 223 та 132 304 (таблиця 1) фруктових плодів за трьох різних погодних умов. Водночас встановлено, що певна кількість фруктових плодів була виявлена, але не обчислена, а саме 72 143, 69 944 та 69 336 для трьох погодних умов; ці об'єкти були ідентифіковані детектором автоматизованої системи як фруктові плоди, проте не враховані під час обрахування, оскільки вони перебували поза поточними робочими зонами. Певну кількість плодів, а саме 5 743, 6 611 та 8 442 за трьох погодних умов, було одночасно виявлено камерами двох або трьох БПЛА та обчислено одноразово, відповідно до логіки запропонованого методу обчислення структурних об'єктів. На рис. 3 надано приклади результатів розпізнавання запропонованої моделі нейронної мережі як для яскравих яблук, так і для фруктів з оклюзіями за різної погоди та умов освітлення.

(а) (б) (в) (г)

Рис. 3. Результати розпізнавання фруктів за допомогою вдосконаленої мережі YOLOv5-v1: (a) хмарно, (b) сонячне світло збоку, (c) сонячно (d), сонячно спереду

На рис. 3 зелені обмежувальні прямокутники представляли яскраві цілі, тоді як сині обмежувальні рамки представляли цілі з оклюзіями. Запропонована модель нейронної мережі зміг виявити структурні

об'єкти на зображеннях, зроблених за різних умов освітлення, включаючи рівномірне освітлення, тьмяне освітлення та сонячне світло. Варто зауважити, що певна кількість фруктових плодів була прикрита листям або перебувала в зонах, погано помітних як для камери БПЛА, так і для людського ока. Як наслідок, детектор автоматизованої системи допустив незначну кількість помилок. Значення статистичних показників, що оцінюють виявлення на обчислення кількості плодів, надано в таблиці 2.

Таблиця 2

Результати роботи детектора

№	Погодні умови	Precision	Recall	F1-score	Помилка I роду	Помилка II роду
1	Сонце (сонце в зеніті)	0,92	0,89	0,90	0,08	0,11
2	Похмуро	0,86	0,82	0,84	0,14	0,18
3	Сонце (сильна затіненість)	0,78	0,74	0,72	0,22	0,26

З таблиці 2 бачимо, що найвищі значення метрик було досягнуто за сонячної погоди, коли сонце перебувало в зеніті, а найнижчі – за сильної затіненості. Порівняння значень показників достовірності розпізнавання за різних погодних умов зображено на рис. 4.

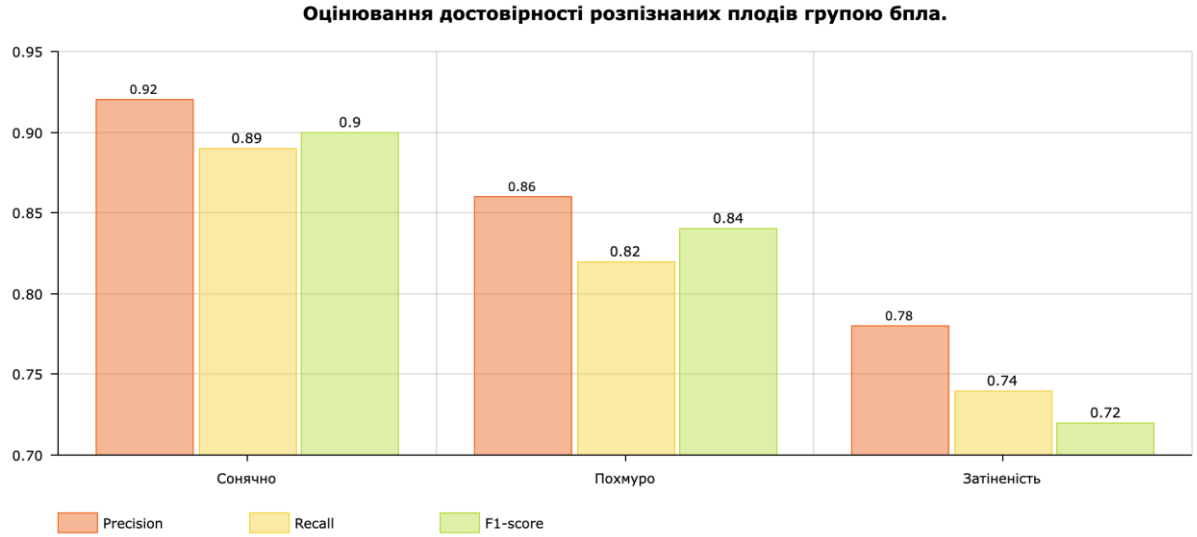


Рис. 4. Порівняння достовірності розпізнавання за різних погодних умов

З рис. 4, рівень достовірності (Accuracy) автоматизованої системи складає: 1) у сонячну погоду – 92,11%, 2) у похмуру – 90,76% та 3) у сонячну погоду, але з високою затіненістю – 82,69%. Отримані значення свідчать про високий показник ефективності автоматизованої системи для виявлення та обчислення фруктових плодів у реальних умовах. У підсумку, проведені експериментальні дослідження підтверджують практичну корисність підготовленої моделі YOLOv5-v1 у рамках використаного підходу виявлення яблук в робочому середовищі фруктового саду та запропонованого методу обчислення кількості структурних об'єктів. Модель добре підходить для розгортання на вбудованих пристроях і може легко адаптуватися до змінних погодних умов у фруктовому саду.

Висновки

У роботі розроблено новий метод обчислення кількості яблук в робочому середовищі фруктового саду, за допомогою якого стане можливим реалізувати інформаційну технологію для розпізнавання та обчислення кількості структурних об'єктів в режимі реального часу. Результати проведених експериментальних досліджень показують, що рівень достовірності автоматизованої системи складає: 1) у сонячну погоду – 92,11%, 2) у похмуру – 90,76% та 3) у сонячну погоду, але з високою затіненістю – 82,69%. Отримані значення свідчать про високий показник ефективності автоматизованої системи для виявлення та обчислення фруктових плодів у реальних умовах. Такі результати свідчать про те, що за сонячних та похмурих погодних умов із низьким рівнем тіні автоматизована система демонструє високу точність та надійність у роботі. Водночас варто зауважити, що через наявність у фруктовому саду значних візуальних шумів, як от, прикриття плодів листям та гілками, ефективність роботи групи БПЛА зокрема та автоматизованої системи загалом у реальних умовах не може бути виконана на 100 %, що може слугувати перспективним завданням для подальших досліджень.

Література

1. Shevchuk H., Hontaruk Ya., Hirenko M. State regulation of horticulture development in Ukraine. Economy and society. 2022. № 43. P. 1–9.

2. Zhou H., Wang X., Au W. et al. Intelligent robots for fruit harvesting: recent developments and future challenges. Precision Agriculture. 2022. Vol. 23, No. 5. P. 1856–1907.

3. Radiuk P.M. Application of a genetic algorithm to search for the optimal convolutional neural network architecture with weight distribution. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. 2020. Vol. 281, No. 1. P. 7–11.

4. Fu L., Gao F., Wu J. et al. Application of consumer RGB-D cameras for fruit detection and localization in field: A critical review. Computers and Electronics in Agriculture. 2020. Vol. 177. P. 105687.

5. Wang D., He D. Channel pruned YOLO V5s-based deep learning approach for rapid and accurate apple fruitlet detection before fruit thinning. Biosystems Engineering. 2021. Vol. 210. P. 271–281.

6. Hu C., Shi Z., Wei H. et al. Automatic detection of pecan fruits based on Faster RCNN with FPN in orchard. International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2022. Vol. 15, No. 6. P. 189–196.

7. Rai P., Mehrotra S., Sharma S. K. Challenges in assessing the quality of fruit juices: Intervening role of biosensors. Food Chemistry. 2022. Vol. 386. P. 132825.

8. Yan B., Fan P., Lei X. et al. A real-time apple targets detection method for picking robot based on improved YOLOv5. Remote Sensing. 2021. Vol. 13, No. 9. P. 1619.

9. Tan M., Le Q. V. EfficientNet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. 36th International Conference on Machine Learning (ICML-2019): Proceedings. Vol. 97. (Long Beach, California, USA, 2019). PMLR.org, 2019. P. 6105–6114.

10. Melnychenko O., Savenko O. A self-organized automated system to control unmanned aerial vehicles for object detection. The 4th International Workshop on Intelligent Information Technologies & Systems of Information Security (IntelITSIS-2023): CEUR-Workshop Proceedings. Vol. 3373. (Khmelnytskyi, 22-24 March 2023). Khmelnytskyi, 2023. P. 589–600.

11. Xiong J., Liu Z., Chen S. et al. Visual detection of green mangoes by an unmanned aerial vehicle in orchards based on a deep learning method. Biosystems Engineering. 2020. Vol. 194. P. 261–272.

12. Wang Z., Walsh K., Koirala A. Mango fruit load estimation using a video-based mango YOLO—Kalman filter—Hungarian algorithm method. Sensors. 2019. Vol. 19, No. 12. P. 2742.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-220-223
УДК 621.315.592

МИХАЛЕВСЬКИЙ ДМИТРО
Вінницький національний технічний університет
http://orcid.org/0000-0001-5797-164X
e-mail: adotq@ukr.net

ВІРОГІДНІСТЬ КОНТРОЛЮ ВИРОБІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ ЗА РІВНЕМ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ ШУМІВ

У статті проводиться дослідження етапів вхідного та вихідного контролю виробів електронної техніки за рівнем низькочастотних шумів. Досліджено основні інформативні параметри: вимірювальну шумову напругу та випадкову похибку. Встановлено, що вимірювальна величина має довірковий інтервал, який враховує похибки вимірювання та визначення границь контролю. Визначено границі контролю, на основі яких отримано аналітичні вирази для розподілу інформативного параметра у визначених межах для надійних та ненадійних виробів електронної техніки. Враховуючи межу розділення виробів на придатні та непридатні, було запропоновано границі контролю, які містять коефіцієнт відсікання імовірних похибок. Отримано узагальнений аналітичний вираз оцінювання вірогідності контролю, який враховує мінімізацію дії систематичних та випадкових факторів впливу для підвищення ефективності вхідного та вихідного контролю за рівнем низькочастотного шуму.

Ключові слова: вірогідність контролю, низькочастотні шуми, вироби електронної техніки, випадкова похибка, контроль.

MYKHALEVSKIY DMYTRO
Vinnytsia National Technical University

RELIABILITY OF THE CONTROL OF ELECTRONIC DEVICES BY LOW-FREQUENCY NOISE

The article examines the stages of input and output control of electronic equipment products according to the level of their own low-frequency noise, namely, the measurement of an informative parameter and its comparison with predetermined limits. It was established that for each type of control there is a need to have a methodology for assessing the compliance of control results with valid characteristics and its effectiveness. One of the main parameters of the effectiveness of all stages of control is the probability, which requires separate studies and the definition of a universal mechanism for its assessment. Therefore, the task was set to obtain a complete method of probability assessment for the input and output control of electronic equipment products by the level of their own noise.

To determine the probabilistic characteristics of the control, the main informative parameters were investigated: the measuring noise voltage, which is random in nature, and the random error. It is established that the measured value has a confidence interval that takes into account measurement errors and determination of control limits. Control limits were obtained, on the basis of which analytical expressions were obtained for the distribution of the informative parameter within the specified limits for reliable and unreliable electronic products. Taking into account the limit of separation of products into suitable and unsuitable, control limits were proposed, which contain the coefficient of possible error cut-off. A generalized analytical expression for evaluating the probability of control is obtained, which takes into account the minimization of the effect of systematic and random factors influencing the result to increase the efficiency of input and output control on the level of low-frequency noise.

Keywords: control probability, low-frequency noise, electronic products, random error, control.

Вступ

Як відомо [1], будь-який технологічний процес виготовлення ВЕТ (виробів електронної техніки) не є ідеальним, тобто на певних етапах присутні похибки, які виникають внаслідок характерних недоліків виробництва та існування різного роду факторів впливу. До таких недоліків можна віднести: дефекти внутрішньої структури напівпровідникових підкладок, дефекти епітаксіальної плівки і контактів, неможливість отримання двох ідентичних виробів із однаковими характеристиками та ін. Це є одним із основних факторів, що призводить до відмов телекомунікаційних та інфокомунікаційних систем. Для мінімізації такого фактору розроблено багато методів та моделей для контролю якості та відбракування потенційно ненадійних виробів у готових партіях так і на етапах виробництва, деякі із них описані у [2–4]. Таким чином, для підвищення ефективності технологічного процесу необхідно визначити сукупність всіх систематичних та випадкових факторів, провести оцінювання їх впливу на параметри ВЕТ, а також за можливістю досягти мінімізації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій та постановка проблеми

Технологічний процес контролю (ВЕТ) за рівнем власних шумів передбачає існування двох етапів [5]: вимірювання інформаційного параметра та порівняння отриманих значень із наперед визначеними границями. Результатом контролю виступає логічне рішення про придатність або непридатність досліджуваного виробу, на основі чого існує можливість проводити якісну оцінку характеристик надійності [6]. Даний вид контролю проводиться на основі досліджень характеристик фізико-хімічних процесів внутрішньої структури ВЕТ, які змінюються в часі. В свою чергу, оцінювання систематичних і випадкових параметрів будь-якого технологічного процесу виготовлення ВЕТ та врахування всіх факторів впливу, дає можливість встановлювати рівень якості продукції на етапах вхідного та вихідного контролю [4, 5]. Для кожного виду контролю є необхідність наявності методики для оцінювання відповідності результатів контролю дійсним характеристикам та його ефективності. Одним із основних параметрів ефективності всіх етапів контролю є вірогідність, яка потребує проведення окремих досліджень та визначення універсального

механізму її оцінювання. Тому, було поставлено завдання отримати повну методику оцінювання вірогідності для вхідного та вихідного контролю ВЕТ за рівнем НЧ шуму.

Метою роботи є підвищення ефективності вхідного та вихідного контролю за рівнем НЧ шуму шляхом отримання узагальненого виразу оцінювання вірогідності із мінімізацією факторів впливу.

Виклад основного матеріалу дослідження

Технологічний контроль ВЕТ за рівнем власних низькочастотних шумів складається із двох етапів: вимірювання інформативного параметра та порівняння його із наперед встановленими границями [4], на основі математичних моделей або отриманих експериментальним шляхом. Кожний етап характеризується існуванням своїх факторів впливу які створюють статичні та випадкові похибки. Це безпосередньо впливає на результат та може бути визначено як повний цикл технологічного контролю. Тому, спершу розглянемо такий цикл, як представлено на схемі рис. 1.

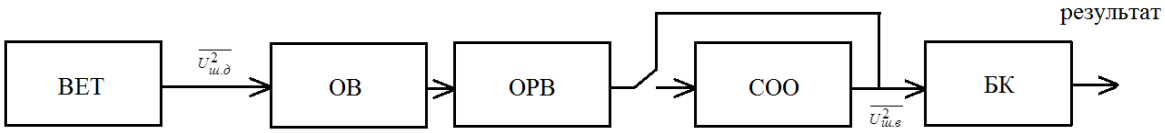


Рис. 1. Схема технологічного контролю за рівнем НЧ шуму

Перший етап контролю – отримання дійсного значення інформативного параметра. В якості інформативного параметра використовується середньоквадратичне значення шумової напруги $\overline{U^2_{ш.д}}$ для будь-якого ВЕТ, що досліджується. Рівень такого параметра в початковому вигляді є недостатнім для отримання результату контролю, тому для його перетворення послідовно виконуються операції вимірювання (ОВ) та обробки результатів вимірювання (ОРВ). Таким чином, результат першого етапу контролю можна записати так [4]:

$$\overline{U^2_{ш.в}} = \frac{k^2 S_д^2 R_н^2}{2T_c^2} \int_0^{T_c} \left(\int_{f_1}^{f_2} U_{ш.д}(f)\,df \right)^2 dt, \tag{1}$$

де k – коефіцієнт підсилення вимірювального каналу; T_c – період вимірювання; $S_д$ і $R_н$ – крутість та навантаження детектора; f_1, f_2 – смуга частот у якій досліджується інформативний параметр.

Для вхідного контролю вказаних операцій перетворень інформативного параметра є достатньо, а границі контролю визначаються із розрахунку шумових моделей при визначенні середньоквадратичного значення шумової напруги $\overline{U^2_{ш.с}}$ для кожного типу ВЕТ [3]. При вихідному або додатковому контролі партій виробів, параметри шумових моделей можуть бути відсутні. Тоді границі контролю можна визначити на основі статистичних операцій оцінювання інформативного параметра (СОО), використовуючи наступні вирази:

$$\overline{U^2_н} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \overline{U^2_{ш.в.i}},$$

$$\delta_c^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \left| \overline{U^2_н} - \overline{U^2_{ш.в.i}} \right|, \tag{2}$$

$$\sigma^2 = \frac{0{,}079}{n-1}\sum_{i-1}^{n} \left(\delta_{вип.i}\right)^2,$$

де $\overline{U^2_{ш.в.i}}$ – вимірювальне значення інформативного параметру i-го виробу із партії кількістю n; $\overline{U^2_{ш.н}}$ – нормоване значення інформативного параметра; δ_c, σ – систематична і випадкова похибки.

Враховуючи вирази (2), загальний результат оцінювання інформативного параметра, можна записати так:

$$\overline{U^2_{в.ш}} \approx \overline{U^2_c} + \delta_c^2 \pm \sigma^2, \tag{3}$$

де $\overline{U^2_c} = \begin{cases} \overline{U^2_{ш.с}}, & \text{при відомих параметрах шумової моделі,} \\ \overline{U^2_н}, & \text{при невідомих параметрах шумової моделі;} \end{cases}$

$\overline{U^2_{ш.с}}$ – значення яке визначається із шумових моделей ВЕТ.

Основними параметрами є вимірювальна шумова напруга $\overline{U^2_{вим}}$ та випадкова похибка σ. Шумова напруга має випадковий характер, і в більшості випадків підпорядковується нормальному закону розподілу. Тоді, вимірювальна величина характеризується довірковим інтервалом, і на результати контролю впливають

похибки вимірювання та визначення границь контролю, які є взаємопов'язаними. Величини $\overline{U^2_{ш.в.i}}$ і σ є випадковими і для їхньої оцінки можна застосувати сумісний закон розподілу, який запишеться так:

$$P(\overline{U^2_{ш.в}}, \sigma^2) = \frac{1}{2\pi(\Delta_1^2\Delta_2^2)^{1/2}} \exp\left(-\frac{(\overline{U^2_{ш.в}} - \overline{U^2_н})^2}{2\Delta_1^2} - \frac{(\sigma^2 - \sigma^2_н)^2}{2\Delta_2^2}\right), \quad (4)$$

де Δ_1 і Δ_2 – середньоквадратичні значення випадкових величин $\overline{U^2_{ш.в.i}}$ і σ відповідно; $\sigma_н$ – математичне очікування середньоквадратичного значення похибки.

На другому етапі контролю необхідно визначити допустимі границі. Згідно [1], умову надійності ВЕТ можна записати так:

$$-\Delta\overline{U^2_{гр}} + \overline{U^2_н} - \delta^2_c < \overline{U^2_{ш.в}} + \sigma^2 < \overline{U^2_н} - \delta^2_c + \Delta\overline{U^2_{гр}},$$
$$-\Delta\overline{U^2_{гр}} + \overline{U^2_н} - \delta^2_c - \overline{U^2_{ш.в}} < \sigma^2 < \overline{U^2_н} - \overline{U^2_{ш.в}} - \delta^2_c + \Delta\overline{U^2_{гр}}, \quad (5)$$

де $\Delta\overline{U^2_{гр}}$ – границя контрольного поля допуску.

Враховуючи нерівності (5), отримаємо вираз для розподілу інформативного параметра у встановлених границях контролю для надійних ВЕТ:

$$P_{над}(\overline{U^2_{ш.в}}) = \frac{\int_{-\Delta\overline{U^2_{гр}}+\overline{U^2_н}-\delta^2_c-\overline{U^2_{ш.в}}}^{\overline{U^2_н}-\overline{U^2_{ш.в}}-\delta^2_c+\Delta\overline{U^2_{гр}}} P(\overline{U^2_{ш.в}}, \sigma^2)\, d\sigma^2}{\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\Delta\overline{U^2_{гр}}+\overline{U^2_н}-\delta^2_c-\overline{U^2_{ш.в}}}^{\overline{U^2_н}-\overline{U^2_{ш.в}}-\delta^2_c+\Delta\overline{U^2_{гр}}} P(\overline{U^2_{ш.в}}, \sigma^2)\, d\sigma^2\, d\overline{U^2_{ш.в}}}. \quad (6)$$

Для ненадійних виробів розподіл інформативного параметра складе:

$$P_{над}(\overline{U^2_{ш.в}}) = \frac{p(\overline{U^2_{ш.в}}) - \int_{-\Delta\overline{U^2_{гр}}+\overline{U^2_н}-\delta^2_c-\overline{U^2_{ш.в}}}^{\overline{U^2_н}-\overline{U^2_{ш.в}}-\delta^2_c+\Delta\overline{U^2_{гр}}} P(\overline{U^2_{ш.в}}, \sigma^2)\, d\sigma^2}{1 - \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\Delta\overline{U^2_{гр}}+\overline{U^2_н}-\delta^2_c-\overline{U^2_{ш.в}}}^{\overline{U^2_н}-\overline{U^2_{ш.в}}-\delta^2_c+\Delta\overline{U^2_{гр}}} P(\overline{U^2_{ш.в}}, \sigma^2)\, d\sigma^2\, d\overline{U^2_{ш.в}}}, \quad (7)$$

де $p(\overline{U^2_{ш.в}})$ – закон розподілу інформативного параметра.

Після визначення границь контролю, передбачається виконання операції їх порівняння із отриманими результатами оцінювання інформативного параметрами. Але особливістю контролю ВЕТ за рівнем НЧ шумів є, по суті, наявність однієї границі, значення якої буде завжди більше нуля [6]. Тоді, граничне допустиме значення інформативного параметра можна виразити через нормоване значення інформативного параметра, наступним чином:

$$\overline{U^2_{гр}} = a\overline{U^2_н}, \quad (8)$$

де a – коефіцієнт контролю, яким можна задавати різні рівні якості ($a > 1$).

Розділення виробів на придатні та непридатні можна представити як показано на рис. 2.

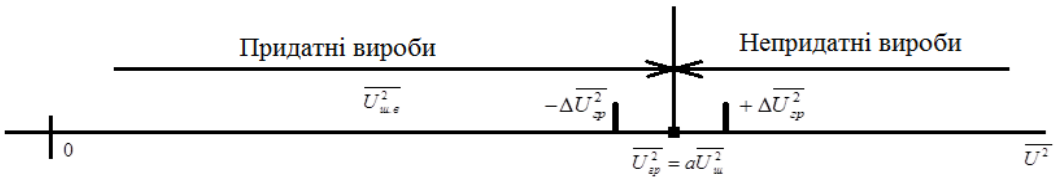


Рис. 2. Розділення придатних та непридатних виробів

Як видно із рис. 2, існує значення інформаційного параметра, яке умовно розділяє придатні і непридатні вироби. Враховуючи існування різного роду факторів це значення може мати випадковий характер в межах допустимого інтервалу границь контролю від середньостатистичного значення $\overline{U^2_{гр}}$. Тоді умову контролю для ВЕТ за рівнем НЧ шумів можна записати так:

$$\overline{U^2_{вим}} < \overline{U^2_{гр}} - \Delta\overline{U_{гр}}. \quad (9)$$

Тоді, враховуючи (8) і (9), нерівності (5) можна записати так:

$$\overline{U^2_{вим}} + \sigma^2 < a\overline{U^2_н} - \delta^2_c - \Delta\overline{U^2_{гр}},$$
$$\sigma^2 < a\overline{U^2_н} - \overline{U^2_{вим}} - \delta^2_c - \Delta\overline{U^2_{гр}}. \quad (10)$$

Враховучи вище сказане, загальний вираз, вірогідності контролю можна записати так:

$$P = \int_0^{\overline{U^2_{гр}}} \int_0^{\sigma^2_{гр}} P(\overline{U^2_{вим}}, \sigma^2)\, d\sigma^2\, d\overline{U^2_{вим}}. \qquad (11)$$

Як відомо, із теорії контролю [5], вірогідність це відповідність результату контролю дійсному стану об'єкта контролю. В даному випадку, це означає з якою імовірністю результат контролю "придатний" буде відповідати дійсним характеристикам досліджуваних ВЕТ. Тому, для отримання такого результату можливо три випадки: оцінка придатного виробу з результатом "придатний", оцінка придатного з результатом "непридатний" та оцінка непридатного виробу як "придатний". В зв'язку із постійним здешевленням технології виготовлення ВЕТ, по відношенню до затрат при виникненні несправності телекомунікаційних та інфокомунікаційних систем на базі неякісних ВЕТ, другий випадок не є суттєвим і його впливом на вірогідність можна нехтувати за допомогою коефіцієнта за рахунок відсікання імовірних похибок використовуючи параметр $\Delta\overline{U_{гр}}$. Таким чином, вірогідність контролю за рівнем НЧ шумів запишеться наступним чином:

$$P = \int_0^{a\overline{U^2_н} - \delta^2_c - \Delta\overline{U^2_{гр}}} \int_0^{(\overline{U^2_{гр}} + \delta^2_c - \overline{U^2_{вим}} - \Delta\overline{U^2_{гр}})} P(\overline{U^2_{вим}}, \sigma^2)\, d\sigma^2\, d\overline{U^2_{вим}} -$$
$$- \int_{a\overline{U^2_н} - \delta^2_c - \Delta\overline{U^2_{гр}}}^{\infty} \int_0^{(\overline{U^2_{гр}} + \delta^2_c - \overline{U^2_{вим}} - \Delta\overline{U^2_{гр}})} P(\overline{U^2_{вим}}, \sigma^2)\, d\sigma^2\, d\overline{U^2_{вим}}. \qquad (12)$$

Отже отриманий вираз дає можливість оцінювати вірогідність контролю ВЕТ за рівнем НЧ шумів на основі зменшення дії систематичних і випадкових факторів впливу.

Висновки

Таким чином, основною задачею технологічного вхідного та вихідного контролю за рівнем власних шумів є підвищення вірогідності оцінювання характеристик внутрішньої структури ВЕТ. В роботі отримано границі контролю, які мінімізують вплив систематичних та випадкових факторів впливу на результат для підвищення ефективності вхідного та вихідного контролю за рівнем НЧ шуму. На основі границь запропоновано узагальнений аналітичний вираз оцінювання вірогідності контролю.

Література

1. Дунаев Б.Б. Точность измерений при контроле качества / Дунаев Б.Б. – К. : Техніка, 1981. – 150 с.
2. Stefanos N. Manias. Fully Controlled Semiconductor Devices. Power Electronics and Motor Drive Systems. 2017, P. 695-805. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811798-9.00010-X.
3. Кичак В.М. Оцінка якості ітегральних транзисторів за допомогою низькочастоних шумів / В.М. Кичак, Д.В. Михалевський, В.В Стронський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький, 2005. – № 2. – С. 177–18.
4. Михалевський Д.В. Метод безпосереднього прогнозування надійності виробів електронної техніки за рівнем НЧ шуму / Д.В. Михалевський, В.М. Кичак // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2008. – № 1. – С. 196–203.
5. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю : навчальний посібник / [Володарський Є.Т., Кухарчук В.В., Поджаренко В.О., Сердюк Г.Б.]. – Вінниця : ВДТУ, 2001. – 219 с.
6. Михалевський Д.В. Прогнозування часу напрацювання на відмову виробів електронної техніки за рівнем НЧ шуму / Д.В. Михалевський // ВОТТП-2012 : матеріали одинадцятої Міжнар. науково-технічної конф., Хмельницький, 5-8 червня 2012 р. – Хмельницький, 2012. – С. 55–56.

References

1. Dunaev B.B. Tochnost' izmerenij pri kontrole kachestva / Dunaev B.B. – K. : Tehnika, 1981. – 150 s.
2. Stefanos N. Manias. Fully Controlled Semiconductor Devices. Power Electronics and Motor Drive Systems. 2017, P. 695-805. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811798-9.00010-X.
3. Kychak V.M. Otsinka yakosti itehralnykh tranzystoriv za dopomohoiu nyzkochastonykh shumiv / V.M. Kychak, D.V. Mykhalevskyi, V.V Stronskyi // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – Khmelnytskyi, 2005. – № 2. – S. 177–18.
4. Mykhalevskyi D.V. Metod bezposerednoho prohnozuvannia nadiinosti vyrobiv elektronnoi tekhniky za rivnem NCh shumu / D.V. Mykhalevskyi, V.M. Kychak // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2008. – № 1. – S. 196–203.
5. Metrolohichne zabezpechennia vymiriuvan i kontroliu : navchalnyi posibnyk / [Volodarskyi Ye.T., Kukharchuk V.V., Podzharenko V.O., Serdiuk H.B.]. – Vinnytsia : VDTU, 2001. – 219 s.
6. Mykhalevskyi D.V. Prohnozuvannia chasu napratsiuvannia na vidmovu vyrobiv elektronnoi tekhniky za rivnem NCh shumu / D.V. Mykhalevskyi // VOTTP-2012 : materialy odynadtsiatoi Mizhnar. naukovo-tekhnichnoi konf., Khmelnytskyi, 5-8 chervnia 2012 r. – Khmelnytskyi, 2012. – S. 55–56.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-224-230
УДК 637.5.02

OLIINYK VIACHESLAV
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"
https://orcid.org/0000-0002-0914-8664
e-mail: v.o.oliinyk@khai.edu
LUKIN VOLODYMYR
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"
https://orcid.org/0000-0002-1443-9685
e-mail: v.lukin@khai.edu

USE OF SIMILARITY METRICS IN ROBUST TIME DELAY ESTIMATION

This paper addresses the task of time delay and direction of arrival estimation for a source of the wideband signal using two sensors with fixed displacement. The peculiarity of the task statement is that a limited time of signal observation is supposed and additive noise is assumed non-Gaussian with a heavy-tail distribution. This leads to a high probability of abnormal estimates for the conventional signal processing method based on cross-correlation. To decrease this probability, it is proposed to reformulate the task of cross-correlation processing to the task of similarity estimation between two data arrays. This allows using different similarity metrics, particularly those that have less sensitivity to outliers in data (impulse noise), and, thus, provide better robustness for non-Gaussian environments typical for several applications of time delay estimation. More than ten different similarity metrics are considered for the model of the symmetric α-stable distribution describing noise properties. It is shown that some metrics including cosine distance, Hellinger, and some others are able to provide sufficiently better accuracy of time delay estimation both in the sense of less RMSE of normal estimates and probability of abnormal estimates for typical values of α and a wide range of γ values for symmetric α-stable distribution.

Key words: time delay estimation, similarity metrics, robustness.

ОЛІЙНИК ВЯЧЕСЛАВ, ЛУКІН ВОЛОДИМИР
Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

ВИКОРИСТАННЯ МЕТРИК ПОДІБНОСТІ ПРИ СТІЙКОМУ ОЦІНЮВАННІ ЗАТРИМКИ ЧАСУ

У цій статті розглядається задача визначення часу затримки та напрямку приходу випромінювання від джерела широкосмугового сигналу за допомогою двох датчиків із фіксованою відстанню між ними. Особливістю постановки завдання є те, що вводяться припущення про обмеженого часу спостереження сигналу, а адитивний шум припускається негаусовим та таким, що має розподілом із важким хвостом. Це призводить до високої ймовірності аномальних оцінок для традиційного методу обробки сигналу на основі взаємної кореляції. Щоб зменшити цю ймовірність, пропонується переформулювати задачу взаємно-кореляційної обробки як задачу оцінки подібності між двома масивами даних. Це дозволяє використовувати різні метрики подібності, зокрема, ті, які мають меншу чутливість до викидів у даних (імпульсного шуму) і, таким чином, забезпечують кращу стійкість для негаусових середовищ, які є типовими для кількох застосувань оцінки часової затримки. Для моделі симетричного α-стабільного розподілу, що описує властивості шуму, розглянуто більше десяти різних метрик подібності. Показано, що деякі метрики, включаючи косинусну відстань, відстань Хеллінгера та деякі інші, здатні забезпечити суттєво кращу точність оцінки часової затримки як у сенсі меншого середнього квадратичного значення нормальних оцінок, так і ймовірності аномальних оцінок для типових значень α та широкого діапазону значень γ для симетричного α-стабільного розподілу.

Ключові слова: оцінка часової затримки, метрики подібності, стійкість.

Problem statement

The task of time delay estimation (TDE) or determination of the direction of arrival (DOA) based on TDE arises in many applications including teleconferencing [1, 2], seismology [3], hydroacoustics (passive sonars) [4], and others [5, 6]. For a simple (idealized) case of stationary wideband signal with the known spectrum, high signal-to-noise ratio (SNR), Gaussian additive noise with the known spectrum, fixed (not varying) time delay, and quite large observation time, the solution is known [1, 4]. It is based on cross-correlation processing of received signals with possible pre-whitening in time or spectral domain if additive noise is not white. The time delay is estimated by finding the largest (global) maximum of the cross-correlation function or its modification and then recalculated to DOA taking into account antenna geometry. However, the situation changes if one or several aforementioned assumptions are violated, i.e. if the signal source moves, SNR is small, and/or the noise is not Gaussian. Note that, for each particular application, there are different reasons to violate these assumptions. For example, additive noise is often non-Gaussian [7, 8], and/or a signal source is not stationary (its position changes in time) as this happens in teleconferencing and hydroacoustics. This leads to an increase in the variance of normal estimates of TDE and DOA as well as to a higher probability of abnormal estimates [9, 10]. This shows that it is desired to provide robustness of TDE in two senses [11], i.e. robustness with respect to the impulsivity of the noise and to limited a priori knowledge on statistics of the noise (parameters α and γ of the symmetric α-stable process simulating non-Gaussian noise).

Analysis of recent research

There are several ways to improve the performance of TDE and, in general, tracking a source of wideband signals. Shao and Nikias [12] proposed data processing based on fractional lower-order moments. Benesty et al [2] used minimum entropy to improve estimation. H. Li et al [13] concentrated on the estimation of the time delay derivative in a complex noise environment. Mehrjouyan and Alfi [14] applied an adaptive robust Kalman filter for

tracking. A joint analysis of these publications shows that the robustness of estimation is tried to be improved at stages of primary signal processing [2, 12] and secondary processing of already obtained estimates [14, 15] or a set of sequentially obtained estimates of cross-correlation outputs [16]. In general, the performance improves due to better accuracy of elementary estimates obtained at the first stage (i.e. for short-time intervals of signal accumulation and processing) and more efficient (robust) post-processing of the already obtained time delay estimates or cross-correlator outputs. Then, it is reasonable to solve both subtasks. Recently, we have concentrated on improving the accuracy of TDE for elementary intervals looking for more efficient processing of signals embedded in non-Gaussian noise by partially or fully replacing the cross-correlation [17-19]. An approach based on robust DFT [20] was proposed in [17] but, unfortunately, the robust DFT has no fast algorithms and, thus, the computational efficiency of the corresponding processing is limited. Another approach [18] presumes the use of a center-weighted median filter [21] to remove impulses in received signals, but it is unclear what are the best parameters of such a filter depending on signal and noise properties. Finally, the authors of the paper [19] propose to apply similarity measures (metrics) instead of cross-correlation-based processing assuming that robust similarity measures or distances are able to provide desired properties to the entire processing. However, the amount of the similarity measures considered in [19] is very limited, and the final recommendations concerning the best among them are not given.

Thus, the Goal of this paper is the following: to investigate the possibility of using a wide set of similarity measures in time delay estimation for different possible practical conditions and to provide motivated recommendations on the best (most robust) similarity measures.

Analysis of possible solutions using different similarity measures

We assume that two sensors displaced by an a priori known distance L receive the mixtures of information wideband noise-like (WNL) signal and additive noise:

$$x_1(t) = s(t) + \xi_1(t), x_2(t) = s(t-\tau_0) + \xi_2(t) \; x_1(t) = s(t) + \xi_1(t), \quad x_2(t) = s(t-\tau_0) + \xi_2(t) \tag{1}$$

where $s(t)$ $s(t)$, $t = [T_b; T_e]$ denotes the WNL information signal which is irradiated by a signal source); $\xi_1(t)$ and $\xi_2(t)$ denote the additive noise realizations for the corresponding sensors, τ_0 τ_0 is the true value of the time delay. There are the following assumptions on WNL signal: its mean is equal to zero and its spectrum is more "low-frequency" than the additive noise spectrum. For additive noise, we assume the following: the means (or location parameters) of the processes $\xi_1(t)$ and $\xi_2(t)$ are assumed equal to zeroes, they are characterized by probability density function that differs from Gaussian and it is more heavy-tailed although there is no absolutely accurate information about noise intensity and impulsivity. The latter assumption follows from practice where it is difficult to estimate statistical characteristics of the noise (especially, from its mixture with information signal) and, moreover, the noise statistics might vary in time. We denote the observation interval starting and ending time instances as T_b and T_e. It is also assumed that the maximal possible value of τ_0 determined by L and the wave propagation speed in a given medium C as $\tau_{max} = L / C$ $\tau_{max} = L/C$ is considerably smaller than $T_e - T_b$. Meanwhile, $T_e - T_b$ is also restricted from the upper side by the source motion, the computational efficiency of processing, and the necessity to get elementary estimates frequently enough. Because of this, $T_e - T_b$ is usually larger than τ_{max} by tens of times.

The conventional way of TDE presumes the calculation of the cross-correlation function:

$$Y(\tau) = \int_{-T/2}^{T/2} x_1(t)\, x_2(t+\tau)\, dt \tag{2}$$

where $T = T_e - T_b$ with the further search of the global maximum coordinate in the limits from $-\tau_{max}$ $-\tau_{max}$ to τ_{max} τ_{max}. This coordinate is accepted as the time delay estimate. Let us now rewrite the expression (2) as

$$E_1 + E_2 - 2Y(\tau) = \int_{-T/2}^{T/2} \left(x_1^2(t) - 2x_1 x_2(t+\tau) + x_2^2(t+\tau) \right) dt \tag{3}$$

where $E_1 = \int_{-T/2}^{T/2} x_1^2(t)\, dt$ $E_1 = \int_{-T/2}^{T/2} x_1{}^2(t)\, dt$ and $E_1 = \int_{-T/2}^{T/2} x_2^2(t+\tau)\, dt$ $E_2 = \int_{-T/2}^{T/2} x_2{}^2(t+\tau)\, dt$ are, in fact, the energies of the mixture $x_1(t)$ $x_1(t)$ and $x_2(t)$ $x_2(t)$ [19]. Suppose that E_1 E_1 and E_2 E_2 are practically constant if WNL signal and additive noises are locally stationary. Then, it becomes clear that instead of searching for the global maximum of expression (2), one can search for the global minimum of (3) which is, in fact, the Euclidian distance between the

received signals $x_1(t)$ $x_1(t)$ and $x_2(t+\tau)$ $x_2(t+\tau)$. For sampled versions of these signals $x_1(i), i = 1,\dots,N$ $x_1(i), i = 1,\dots,N$ and $x_2(i+j), i = 1,\dots,N$ $x_2(i+j), i = 1,\dots,N$, it is then possible to compute the similarity measure $S(j), i = -j_{max},\dots,j_{max}$ $S(j), i = -j_{max},\dots,j_{max}$, where $j_{max}\Delta t = \Delta\tau_{max} = L/C$ $j_{max}\Delta t = \Delta\tau_{max} = L/C$ and Δt is the sampling rate.

The next step deals with the fact that Euclidian distance is not robust with respect to impulse noise. Then, some other similarity measures can be applied instead of it. In particular, it has been proposed in [19] to form the output as $S_\beta(j) = \sum \left|x_1(i) - x_2(i+j)\right|^\beta$ $S_\beta(j) = \Sigma|x_1(i) - x_2(i+j)|^\beta$ where β denotes the order. Three values of β equal, namely, to 0.5 1.0, and 1.5 have been considered in [19] and it has been demonstrated that, depending on the additive noise impulsivity, all of these three values could be quasi-optimal in the sense of providing the best robustness. If so, other similarity measures that possess certain robust features can be potentially applied as well.

In our studies, we have used several similarity measures and distances [22]. One of them is Minkowski's distance expressed as

$$d_M = x_i - y_{ip} = \sqrt[p]{\sum_{i=1}^{n} \left|x_i - y_i\right|^p}, \tag{4}$$

where x and y are general notations for two vectors that can represent two (mutually shifted) signals received by two sensors for the task of our research, i is the vector element index, and p denotes the order. As is seen, in [19], we have used not directly the Minkowski distance but its analog. Also note that the Minkowski metrics with p=1 and p=2 are called Manhattan and Euclidian distances, respectively.

The Canberra metric [22] was originally used in solving cluster analysis problems, which involve assessing the similarity of data for grouping and building a hierarchy relative to the original data. This metric is written as

$$d_C = \sum_{i=1}^{n} \left|x_i - y_i\right| / \left(\left|x_i\right| + \left|y_i\right|\right) \tag{5}$$

A metric based on the Bray-Curtis (also called Sorensen) distance [22] has been mainly used for the assessment of the similarity of samples in botany. It is expressed as

$$d_{BC} = \sum_{i=1}^{n} \left|x_i - y_i\right| / \sum_{i=1}^{n} \left|x_i + y_i\right| \tag{6}$$

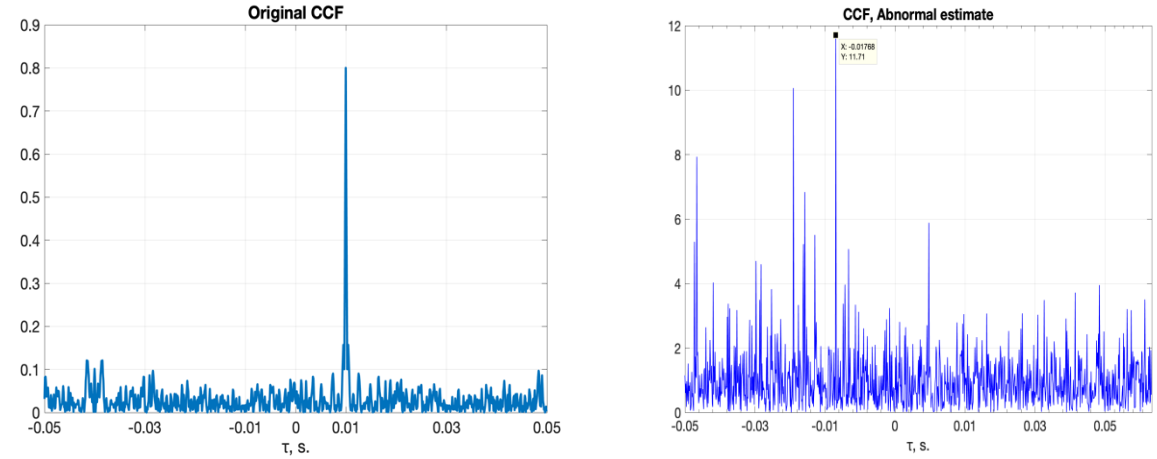
The Hellinger distance (see the expression below) as a modification of the Euclidian distance is intensively used in probability theory, cluster, and statistical analysis:

$$d_H = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left|\sqrt{x_i} - \sqrt{y_i}\right|^2} \tag{7}$$

Instead of searching the maximum of the cross-correlation function like in the conventional method, we need to search for the global minimum of sampled functions (outputs) $S_{Mp}(j)$, $S_C(j)$, $S_{BC}(j)$, and $S_H(j)$ that are based on Minkowski metric with a given p, Canberra, Bray-Curtis, and Hellinger distances, respectively.

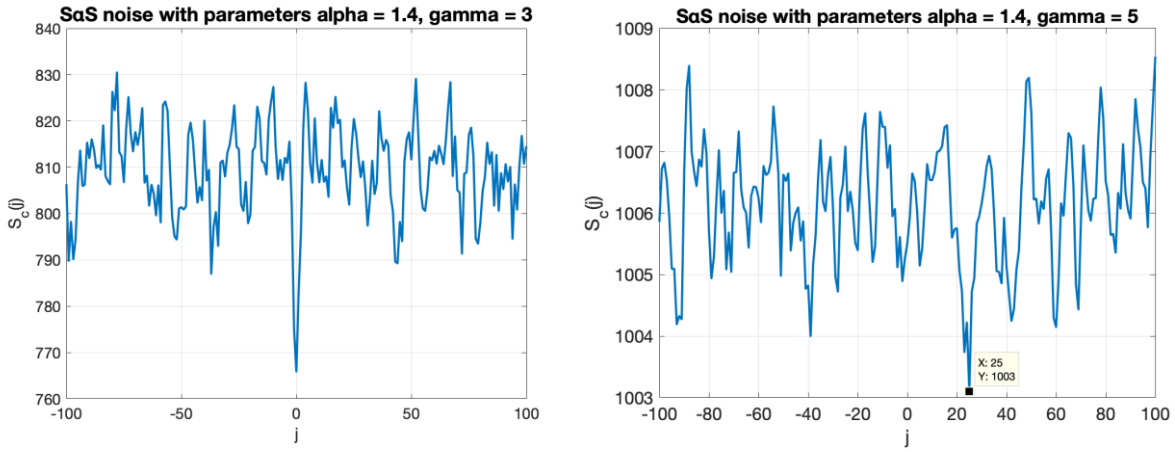
Let us give some examples to better explain the aforesaid. First, Figure 1 shows two examples of absolute values of the cross correlation function $Y(\tau)$ in case of using the standard approach. There is the situation of obtaining a normal estimate (τ_0 = 0.01 s) for a very high signal-to-noise ratio (Fig. 1a). In turn, the situation of abnormal estimation is presented in Fig. 1b. In this case, τ_0 is the same, but, due to heavy noise, the global maximum is observed for τ about – 0.007 s and the standard method fails.

Outputs for the considered distances differ from $Y(\tau_j) = Y(j)$, $j=-j_{max}, \dots, j_{max}$ as well as between each other. To demonstrate this, Figure 2 presents the array $S_C(j)$, $j=-j_{max}, \dots, j_{max}$, where j_{max} = 100 for the considered case. First of all, in this case, one needs to find the global minimum. The case of obtaining a normal estimate is depicted in Fig. 2,a where, in this case, τ_0 = 0 s and this corresponds to j = 0. As one can see, output values are of the order of hundreds and the minimal value for j = 0 is only slightly smaller than for other j. For more intensive non-Gaussian noise (see the details of the used noise model in the next section), the obtained estimate is abnormal – it is observed for j = 25, SNR is about -15 dB. The values of $S_C(j)$ due to more intensive noised (larger γ) have increased and they are all about 1006.



a b

Figure 1. Output CCFs *Y(τ)* using the standard approach for the situations of normal (a) and abnornal (b) estimation of time delay



a b

Figure 2. Output for the Canberra distance S_C(j): normal (a) and abnormal (b) estimation cases Signal/Noise Model

The following similarity metrics are investigated in our study: Minkowski distance with p = 1.5, 1.0. and 0.5, Canberra, Bray-Curtis, and Hellinger distances. Simulations have been conducted to compare their effectiveness using a broadband noise-like signal. To model it, additive white Gaussian noise was passed through a low-pass filter to provide the upper (cut-off) frequency approximately three times lower than the Nyquist frequency (20 kHz in our case). The power (variance) was fixed and equal to one. To simulate additive noise independent for the receivers, a model of a symmetric alpha-stable (*SαS*) process [8] was chosen. This allows for the flexible variation of the noise intensity and distribution tail heaviness using two parameters: $\alpha_{S\alpha S}$ adjusts the distribution tail heaviness (smaller $\alpha_{S\alpha S}$ relates to heavier tails), and γ is the scale parameter responsible for the noise intensity (larger γ corresponds to more intensive noise). This makes it possible to vary the equivalent signal-to-noise ratio.

Statistical modelling was carried out using MATLAB in the following manner. 10,000 realizations of the noisy signal and noises $\xi_1(t)$ and $\xi_2(t)$ were generated for each considered pair of $\alpha_{S\alpha S}$ and γ in the first and second channels. Standard methods were used to obtain the output arrays for the standard approach denoted as Fourier approach in the plots below and new approaches based on the considered similarity metrics (distances). The root mean square error $\sigma_\tau(\gamma)$ of normal estimates and the probability of abnormal estimates $P_{abn}(\gamma)$ were determined for each of the considered methods. For both, the smaller the better. It should be noted that the latter criterion holds more significance.

Result Analysis

Simulation results were obtained for four $\alpha_{S\alpha S}$ values, namely 2, 1.8, 1.6, and 1.4, where $\alpha_{S\alpha S}$ = 2 corresponds to Gaussian noise.

The obtained plots $P_{abn}(\gamma)$ are presented in Fig. 3 for the proposed approach based on the Minkowski distance (recall that a larger γ corresponds to more intensive noise, to a smaller equivalent SNR, and to a larger probability of abnormal errors observed for all plots in Figures 3 and 4). For $\alpha_{S\alpha S}$ = 2 (Fig. 3a), the proposed approach performs slightly better than the conventional one (based on cross-correlation processing) for large values of γ. If $\alpha_{S\alpha S}$ = 1.8 (Fig. 3b), the advantages of using the proposed approach become obvious. The use of the

Minkowski distance with p=1.0 provides, on average, slightly better results than for other p values. For smaller $\alpha_{S\alpha S}$ values (Figures 3c and 3d), the conventional method fails for γ = 1.0. The proposed approach possesses certain robustness to the heavy-tailed noise even for γ = 2. The results for all values of p are approximately the same, so we can recommend using p = 1.

Let us analyze now the simulation data for three other distances. The results are presented in Fig. 4 for four values of $\alpha_{S\alpha S}$.

As one can see, the distances utilized in classification and cluster analysis are able to yield favourable outcomes. The standard approach based on cross-correlation processing yielded quite good results under ideal conditions ($\alpha_{S\alpha S}$ = 2, Fig. 4a). However, Hellinger and Bray-Curtis outperformed it. The use of processing based on the Canberra metric is not suitable for these conditions.

As noise impulsivity increases (see data for $\alpha_{S\alpha S}$ = 1.8, Fig. 4b), the conventional approach clearly becomes the worst ($P_{abn}(\gamma)$ values occur to be the largest for a wide range of γ variation). The data processing method based on Canberra distance is less efficient than for two other considered distances. The methods based on Hellinger and Bray-Curtis distances perform in a similar manner. For more impulsive additive noise (see data for $\alpha_{S\alpha S}$ = 1.6 and 1.4, Figures 4c and 4d, respectively), the conventional method fails even for γ = 1. Meanwhile, it is possible to state that the data processing method that relies on the Bray-Curtis metric performs in the best manner.

In practice, different situations are possible. First, one might know noise impulsivity (associated with $\alpha_{S\alpha S}$ for the $S\alpha S$ noise model) in advance. Then, the obtained results presented in Figures 3 and 4 allow for choosing the most appropriate similarity metric (distance). If $\alpha_{S\alpha S}$ is a priori known and it is difficult to measure it, a "robust" approach can be applied. In this sense, we recommend using either the Minkowski distance with the parameter p equal to unity or the Bray-Curtis distance. In the future, it seems possible to design some adaptive approach presuming estimation of non-Gaussian noise parameters and proper selection of distance.

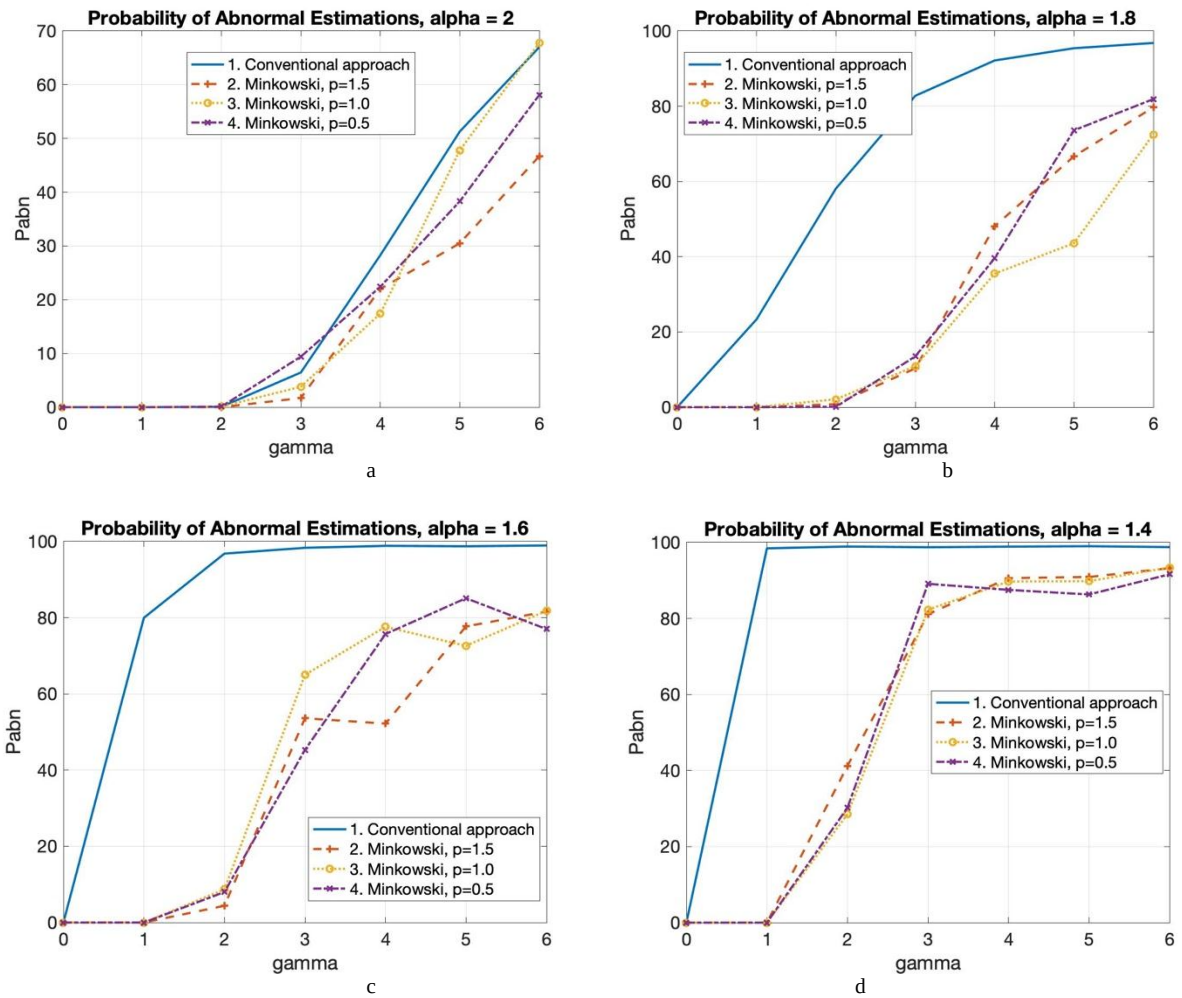


Figure 3. Comparison of performance for the conventional approach and the proposed approach based on Minkowski distance

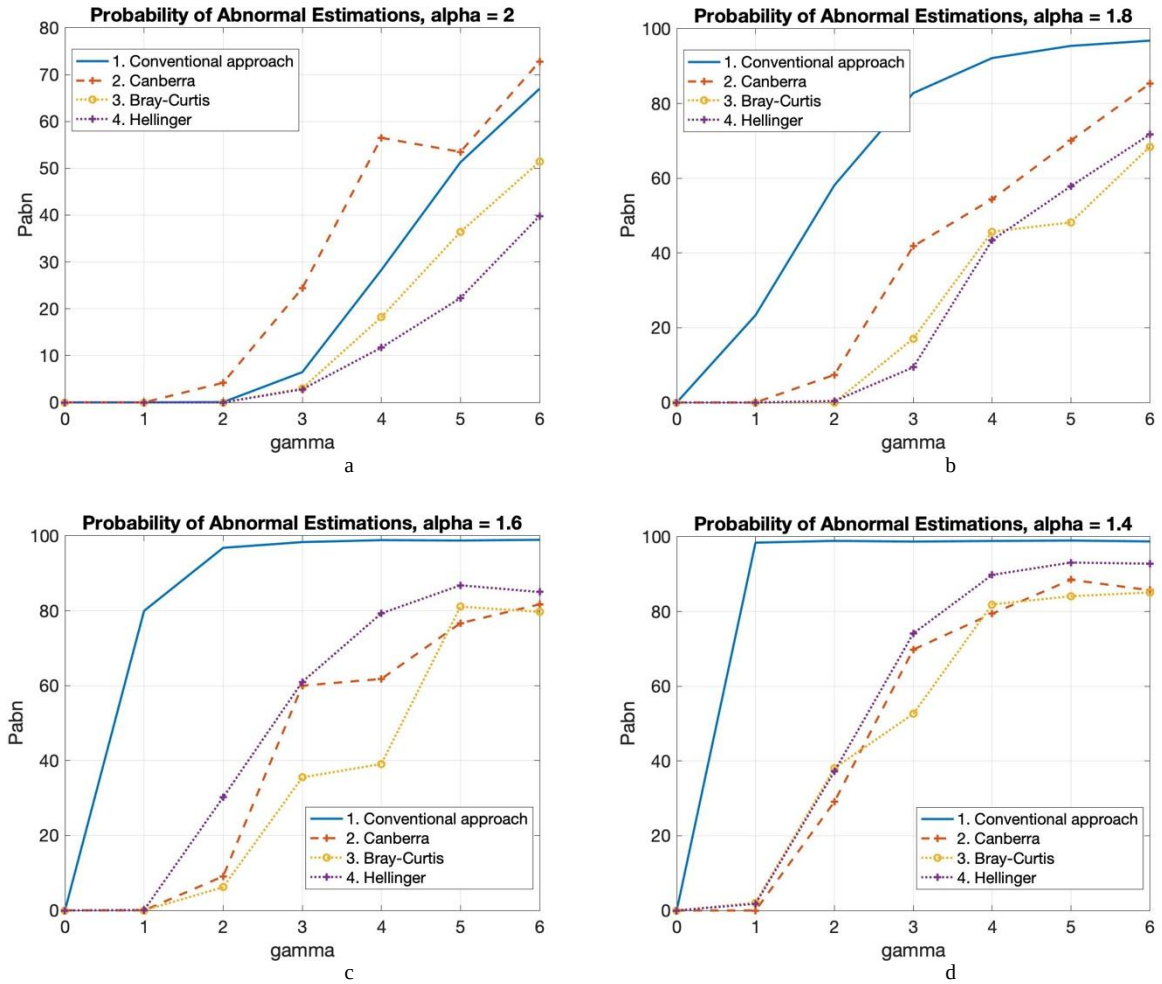


Figure 4. Comparison of performance for the conventional approach and the proposed approach based on Canberra, Bray-Curtis, and Hellinger distances

Conclusions

This article focuses on the application of similarity metrics in time delay estimation as an alternative to conventional cross-correlation processing, which serves as a reliable technique for TDE for WNL signals in favourable conditions of low-intensity Gaussian noise. It is shown that non-Gaussianty of the noise leads to a high probability of abnormal estimates of time delay. The proposed method relies on using robust similarity metrics as the basis of processing. Employing a robust distance metric as a CCF analogue provides rather fast and efficient processing for non-Gaussian environment. Simulation data giving some insight for choosing the most suitable metric based on noise parameters are presented. Through simulation results, it is evident that the proposed approach demonstrates a significant improvement compared to the conventional method. As a result, future research will aim to develop an adaptive metric that can be applied in practical situations.

References

1. Benesty J., Chen J. Study and Design of Differential Microphone Arrays. Berlin: Springer-Verlag, 2013. 183 p.
2. Benesty J., Huang Y., Chen J. Time delay estimation via minimum entropy. IEEE Signal Processing Letters. 2007. Vol. 14, № 3. P. 157–160. DOI: 10.1109/LSP.2006.884038.
3. Carrier A., Got J.-L. A maximum a posteriori probability time-delay estimation for seismic signals. Geophysical Journal International. 2014. Vol. 198, № 3. P. 1543–1553. DOI: 10.1093/gji/ggu218.
4. Carter G. Coherence and Time Delay Estimation: An Applied Tutorial for Research, Development, Test, and Evaluation Engineers. New York: IEEE Press, 1993. 506 p.
5. Saad M. M., Bleakley C. J., Ballal T., Dobson S. High-Accuracy Reference-Free Ultrasonic Location Estimation. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2012. Vol. 61, № 6. P. 1561–1570. DOI: 10.1109/TIM.2011.2181911.
6. Zhu Yi., Liu L., Zhang J. Joint Angle and Delay Estimation for 2D Active Broadband MIMO-OFDM Systems. Proceedings of the IEEE Global Communications Conference, GLOBECOM'13, 9–13 Dec. 2013, Atlanta, GA. [S. l.], 2013. P. 3322–3327. DOI: 10.1109/GLOCOM.2013.6831581.
7. Nielsen R. O. Sonar Signal Processing. Boston: Artech House, 1991. 384 p.
8. Nolan J. P. Stable Distributions: Models for Heavy-Tailed Data. Boston: Birkrusher, 2005. 364 p.
9. Ianniello J. P. Time delay estimation via cross-correlation in the presence of large estimation errors. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Process. 1982. Vol. 30, № 6. P. 998–1003. DOI: 10.1109/TASSP.1982.1163992.
10. Björklund S. A Survey and Comparison of Time-Delay Estimation Methods in Linear Systems. Linköpings: UniTryck, 2003. 170 p.
11. Huber J. P. Robust statistics. New York: Wiley, 1981. 380 p.
12. Shao M., Nikias C. L. Signal processing with fractional lower order moments: stable processes and their applications. Proceedings of IEEE. 1993. Vol. 81, № 7. P. 986–1010. DOI: 10.1109/5.231338.

13. Li H., Gedikli E. D., Lubbad R. Exploring time-delay-based numerical differentiation using principal component analysis. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2020. Vol. 556. P. 1–20. DOI: 10.1016/j.physa.2020.124839.

14. Mehrjouyan A., Alfi A. Robust adaptive unscented Kalman filter for bearings-only tracking in three dimensional case. Applied Ocean Research. 2019. Vol. 87. P. 223–232. DOI: 10.1016/j.apor.2019.01.034.

15. Aysal T. C., Barner K. E. Meridian Filtering for Robust Signal Processing. IEEE Transactions on Signal Processing. 2007. Vol. 55, № 8. P. 3949–3962. DOI: 10.1109/TSP.2007.894383.

16. Dolia A. N., Lukin V. V., Zelensky A. A. Curve Extraction Using Radon Transform for Varying Time Delay Estimation. Development and Application System: Proc. of Intern. Conf., 21–23 May 1998, Suceava, Romania. Suceava, 1998. Vol. 10. P. 221–228.

17. Oliinyk V., Lukin V., Djurovic I. Time Delay Estimation for Noise-Like Signals Embedded in Non-Gaussian Noise Using Adaptive Robust DFT. IEEE 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing. MECO'2018: proceedings, 10–14 June 2018, Budva, Montenegro. Podgorica, 2018. P. 267–270. DOI: 10.1109/MECO.2018.8406054.

18. Oliinyk V., Lukin V. Time Delay Estimation for Noise-Like Signals Embedded in Non-Gaussian Noise Using Pre-filtering in Channels. IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering. TCSET'2020: proceedings, Febr. 25–29, 2020, Lviv-Slavske, Ukraine. Lviv, 2020. P. 638–643. DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235510

19. Oliinyk V., Lukin V., Djurovic I. Fast and Efficient Method for Time Delay Estimation for the Wideband Signals in Non-gaussian Environment. International Scientific and Technical Conference on Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineerin. ICTM'2020: proceedings, 29–30 Oct. 2020, Kharkov, Ukraine. Cham: Springer, 2021. P. 30–41. (Lecture Notes in Networks and Systems. LNNS; vol. 188). DOI: 10.1007/978-3-030-66717-7_3.

20. Djurović I., Stanković L. J. Robust L-estimation based forms of signal transforms and time-frequency representations. IEEE Transactions on Signal Process. 2003. Vol. 51, № 7. P. 1753–1761.

21. Yin L., Yang R., Gabbouj M., Neuvo Y. Weighted median filters: A tutorial. IEEE Transactions on Circuits and Systems II Analog and Digital Signal Processing. 1996. Vol. 43, № 3. P. 157–192. DOI: 10.1109/82.486465.

22. Bandyopadhyay S., Saha S. Unsupervised Classification: Similarity Measures, Classical and Metaheuristic Approaches, and Applications. Berlin: Springer-Verlag, 2013. 280 p. DOI: 10.1007/978-3-642-32.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-231-239
УДК 637.5.02

ПАВЛЕНКО ЄВГЕН
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
https://orcid.org/0000-0002-0451-3861
e-mail: sl1mvsshady@gmail.com
СТЕПАНОВ МИХАЙЛО
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
https://orcid.org/0000-0001-6376-4268
e-mail: 2m.stepanov@gmail.com

ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ЕКРАНУВАННЯ ЯК СПОСІБ ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ ІНФОРМАТИЗАЦІЇ ВІД ВИТОКІВ ІНФОРМАЦІЇ ТЕХНІЧНИМИ КАНАЛАМИ

В даній роботі був досліджений один із таких способів захисту інформації від її витоків технічним каналами, як екранування. В першій частині роботи були розглянуті теоретичні засади екранування: визначення та процес екранування, його види, головне завдання екрану, висвітлено поняття ефективності екранування, представлена залежність для розрахунку ефективності електромагнітного екрану, зроблена класифікація екранів за трьома ознаками: типу поля завади, матеріалу і конструкції, форми екрану, для кожної форми представлена залежність для розрахунку ефективності екранування магнітного та електромагнітного поля, представлена залежність для розрахунку глибини проникнення як величини, яка характеризує екрануючу дію матеріалу екрана.

В другій частині роботи були розглянуто окремі види екранування: екранування електричного поля, залежність для розрахунку його ефективності, представлені основні вимоги, що пред'являються до електричних екранів, розглянуто принципи екранування низькочастотних та високочастотних магнітних полів, залежності для розрахунку ефективності їх екранування, представлені основні вимоги для магнітостатичних екранів, розглянуто екранування електромагнітних полів, основні механізми захисту від електромагнітних завад, представлена залежність для розрахунку ефективності екранування електромагнітного поля.

В третій частині роботи розрахована ефективність екранування та глибина проникнення електромагнітного поля для магнітних та немагнітних матеріалів на заданих частотах при різній провідності та різних значеннях товщини стінок екрану, представлені графіки частотної залежності ефективності екранування при різних значеннях товщин екрану, показана частотна залежність глибини проникнення електромагнітного поля для різних матеріалів, зроблені висновки та рекомендації щодо вибору матеріалів для екранування на високих та низьких частотах, приведені деякі матеріали для екранування постійного магнітного поля та високочастотного електромагнітного поля.

Ключові слова: технічний захист інформації, екранування, електромагнітне поле, ефективність екранування, екрануючі матеріали.

PAVLENKO YEVHEN, STEPANOV MIKHAILO
National Technical University of Ukraine ''Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ELECTROMAGNETIC SHIELDING AS A WAY OF PROTECTING INFORMATION FROM ITS LEAKAGE BY TECHNICAL CHANNELS

In this paper, investigated one of the way of protecting information from its leakages through the technical channels, such as shielding. The first part of the work mainly consider the theoretical principles of shielding, such as definition and process of shielding, its types, main task of the shield, highlighted the concept of shielding efficiency, presented dependence for calculating the efficiency of electromagnetic shield, provided shields classification according to three characteristics: type of field interference, design and material, shield forms, for each of them presented dependence for calculating shielding efficiency of magnetic and electromagnetic field, presented dependence for calculating depth of penetration, as a value that characterizes shielding effect of shielding material.

The second part of work consider separate types of shielding such as shielding of the electric field, dependence for calculating its effectiveness, presented main requirements for electric shields, considered the principles of shielding for low-frequency and high-frequency magnetic fields, dependences for calculating its shielding efficiency, presented main requirements for magnetostatic shields, considered shielding of electromagnetic fields, provided main mechanisms of protection against electromagnetic interference, presented dependence for calculating shielding efficiency of electromagnetic field.

In the third part of the work calculated shielding efficiency and penetration depth of electromagnetic field for magnetic and non-magnetic materials at given frequencies with different conductivity and different thickness of shield walls, provided graphs of frequency dependence of shielding efficiency at different thickness of the shield walls, shown graph of frequency dependence of penetration depth for different materials, made conclusions and provided recommendations regarding selection of shielding materials at high and low frequencies, presented shielding materials for permanent magnetic field and high-frequency electromagnetic field.

Keywords: technical protection of information, shielding, electromagnetic field, shielding effectiveness, shielding materials.

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

Робота та функціонування технічних засобів обробки інформації (ТЗОІ) та зв'язку супроводжується появою різних технічних каналів витоку інформації. Одним із таких каналів являється електромагнітний канал, що виникає внаслідок електромагнітного випромінювання, яке поширюється у різних середовищах (повітря, струмопровідні конструкції, тощо). Для забезпечення вимог по електромагнітній безпеці об'єкта, що включає в себе протидію несанкціонованому доступу до інформації з використанням спеціальних

технічних засобів, використовується екранування електромагнітних хвиль. Актуальність розробки високоефективних, широкосмугових, технологічних і зручних в експлуатації екрануючих і радіопоглинаючих матеріалів пояснюється постійною потребою в даних матеріалах при розробці і удосконаленні конструкцій радіоелектронних приладів, приладів захисту інформації і військової техніки.

Аналіз досліджень та публікацій

В роботі [1] представлено методи підвищення ефективності електромагнітного екранування, запропонований метод підвищення ефективності електромагнітного екранування для забезпечення електромагнітної сумісності за допомогою технології комп'ютерного моделювання. В статті [2] представлено аналіз ефективності екранування для різних матеріалів в залежності від частоти. Проведений аналіз виконується окремо для електричного, магнітного та електромагнітного полів, показано, що матеріали не є еквівалентними для зменшення електромагнітних полів. В роботі [3] розглянута конструкція екрану для низькочастотного магнітного поля, а також вимірюється ефективність екранування сталевого екрануючого корпусу та двох різних екрануючих дверей для низькочастотних магнітних полів у ближній зоні. В дослідженні [4] пропонується ефективний метод розташування шарів матеріалів з високою проникністю для екранування магнітного поля. В статті [5] було проведено експериментальні випробування ефективності екранування циліндричного мідного екрану та екрану з плетеного дроту в діапазоні 10 кГц – 1 ГГц, представлена нова модель екрану з плетеного дроту, а в роботі [6] досліджується моделювання характеристик магнітного екранування циліндричних екранів з однією або двома щілинами для різних матеріалів (залізо, мідь і високотемпературні напівпровідники YBCO). В дослідженні [7] було проаналізовано екранування при використанні мідної фольги та запропоновано нову схему екранування, яка має хороший ефект при екрануванні електричного поля, але не впливає на магнітне поле.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є забезпечення захисту інформації шляхом екранування електромагнітного випромінювання, а також аналіз ефективності екранів та їх матеріалів.

Виклад основного матеріалу

Екрануванням називають локалізацію електромагнітної енергії у певному просторі за рахунок обмеження розповсюдження її усіма можливими способами. Даний процес характеризується розсіюванням, заломленням, відбиванням і поглинанням енергії електромагнітних полів. Розрізняють наступні види екранування:

- екранування електричного поля (поле в ближній зоні випромінювання від джерела еквівалентного електричному диполю)
- екранування магнітостатичного поля (поле в ближній зоні випромінювання від джерела, еквівалентного магнітному диполю – рамці зі струмом)
- екранування електромагнітного поля (поле в ближній і дальній зонах випромінювання від будь-яких інших електромагнітних джерел енергії)

При проектуванні екрануючих систем використовують теорію поля, при цьому вводять поняття «ефективність екранування» (ЕЕ), яке в подальшому використовують у якості основного критерія вибору екрануючих матеріалів і конструкцій екранів.

Головне завдання екрану – послаблення напруги електричного (Е) або магнітного (Н) полів. Екрануючу дію екрану зробленого із немагнітного матеріалу у змінному електромагнітному полі визначають струми, що наводяться у площині екрану, а також магнітне поле, збуджене даними струмами. При екрануванні всередині блоків РЕА (радіоелектронна апаратура) внаслідок відносно невеликих відстаней між джерелами та приймачами завад мова йде, здебільшого, про екранування електро- та магнітостатичних полів.

Найбільший вплив на працездатність вузлів РЕА вказує магнітна складова електромагнітного поля з індукцією В. Коли магнітне поле з частотою f перетинає замкнутий контур площею S, то в контурі виникає ЕРС (електрорушійна сила).

$$|U| = 2\pi f S |B| \quad (1)$$

Розрахована за формулою (1) напруга являється напругою завади для чутливих елементів пристрою.

Якщо, $|U| \geq U_n$ і нема можливості зменшити площу контура S, тоді потрібен електромагнітний екран, ефективність якого:

$$EE = 20\lg\left(\frac{|U|}{U_n}\right) \quad (2)$$

Де ЕЕ – ефективність електромагнітного екрану; U – ЕРС, що виникає у замкнутому контурі; U_n – напруга завади.

Загалом, електромагнітні екрани можна класифікувати за трьома ознаками: типу поля завади, конструктивній формі та матеріалу конструкції стінок екрану [8].

Тип поля завади

По типу завади розглядають магнітостатичні, електричні та електромагнітні поля. Під завадою розуміють внутрішній або зовнішній вплив, в результаті якого відбувається спотворення інформації в процесі її обробки, перетворення, збереження або передачі. Область простору навколо умовного випромінювача електромагнітної завади розділяється на ближню ($r \le \lambda/2\pi$) і дальню ($r > \lambda/2\pi$) зони, де r – відстань від випромінювача до екрана; λ – довжина хвилі завади.

Форма екрана

Форма екрана впливає на ефективність екранування через залежність від неї величини характеристичного опору середовища. До того ж, форма екрана впливає на значення частоти на якій відбувається різке збільшення магнітного і електричного поля всередині екрану, а значить на його резонансні властивості. Виділять прямокутну, циліндричну і сферичну форми екранів. Ефективність екранування електромагнітного поля прямокутного, циліндричного і сферичного екранів виражається наступним приблизним співвідношенням:

$$EE_п = EE_ц + 3,6\,дБ = EE_с + 9.6\,дБ$$

Де $EE_п$ – ефективність екранування електромагнітного поля прямокутного екрану; $EE_ц$ – ефективність екранування електромагнітного поля циліндричного екрана; $EE_с$ – ефективність екранування електромагнітного поля сферичного екрана.

Найкраще співвідношення хвилевих опорів простору і екрана має плоска хвиля, внаслідок чого виникає більше відбивання хвилі. Дана обставина обумовлює перевагу циліндричного екрану по відношенню до сферичного і, в свою чергу, прямокутного по відношенню до обох даних конструкцій.

Зворотна закономірність справедлива і для магнітних екранів. В даному випадку, має місце наступна залежність між ефективністю затухання прямокутного, циліндричного і сферичного екранів:

$$EE_п = EE_ц + 3,6\,дБ = EE_с + 9.6\,дБ$$

Цьому є і фізичне пояснення. Дія магнітостатичних екранів відбувається по принципу замикання магнітного потоку в магнітній масі екрана. Екрануючий ефект зростає зі зменшенням опору екрана даному потоку. В порівнянні с прямокутним екраном, більш точно даній вимозі відповідає конструкція у вигляді шара або циліндра.

Матеріал і конструкція екрану

Матеріал стінки екрану найбільш впливає на ефективність екранування. За матеріалом і конструкцією стінок виділяють магнітні та немагнітні метали, а також фольговані, сіткові, радіопоглинаючі матеріали та багатошарові екрани. Величиною, що характеризує екрануючу дію матеріалу екрана являється глибина проникнення δ (на такій глибині напруга електричного поля зменшується в е разів) [9]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$$

Де $\omega = 2\pi f$ – кутова частота; f – частота, Гц; σ – провідність, См · $см^3$; $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$;

$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-8}$ Г · $см^{-1}$ – магнітна стала; μ_r – *відносна магнітна проникність*

Якщо екран працює в магнітному полі ближньої зони, ефективність екранування для магнітних матеріалів у порівнянні з немагнітними значно вище, так як $_r$ >> 1. В електромагнітному полі дальньої зони, немагнітні матеріали, внаслідок їх більшої провідності являються більш ефективнішими, ніж магнітні.

Теоретично, вирішення задачі екранування, визначення значень напруги полів надзвичайно важко, тому відштовхуючись від конкретної задачі доцільно розглядати його окремі види: електромагнітне, магнітостатичне та електричне.

Екранування електричних полів

Електрична складова електромагнітного поля має місце в ближній зоні випромінювання при протіканні малих струмів та при великих напругах функціональних вузлів ТЗОІ, яка розглядається як зв'язок через малу паразитну ємність $C_{св}$ між джерелами та приймачами наведень, ефективність її екранування визначається наступним співвідношенням [10]:

$$A = 20lg\frac{U_p}{U_{p.з}} = 20lg\frac{C_{св}}{C'_{св}}$$

Таким чином, знижуючи $C_{св}$ тим самим збільшуємо і ЕЕ.

Розглянемо основні рекомендації, стосовно використання електричних екранів:

1. Замикання силових ліній електричного поля не повинно виходити за межі конструкції екрану.
2. При роботі на низьких частотах, ключове значення з точки зору ЕЕ має якість контакту екрану та корпусу пристрою, товщина екрана та його матеріалу практично не мають значення.

3. При роботі на високих частотах, в режимі електромагнітного поля, ключове значення з точки зору ЕЕ мають властивості матеріалу екрану (магнітна проникність, електрична провідність) та його товщина.

Екранування низькочастотних магнітних полів (магнітостатичне екранування)

Екрани виготовляють із феромагнітних матеріалів (наприклад, пермалой або сталь), що мають велику відносну магнітну проникність μ_r. Внаслідок значної розбіжності між μ_r екрану та μ_r внутрішнього середовища, силові лінії магнітного поля будуть проходити вздовж стінок екрану, котрі мають значно менший опір ніж опір повітря. ЕЕ магнітного поля залежить від μ_r екрану (опір магнітопроводу) та його товщини і визначається наступним виразом:

$$A = 20\lg\left(\frac{\mu S_1 + S_2}{S}\right)$$

Де μ – відносна магнітна проникність матеріала екрана;

$$S = S_1 + S_2$$

Даний вид екранування застосовується при подавленні наведень в діапазоні частот 1–10 кГц. Розглянемо основні рекомендації, щодо використання магністатичного екрану:

1. Матеріал екрану повинен мати високе значення μ_r
2. Чим більше значення товщини екрану тим більша ефективність його екранування.
3. Ефективність екранування низькочастотних магнітних полів від заземлення не залежить.

Екранування високочастотних магнітних полів

Екранування магнітного поля обумовлено, в першу чергу, компенсацією даного поля магнітним полем вихрових струмів, а також послабленням магнітного поля при проникненні в глибину матеріалу стінок екрана. Чим вище частота магнітного поля, тим менша глибина проникнення. До тих пір поки товщина стінок екрана менше глибини проникнення (для низьких частот), основну роль грає компенсація поля. Зі збільшенням частоти, коли товщина стінок екрана стає більше глибини проникнення, вирішальним фактором може стати ослаблення поля при проникненні його в товщину стінок екрана. Так як з ростом частоти магнітного поля глибина проникнення зменшується, то зменшується і магнітопровідність екрана, яка залежить від габаритних розмірів і магнітної проникності матеріалу екрана. В даних умовах, в наслідок суттєвого зменшення еквівалентної товщини стінок екрана, не проявляється явище шунтування магнітного поля. Тому, для забезпечення екранування на високих частотах, в якості матеріалу екранів часто застосовують немагнітні матеріали [10].

Ефективність екранування магнітних полів на високих частотах визначається втратами викликаними вихровими струмами в матеріалі екрана за рахунок їх поглинання, відбивання або компенсації. Під дією високочастотного магнітного поля, діють два фактори викликані вихровими струмами: зворотне поле екрана та поверхневий ефект його матеріалу. При відносно великому значенні товщині матеріалу екрана, при $\boldsymbol{\delta}_{екр} > \delta$ діють обидва фактори і ЕЕ можна визначити за приблизною залежністю:

$$E \approx e^{\delta_{екр}/\delta}\left(\frac{1}{2} + \frac{D}{2{,}8 m \mu\ \boldsymbol{\delta}}\right)$$

На низьких частотах, при $\boldsymbol{\delta}_{екр} < \delta$, спостерігається незначений поверхневий ефект і діє тільки перший фактор, ефективність розраховують за допомогою наступного рівняння:

$$E \approx \sqrt{1 + \left(\frac{\omega \mu_0 \sigma D \delta_{екр}}{2m}\right)^2}$$

Екранування електромагнітних полів

Слід відрізняти екранування електромагнітних полів від магнітного екранування, яке відносять до екранування магнітних полів на низьких частотах (наприклад, 60 Гц). Матеріали для екрана для електромагнітних полів відрізняються від магнітних. Екранування відбувається завдяки відбиванню електромагнітної хвилі від металевої поверхні екрана і подальшому загасанню заломленої хвилі у тілі екрана. Основним механізмом захисту від електромагнітних завад являється відбивання. Відбивання обумовлюється невідповідністю електромагнітного середовища, в якому розповсюджується електромагнітна енергія з матеріалом екрана. На рисунку 1, показаний загальний механізм захисту від ЕМП (електромагнітного поля) за допомогою плоского екрану:

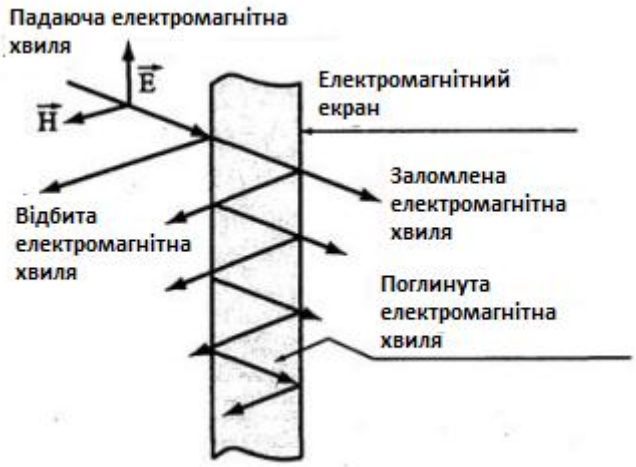


Рис. 1. Екранування ЕМП плоским екраном

Загалом, взаємодію електромагнітної хвилі з екраном можна представити наступним чином: відбиття хвилі від поверхні екрану, часткове проникнення хвилі в стінку екрану з її подальшим поглинання матеріалом екрану за рахунок багатократного відбивання від його стінок в результаті відбувається часткове проникнення хвилі в область екранування. Якщо втрата енергії хвилі в екрані, тобто її поглинання, перевищує 10 дБ, то хвилями, що пройшли за екран після внутрішніх відбивань можна знехтувати (практичне значення мають тільки два перші відбивання) [11].

Металеві екрани відрізняються високою ефективністю роботи на радіочастотах, які збільшується при збільшенні частоти електромагнітного випромінювання, що падає, однак вони мають один істотний недолік, пов'язаний з їх високою електропровідністю: високим коефіцієнтом відбиття, зумовленим великою відмінністю хвильового опору вільного простору та екрану.

Іншим механізмом захисту від електромагнітних завад являється поглинання. Для значного поглинання випромінювання екран повинен мати електричні та/або магнітні диполі, що взаємодіють із електромагнітними полями у випромінюванні. Такі диполі можуть бути представлені матеріалами, що мають високу діелектричну проникність. Магнітні диполі можуть бути представлені матеріалами, що мають високе значення магнітної проникності. На низьких частотах ефективність екранування тим вища, чим вище значення магнітної проникності матеріалу екрана. Однак, з урахуванням того, що залежність втрат при поглинанні прямо пропорційна значенням товщини екрану та частоти електромагнітного поля, доводиться збільшувати товщину екрана. Зі зростанням частоти, магнітна проникність всіх матеріалів швидко зменшується при чому – чим більше значення магнітної проникності, тим значніше її зменшення. Тому, матеріали з великим значенням початкової магнітної проникності доцільно використовувати для частот близько 1 кГц. При більших значеннях напруженості магнітного поля через насичення матеріалу феромагнетика його магнітна проникність падає тим різкіше, чим більше початкове значення проникності. Електромагнітне випромінювання на високих частотах проникає лише поблизу поверхневої області електричного провідника. Об'ємна щільність струму максимальна біля поверхні провідника. При віддаленні від поверхні вона зменшується експоненційно і на глибині δ стає менше в кілька разів. Дану глибину проникнення можна розрахувати за наступною формулою:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \tag{3}$$

Виходячи із вищесказаного, ефективність екранування електромагнітного поля може бути представлена формулою:

$$EE = Eпад / E_2 = H_{пад} / H_2 = e^{\frac{\delta_{екр}}{\delta}} Z_{с\,пов} / 4 Z_{с\,мет}, \tag{4}$$

де $Z_{с\,пов.} = 377\,Ом$ – характеристичний опір вакууму (і повітря), глибина проникнення розраховується за формулою (3), характеристичний опір матеріалу екрана розраховується за формулою:

$$Z_{с\,мет} = \sqrt{\frac{\square\ \mu}{\sigma}} = \sqrt{\frac{2\pi f \mu}{\sigma}} \tag{5}$$

Базуючись на формулах (3), (4), (5) розрахуємо ЕЕ (ефективність екранування) та глибину проникнення електромагнітного поля для магнітних та немагнітних матеріалів на заданих частотах при різній провідності та різних значеннях товщини стінок екрану:

Таблиця 1

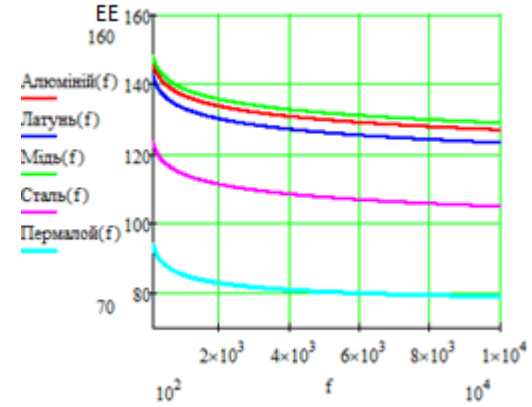
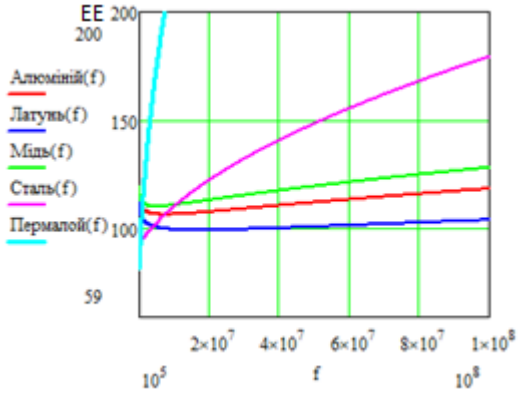
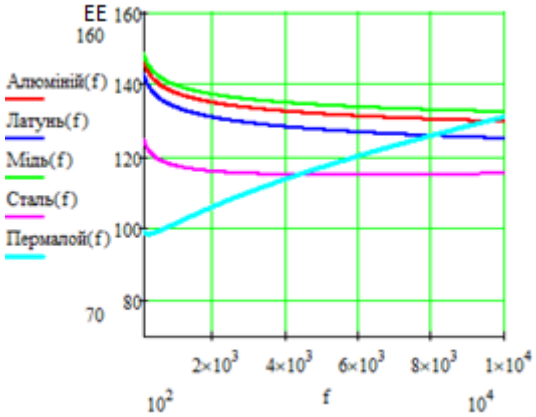
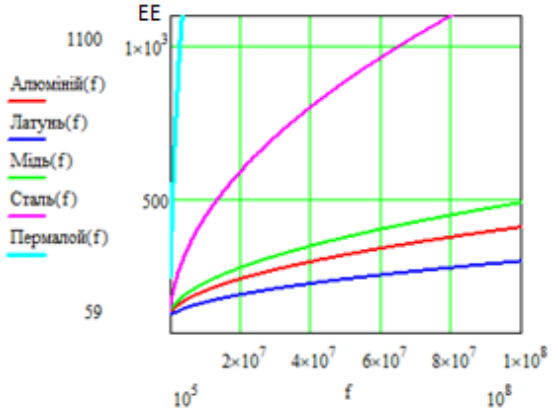
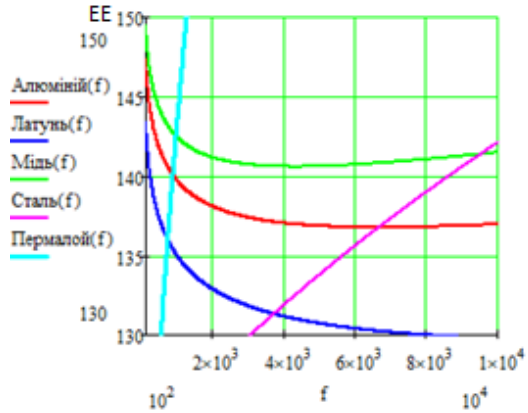
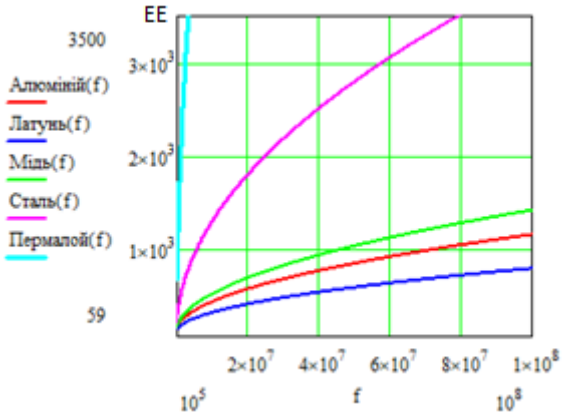
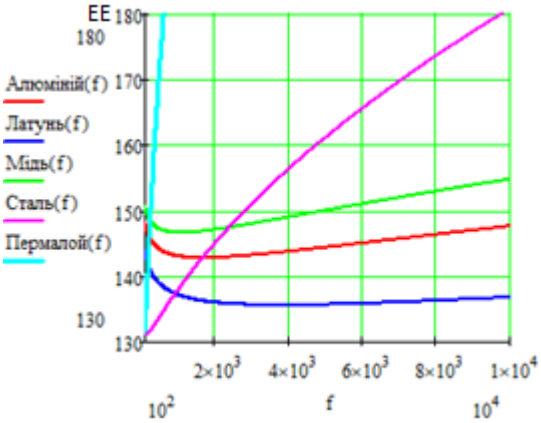
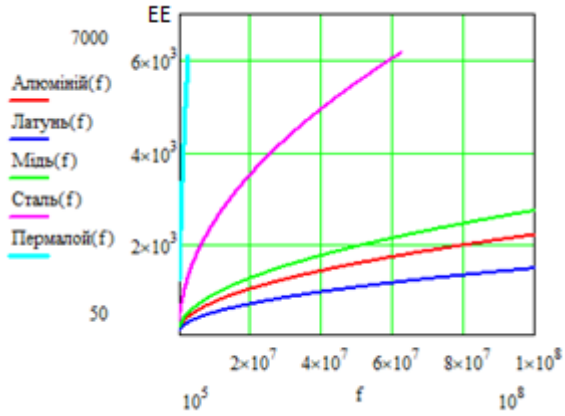
Розрахунок ЕЕ та глибини проникнення електромагнітного поля для магнітних та немагнітних матеріалів на заданих частотах при різних значеннях провідності та товщини стінок екрану

f, Гц	$\delta_{екр}$, мм	ЕЕ									
		Алюміній		Латунь		Мідь		Сталь		Пермалой	
		σ= 38 * 10^4 См·см^3	$\mu_r = 1$	σ= 16.6 * 10^4 См·см^3	$\mu_r = 1$	σ= 59 * 10^4 См·см^3	$\mu_r = 1$	σ= 10 * 10^4 См·см^3	$\mu_r = 50$	σ= 1.54 * 10^4 См·см^3	$\mu_r = 8000$
10^2	0.03	146		143		148		124		94	
	0.3	147		143		148		125		99	
	1.0	147		143		150		127		113	
	2,0	148		144		151		131		132	
Глибина проникнення δ, мм		8.170		12.350		6.550		2.250		0.450	
10^3	0.03	136		133		138		114		85	
	0.3	137		133		139		117		102	
	1.0	140		135		142		126		144	
	2,0	143		137		147		138		204	
Глибина проникнення δ, мм		2.600		3.900		2.070		0.710		0.140	
10^4	0.03	127		123		128		105		79	
	0.3	130		125		132		115		131	
	1.0	137		130		141		142		265	
	2,0	148		137		155		181		456	
Глибина проникнення δ, мм		0.820		1.230		0.655		0.225		0.045	
10^5	0.03	117		113		119		97		82	
	0.3	126		119		131		130		245	
	1.0	150		135		160		216		669	
	2,0	184		157		202		338		1275	
Глибина проникнення δ, мм		0.260		0.390		0.207		0.071		0.014	
10^6	0.03	110		105		112		95		111	
	0.3	138		124		148		199		628	
	1.0	213		173		241		469		1968	
	2,0	319		243		373		855		3884	
Глибина проникнення δ, мм		0.082		0.124		0.066		0.023		0.004	
10^7	0.03	106		99		111		110		225	
	0.3	197		159		224		440		1860	
	1.0	433		315		517		1294		6099	
	2,0	769		537		936		2514		–	
Глибина проникнення δ, мм		0.026		0.039		0.021		0.007		0.001	
10^8	0.03	118		104		128		179		608	
	0.3	405		294		486		1221		5779	
	1.0	1150		786		1414		3922		–	
	2,0	2213		1489		2739		–		–	
Глибина проникнення δ, мм		0.008		0.012		0.006		0.002		0.0004	

Графіки частотних залежностей таблиці 1 при різних значеннях товщини екрану наведені в таблиці 2:

Таблиця 2

Частотні залежності ЕЕ при різних значенням товщин екрана

$\delta_{екр}$	Низькі частоти	Високі частоти
0,03 мм		
0,3 мм		
1 мм		
2 мм		

Залежності глибини проникнення електромагнітного поля від частоти для матеріалів, які часто використовуються при виготовленні екранів, наведені на рисунку 2:

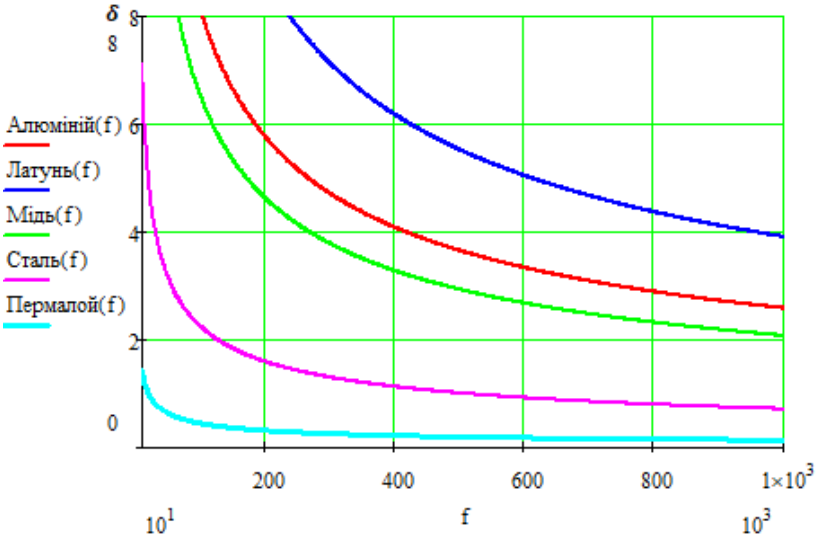


Рис. 2. Частотна залежність глибини проникнення електромагнітного поля для різних матеріалів

Таким чином, у випадку екранування на високих частотах, необхідно вибирати матеріали з високою провідністю, а на низьких – з високою проникністю. Для екранування постійного магнітного поля використовуються магнітно-м'які матеріали, такі як пермалой, альсифер, трансформаторна або електротехнічна сталь тощо. Для екранування високочастотного електромагнітного поля використовуються матеріали з високою провідністю: срібло, мідь, алюміній, латунь тощо. Ефективність екранування в найбільший мірі залежить від стінок екрану. Крім того, метали і сплави з високою провідністю, за виключенням сталі, не підходять для екранування постійних магнітних полів, тому що мають магнітну проникність рівну одиниці (як у повітря). Також для того, щоб здійснювати ефективне екранування в широкому діапазоні частот краще використовувати багатошарові матеріали, наприклад сталь з нанесеним шаром провідного металу. Для отримання ще більшого коефіцієнта екранування можна застосовувати комбіновані багатошарові матеріали.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В ході проведеної роботи був досліджений один із основних методів пасивного захисту від витоків інформації технічними каналами – екранування.

1) В першій частині роботи були досліджені теоретичні засади екранування, поняття його ефективність та її залежності від типу завади, форми екрану та матеріалу його конструкції.

2) В другій частині роботи були досліджені основні положення і залежності екранування електричних, магнітних та електромагнітних екранів, розглянуті питання ефективності їх екранування. Представлені основні вимоги до електричних та магнітостатичних екранів.

3) В третій частині був проведений розрахунок ефективності екранування магнітних та немагнітних матеріалів на заданих частотах при різних значеннях провідності та товщини стінок екрану, представлені графіки частотних залежностей проведених розрахунків, а також графік частотної залежності глибини проникнення електромагнітних полів для різних матеріалів. На базі отриманих результатів, представлені відповідні висновки та рекомендації.

Література

1. Chien T. T., Minh Tu B. T. and Do T. N. Improvement of shielding for electromagnetic compatibility. 2016 International Conference on Electronics, Information, and Communications (ICEIC), Danang, Vietnam, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELINFOCOM.2016.7562954.

2. Saadi H. and Oussaid R. Materials Effect on Shielding Effectiveness. 2007 IEEE International Conference on Signal Processing and Communications, Dubai, United Arab Emirates, 2007, pp. 999-1002, doi: 10.1109/ICSPC.2007.4728490.

3. Yichao Z., Cheng G., Lihua S. and Bihua Z. Analysis and Test of EM Shielding for Low-Frequency Magnetic Field. 2007 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Qingdao, China, 2007, pp. 345-349, doi: 10.1109/ELMAGC.2007.4413501.

4. Lee S.-Y., Lim Y.-S., Choi I.-H., Lee D.-I. and Kim S.-B. Effective Combination of Soft Magnetic Materials for Magnetic Shielding. in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, no. 11, pp. 4550-4553, Nov. 2012, doi: 10.1109/TMAG.2012.2196682.

5. Guan Wang, Mang He, Tianwen Wang, Yanhui Guo, Xihong Ye and Xiaowen Xu. Simulation of the electric field Shielding Effectiveness in the range of 10kHz–1GHz. 2013 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON MICROWAVE TECHNOLOGY & COMPUTATIONAL ELECTROMAGNETICS, Qingdao, 2013, pp. 12-15, doi: 10.1109/ICMTCE.2013.6812470.

6. Zhang W., Zhu W., Luo T., Shen H. and Huang S. Research on Magnetic Shielding Effectiveness of Different Materials Hollow Cylinder with Slits. 2018 IEEE 2nd International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Beijing, China, 2018, pp. 365-370, doi: 10.1109/CIEEC.2018.8745967.

7. Qingbin Chen and Wei Chen. The new electric shielding scheme with comb-shaped wire and its applications in SMPS. 2011 IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), Amsterdam, Netherlands, 2011, pp. 1-7, doi: 10.1109/INTLEC.2011.6099751.

8. Пігур Н. В. Показники та критерії оцінювання якості комплексної системи захисту інформації / Н. В. Пігур, В. Д. Погребенник // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Автоматика, вимірювання та керування. – 2013. – № 774. – С. 86–91. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULP_2013_774_16

9. Касаткіна Н. В. Розрахункові методи проектування електромагнітних екранів із заданими захисними властивостями / Н. В. Касаткіна, О. М. Тихенко, О. М. Фурсенко // Системи упр., навігації та зв'язку. – 2020. – Вип. 2. – С. 118–121.

10. Основи конструювання обчислювальної техніки : навч. посіб. ч. 2 / А. П. Федоренко, С. В. Баловсяк ; Чернів. нац. ун-т ім. Ю.Федьковича. – Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2011. – 80 с.

11. Гнатов А. В. Фізичні основи екранування з погляду питань електромагнітної сумісності / А. В. Гнатов, Д. С. Шимук, А. О. Шевченко // Системи обробки інформації. – 2006. – Вип. 6. – С. 51–58. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2006_6_9.

References

1. Chien T. T., Minh Tu B. T. and Do T. N. Improvement of shielding for electromagnetic compatibility. 2016 International Conference on Electronics, Information, and Communications (ICEIC), Danang, Vietnam, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELINFOCOM.2016.7562954.

2. Saadi H. and Oussaid R. Materials Effect on Shielding Effectiveness. 2007 IEEE International Conference on Signal Processing and Communications, Dubai, United Arab Emirates, 2007, pp. 999-1002, doi: 10.1109/ICSPC.2007.4728490.

3. Yichao Z., Cheng G., Lihua S. and Bihua Z. Analysis and Test of EM Shielding for Low-Frequency Magnetic Field. 2007 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Qingdao, China, 2007, pp. 345-349, doi: 10.1109/ELMAGC.2007.4413501.

4. Lee S.-Y., Lim Y.-S., Choi I.-H., Lee D.-I. and Kim S.-B. Effective Combination of Soft Magnetic Materials for Magnetic Shielding. in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, no. 11, pp. 4550-4553, Nov. 2012, doi: 10.1109/TMAG.2012.2196682.

5. Guan Wang, Mang He, Tianwen Wang, Yanhui Guo, Xihong Ye and Xiaowen Xu. Simulation of the electric field Shielding Effectiveness in the range of 10kHz–1GHz. 2013 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON MICROWAVE TECHNOLOGY & COMPUTATIONAL ELECTROMAGNETICS, Qingdao, 2013, pp. 12-15, doi: 10.1109/ICMTCE.2013.6812470.

6. Zhang W., Zhu W., Luo T., Shen H. and Huang S. Research on Magnetic Shielding Effectiveness of Different Materials Hollow Cylinder with Slits. 2018 IEEE 2nd International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Beijing, China, 2018, pp. 365-370, doi: 10.1109/CIEEC.2018.8745967.

7. Qingbin Chen and Wei Chen. The new electric shielding scheme with comb-shaped wire and its applications in SMPS. 2011 IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), Amsterdam, Netherlands, 2011, pp. 1-7, doi: 10.1109/INTLEC.2011.6099751.

8. Pihur N. V. Pokaznyky ta kryterii otsiniuvannia yakosti kompleksnoi systemy zakhystu informatsii / N. V. Pihur, V. D. Pohrebennyk // Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". Avtomatyka, vymiriuvannia ta keruvannia. – 2013. – № 774. – S. 86–91. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULP_2013_774_16

9. Kasatkina N. V. Rozrakhunkovi metody proektuvannia elektromahnitnykh ekraniv iz zadanymy zakhysnymy vlastyvostiamy / N. V. Kasatkina, O. M. Tykhenko, O. M. Fursenko // Systemy upr., navihatsii ta zviazku. – 2020. – Vyp. 2. – S. 118–121.

10. Osnovy konstruiuvannia obchysliuvalnoi tekhniky : navch. posib. ch. 2 / A. P. Fedorenko, S. V. Balovsiak ; Cherniv. nats. un-t im. Yu.Fedkovycha. – Chernivtsi : Chernivetskyi nats. un-t, 2011. – 80 c.

11. Hnatov A. V. Fizychni osnovy ekranuvannia z pohliadu pytan elektromahnitnoi sumisnosti / A. V. Hnatov, D. S. Shymuk, A. O. Shevchenko // Systemy obrobky informatsii. – 2006. – Vyp. 6. – S. 51–58. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2006_6_9.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-240-246
УДК 621.33(075)

ПАЯНОК ОЛЕКСАНДР
Вінницький національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0001-8139-4600
e-mail: oapayanok@gmail.com
БАБІЙ СЕРГІЙ
Вінницький національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0002-8043-0646
e-mail: babiy82sm@gmail.com
ПРОЦЕНКО ДМИТРО
Вінницький національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0002-5611-7262
e-mail: procenko.d.p@vntu.edu.ua
ГРАНЯК ВАЛЕРІЙ
Вінницький національний аграрний університет
https://orcid.org/0000-0001-6604-6157
e-mail: titanxp2000@ukr.net

ВДОСКОНАЛЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ РОЗПОДІЛОМ ТА ВИКОРИСТАННЯМ ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ ГАЛЬМУВАНЬ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

В роботі проведено аналіз режимів розподілу та використання енергії електричних (рекуперативних) гальмувань засобів рухомого складу міського електричного транспорту. Надані результати експериментального дослідження в контактній мережі міського електричного транспорту міста Вінниця. Проведено узагальнення та поширення отриманих результатів вимірювань на всю систему тягової електромережі. Встановлено, що значення випрямленої напруги на деяких тягових підстанціях міста Вінниця перевищують нормативне значення навіть за умови відсутності рекуперативних режимів роботи ЗРС. Запропоновано та узагальнено критерії оцінки енергоефективності режимів електричного гальмування з метою підвищення ефективності використання енергії електричних гальмувань.

Ключові слова: міський електричний транспорт, тягові підстанції, рекуперативне гальмування, контактна мережа, накопичувачі енергії, вимірювання, експериментальні дослідження.

PAYANOK OLEKSANDR, BABIY SERGIY, PROCENKO DMYTRO
Vinnytsia National Technical University
GRANYAK VALERY
Vinnytsia National Agrarian University

IMPROVEMENT OF OPTIMAL MANAGEMENT OF THE CITY ELECTRIC TRANSPORT ELECTRIC BRAKING ENERGY DISTRIBUTION AND USE

The paper presents the results of experimental measurements at the traction substations of the city electric transport ME "Vinnytsia Transport Company", an analysis of the electric (regenerative) braking energy distribution and use modes, generalization and distribution of the obtained measurement results to the entire system of the traction power network. During the research, was confirmed the fact that the rectified voltage values at some traction substations in the city of Vinnytsia exceed the established normative value even in the recovery absence, which complicates the use of regenerative braking modes on individual sections of the contact network and requires the search for other options for the distribution and electric braking energy use. The implementation of regenerative braking modes in the conditions of power supply of urban electric transport depends on the peculiarities of its power system operation. It consists in the fact that traction networks and substations of urban ground electric transport operate under conditions significantly different from the conditions of stationary power electrical installations operation. Power supply systems of urban electric transport as a whole and especially individual feeder zones of contact network electrified sections are characterized by load unevenness. This is explained by: uneven power consumed by electric city transport (starting according to automatic characteristics, coasting, braking); different speeds of trams and trolleybuses, as a result, different consumed energy; the dependence of the traction substations feeders load location of electric transport on the power supply area; the number and variety of types of transport used in the electric economy; their traffic intensity and the nature of the traffic schedule; transport management technique and its type and other factors.

Criteria for evaluating the energy efficiency of electric braking modes have been formed and summarized in order to increase the efficiency of electric braking of the electrotechnical complex "power supply system - electric transport of the city" energy use. Further research is aimed at finding the most rational technical and organizational measures and their implementation in the city electric transport power supply system.

Key words: urban electric transport, traction substations, regenerative braking, contact network, energy storage, measurements, experimental studies.

Постановка проблеми

Беззаперечно актуальним питанням як світової енергетики, так і енергетичної системи нашої країни є помірковане зниження електроспоживання всіх електроприймачів. В складних реаліях сьогодення нашої країни, в умовах періодичних вимушених відключень ділянок енергосистеми та повсякчасного здорожчання енергоносіїв, вагому частку яких складає саме електрична енергія, питання пошуку та впровадження механізмів ощадливого, ефективного використання споживаної електричної енергії та пошуку додаткових джерел електричної енергії набуває особливої гостроти.

Важливим та відповідальним споживачем електроенергії є міський електричний транспорт. Щороку в салони, наприклад, вінницького транспорту загального користування заходить понад 150 млн пасажирів, 70% з яких перевозить саме пасажирський електротранспорт [1]. Для господарства міського електричного транспорту, в якому енергетична складова в даний час складає 30–50 % від загальних витрат комунальних підприємств в цілому, питання зниження енерговитрат шляхом створення та вдосконалення високотехнологічних зразків транспортних засобів і впровадження енергоефективних режимів їх роботи ніколи не втрачало своєї актуальності.

Одним із основних напрямків зменшення споживання електроенергії міським електричним транспортом є, так би мовити, «вторинне» використання потенційно запасеної кінетичної енергії під час електричних гальмувань засобів рухомого складу шляхом повернення її в мережу або передачу в накопичувачі енергії (НЕ) [2]. При такому гальмуванні тролейбус/трамвай може повертати до 30% спожитої ним енергії із одночасним істотним зниженням зносу механічних гальмівних пристроїв.

Аналіз останніх джерел

Тривалий час проблема ефективності електропостачання електричного транспорту залишається предметом досліджень великого кола вчених та інженерів. Проблеми передачі енергії в тягову мережу у випадку електричного гальмування електротранспорту розглядалися неодноразово [3–6], проте до сьогодні вирішені частково. Відсутність можливості синхронізувати процеси регенерації електричної енергії та її умовно одночасне споживання різними засобами рухомого складу (ЗРС) потребує пошуку технічних та організаційних рішень щодо підвищення ефективності використання енергії електричних гальмувань. Серед існуючих праць за останній час, в яких пропонуються рішення вище згаданого питання, досить вагома частка досліджень присвячена саме ефективності електропостачання залізничного транспорту. Так, наприклад, в роботі [7] запропоновано результати досліджень щодо підвищення ефективності застосування рекуперативного гальмування на залізницях постійного струму шляхом використанням накопичувачів електричної енергії в системі тягового електропостачання та на ЗРС. В роботі [8] науковцями проведено аналіз експериментальних досліджень ефективності роботи інверторних підстанцій системи тягового електропостачання залізничного транспорту постійного струму в режимі рекуперації енергії і встановлено, що повернення надлишкової енергії рекуперації поїздів в мережу не забезпечує її оптимального розподілу та належного рівня напруги в тяговій мережі. В джерелі [9] запропоновано огляд методів розрахунку режимів тягових навантажень та рекуперативного гальмування міського електричного транспорту (МЕТ), які не позбавлені недоліків, оскільки не дають можливості враховувати ймовірність відхилень графіків руху засобів рухомого складу (ЗРС) та важкі умови роботи в системі електропостачання.

Метою роботи є проведення детального аналізу режимів рекуперативного гальмування ЗРС МЕТ, узагальнення та поширення отриманих експериментальних результатів вимірювань в системі електропостачання МЕТ КП «ВТК» міста Вінниці та розробка критеріїв оцінки енергоефективності режимів електричного гальмування електротехнічного комплексу «система тягового електропостачання – МЕТ».

Виклад основного матеріалу

Виходячи із закону збереження енергії, запасеної під час руху ЗРС, кінетичну енергію завжди можна перетворити на інший вид енергії. Реалізація режимів регенеративного гальмування в умовах електропостачання міського електричного транспорту залежить від особливостей експлуатації його. Тягові мережі та підстанції МЕТ працюють в суттєво відмінних умовах на відміну від стаціонарного силового електричного обладнання. Окремі фідерні ділянки та лінії контактної мережі системи електропостачання МЕТ характеризуються нерівномірністю навантажень. Причинами цього є:

- нерівномірність споживання потужностей МЕТ, обумовлена чергуванням режимів прискорення, вибігу та гальмування;
- різноманітність та зміна в широких межах швидкостей руху засобів рухомого складу, відповідно, зміна споживаної електричної енергії в широких межах;
- залежність навантажень тягових підстанцій від місця розташування ЗРС на ділянці контактної мережі;
- кількість та різноманіття типів ЗРС, які використовуються в комунальному підприємстві;
- одночасне суміщення на одній ділянці контактної мережі різних типів ЗРС (різні типи тролейбусів і трамваїв);
- інтенсивність руху ЗРС та характер графіку (розкладу) руху;
- техніка керування ЗРС та іншими факторами [10].

До вище вказаних особливостей варто додати, що в трамвайно-тролейбусному господарстві зокрема міста Вінниці одночасно експлуатується декілька типів ЗРС, кожен з яких характеризується своїми електричними та динамічними показниками.

Умови роботи пристроїв електропостачання при рекуперації, на відміну від режиму тяги, багато в чому залежать та визначаються рівнем напруги. В режимі тяги рівень напруги в контактній мережі впливає на швидкість ЗРС, пропускну здатність ділянки контактної мережі та інші показники. Тоді як в режимі рекуперативного гальмування відповідність значень випрямленої напруги необхідним експлуатаційним (нормованим) значенням визначає не лише економічні показники, але й саму можливість реалізації даного

виду електричного гальмування [11].

Крім того, слід пам'ятати, що значення випрямленої напруги на шинах тягових підстанцій напряму залежить від кількості ЗРС на ділянці контактної мережі. Коли тягове навантаження відсутнє, то напруга на вихідних шинах тягової підстанції визначається лише характеристиками загального режиму роботи енергосистеми, зокрема, залежить від навантажень інших тягових підстанцій. При зростанні тягового навантаження підстанції та незмінній напрузі холостого ходу напруга на її шинах зменшується рівномірно прикладеному навантаженню.

Істотне значення для реалізації режимів електричного гальмування має розподіл напруги вздовж контактної мережі (КМ). При відсутності рекуперації напруги на струмоприймачах ЗРС, що знаходяться в режимі тяги, завжди є нижчими значень Uxx тягових підстанцій, а у випадку рекуперації вона може бути вищою Uxx як на струмоприймачах ЗРС, так і на шинах тягових підстанцій, як це показано на рис. 1.

На рис. 1 наведені такі позначення: ТП – тягова підстанція МЕТ; КМ – контактна мережа; ΔU – допустиме падіння напруги в контактній мережі МЕТ; Uш – напруги на шинах тягової підстанції; Uм – напруги в контактній мережі МЕТ; U1–U8– рівні напруг в контактній мережі МЕТ при появі ЗРС в режимі споживання електроенергії; Up1-Up2 – рівні напруг в контактній мережі МЕТ при появі ЗРС в режимі рекуперації електроенергії; $I_{ЗРС1}$–$I_{ЗРС8}$ – струми навантаження ЗРС; $I_{рЗРС1}$–$I_{рЗРС2}$ – струми рекуперації ЗРС.

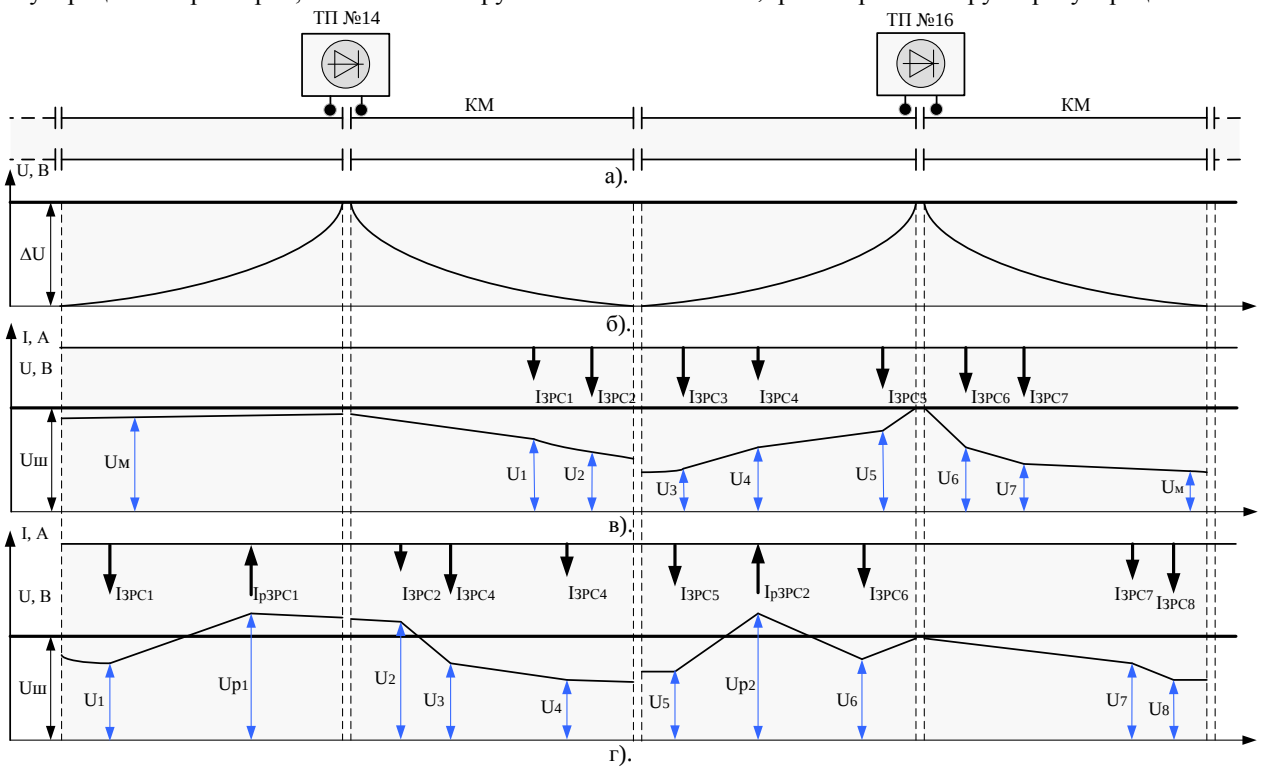


Рис. 1. Особливості розподілу напруги та струмів на ділянках КМ МЕТ: а) принципова схема живлення ділянок контактної мережі; б) характер зміни рівня напруги у випадку рівномірного розподілу навантажень; в) графік розподілу напруги та струмів в режимі споживання; г) графік розподілу напруги та струмів при поєднанні режимів споживання та рекуперації

Розподіл навантажень між паралельно працюючими підстанціями, втрати електроенергії в тяговій мережі, значення струмів короткого замикання та напруга на струмоприймачах ЗРС (особливо в режимі рекуперації) також залежать від напруги на шинах тягової підстанції (див. рис. 1). Нормовані значення напруги контактної мережі і трансформаторних підстанцій приведені в табл. 1 [11].

Таблиця 1

Нормовані значення напруги контактних мереж і тягових підстанцій МЕТ

Вид транспорту	Значення напруги, В				
	Тягова підстанція		Контактна мережа		
	$U_{ном.}$	$U_{хх.}$	$U_{ном.}$	$U_{min.}$	$U_{max.}$
Сумісне електропостачання трамваїв і тролейбусів	600	630	550	400	700; 720 (режим рекуперації)

Відповідно до нормованих значень напруга в тяговій мережі під час проведення рекуперативного гальмування не повинна перевищувати 720 В, що потребує підтвердження шляхом проведення натурних вимірювань.

Для забезпечення режиму рекуперативного гальмування допустиме значення напруги на струмоприймачі ЗРС не повинно перевищувати її максимального значення Umax:

$$U_{max} = U_{Ш} + I_p \cdot R, \quad (1)$$

де Uш – напруга на шинах тягової підстанції, В; R – опір контактної мережі на ділянці між споживаючим та рекуперуючим ЗРС, Ом; I_p – максимально можливий струм рекуперації, А, який в свою чергу може бути визначений згідно з [9]:

$$I_p = I_{p.сер.} \cdot n \cdot \left[\frac{z_p \cdot \sqrt{k_{еф.}^2 - 1}}{\sqrt{n}} - 1 \right], \quad (2)$$

де $I_{p.сер.}$ – середнє значення струму ЗРС за час рекуперації, А; n – кількість ЗРС на ділянці контактної мережі; z_p – функція ймовірності $p_{доп.}$, яка визначається з таблиць інтегралів ймовірностей ($z_p = 3{,}1$ за $p_{доп.} = 10^{-3}$; $z_p = 4{,}3$ за $p_{доп.} = 10^{-5}$); $k_{еф.}$ – коефіцієнт ефективності струму ЗРС в режимі рекуперації.

Варто враховувати, що середнє значення струму ЕРС за час рекуперації $I_{p.сер.}$ залежить від багатьох супутніх чинників, зокрема базового струму ЗРС (взимку, влітку), середнього струму власних потреб ЗРС (взимку, влітку), поправки на геометрію ділянки дорожнього полотна (підйоми, нахили, рівномірна горизонталь), врахування багатопускових режимів ЗРС в різних умовах руху, поправки на експлуатаційну швидкість ЗРС; врахування довжини перегону між зупинками.

Визначення кількості n ЗРС, які можуть працювати в режимі рекуперації, залежить від значення напруги на струмоприймачах. У випадку, коли напруга в режимі рекуперації має максимально допустиме значення, то враховуються тільки ЗРС, що знаходяться на конкретній ділянці. Якщо напруга в режимі рекуперації має значення нижче максимального, то можна враховувати всі ЗРС, які отримують живлення від окремої ТП.

Проведення точних розрахунків для забезпечення рекуперативного/регенеративного гальмування кожної окремої енергосистеми міста має бути пов'язане перш за все із врахуванням реальних рівнів напруги на тягових підстанціях та ЗРС. Саме тому в розрізі даного питання були проведені багаторазові експериментальні заміри напруг в контактній мережі тягових підстанцій КП «ВТК» міста Вінниці.

Спостереження різкозмінних навантажень тягових підстанцій міського електричного транспорту дозволили отримати підтвердження зміни випрямленої напруги різних ділянок контактної мережі в досить широких, а в окремих випадках, недопустимих межах. Приклад осцилограми форми кривої випрямленої напруги для однієї з досліджуваних ТП, за умови перебування на секціонованій ділянці контактної мережі одночасно декількох одиниць електричного транспорту, наведений на рис. 2.

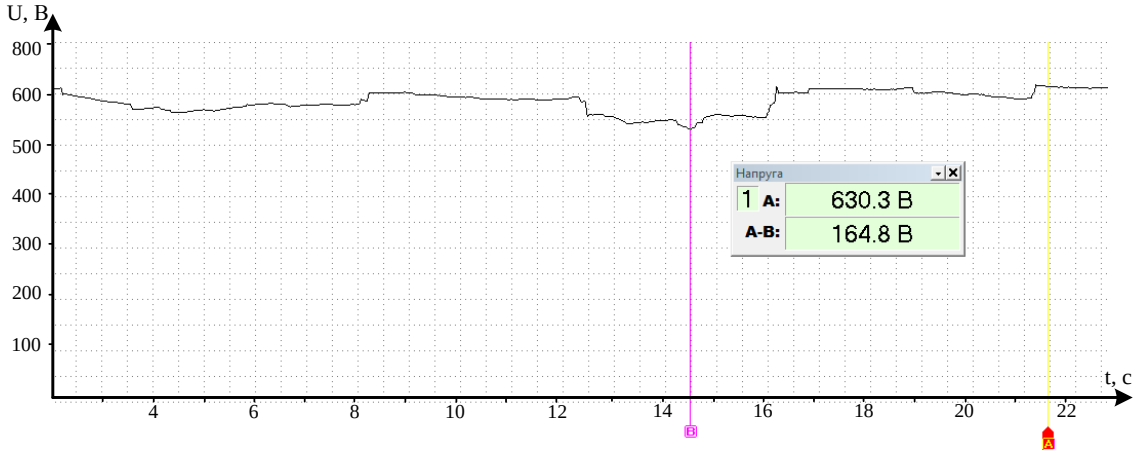


Рис. 2. Приклад осцилограми випрямленої напруги ТП

Приклад збільшення тягового навантаження та характер зміни при цьому випрямленої напруги в контактній мережі тягової підстанції приведений на рис. 3.

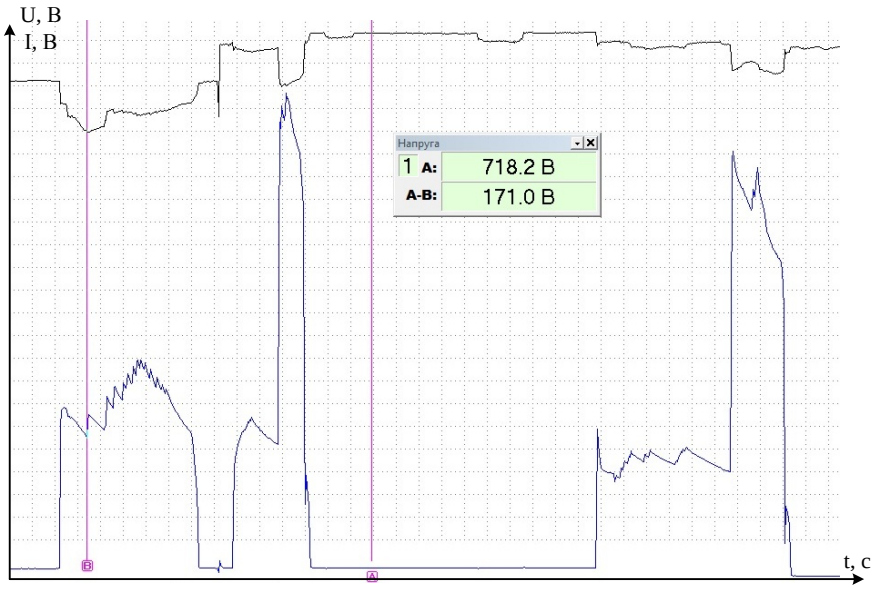


Рис. 3. Приклад осцилограми зміни навантаження та випрямленої напруги ТП

Під час вимірювань та аналізу отриманих даних використовувався метод практичного аналізу отриманих осцилограм та метод аналізу, заснований на застосуванні спеціальних приладів-аналізаторів [11]. Окремим та важливим етапом дослідження було проведення вимірювань вздовж ділянки контактної мережі шляхом розташування вимірювального обладнання безпосередньо на одному із ЗРС.

Аналізуючи приведені графіки перехідних процесів можна чітко простежити особливість системи електропостачання, яка характеризується неперервною зміною місць прикладення електричних навантажень у відповідності до руху ЗРС вздовж лінії. Вимірюваннями встановлено, що рівень випрямленої напруги в контактній мережі більшості ТП під час роботи в найбільш навантажені та «холості» години доби коливається в межах від 430 до 640 В.

Дослідженнями підтверджено, що значення випрямленої напруги на деяких тягових підстанціях КП «ВТК» міста Вінниці перевищують встановлене нормативне значення навіть за умови відсутності рекуперативних режимів роботи ЗРС і подекуди досягають 720-730 В. (рис. 4).

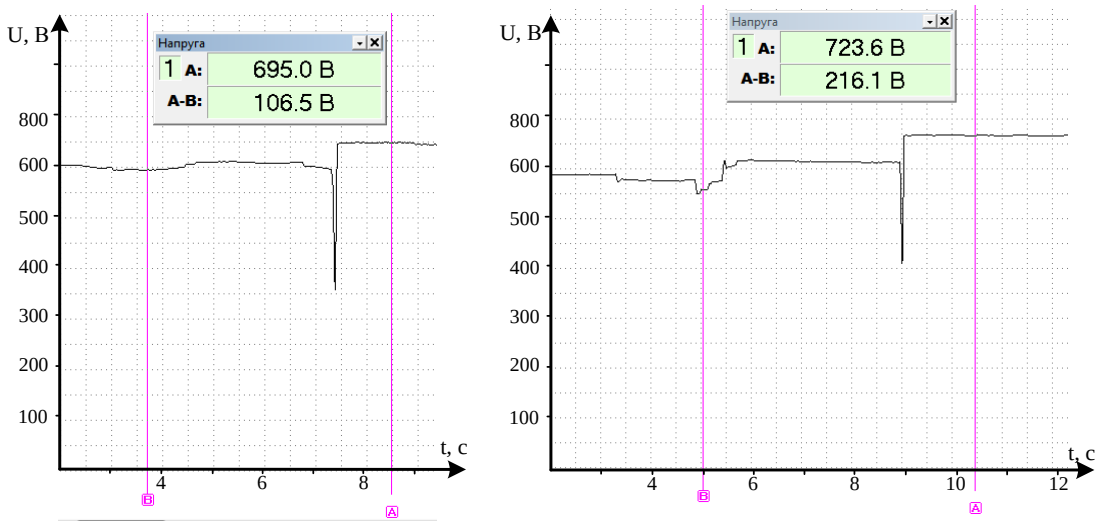


Рис. 4. Осцилограми зареєстрованих перевищень нормованих значень напруги ТП

Запропоновані графіки додатково ілюструють особливість побудови контактної мережі міського електричного транспорту, яка полягає в секціонуванні (розділенні) її ділянок за допомогою ізоляторів по всій довжині лінії. Слід відзначити, що в умовах КП «Вінницька транспортна компанія» серед множини існуючих підстанцій є такі, що виконують електропостачання тільки трамвайних або тролейбусних (одноагрегатні ТП) маршрутів та одночасно тролейбусних і трамвайних маршрутів МЕТ (дво- або трьохагрегатні ТП). Це, в свою чергу, накладає додаткові вимоги до розрахунку та проведення режимів рекуперативного/регенеративного гальмування за умов наявності на ділянках контактної мережі декількох різнотипних ЗРС.

Аналіз проведених досліджень показав, що зміни струмів навантаження ЗРС обумовлені переважно двома групами чинників: перша група викликає дискретні зміни, а друга – неперервні та випадкові. Перша

група включає в себе такі фактори як відстань між тяговими підстанціями, рельєф та профіль шляху, зміна ваги ЗРС (заповнення салону), чергування типу та потужності ЗРС. До другої групи слід віднести зміни кількості ЗРС та їх швидкісні режими руху на певній ділянці контактної мережі при заданій густині руху, напруга на шинах тягових підстанцій, реактивні опори в колах випрямлячів та режими роботи всієї групи ЗРС [11].

З огляду на можливі труднощі реалізації режиму рекуперативного гальмування найбільш оптимальним під час рекуперації є такий режим, при якому вся регенерована ЗРС енергія передається в неподалік розташований накопичувач енергії, а в момент розряду НЕ – в максимально можливій мірі повертається найближчому ЗРС, що працює в режимі тяги або використовується для власних потреб цього ж ЗРС. Виходячи з цього принципу, найбільш оптимальним з точки зору зниження втрат, є розміщення НЕ поблизу зупинки (де завжди мають місце (найдовші) режими гальмування та тяги) або безпосередньо на ЗРС.

Зрештою, фундаментальною задачею системи керування розподілом та використанням енергії електричних гальмувань ЗРС є управління регенерацією електроенергії та її акумулюванням для максимальної ефективності всієї системи електропостачання за рахунок декомпозиції максимальної кількості позитивних сторін кожного з можливих варіантів використання енергії, що виробляється ЗРС в режимі електродинамічного гальмування, та вибору найбільш раціонального способу використання цієї енергії в складній електромеханічній системі «система електропостачання – електротранспорт міста» [12]. Розробка єдиної системи управління енергоспоживанням та миттєвою потужністю МЕТ під час електричних гальмувань потребує врахування та регулювання критеріїв енергоефективності режимів електричного гальмування, серед яких можна виділити такі:

- дотримання швидкісних діапазонів та режимів руху (величина сповільнення, час гальмування) ЗРС на перегонах між зупинками;
- контроль за якістю та стабільністю напруги контактної мережі, яка може змінюватись в широких межах (підтверджено вимірюваннями);
- забезпечення наявності споживача(ів) регенерованої енергії (НЕ або ЗРС) для забезпечення можливості подальшого її розподілу та використання;
- оцінка ефективності енергообмінних процесів між структурними елементами енергосистеми ЗРС;
- забезпечення необхідних електричних характеристик накопичувачів енергії на основі їх функціонального призначення (оцінка енергоємності бортових НЕ, реалізація великих потужностей накопичення та повернення відносно великих енергії за відносно короткий час);
- врахування можливого споживання електроенергії на власні потреби під час гальмування.

Більш висока швидкість, інтенсивність сповільнення, час гальмування, вага ЗРС та менше допоміжне навантаження безпосередньо перед зупинкою збільшують величину енергії гальмування та можливість її подальшого розподілу і використання.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Проведено аналіз режимів розподілу та використання енергії електричних гальмувань ЗРС МЕТ, узагальнення та поширення отриманих результатів вимірювань на всю систему тягової електромережі. Під час досліджень отримано підтвердження того, що значення випрямленої напруги на деяких тягових підстанціях міста Вінниці перевищують встановлене нормативне значення навіть за умови відсутності рекуперативних режимів роботи ЗРС, що ускладнює використання режимів рекуперативного гальмування на окремих ділянках контактної мережі МЕТ. Сформовано та узагальнено критерії оцінки енергоефективності режимів електричного гальмування електротехнічного комплексу «система електропостачання – електротранспорт міста».

Література

1. КП «Вінницька транспортна компанія». Загальна інформація. URL: URL: https://2021.vmr.gov.ua/MunicipalEnreprise/Lists/KPVTK/Default.aspx.

2. Паянок О.А. Використання накопичувачів енергії в системі тягового електропостачання / О.А. Паянок // Матеріали XLIX регіональної науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області. – м. Вінниця, 2020. URL: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2020/paper/view/9094/7495.

3. Сопов В. И. Способы повышения эффективности использования энергии электрического торможения подвижного состава / В. И. Сопов // Онлайн Электрик: Электроэнергетика. Новые технологии, 2012. URL: URL:http://www.online-electric.ru/articles.php?id=43.

4. Босий Д. О. Баланс електричної енергії тягової підстанції постійного струму за різних рівнів несиметрії напруги системи зовнішнього електропостачання / Д. О. Босий, Д. Р. Земський // Східно-Європейський журнал передових технологій. Энергосберегающие технологии и оборудование. – 2014. – № 2/8 (68). – С. 52–57.

5. Сиченко В. Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць : монографія / В. Г. Сиченко, Ю. Л. Саєнко, Д. О. Босий ; Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – Дніпропетровськ : Стандарт-Сервіс, 2015. – 344 с.

6. Саблин О. И. Анализ качества рекуперируемой электроэнергии в системе электрического транспорта / О. И. Саблин // Вестник НТУ«ХПИ». – 2013. – Вип. 38. – С. 186–189.

7. Пасько О. В. Розробка методів і засобів підвищення ефективності застосування рекуперативного гальмування на залізницях постійного струму / О. В. Пасько, Р. Є. Тананян // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – Харків, 2017. – Випуск 173. – С. 167–175.

8. Саблін О.І. Ефективність рекуперації електроенергії в системі електротранспорту з інверторними тяговими підстанціями постійного струму / О.І. Саблін, Д.О. Босий, В.Г. Кузнецов, М.О. Баб'як, Є.М. Косарєв, П.В. Губський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 2. – С. 73–78.

9. Павленко Т. П. Електропостачання транспорту : навч. посібник / Т. П. Павленко, Н. П. Лукашова ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 216 с. – ISBN 978-966-695-547-3.

10. Паянок О.А. Дослідження гармонічного складу напруг в контактній мережі постійного струму тягових підстанцій міста / О.А. Паянок // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 1. – С. 84–89.

11. Мокін Б.І. Регулювання спектра напруги тягових підстанцій електротранспорту : [монографія] / Б.І. Мокін, О.А. Паянок. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 116 с. – ISBN 978-966-641-691-2.

12. Евстафьев А.М. Повышение энергетической эффективности гибридного локомотива / А.М. Евстафьев // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2015. – № 2. – С. 6–10.

References

1. KP «Vinnytska transportna kompaniia». Zahalna informatsiia. URL: URL: https://2021.vmr.gov.ua/MunicipalEnreprise/Lists/KPVTK/Default.aspx.

2. Paianok O.A. Vykorystannia nakopychuvachiv enerhii v systemi tiahovoho elektropostachannia / O.A. Paianok // Materialy KhLIX rehionalnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii profesorsko-vykladatskoho skladu, spivrobitnykiv ta studentiv universytetu z uchastiu pratsivnykiv naukovo-doslidnykh orhanizatsii ta inzhenerno-tekhnichnykh pratsivnykiv pidpryiemstv m. Vinnytsi ta oblasti. – m. Vinnytsia, 2020. URL: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2020/paper/view/9094/7495.

3. Sopov V. I. Sposoby povyshenija jeffektivnosti ispol'zovanija jenergii jelektricheskogo tormozhenija podvizhnogo sostava / V. I. Sopov // Onlajn Jelektrik: Jelektrojenergetika. Novye tehnologii, 2012. URL: URL:http://www.online-electric.ru/articles.php?id=43.

4. Bosyi D. O. Balans elektrychnoi enerhii tiahovoi pidstantsii postiinoho strumu za riznykh rivniv nesymetrii napruhy systemy zovnishnoho elektropostachannia / D. O. Bosyi, D. R. Zemskyi // Skhidno-Yevropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii. Enerhosberehaiushchye tekhnolohyy y oborudovanye. – 2014. – № 2/8 (68). – S. 52–57.

5. Sychenko V. H. Yakist elektrychnoi enerhii u tiahovykh merezhakh elektryfikovanykh zaliznyts : monohrafiia / V. H. Sychenko, Yu. L. Saienko, D. O. Bosyi ; Dnipropetrovskyi natsionalnyi universytet zaliznychnoho transportu im. akademika V. Lazariana. – Dnipropetrovsk : Standart-Servis, 2015. – 344 s.

6. Sablin O. I. Analiz kachestva rekuperiruemoj jelektrojenergii v sisteme jelektricheskogo transporta / O. I. Sablin // Vestnik NTU«HPI». – 2013. – Vip. 38. – S. 186–189.

7. Pasko O. V. Rozrobka metodiv i zasobiv pidvyshchennia efektyvnosti zastosuvannia rekuperatyvnoho halmuvannia na zaliznytsiakh postiinoho strumu / O. V. Pasko, R. Ye. Tananian // Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu. – Kharkiv, 2017. – Vypusk 173. – S. 167–175.

8. Sablin O.I. Efektyvnist rekuperatsii elektroenerhii v systemi elektrotransportu z invertornymy tiahovymy pidstantsiiamy postiinoho strumu / O.I. Sablin, D.O. Bosyi, V.H. Kuznetsov, M.O. Babiak, Ye.M. Kosariev, P.V. Hubskyi // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2016. – № 2. – S. 73–78.

9. Pavlenko T. P. Elektropostachannia transportu : navch. posibnyk / T. P. Pavlenko, N. P. Lukashova ; Kharkiv. nats. un-t misk. hosp-va im. O. M. Beketova. – Kharkiv : KhNUMH im. O. M. Beketova, 2021. – 216 s. – ISBN 978-966-695-547-3.

10. Paianok O.A. Doslidzhennia harmonichnoho skladu napruh v kontaktnii merezhi postiinoho strumu tiahovykh pidstantsii mista / O.A. Paianok // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2008. – № 1. – S. 84–89.

11. Mokin B.I. Rehuliuvannia spektra napruhy tiahovykh pidstantsii elektrotransportu : [monohrafiia] / B.I. Mokin, O.A. Paianok. – Vinnytsia : VNTU, 2017. – 116 s. – ISBN 978-966-641-691-2.

12. Evstaf'ev A.M. Povyshenie jenergeticheskoj jeffektivnosti gibridnogo lokomotiva / A.M. Evstaf'ev // Jelektronika i jelektrooborudovanie transporta. – 2015. – № 2. – S. 6–10.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-247-251
УДК 656.072

ПЕРЛОВ ВІКТОР
Вінницький національний технічний університет
https://orcid.org/0009-0005-0011-5515
e-mail: perlov@vntu.edu.ua
КИРИЦЯ ІННА
Вінницький національний технічний університет
e-mail: slk-vin@ukr.net

ЗАСТОСУВАННЯ ТРАНСПОРТНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПІД ЧАС ПЛАНУВАННЯ МІСТ НА ПРИКЛАДІ ВІННИЦІ

Розглянуті питання застосування транспортного моделювання при ухваленні планувальних рішень на прикладі Вінниці. Показано перелік задач для мікро- та макромоделювання, а також важливість транспортної моделі міста як в стратегічних, так і в тактичних підходах.

Ключові слова: транспортна модель, макромоделювання, мікромоделювання, транспортне планування

PERLOV VIKTOR, KYRYTSYA INNA
Vinnytsia National Technical University

APPLICATION OF TRANSPORT MODELING IN URBAN PLANNING USING THE EXAMPLE OF VINNYTSIA

The issues of using transportation modeling for decision-making in urban planning are discussed using the example of Vinnytsia. Macro-simulation allows for analyzing overall traffic flow without reproducing the movement of individual vehicles in detail. It enables a quick evaluation of different scenarios for the development of the transportation network and determining the effectiveness of road traffic management strategies. The transportation model of the city enables analyzing the load on the road network in the current state and predicting this parameter for scenarios of implementing new infrastructure projects. Examples of load maps for the road network of Vinnytsia and an individual transport hub are shown from the transportation model of the city.

Micro-modeling is the process of creating a mathematical model for a detailed analysis of vehicle movement in small areas (intersections, street sections, enterprise areas, etc.). An example of micro-modeling results for one intersection is presented. The application of micro-modeling in evaluating changes to the transportation network is an effective tool that allows municipalities to avoid inefficient use of funds and transportation mistakes that worsen traffic conditions. A list of tasks for micro and macro-modeling is analyzed. The main advantages and disadvantages of modeling and the risks that may arise from its use are described. The importance of the transportation model of the city is shown in both strategic and tactical approaches.

Keywords: transport model, macromodeling, micromodeling, transport planning

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

З кожним роком кількість автомобілів на дорогах міст збільшується, що призводить до заторів і затримок у русі як приватного, так і громадського транспорту [1]. Тому важливо мати ефективні засоби управління транспортними потоками, щоб забезпечити безпеку, швидкість і ефективність перевезень. Одним з таких засобів є транспортне моделювання, яке дозволяє прогнозувати і відтворювати поведінку транспортних потоків в реальному часі.

Транспортне моделювання використовує комп'ютерні програми, які аналізують дані про транспортний потік, враховуючи різноманітні фактори, такі як щільність трафіку, конфігурацію доріг і перехресть, швидкість руху транспорту та багато інших. Це дає можливість розробляти оптимальні маршрути, розраховувати час прибуття, прогнозувати затори і затримки.

У даній статті ми розглянемо різні методи транспортного моделювання, їх особливості, а також приклади застосування у місті Вінниця.

Результати дослідження.

Одним з ефективних інструментів управління транспортними потоками є транспортне моделювання, яке дозволяє прогнозувати та аналізувати різні сценарії руху транспортних засобів в реальному часі [2].

Транспортне моделювання використовує різні методи та алгоритми, які дозволяють аналізувати поведінку транспортних потоків з урахуванням різних чинників, таких як конфігурація доріг та перехресть, щільність транспортного потоку, швидкість руху, час доби, погода та інші.

Одним з методів транспортного моделювання є макросимуляція, яка дозволяє аналізувати рух транспортних потоків в цілому, без детального відтворення руху кожного окремого засобу. Вона дозволяє швидко оцінювати різні сценарії руху транспортних потоків та визначати ефективність застосування різних стратегій управління дорожнім рухом. Транспортне моделювання також може бути використано для прогнозування заторів та затримок у русі транспорту, що дозволяє розробляти оптимальні маршрути для громадського транспорту задля уникнення затримок у русі.

Транспортне макромоделювання – це процес створення математичної моделі для аналізу і прогнозування транспортних потоків на великих територіях, таких як міста, регіони або країни. У транспортному макромоделюванні враховуються різні фактори, такі як густота населення, географічні умови, економічний розвиток, наявність транспортних мереж та інші.

Макромоделі дозволяють виконувати аналіз транспортних потоків на великих територіях та прогнозувати рух транспортних засобів, що є важливим для планування розвитку транспортної інфраструктури, проектування нових доріг та інших об'єктів.

Для створення транспортних макромоделей використовуються різні методи, включаючи статистичні, економетричні та інші. Такі моделі можуть бути статичними або динамічними, залежно від того, чи враховують вони зміни в часі. Етапи створення транспортної моделі та особливості розробки докладно описані в [3].

Транспортну модель м. Вінниця розроблена в 2019 році в середовищі "PTV Visum" у межах проекту "Інтегрований розвиток міст України" за фінансування Німецького товариства міжнародного співробітництва (GIZ).

На рис. 1 показаний приклад картограми завантаженості вулично-дорожньої мережі міста.

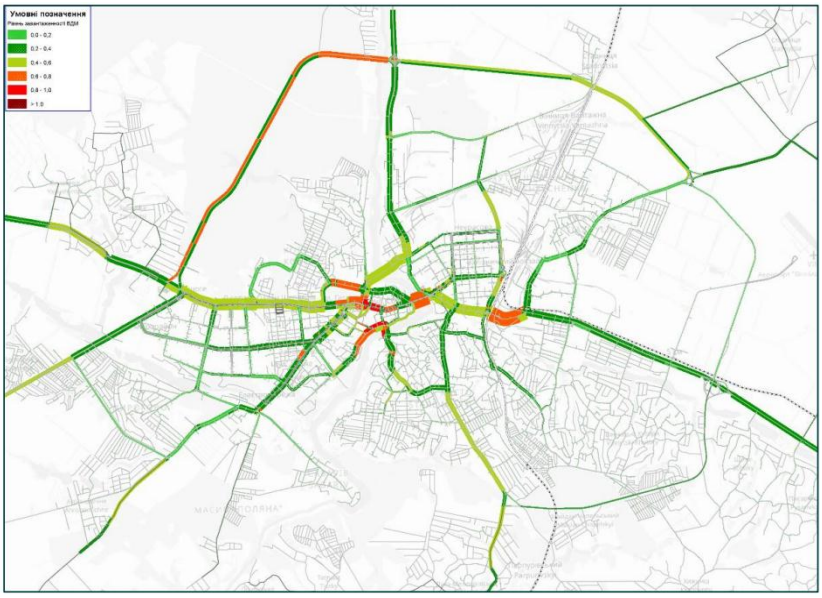


Рис. 1. Картограма завантаженості вулично-дорожньої мережі (ВДМ) м. Вінниця

Зазначена транспортна модель міста в тактичному плані дає змогу оцінити поточний стан завантаженості ВДМ, виявити проблемні ділянки, що потребують вдосконалення та конфліктні точки на маршрутах громадського транспорту (рис. 2, 3).

Рис. 2. Картограма завантаженості вузла "Майдан Небесної Сотні"

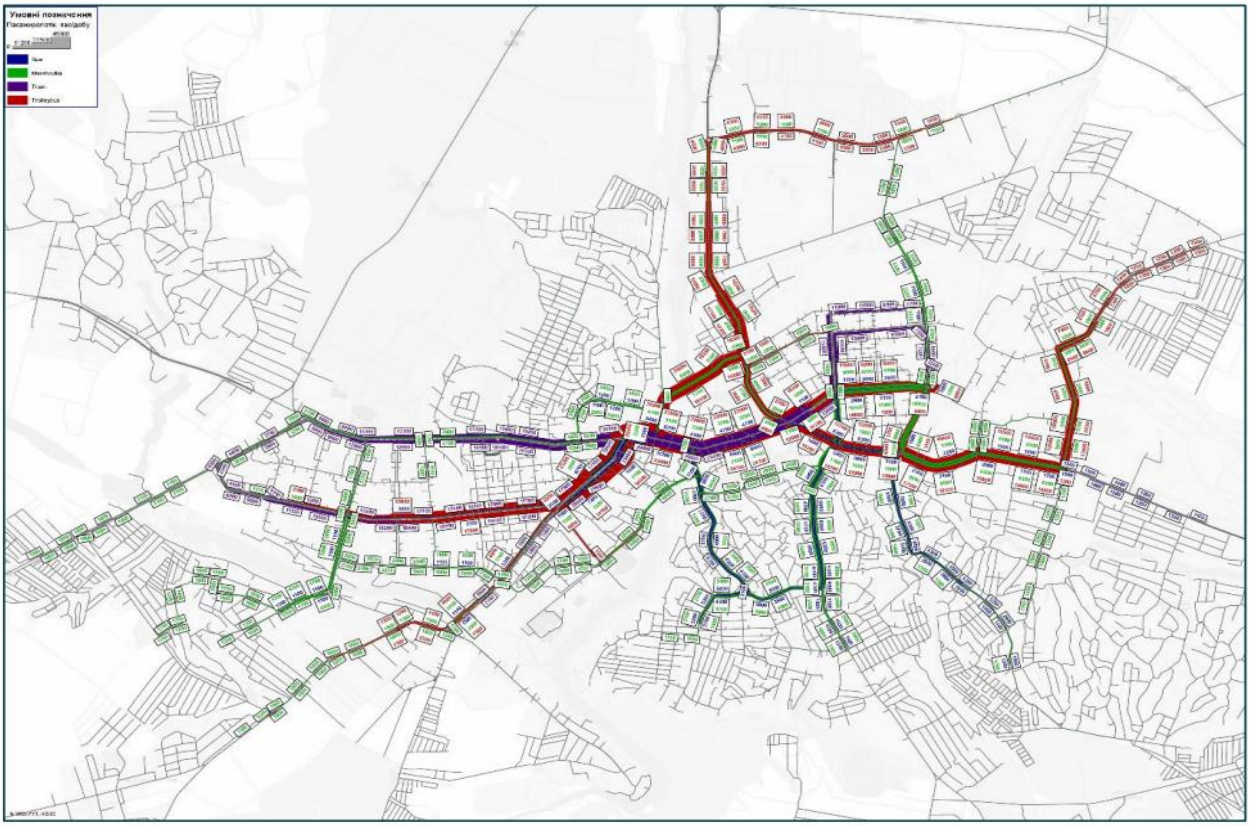


Рис. 3. Картограма пасажиропотоків за видами транспорту

В стратегічному плані модель дає змогу оцінити вплив великих інфраструктурних проектів на дорожню мережу міста в цілому та проаналізувати доцільність їх втілення. Наприклад: будівництво шляхопроводу Янгеля-Ватутіна, проект “Вінницька Миля” (реконструкція проспекту Коцюбинського), розробка детальних планів територій тощо.

Транспортне макромоделювання є важливим інструментом для управління транспортними потоками на великих територіях, що дозволяє забезпечити ефективне планування і розвиток транспортної інфраструктури, зменшити затори і затримки на дорогах та підвищити рівень безпеки руху.

Іншим методом транспортного моделювання є мікросимуляція. Вона дозволяє детально відтворювати рух кожного транспортного засобу в окремості, з використанням математичних моделей і алгоритмів, які враховують поведінку водіїв та взаємодію між транспортними засобами на дорозі [4].

Транспортне мікромоделювання – це процес створення математичної моделі для детального аналізу руху транспортних засобів на малих відрізках доріг або вулиць. У транспортному мікромоделюванні враховуються різні фактори, такі як поведінка водіїв, розташування світлофорів, розв'язок перехресть та інші параметри.

Транспортне мікромоделювання дозволяє докладно проаналізувати транспортний потік на малій ділянці дороги, що є важливим для планування та розробки дорожньої інфраструктури, дослідження дорожньої безпеки та визначення найбільш ефективних рішень для поліпшення руху транспорту [5].

Для створення транспортних мікромоделей використовуються різні методи, включаючи мультиагентні, дискретно-подібні та інші. Такі моделі можуть бути динамічними або стохастичними, залежно від того, чи враховують вони непередбачуваність поведінки водіїв.

На рис. 4 показано результати мікромоделювання перехрестя на площі Калічанській у м. Вінниця, які дали змогу оцінити потенційні результати втілення запропонованого проекту та ухвалити аргументовані управлінські рішення щодо його впровадження.

Транспортне мікромоделювання є важливим інструментом для управління транспортними потоками на малих відрізках доріг, що дозволяє забезпечити ефективну роботу світлофорів, визначити оптимальні розв'язки перехресть та зменшити кількість аварій. Використання транспортного мікромоделювання є особливо важливим в міських районах з високою щільністю населення, де затори на дорогах можуть бути серйозною проблемою та дозволяє уникнути неефективного витрачання коштів громади й уберегти місто від проектів, що мають потенційні ризики.

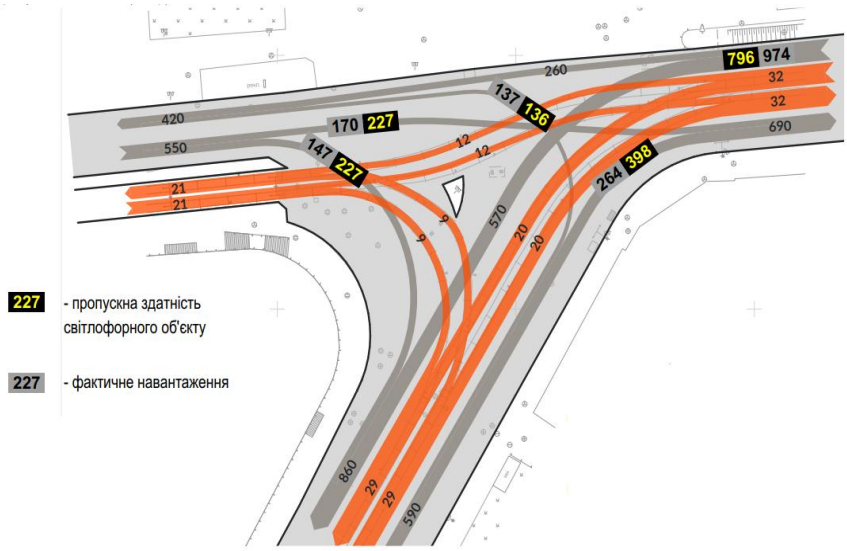


Рис. 4. Моделювання пропускної здатності площі Калічанської (кол. Гагаріна)

Основні переваги застосування транспортного моделювання включають:

- ефективність: транспортне моделювання дозволяє швидко та ефективно оцінювати різні альтернативні рішення, що стосуються розвитку транспортної інфраструктури. Застосування транспортного моделювання дозволяє виявити проблемні ділянки доріг та зони заторів, зрозуміти причини проблем та розробити оптимальні рішення для їх вирішення.

- економія коштів: транспортне моделювання дозволяє розробляти та оцінювати різні варіанти планування транспортної інфраструктури, що дозволяє зменшити витрати на будівництво та експлуатацію доріг та інших об'єктів.

- підвищення безпеки дорожнього руху: застосування транспортного моделювання дозволяє оцінити ризики дорожньо-транспортних пригод та розробити ефективні стратегії для їх запобігання. Моделювання також дозволяє визначити найбільш небезпечні ділянки доріг та вжити необхідних заходів для їх поліпшення.

- поліпшення руху транспорту: транспортне моделювання дозволяє визначити оптимальні рішення для покращення руху транспорту, такі як оптимізація сигналів світлофорів, розробка розв'язок перехресть та інших заходів.

- прогнозування: транспортне моделювання дозволяє прогнозувати майбутнє становище транспортної інфраструктури та руху транспорту, що дозволяє розробляти довгострокові стратегії розвитку транспортної мережі міст.

Основні недоліки та ризики застосування транспортного моделювання включають:

- Невідповідність реальності: транспортне моделювання базується на припущеннях та даних, що можуть не відповідати реальній ситуації. Наприклад, модель може не враховувати нові дорожні об'єкти або зміни в поведінці водіїв.

- Обмеженість даних: застосування транспортного моделювання потребує наявності точних та повних даних про транспортну інфраструктуру та рух транспорту. Недостатня кількість даних або їх недостатня якість може призвести до неточностей та недостовірних результатів.

- Складність моделювання: транспортне моделювання може бути складним технічним процесом, що потребує високої кваліфікації та досвіду фахівців. Невірна інтерпретація результатів моделювання може призвести до неправильних рішень.

- Високі витрати: застосування транспортного моделювання може бути дорогим процесом. Необхідність зібрати та обробити велику кількість даних, використання складних алгоритмів моделювання та найм кваліфікованих фахівців можуть збільшити витрати на проект.

- Необхідність постійного оновлення: транспортна інфраструктура та поведінка водіїв постійно змінюються, що вимагає постійного оновлення моделей. Недостатня частота оновлення може призвести до застарілих результатів, що не відповідають поточній ситуації.

Висновки

Транспортне макромоделювання є ефективним способом оцінки поточного стану транспортної мережі міста в цілому, а також потенційних результатів пропонованих проектувальниками рішень по зміні конфігурації транспортної системи (сценаріїв розвитку). Застосування транспортної моделі також дає змогу оцінити вплив окремих інфраструктурних об’єктів на завантаженість вулично-дорожньої мережі, що є вкрай важливим при розробці генеральних планів та детальних планів територій. Макромоделювання також дає змогу отримувати вихідні дані для мікромоделювання.

Транспортне мікромоделювання є важливим інструментом оцінки проектів при ухваленні рішень щодо реконструкції перехресть, ділянок вулиць тощо. Його застосування дає змогу виявити та виправити потенційні ризики проекту до його втілення, що забезпечує ефективне використання ресурсів громади.

Література

1. Статистичні дані по галузі автомобільного транспорту. Державна служба статистики України. Дата оновлення: 23.03.2023. URL: https://ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/tr.htm (дата звернення 03.04.2023).

2. Ortuzar D., Willumsen G. Modelling Transport, 3rd Edition, London, 2006.

3. Осєтрін М. М., Беспалов Д. О., Дорош М. І. Основні принципи створення транспортної моделі міста. Містобудування та територіальне планування. 2015. № 57. С. 309–320.

4. Любий Є. В., Пономарьова, Н. В., Чернишова, О. С. Транспортне планування міст: сучасні інструменти транспортного моделювання автотранспортних систем. Комунальне господарство міст. 2019. № 128. С. 76–82.

5. Осєтрін М. М., Беспалов Д. О., Дорош М. І., Тарасюк В. П. Транспортне моделювання як один із методів оцінки ефективності інженерно-планувальних елементів розв’язок в різних рівнях. Містобудування та територіальне планування. 2019. № 70. С. 417–430.

References

1. Statystychni dani po haluzi avtomobilnoho transportu. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy. Data onovlennia: 23.03.2023. URL: https://ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/tr.htm (data zvernennia 03.04.2023).

2. Ortuzar D., Willumsen G. Modelling Transport, 3rd Edition, London, 2006.

3. Osietrin M. M., Bespalov D. O., Dorosh M. I. Osnovni pryntsypy stvorennia transportnoi modeli mista. Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia. 2015. № 57. S. 309–320.

4. Liubyi Ye. V., Ponomarova, N. V., Chernyshova, O. S. Transportne planuvannia mist: suchasni instrumenty transportnoho modeliuvannia avtotransportnykh system. Komunalne hospodarstvo mist. 2019. № 128. S. 76–82.

5. Osietrin M. M., Bespalov D. O., Dorosh M. I., Tarasiuk V. P. Transportne modeliuvannia yak odyn iz metodiv otsinky efektyvnosti inzhenerno-planuvalnykh elementiv rozviazok v riznykh rivniakh. Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia. 2019. № 70. S. 417–430.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-252-262
УДК 678.05

ПОЛІЩУК АНДРІЙ
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0001-7887-7169
ПОЛІЩУК ОЛЕГ
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0001-6623-2523
e-mail: opolishchuk71@gmail.com
e-mail: andrepol215@gmail.com
ЛІСЕВИЧ СВІТЛАНА
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0002-5501-9038
e-mail: lisevichsv@gmail.com
УРБАНЮК ЄВГЕН
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0001-8713-501X
e-mail: urbanjuk@gmail.com
РУБАНКА МИКОЛА
Київський національний університет технологій та дизайну
https://orcid.org/0000-0003-2367-0333
e-mail: rubanka.mm@knutd.edu.ua

КОМПОЗИЦІЙНІ СУМІШІ НА ОСНОВІ СИНТЕТИЧНИХ ПОЛІМЕРІВ І НАПОВНЮВАЧІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ 3D-ДРУКУ НИМИ

В статті зазначено, що використання композиційних матеріалів замість традиційних матеріалів дозволяє суттєво зменшити вагу виробу, при цьому не змінюючи характеристики міцності даного матеріалу. Визначено, що перспективними для використання в якості конструкційних матеріалів є полімерні композиційні матеріали на основі металевих порошків, високоміцних органічних (арамідних) і вуглецевих волокнистих наповнювачів з полімерною матрицею. Приведено класифікацію полімерних композиційних матеріалів за матрицею та наповнювачем. Зазначено, що найбільше розмаїття властивостей вдається отримати з використанням твердих наповнювачів різної природи (метали, кераміка, полімери) і структури. Встановлено, що при формуванні тих чи інших властивостей полімерних композиційних матеріалів має значення як вид наповнювача, так і форма та розміри частинок. Визначено, що композиційні матеріали знаходять застосування в адитивних технологіях, зокрема в 3D-друку. Наведено розроблену технологію друку сумішшю полімерного з'єднувача та наповнювача з використанням 3D-принтера, яка включає певні етапи. Для проведення експериментальних досліджень в якості матриці вибрано полімерні матеріали та тверді наповнювачі різної природи і описано їх властивості. Наведено розроблений екструдер, що друкує гранулами чи композиційними сумішами полімерних матеріалів та 3D-принтер, на який його встановлено. Наведено композиційні суміші для проведення експериментальних досліджень. Зазначено параметри надрукованих зразків, що будуть досліджуватися.

Ключові слова: полімер, металевий порошок, композиційний матеріал, 3D-друк, 3D-принтер, екструдер.

POLISHCHUK ANDRII, POLISHCHUK OLEH, LISEVICH SVITLANA, URBANIUK YEVHEN
Khmelnytskyi National University
RUBANKA MYKOLA
Kyiv National University of Technologies and Design

COMPOSITE MIXTURES BASED ON SYNTHETIC POLYMERS AND FILLERS AND EQUIPMENT FOR 3D PRINTING WITH THEM

The article states that the use of composite materials instead of traditional materials allows you to significantly reduce the weight of the product, while not changing the strength characteristics of this material. It was determined that polymer composite materials based on metal powders, high-strength organic (aramid) and carbon fiber fillers with a polymer matrix are promising for use as structural materials. Fillers are used to improve the operational properties of the composite material (strength, stiffness, heat resistance), give them various specific properties and reduce the cost. The classification of polymer composite materials by matrix and filler is presented. It is noted that the greatest variety of properties can be obtained using solid fillers of different nature (metals, ceramics, polymers) and structures. It has been established that both the type of filler and the shape and size of the particles are important when forming certain properties of polymer composite materials. It was determined that composite materials are used in additive technologies, in particular in 3D printing.

Examples of the production of composite filaments by various companies, including various types of fillers, are given. The developed technology of printing with a mixture of polymer connector and filler using a 3D printer, which includes certain stages, is presented. Polymer materials and solid fillers of various nature were selected as the matrix for experimental research and their properties were described. The classification of equipment for forced mixing of materials is described. The developed extruder that prints with granules or composite mixtures of polymer materials and the 3D printer on which it is installed are presented. Composite mixtures for conducting experimental studies are given. The parameters of the printed samples to be examined are specified.

Keywords: technological process, cutting department, sewing enterprise, cutting production equipment, cutting, sewing materials.

Вступ

У зв'язку з необхідністю забезпечення нової техніки конструкційними матеріалами останні десятиліття дослідженню фізико-механічних властивостей композиційних матеріалів приділяють особливу увагу. Створення різних композиційних матеріалів на основі металевих та полімерних волокон дає можливість отримати матеріали з високими характеристиками міцності. Перевагою будь-якого композиційного матеріалу є те, що йому можна надати необхідні конструктивні властивості. Крім того, створювати матеріали з такими показниками, як високі значення міцності, деформованості та в'язкості руйнування. Надійність роботи конструкції, насамперед, залежить від запасу міцності конструкційного матеріалу, і навіть від такої характеристики, як в'язкість руйнування, тобто здатності матеріалу перешкоджати поширенню тріщини.

Використання композиційних матеріалів замість традиційних матеріалів дозволяє суттєво зменшити вагу виробу, при цьому не змінюючи характеристики міцності даного матеріалу, що особливо важливо для авіаційної та аерокосмічної промисловості. У більшості випадків полімерні матеріали дуже часто не мають достатньої жорсткості та міцності, щоб забезпечити вимоги, які пред'являються до конструкцій. Введення найрізноманітніших наповнювачів є найбільш традиційним способом поліпшення властивостей композиційних матеріалів, достатніх для того, щоб композиційні полімерні матеріали можна було використовувати як конструкційні матеріали.

На сьогодні найбільш перспективними для використання в якості конструкційних матеріалів є полімерні композиційні матеріали на основі металевих порошків, високоміцних органічних (арамідних) і вуглецевих волокнистих наповнювачів з полімерною матрицею. Найперспективнішим напрямом використання металевих, арамідних та сучасних вуглецевих матеріалів є напрямок, що пов'язаний із створенням надміцних композиційних матеріалів для використання їх у різних галузях промисловості та техніці [1–3].

Об’єкт та методи дослідження

Об’єктом досліджень є процеси, що протікають під час створення сумішей полімерних та твердих наповнювачів і друку з них готових деталей та виробів. В ході розв’язання поставлених задач використано метод системного аналізу. Теоретичні дослідження базуються на основних положеннях технології виробництв композитних матеріалів.

Постановка завдання

Враховуючи актуальність питання створення нових технологій швидкого виробництва продукції, завданням досліджень є розробка вузлів та деталей обладнання для виготовлення готових виробів і деталей з сумішей полімерних та порошків твердих наповнювачів.

Результати та їх обговорення

Полімерні композиційні матеріали – загальна назва двох або багатокомпонентних матеріалів на основі макромолекулярної сполуки (пластику), яка армується різними наповнювачами. Матриця виконує функцію з’єднувальної ланки, тоді як добавки забезпечують необхідні фізичні параметри. За своїми властивостями полімерні композиційні матеріали не поступаються традиційним аналогам, а часто перевершують їх. При цьому вони значно легші. Це забезпечує полімерним композиційним матеріалам широке застосування від декоративних виробів до деталей авіаційної та космічної галузей [2].

Основна особливість полімерних композиційних матеріалів – це можливість створення з них матеріалів та елементів конструкцій із заданими властивостями, що всебічно задовольняють характеру та умовам роботи виробів.

Полімерні композиційні матеріали мають дуже цінний комплекс технічних властивостей, найбільш важливими з яких є низька щільність і пов'язані з цим висока питома міцність і питома жорсткість матеріалів, можливість експлуатації в досить широкому температурному діапазоні та в умовах дії знакозмінних навантажень, корозійна стійкість та здатність витримувати досить тривалі статичні та динамічні навантаження, підвищеної вологості тощо.

Змінюючи склади та відсотковий вміст речовин, можна отримати безліч нових похідних матеріалів з різними характеристиками міцності, жорсткості, теплопровідності, електроізоляції, хімічної, температурної стійкості.

Класифікація полімерних композиційних матеріалів проводиться за матрицею та наповнювачем [1–3].

Номенклатурний ряд полімерів, що використовуються у матриці досить обширний. Тому основна класифікація проводиться за двома видами [4, 5]:

- термореактивні полімерні композиційні матеріали (реактопласти);
- термопластичні полімерні композиційні матеріали (термопласти).

До термореактивних відносяться низькомолекулярні олігомери: фенолоальдегідні, поліефірні, епоксидні, кремнійорганічні, поліефірні смоли тощо. При кімнатній температурі матриця зберігається у рідкому стані. Реактопласти мають кращу міцність, термостійкість, просочувальну здатність, адгезію, низьку в'язкість. До недоліків відносяться: крихкість; висока пористість матеріалів; лімітований термін зберігання заготовок; токсичність розчинників, що використовуються; необхідність термічної обробки в процесі формування, що збільшує її час. Виготовлення кінцевої продукції супроводжується незворотною каталітичною реакцією, внаслідок чого вона характеризується неплавкою структурою з міцними

молекулярними зв'язками. Вторинній переробці вироби не підлягають. Це створює певні проблеми, пов'язані з їхньою утилізацією. Нові технології передбачають видалення смоли шляхом піролізу з виділенням наповнювача.

До термопластичних відносяться високомолекулярні сполуки: поліолефіни, аліфатичні та ароматичні поліаміди, фторопласти. За природних умов матриці перебувають у твердому стані, при цьому термін зберігання практично не обмежений. Для просочення наповнювача вони розігріваються до розплавлення. Процеси нагріву та затвердіння можна виконувати багаторазово. Залежно від структури термопластичні полімери поділяють на аморфні та частково кристалічні. Перші відрізняються ізотропністю властивостей, еластичністю та високим поверхневим тертям. Для кристалічних характерні ударна міцність, термостійкість, хімічна інертність. Недоліком термопластів є швидше старіння під впливом навколишнього середовища. Однак, цей недолік компенсується можливістю переробки. Процес формування виробів включає нагрівання матриці, просочення часток або волокон під тиском і подальшим охолодженням при збереженні цього тиску. Технологія досить складна і потребує використання дорогого обладнання, що збільшує вартість кінцевої продукції.

Однією з найважливіших цілей використання наповнювачів є зниження вартості полімерних композиційних матеріалів. Саме ця характеристика вирішальною мірою визначає великий інтерес до наповнювачів і наповнених систем. Необхідно зауважити, що велике значення має здатність різних видів наповнювачів надавати нових властивостей полімерним матеріалам, порівняно з ненаповненими матеріалами [4, 6].

Наповнювачі використовують для покращення експлуатаційних властивостей композиційного матеріалу (міцності, жорсткості, теплостійкості), надання їм різних специфічних властивостей та зниження вартості. Наповнювач як один із компонентів відіграє вирішальну роль у формуванні основних характеристик композиційного матеріалу. Від наповнювача, значною мірою, залежать технологічні властивості композитів та можливості їхньої переробки у вироби.

До ідеального наповнювача пред'являються особливі вимоги, які в одному наповнювачі поєднувати дуже важко: висока міцність, високий рівень фізико-механічних властивостей, низьке водопоглинання, хороша змочуваність, відсутність шкідливих домішок, низька вартість, висока хімічна стійкість та термостійкість, негорючість, можливість придання заданої форми і розмірів частинок, хороше диспергування. Наповнювачі повинні добре суміщатися з полімером або диспергуватись у ньому з утворенням однорідної композиції. Вони не повинні змінювати свої властивості при зберіганні, переробці та експлуатації.

Коли один наповнювач не відповідає всім вимогам, то в композиційний матеріал вводять кілька наповнювачів. Часто вводяться наповнювачі різних форм та складів. Підбором відповідних наповнювачів можна регулювати хімічну стійкість, теплостійкість, тепло- та електропровідність, густину та інші характеристики композиційного матеріалу [4].

Існує низка підходів при класифікації наповнювачів за різними ознаками. Всі відомі наповнювачі за агрегатним станом поділяються на газоподібні, рідкі та тверді. За своєю природою вони поділяються на органічні та неорганічні; за джерелом отримання – на армуючі, зміцнюючі, підсилюючі, нейтральні. За розмірами, формою частинок та структурою наповнювачі розділяються на 4 основні види: дисперсні (порошкоподібні); волокнисті (волокна, нитки, джгути тощо), листові (плівкові) із заданою структурою (тканини, папір, стрічки, листи, плівки, сітки); об'ємні (каркасні) з безперервною тривимірною структурою (об'ємні тканини, повсть, скелетні та пористі каркаси).

Найбільшу розмаїтість властивостей вдається отримати застосуванням твердих наповнювачів різної природи (метали, кераміка, полімери) і структури [6]. Наповнювачами композиційних матеріалів можуть служити практично всі існуючі природні та створені людиною матеріали після надання їм заданої форми, структури та розмірів. З одного і того ж матеріалу (наприклад, скла) можна отримати різні за формою, розмірами, структурою наповнювачі: порошки з частинками кулястої, лускатої, голчастої, еліпсоїдної форми; нитки, волокна різного діаметра та довжини; тканини, стрічки, полотна тощо.

З органічних наповнювачів найбільш поширені – деревне борошно, що містить целюлозу та лігнін, борошно із шкаралупи горіхів; з неорганічних - слюда, тальк, крейда, каолін, силікати (глина, азбест, польовий шпат, пемза), оксиди (оксид алюмінію, магнію, цинку, двоокис титану), вуглецеві наповнювачі (графіт, кокс, вуглецеві та графітові волокна), (порошки, лусочки, волокна, сфери) [7, 8].

Все ширше застосовуються синтетичні волокна, порошки металів та його сплавів. Деякі металеві наповнювачі надають полімерам специфічні властивості, наприклад: порошки заліза та його сплави – феромагнітні властивості; лусочки алюмінію, нікелю, срібла – низьку газо- та паропроникність; порошки алюмінію та мідних сплавів – декоративність. Матеріали, наповнені свинцем, кадмієм та вольфрамом придатні як захист від випромінювань високої енергії. Порошки міді покращують фрикційні властивості композиційного матеріалу. Фториди та сульфати деяких металів (барію, кальцію) підвищують тепло- та хімічну стійкість, дисульфід молібдену знижує коефіцієнт тертя композиційного матеріалу [6].

При формуванні тих чи інших властивостей полімерних композиційних матеріалів має значення вид наповнювача, форма та розміри частинок.

Наповнювачі відіграють важливу роль при формуванні декоративних властивостей полімерного композиційного матеріалу. Застосування спеціальних наповнювачів дозволяє імітувати у виробу

забарвлення та фактуру різних матеріалів – деревини, тканин, оздоблювального каменю, що надзвичайно розширює можливості використання матеріалів у побуті, будівництві та техніці [8].

Композиційні матеріали, що містять дисперсні наповнювачі, які рівномірно розподілені в матеріалі, як правило, характеризуються ізотропією властивостей, оптимум яких досягається при ступені наповнення, що забезпечує адсорбцію всього об'єму з'єднувача поверхнею частинок наповнювача. При підвищенні температури і тиску частина з'єднувача десорбується з поверхні наповнювача, завдяки чому матеріал можна формувати у вироби складних форм з крихкими армуючими елементами. Дисперсний наповнювач зменшує усадку при пресуванні, підвищує жорсткість і твердість виробів з композиційних матеріалів, а в окремих випадках вироби набувають специфічних властивостей, наприклад дугостійкість, електро- і теплопровідність, стійкість до дії електромагнітного та проникаючого випромінювання тощо. Введення в композиційний матеріал дисперсних наповнювачів доцільніше для створення матеріалів масового виробництва, більш технологічних, з невисоким рівнем характеристик міцності. Дисперсні наповнювачі вводять у термопласти з високою енергією руйнування для зниження їх вартості, підвищення жорсткості та міцності при стисканні та покращення їх технологічних характеристик при переробці. При цьому їх міцність при розтягуванні та ударна в'язкість знижуються внаслідок зменшення частки полімеру в наповненій композиції.

Волокнисті наповнювачі посідають друге місце після дисперсних за обсягом використання. Вони застосовуються у вигляді ниток, джгутів, ровінгів, при створенні конструкційних, високоміцних та високомодульних композиційних матеріалів [7]. Волокнисті наповнювачі одержують із металів (сталь, залізо, вольфрам, молібден, титан), кварцу, базальту, кераміки, полімерів. Найбільш поширені скляні, вуглецеві, базальтові, борні, полімерні волокна діаметром 5-100 мкм, круглого та профільного перерізів. Особливий інтерес представляють монокристалічні волокна (ниткоподібні кристали або «вуса»), отримані з металів, їх оксидів, карбідів, нітридів. Вони відрізняються виключно високим модулем пружності та міцністю при розтягуванні.

При виробництві полімерних композиційних матеріалів в якості дисперсних наповнювачів використовують різні порошки металів [6, 9, 10]. Найчастіше застосовуються: залізо; олово; срібло; мідь; алюміній; цинк; свинець.

Порошкові металеві наповнювачі не мають значного впливу на міцність полімерного композиційного матеріалу, але здатні надавати матеріалам необхідні властивості, захищати від проникаючого електронного випромінювання, і в широких діапазонах змінюють їх фізичні параметри, а саме: електро- та теплопровідність; магнітні характеристики; теплоємність; щільність.

Властивості полімерних композитних матеріалів, наповнених металевими порошками, визначаються формою та розмірами їх частинок. В основному їх діаметр становить 40-50 мкм, але з метою надання виробам певних характеристик він може коливатися в межах 5-300 мкм.

Форма металевих частинок може бути різною (гольчастою, сферичною, лускатою, дендритною, оскольчатою) і визначається методом їх отримання. Технологія виробництва дозволяє задавати форму та розмір частинок.

Частинки плоскої форми надають виробам інтенсивного забарвлення, а довгасті частинки підвищують їхню міцність і стійкість до механічних впливів. Для досягнення максимально допустимої концентрації металевих включень в полімерних композиційних матеріалах використовують частинки різних розмірів і форми, а їх кількість залежить від в'язкості з'єднувальних полімерних компонентів.

Слід враховувати, що висока концентрація металевого порошку призводить до того, що частинки його починають контактувати між собою. Це призводить до стрибкоподібної зміни параметрів електро- та теплопровідності та є показником обмеження вмісту металевого наповнювача у полімерному композиційному матеріалі. Завдяки високим якісним характеристикам полімерні матеріали з металевими наповнювачами знайшли широке застосування в багатьох галузях промисловості.

Слід зазначити, що, попри очевидні переваги полімерних композиційних матеріалів, їх використання ведеться недостатньо інтенсивно. Певними перешкодами є необхідність розвитку нових виробничих потужностей, удосконалення технології виготовлення та переробки у готові вироби та недостатньо глибока підготовка інженерно-технічних працівників у галузі теорії механіки композиційних матеріалів. Ці перепони є причиною того, що якщо в авіаційно-космічній техніці, суднобудуванні досягнуто непоганих результатів зі створення виробів з композиційних матеріалів, що мають специфічні властивості, то в інших галузях техніки, зокрема 3D-друку, відомі технології виготовлення силових і корпусних елементів з композитів використовуються ще недостатньо.

Композиційні матеріали знаходять застосування в адитивних технологіях [11]. За останні кілька років інтенсивний розвиток адитивних технологій дозволив впровадити 3D-друк у більшість галузей. Це спричинило нові вимоги до 3D-принтерів і появу абсолютно нових, розроблених під конкретні запити замовників витратних матеріалів. Розширення лінійки витратних матеріалів, головним чином, торкнулося найпопулярнішої та доступної технології 3D-друку – FDM/FFF.

Широке застосування 3D-друку відкрило принципово новий шлях у галузі створення композиційних матеріалів. Сучасні технології, що швидко розвиваються, в найближчі кілька років приведуть до поступової заміни традиційних заводів та підприємств на виробничі центри, в яких будуть

використовуватися 3D-принтери для промислового випуску широкої гами виробів, деталей, компонентів для різних галузей промисловості.

З кожним роком зростає кількість виробничих компаній, які використовують композиційні матеріали для 3D-друку різних деталей чи готових продуктів. Згідно з маркетинговими дослідженнями ринку композиційного 3D-друку від компанії IDTechEx (Великобританія), до 2030 року об'єм такого виробництва становитиме $1,73 млрд, тоді як у 2020 році він становив лише $0,4 млрд [12].

В адитивному виробництві використовується широкий спектр матеріалів, від високоефективних термопластів, таких як PEEK до металів, придатних для аерокосмічної промисловості, таких як титан.

Однак, іноді інженерам необхідно поєднати властивості двох різних матеріалів, і один із найкращих способів зробити це – використовувати композити. Композиційні матеріали, що використовуються в таких процесах, як FDM та SLS, зазвичай містять базовий термопластичний матеріал та армуючі елементи, наприклад мідні частки. Співвідношення між двома елементами може змінюватись, як і спосіб інтеграції армуючого матеріалу.

Оскільки технології 3D-друку продовжують удосконалюватися, використання композитів, придатних для 3D-друку, стає більш поширеним. Їх використання також не обмежується промисловістю. Деякі композити (наприклад, порошки SLS) призначені, в основному, для промислового використання, інші (наприклад, термопласти, армовані рубаним волокном) можуть використовуватися в 3D-принтерах FDM середньої цінової категорії для аматорів та професіоналів .

У 3D-друку композити, зазвичай, є комбінацією термопластичного основного матеріалу (матриці) і армуючого елемента, такого як металеві частки, вуглецеве волокно, скловолокно, графен або кевлар [4].

Базові матеріали можуть бути практично будь-якими, але в промисловості, зазвичай, використовуються термопласти преміум-класу, які мають хороші характеристики матеріалу навіть без армуючих елементів. До таких полімерів можна віднести наступні синтетичні полімери: пластики на основі сополімерів акрилонітрилу, бутадієну та стиролу (ABS); поліетилентерефталат, модифікований гліколем (PET-G), полікарбонат PC; нейлон, а також полі-D, L-лактиди (PLA). Ці з'єднувальні матеріали дають величезний базис для роботи з адитивними технологіями для масового споживача, оскільки задовольняють за ціною та кінцевим результатом.

Композити можуть приймати різні форми матеріалів, найбільш поширеними є змішані порошки для селективного лазерного спікання (SLS) і змішані нитки для моделювання методом наплавлення (FDM). Існує також обмежена кількість композиційних смол для процесів 3D-друку з фотополімеризацією у ванні, таких як стереолітографія (SLA); за допомогою цієї технології матеріали на основі термореактивної смоли можуть бути затверділі навколо армуючого волокнистого каркасу [5].

Чи це порошок, нитка або інша форма, композиційні матеріали для 3D-друку, зазвичай, розробляються через їх високу міцність, високу жорсткість, стабільність розмірів і добре відношення міцності до ваги. Металеві частки можуть значно підвищити міцність термопластику. Інженерні композити надруковані на 3D-принтері, можна використовувати замість суцільного металу.

Базові термопласти для FDM 3D-друку композитами варіюються від звичайних полімерів, таких як PLA та ABS, до високопродуктивних полімерів, таких як PEEK (поліефіркетон). Нейлон – основний матеріал, що використовується для композиційних порошків SLS (як і основний матеріал, що застосовується при лазерному спіканні), але він також може використовуватися в якості матриці композиційного матеріалу при FDM 3D-друку.

Приклади композиційних матеріалів на ринку, що випускаються різними фірмами, включають композиційні метало-PLA філаменти від ColorFabb, ProtoPasta, TreeD Filaments і Formfutura [13–16]. Ці філаменти, що містять значний відсоток металевих порошків, залишаються досить пластичними для того, щоб можна було друкувати за низької температури (від 200 до 300 ^{0}C) на будь-якому 3D-принтері. У той час, вони містять достатньо металу, щоб кінцевий об'єкт виглядав, створював тактильне відчуття і навіть важив, як металевий. Філаменти на основі заліза, за певних умов, навіть іржавіють.

Зазвичай, у філамент для 3D-друку додається до 50% металевого порошку. У голландській компанії Formfutura заявляють, що їм вдалося досягти 85-відсоткового вмісту металевого порошку при 15% PLA [16]. Ці філаменти називаються MetalFil Ancient Bronze та Metalfil Classic Copper [17, 18]. Ними можна друкувати навіть за «помірних» температур від 190 до 200 ^{0}C.

Прикладом композиційних матеріалів на основі волокнистих наповнювачів є: PA 640-GSL від EOS [19], нейлоновий SLS-порошок PA 12, армований скляними гранулами та вуглецевими волокнами [20]; CarbonX PETG+CF від 3DXTech, нитка PETG FDM, армована рубаним вуглецевим волокном [21]; Onyx від Markforged, матеріал на основі нейлону, наповнений вуглецевим волокном, який може бути посилений безперервними волокнами з використанням запатентованої технології композитного друку Markforged [22].

До галузей, де використовується адитивне виробництво та 3D-друк композитів, належать аерокосмічна, автомобільна, електронна, медична та інші галузі промисловості. У більшості цих галузей композиційний 3D-друк застосовується для виготовлення деталей високої жорсткості невеликого масштабу [23].

Пропонується технологія друку сумішшю полімерного з'єднувача та наповнювача з використанням 3D-принтера, що включає наступні етапи.

Етап 1. Дослідження і підбір сировини. На першому етапі необхідно підібрати і проаналізувати вихідний матеріал для виготовлення змодельованого виробу.

Етап 2. Змішування вихідних матеріалів з метою отримання композиційної суміші.

Етап 3. Здійснення пробної екструзії на лабораторному обладнанні.

Етап 4. Тестування суміші композиційного матеріалу з використанням 3D-принтера.

Етап 5. Запуск друку на обладнанні і налаштування його оптимальних режимів роботи.

Етап 6. Механічні дослідження 3D-друкованих зразків на стискання, згин, а також розрив вздовж та поперек шарів.

Етап 7. При задовільних результатах запуск на 3D-друк необхідних деталей.

Підбір сировини для 3D-друку.

Для проведення експериментальних досліджень було вибрано в якості наповнювача металеві частки: міді марки ПМС-1 [24], бронзи ПР-БРАЖ 9.5-1 [25] та нержавіючої сталі ПР-12Х18Н10Т [26].

Порошкоподібна мідь ПМС-1 – це електролітичний компонент із досить складним фізико-хімічним складом та високим вмістом міді 99% (рис. 1). Продукт виготовляється шляхом утворення твердого осаду для обробки сульфату міді. Це стабілізована речовина популярна у різних промислових та хімічних галузях. Унікальні властивості продукту зробили його незамінним: як легуючу добавку, речовина, що прискорює хімічні реакції у металургії; для полірування скла та лінз в оптико-механічному виробництві; у машинобудуванні для з'єднання з порошками заліза; у металургії, авіації для виготовлення кілець, вкладишів, електромеханічних контактних груп [24].

Також порошковий матеріал ПМС-1 є основним компонентом у виготовленні виробів, де використовуються дисперсно-зміцнені композиційні матеріали – струмопровідні наконечники та електроди для дугового зварювання.

Було проведено дослідження по визначенню хімічного складу та величини зернистості мідного порошку ПМС-1. В результаті досліджень встановлено наступний хімічний склад даного матеріалу: масова частка міді складає – 99,5%; масова частка домішок (заліза, свинцю, миш'яку, сурми). Розміри часток міді складають до 40-42 мкм.

Порошок бронзи марки ПР-БРАЖ 9.5-1 [25]. Бронза порошкова ПР-БРАЖ 9.5-1 – це мілко подрібнений порошок темно-коричневого кольору, що складається з часток бронзи. Він володіє здатністю до пластичної деформації, здатністю зберігати форму, здатністю під впливом нагрівання утворювати міцне тіло або величиною усадки. Має високі антифрикційні властивості з хорошим опором корозії та підвищені механічні властивості.

Бронзовий порошок є вихідним матеріалом для виготовлення металокерамічних виробів. Використовується в електротехніці, приладобудуванні, металургії, машинобудуванні, авіації, хімічній промисловості. Застосовується в поліграфічній промисловості для покриття різних поверхонь та матеріалів з декоративною та захисною метою.

Було проведено дослідження по визначенню хімічного складу та величини зернистості порошку бронзи марки ПР-БРАЖ 9.5-1 (рис. 2). В результаті досліджень встановлено наступний хімічний склад даного матеріалу: мідь – 89,5%; алюміній – 9,5%; залізо – 1%. Зернистість мілкодисперсного порошку складає 45 мкм.

Порошок нержавіючої сталі ПР-12Х18Н10Т (рис. 3) [26]. Це порошкоподібна речовина, виготовлена із заліза з малою кількістю домішок. Порошок з нержавіючої сталі використовується для виготовлення виробів методом порошкової металургії, зварювальних матеріалів, покриття зварювальних електродів та їх виробництва, хімічної та поліграфічної промисловості.

Рис. 1. Порошкоподібна мідь ПМС-1

Рис. 2. Порошок бронзи марки ПР-БрАЖ 9.5-1

Було проведено дослідження по визначенню хімічного складу та величини зернистості порошку нержавіючої сталі ПР-12Х18Н10Т. В результаті досліджень встановлено наступний хімічний склад даного матеріалу: хром – 19%; нікель – 11%; залізо – 66%, кремній – 0,8%, марганець – 1,5%. Залишок складають сірка, фосфор, титан. Зернистість мілкодисперсного порошку складає 50 мкм.

Порошок має однорідний хімічний склад, коефіцієнт форми знаходиться в межах 1,5-2,0. Форма частинок переважно сферична, а розмір частинок знаходиться в межах 43-47 мкм.

Для проведення експериментальних досліджень було вибрано, в якості матриці композиційної суміші полімерні матеріали, що використовуються для виготовлення нитки для 3D друку: PLA-пластик, ABS-пластик і нейлон PA6 [27, 28].

PLA (полілактид) – найпопулярніший матеріал для 3D принтера за рахунок своєї екологічності, безпеки, відсутності неприємного запаху і високих механічних характеристик [29]. Нитка для 3D принтера з полілактиду дозволяє створювати габаритні моделі з високою стабільністю розмірів, високою геометричною складністю і високою роздільною здатністю друку. У цього матеріалі низька усадка, висока адгезія до платформи, а також між шарами – це дозволяє друк без деламінації і деформації готового виробу. PLA володіє високою жорсткістю і високою міцністю на розрив, проте, він крихкий, із низькою температурою експлуатації, що не дозволяє його використовувати для більшості технічних виробів.

Технічні характеристики вибраного пластику PLA наступні: лінійна маса - 325-335 м/кг; густина – 1,24 г/см^3; міцність на розтяг – 51 МПа; відносне видовження при розриві – 30%; модуль пружності при розтягу – 2300 МПа; міцність при згині – 80 МПа; ударна в'язкість без надрізу по Шарпі (23°С) – 102 кДж/м^2 (рис. 4).

Рис. 3. Порошок нержавіючої сталі ПР-12Х18Н10Т

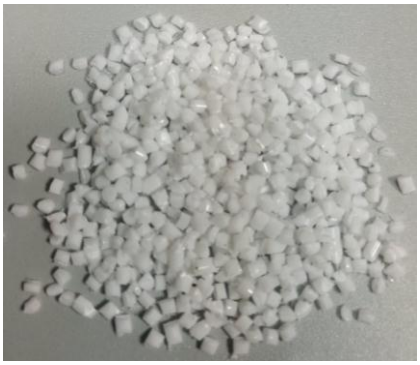


Рис. 4. PLA - пластик

ABS (акрилонітрил бутадієн стирол) – один з найпоширеніших пластиків для 3D друку [30]. Свою популярність він набув завдяки своїм унікальним властивостям, таким як простота механічної та хімічної обробки надрукованих виробів, широкому діапазону температур експлуатації, стійкістю до впливу розчинів лугів і кислот. Це механічно міцний та ударостійкий матеріал. Він легко піддається фарбуванню і склеюванню.

Вироби створені з ABS пластику мають приємну рівномірну матову поверхню, яку можна зробити глянцевою при обробці в етилацетаті або ацетоні. Даний матеріал, в основному, використовується для 3D друку прототипів, корпусів, елементів декору, іграшок та інших виробів невідповідального призначення.

Технічні характеристики вибраного ABS пластику наступні: лінійна маса 380-400 м/кг; стійкість до згину – 10 разів; густина – 1,05 г/см^3; температура експлуатації – 20–80 °С; міцність на розтяг – 40 МПа; відносне видовження при розриві – 30 %; модуль пружності при розтягу – 2600 МПа; модуль пружності при згині – 2500 МПа; міцність при згині – 55–70 МПа; ударна в'язкість без надрізу по Шарпі (23°С), 196 кДж/м^2 (рис. 5).

Nylon (PA6) відноситься до конструкційних (інженерних) полімерних матеріалів [31]. Nylon – жорсткий пластик, піддається кристалізації, володіє високою міцністю на розрив і стійкістю до зношування. Він відрізняється високою температурою розм'якшення та еластичністю при низьких температурах, витримує стерилізацію паром, розігрітим до 140 °С. Ця властивість дозволяє використовувати його в умовах з температурними перепадами в широкому діапазоні.

Nylon стійкий до впливу різних хімічно активних речовин, таких як слабкі кислоти, кетони, луги, вуглеводні, масла, спирти та ефіри. Деталі, виготовлені з Nylon стійкі до ударних і кінетичних навантажень. Він може слугувати хорошим теплоізолятором.

Технічні характеристики вибраного пластику Nylon PA6 наступні: лінійна маса – 330-350 м/кг; густина – 1,2 г/см3; температура експлуатації – від -30 до +120 °С; міцність на розтяг – 78 МПа; відносне видовження при розриві – 75, %; модуль пружності при розтягу – 2700 МПа; модуль пружності при згині – 2600 МПа; міцність при згині – 70 МПа (рис. 6).

Отримання якісних сумішей для виготовлення композиційних матеріалів є однією з актуальних задач. Сьогодні змішування компонентів композиції перетворилося в особливу галузь технологічних знань, які ґрунтуються на механічних процесах, мета яких – забезпечити максимально високу ступінь суміщення окремих компонентів в суміші.

При створені композиційних сумішей використовується різноманітне обладнання для примусового змішування матеріалів.

Рис. 5. ABS пластик

Рис. 6. Nylon PA6 пластик

З цією метою використовуються різні змішувачі безперервної та періодичної дії. Змішувачі періодичної дії в залежності від типу робочого органу ділять на: змішуючі барабани (з корпусом, що обертається); черв'ячно-лопатеві; плунжерні; стрічкові; змішуючі бігуни; змішувачі відцентрової дії; з псевдозрідженням сипучого матеріалу; з ротором, що швидко обертається і пневмозмішувачі.

Змішувачі безперервної дії ділять на: барабанні; черв'ячно-лопатеві; гравітаційні; відцентрової дії; прямоточні; каскадні; циркуляційні та віброзмішувачі.

Високоефективне змішування сухих компонентів забезпечить високу реакційну здатність суміші під час використання в адитивних технологіях.

Для приготування композиційної суміші для 3D принтера використовувалося просте змішування порошків полімеру і наповнювача з послідуючим переводом полімеру у вязкотекучий стан в екструдері.

Приклад отриманої суміші PLA-CCu мідь, що включає в себе пластик PLA (35%) і частки міді (65%) представлено на рис. 7.

Рис. 7. Суміш PLA-CCu

Для проведення експериментальних досліджень було розроблено екструдер, що друкує гранулами чи композиційними сумішами полімерних матеріалів. Використовуючи програмне забезпечення SolidWorks, було розроблено модель екструдера, що представлена на рис. 8 [32].

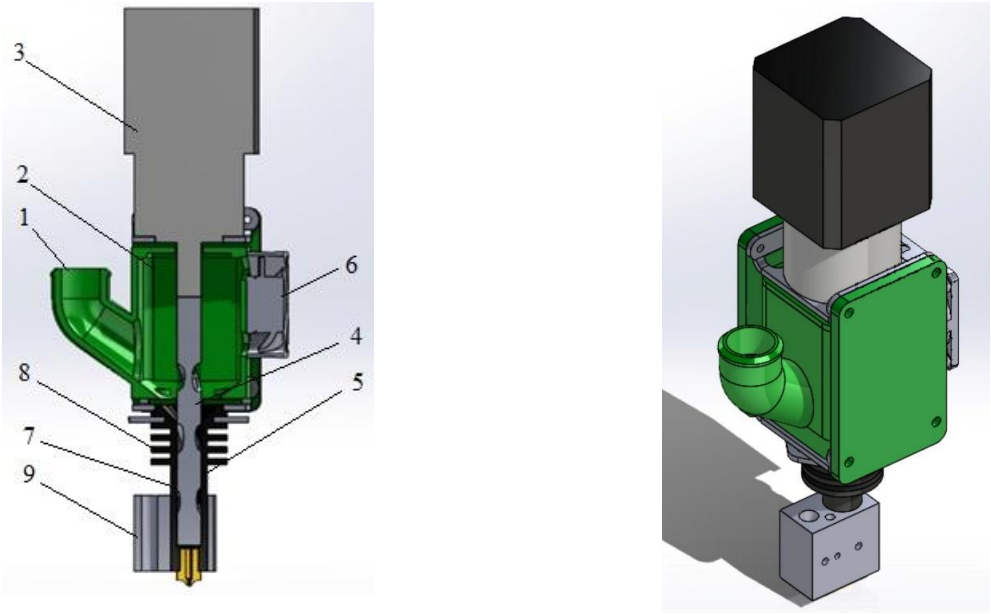


Рис. 8. Модель екструдера в програмному середовищі SolidWorks

Вихідна суміш композиційного матеріалу засипається у завантажувальних бункер, що знаходиться ззовні. В подальшому суміш подається через патрубок 1, що розміщений на стінці проміжної камери 2. Від мотор-редуктора 3 приводиться в дію шнек 4, що обертається. Його основна функція – транспортування суміші з проміжної камери 2 в нагрівальну камеру 5. Для подачі потоку холодного повітря в проміжну камеру з метою підтримання сталої температури, нижчої ніж в нагрівальній камері, використовується вентилятор 6. Камера для нагрівання суміші 5 складається з алюмінієвого корпусу, на якому ззовні розміщено радіатор 8. Він використовується для розсіювання тепла, яке поступає від нагрівального елементу в допоміжну камеру.

Тепло від нагрівача 9, що розміщений в нижній частині екструдера передається догори по алюмінієвому циліндру та шнеку, нагріває їх до заданої температури та розплавлює з'єднувальний полімер (матрицю). Шнек екструдера при обертанні збільшує тиск на розплавлену суміш, проштовхуючи її через отвір у соплові.

Розроблений екструдер було встановлено на 3D принтер Anycubic Mega S. Загальний вигляд експериментальної установки наведено на рис. 9.

В подальшому, буде здійснено виконання етапів 3-7 запропонованої технології.

Будуть проведені експериментальні дослідження з метою підтвердження працездатності пристрою для 3D-друку експериментальних зразків та готових виробів сумішшю композиційних матеріалів, а саме: пластик PLA+мідь; PLA+бронза; PLA+нержавіюча сталь (нікель); пластик ABS+мідь; ABS+бронза; ABS+нержавіюча сталь (нікель); пластик Nylon PA6+мідь; Nylon PA6+бронза; Nylon PA6+нержавіюча сталь (нікель).

Рис. 9. Загальний вигляд 3D принтера Anycubic Mega S із встановленим екструдером для друку сумішшю композиційного матеріалу

З метою збільшення кількості композиційних сумішей для 3D друку та подальших досліджень будуть використані наповнювачі у вигляді скляного та вуглецевого волокон та створені наступні суміші: пластик PLA+графіт; пластик PLA+скловолокно; пластик PLA+карбонове волокно; пластик ABS+графіт; пластик ABS+скловолокно; пластик ABS+карбонове волокно; пластик Nylon PA6+графіт; пластик Nylon PA6+скловолокно; пластик Nylon PA6+карбонове волокно.

Також здійснено визначення мікроструктури нових полімеронаповнених сумішей для 3D друку та готових виробів на їх основі за допомогою оптичної та скануючої електронної мікроскопії з отриманням наступних даних: однорідність, пористість, зернистість, розподіл структурних компонентів, наявність неметалевих часток, тощо); досліджено екструдер 3D принтера при роботі з сумішами матеріалів, що мають високу абразивність.

Висновки

Виконані дослідження показують наступне:

- використання композиційних матеріалів замість традиційних матеріалів дозволяє суттєво зменшити вагу виробу, при цьому не змінюючи характеристики міцності даного матеріалу;
- перспективними для застосування, в якості конструкційних матеріалів, є полімерні композиційні матеріали на основі металевих порошків, високоміцних органічних (арамідних) і вуглецевих волокнистих наповнювачів з полімерною матрицею, які дають змогу покращити експлуатаційні властивості (міцність, жорсткість, теплостійкість) готових виробів, виготовлених методом 3D-друку та надають їм різних специфічних властивостей і ведуть до зниження вартості їх виготовлення;
- надруковані на розробленому 3D-принтері деталі та вироби із композиційних сумішей потребують експериментальних досліджень по визначенню їх фізико-механічних властивостей.

Література

1. Юскаєв В.Б. Композиційні матеріали : навчальний посібник. Суми : Видавництво СумДУ, 2006. 199 с.
2. Джурка Г.Ф. Полімерні композиційні матеріали. Полтава, 2008. 58 с.
3. Копань В. Композиційні матеріали. К. : Вид-во «Пульсари», 2004. 200 с.
4. Гончаренко В.В., Коваленко І.В. Технологія композиційних матеріалів : навчальний посібник. К. : 2007. 131 с.
5. Суберляк О.В., Баштаник П.В. Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів. Львів : Растр, 2007. 375 с.
6. Курта С.А. Наповнювачі – синтез, властивості та використання : навчальний посібник. Івано-Франківськ : Вид-во Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, 2012. 302 с.
7. Волокнисті композиційні матеріали: властивості та застосування. URL: http://vidpoviday.com/voloknisti-kompozicijni-materiali-vlastivosti-ta-zastosuvannya (дата звернення 06.04.2023).
8. Лютий П.В. Основні методи виготовлення композиційних матеріалів на основі деревинних відходів і термопластичних полімерів. Науковий вісник НЛТУ України, 2009. Вип. 19.2.
9. Нестеренко Т.М., Скачков В.О., Воденнікова О.С. Теорія і технологія порошкової металургії : навчально-методичний посібник. Запоріжжя : ЗДІА, 2016. 192 с.
10. Савчук П.П., Кашицький В.П., Мельничук М.Д., Садова О.Л. Композитні та порошкові матеріали : навчальний посібник. Луцьк : ФОП Теліцин О.В., 2017. 368 с.
11. Закономірності адитивного формування 3D виробів із полілактиду та композитів на його основі. URL: http://surl.li/givgk (дата звернення 06.04.2023).
12. Collins R. 3D printing composites 2020-2030: technology and market analysis current and future technologies, and market forecasts, 2020. URL: https://www.idtechex.com/en/research-report/ (дата звернення 06.04.2023).
13. PLA Filaments. URL: https://colorfabb.com/filaments/materials/pla-filaments (дата звернення 06.04.2023).
14. Metal Filled. URL: https: https://www.proto-pasta.com/collections/metal-filled (дата звернення 06.04.2023).
15. 3D Filaments. URL: https://treedfilaments.com/3d-printing-filaments/ (дата звернення 06.04.2023) (дата звернення 06.04.2023).
16. Filaments. URL: https://formfutura.com/c/filaments/page/5 (дата звернення 06.04.2023).
17. MetalFil – Ancient Bronze. URL: https://formfutura.com/product/metalfil-ancient-bronze/ (дата звернення 06.04.2023).
18. MetalFil – Classic Copper. URL: https://formfutura.com/product/metalfil-classic-copper/ (дата звернення 06.04.2023).
19. PA 640 GSL. URL: https://store.eos.info/products/pa-640-gsl (дата звернення 06.04.2023).
20. PA12 Smooth URL: https://sinterit.com/materials/pa12-smooth/ (дата звернення 06.04.2023).
21. Carbon X PETG+CF URL: https://www.3dxtech.com/product/carbonx-petg-cf/ (дата звернення 06.04.2023).
22. Onyx. URL: https://markforged.com/materials/plastics/onyx (дата звернення 06.04.2023).
23. Адитивне виробництво: технологія, матеріали та переваги 3D-друку. URL: https://3dprint.infomir.eu/uk/aditivne-virobnicztvo (дата звернення 06.04.2023).
24. Мідь порошок, марка ПМС-1. URL: https://ukrsplav.in.ua/uk/product/med-poroshok-marka-pms-1/ (дата звернення 06.04.2023).
25. Бронзові порошки. URL: https://prom.ua/ua/p1010249206-bronzovye-poroshki.html (дата звернення 06.04.2023).
26. Порошки металів. URL: https://prom.ua/ua/c3207584-metall-kamen.html?product_group=70708945 (дата звернення 06.04.2023).
27. Стандартні матеріали. URL: https://monofilament.com.ua/ua/products/standartnye-materialy/ (дата звернення 06.04.2023).
28. Інженерні пластики. URL: https://monofilament.com.ua/ua/products/ (дата звернення 06.04.2023).
29. PLA. URL: https://monofilament.com.ua/ua/products/standartnye-materialy/pla/pla-chernyj (дата звернення 06.04.2023).
30. ABS. URL: https://monofilament.com.ua/ua/products/standartnye-materialy/abs/abs-chernyj (дата звернення 06.04.2023).
31. Nylon. URL: https://monofilament.com.ua/ua/products/inzhinernye-plastiki/nylon/nylon-6-tsvet-chernyj (дата звернення 06.04.2023).
32. Пустюльга С.І., Самостян В.Р., Клак Ю.В. Інженерна графіка в SolidWorks : навчальний посібник. Луцьк: Вежа, 2018. 172 с.

References

1. Yuskaiev V.B. Kompozytsiini materialy : navchalnyi posibnyk. Sumy : Vydavnytstvo SumDU, 2006. 199 s.
2. Dzhurka H.F. Polimerni kompozytsiini materialy. Poltava, 2008. 58 s.
3. Kopan V. Kompozytsiini materialy. K. : Vyd-vo «Pulsary», 2004. 200 s.
4. Honcharenko V.V., Kovalenko I.V. Tekhnolohiia kompozytsiinykh materialiv : navchalnyi posibnyk. K. : 2007. 131 s.

5. Suberliak O.V., Bashtanyk P.V. Tekhnolohiia pererobky polimernykh ta kompozytsiinykh materialiv. Lviv : Rastr, 2007. 375 s.
6. Kurta S.A. Napovniuvachi – syntez, vlastyvosti ta vykorystannia : navchalnyi posibnyk. Ivano-Frankivsk : Vyd-vo Prykarpatskoho natsionalnoho universytetu imeni Vasylia Stefanyka, 2012. 302 s.
7. Voloknysti kompozytsiini materialy: vlastyvosti ta zastosuvannia. URL: http://vidpoviday.com/voloknisti-kompozicijni-materiali-vlastivosti-ta-zastosuvannya (data zvernennia 06.04.2023).
8. Liutyi P.V. Osnovni metody vyhotovlennia kompozytsiinykh materialiv na osnovi derevynnykh vidkhodiv i termoplastychnykh polimeriv. Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy, 2009. Vyp. 19.2.
9. Nesterenko T.M., Skachkov V.O., Vodennikova O.S. Teoriia i tekhnolohiia poroshkovoi metalurhii : navchalno-metodychnyi posibnyk. Zaporizhzhia : ZDIA, 2016. 192 s.
10. Savchuk P.P., Kashytskyi V.P., Melnychuk M.D., Sadova O.L. Kompozytni ta poroshkovi materialy : navchalnyi posibnyk. Lutsk : FOP Telitsyn O.V., 2017. 368 s.
11. Zakonomirnosti adytyvnoho formuvannia 3D vyrobiv iz polilaktydu ta kompozytiv na yoho osnovi. URL: http://surl.li/givgk (data zvernennia 06.04.2023).
12. Collins R. 3D printing composites 2020-2030: technology and market analysis current and future technologies, and market forecasts, 2020. URL: https://www.idtechex.com/en/research-report/ (data zvernennia 06.04.2023).
13. PLA Filaments. URL: https://colorfabb.com/filaments/materials/pla-filaments (data zvernennia 06.04.2023).
14. Metal Filled. URL: https: https://www.proto-pasta.com/collections/metal-filled (data zvernennia 06.04.2023).
15. 3D Filaments. URL: https://treedfilaments.com/3d-printing-filaments/ (data zvernennia 06.04.2023) (data zvernennia 06.04.2023).
16. Filaments. URL: https://formfutura.com/c/filaments/page/5 (data zvernennia 06.04.2023).
17. MetalFil – Ancient Bronze. URL: https://formfutura.com/product/metalfil-ancient-bronze/ (data zvernennia 06.04.2023).
18. MetalFil – Classic Copper. URL: https://formfutura.com/product/metalfil-classic-copper/ (data zvernennia 06.04.2023).
19. PA 640 GSL. URL: https://store.eos.info/products/pa-640-gsl (data zvernennia 06.04.2023).
20. PA12 Smooth URL: https://sinterit.com/materials/pa12-smooth/ (data zvernennia 06.04.2023).
21. Carbon X PETG+CF URL: https://www.3dxtech.com/product/carbonx-petg-cf/ (data zvernennia 06.04.2023).
22. Onyx. URL: https://markforged.com/materials/plastics/onyx (data zvernennia 06.04.2023).
23. Adytyvne vyrobnytstvo: tekhnolohiia, materialy ta perevahy 3D-druku. URL: https://3dprint.infomir.eu/uk/aditivne-virobnicztvo (data zvernennia 06.04.2023).
24. Mid poroshok, marka PMS-1. URL: https://ukrsplav.in.ua/uk/product/med-poroshok-marka-pms-1/ (data zvernennia 06.04.2023).
25. Bronzovi poroshky. URL: https://prom.ua/ua/p1010249206-bronzovye-poroshki.html (data zvernennia 06.04.2023).
26. Poroshky metaliv. URL: https://prom.ua/ua/c3207584-metall-kamen.html?product_group=70708945 (data zvernennia 06.04.2023).
27. Standartni materialy. URL: https://monofilament.com.ua/ua/products/standartnye-materialy/ (data zvernennia 06.04.2023).
28. Inzhenerni plastyky. URL: https://monofilament.com.ua/ua/products/ (data zvernennia 06.04.2023).
29. PLA. URL: https://monofilament.com.ua/ua/products/standartnye-materialy/pla/pla-chernyj (data zvernennia 06.04.2023).
30. ABS. URL: https://monofilament.com.ua/ua/products/standartnye-materialy/abs/abs-chernyj (data zvernennia 06.04.2023).
31. Nylon. URL: https://monofilament.com.ua/ua/products/inzhinernye-plastiki/nylon/nylon-6-tsvet-chernyj (data zvernennia 06.04.2023).
32. Pustiulha S.I., Samostian V.R., Klak Yu.V. Inzhenerna hrafika v SolidWorks : navchalnyi posibnyk. Lutsk: Vezha, 2018. 172 s.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-263-267
УДК 621.74.045

SAVYTSKYI YURYI
Khmelnytskyi National University
https://orcid.org/0000-0001-6528-6642
e-mail: yra.savisky@gmail.com

SIMULATION OF THE PROCESS OF FILLING POLYSTYRENE FOAM FOUNDRY MOLD WITH THE METAL

Modern approaches to prefabrication production consist in the maximum approximation of the shape and size of the blanks to the finished part, which essentially makes the final part cheaper. One of the methods of precision casting is casting in gasified models, or foam models. The basis is the task of developing a theoretical model of filling a polystyrene foam model with liquid metal. The analysis of the process of filling the mold with a gasified model and the process of filling the mold with a closed sprue system are considered.

The analysis of the obtained solutions shows that the movement of the metal has the character of aperiodic oscillations. The speed of metal in quantity is maximum at the initial moment of metal processing in the form and happens as it is filled. The pressure of the steam-gas mixture at the initial moment of time exceeds the pressure of the weak metal in the riser, which provides the possibility of metal ejection from the bowl. At the same time, the pressure in the mold cavity changes little with the increase in gas permeability of the mold, which is explained by the small gap between the melting front of the model and the metal mirror. However, with an increase in gas permeability due to a decrease in back pressure, the speed of the metal in the mold cavity and the path traveled by it increase. The analysis of the system of equations allows predicting the behavior of metal during the design of molds for the summer, which reduces the probability of production defects.

Keywords: casting, gasified models, polystyrene, gas, foundry form, castings.

САВИЦЬКИЙ ЮРІЙ
Хмельницький національний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗАПОВНЕННЯ МЕТАЛОМ ПІНОПОЛІСТИРОВОЇ ЛИВАРНОЇ ФОРМИ

Сучасні підходи до заготівельного виробництва полягають в максимальному наближенні форми і розмірів заготовок до готової деталі, що суттєво здешевлює кінцеву деталь. Одним з методів точного лиття є лиття в газифіковані моделі, або пінномоделі. В основу поставлено задачу розробити теоретичну модель заповнення пінополістирольної моделі рідким металом. Розглянуто аналіз процесу заповнення форми з газифікованою моделлю та процес заповнення форми при замкнутій системі литника.

Аналіз отриманих рішень показує, що рух металу має характер аперіодичних коливань. Швидкість металу в формі максимальна в початковий момент подачі металу в форму і убуває по мірі її заповнення. Тиск парогазової суміші в початковий момент часу перевершує напір рідкого металу в стояку, що свідчить про можливість викиду металу з чаші. При цьому тиск в порожнині форми мало змінюється зі збільшенням газопроникності форми, що пояснюється порівняно невеликим зазором між фронтом плавлення моделі і дзеркалом металу. Однак зі збільшенням газопроникності внаслідок зменшення протитиску, збільшується швидкість металу в порожнині форми і пройдений ним шлях. Аналіз системи рівнянь дозволяє прогнозувати поведінку металу при конструюванні форм для лиття, що зменшує вірогідність виробничого браку.

Ключові слова: лиття, газифіковані моделі, полістирол, газ, ливарна форма, відливки.

Formulation of the problem. Modern approaches to pre-fabrication production consist in the maximum approximation of the shape and size of the blanks to the finished part, which substantially lowers the price of the final part. One of the methods of precision casting is casting in gasified models, or foam models.

The technological process of manufacturing castings according to gasified models is the following. In special metal molds, models of parts and sprue systems are manufactured by mechanical processing, using suspended polystyrene in the form of pre-foamed granules or normalized polystyrene blocks and plates. The models are connected by gluing or welding to the elements of the sprue system, after which they are painted once with paint or a suspension of a binding solution and dusty fore-resistant material, which is applied by dipping, brushing or spraying from a paint sprayer in special chambers. The painted layer is dried in the air and in this way a thin-walled, fire-resistant, gas-permeable shell up to 2 mm thick, which is firmly connected to the polystyrene model, is obtained. After that, it is placed in a special pot-container and evenly, carefully so as not to deform the model, it is covered with a granular fire-resistant filler. Quartz, olivine, zircon sand, fireclay, magnesite, electrocorundum are used as fillers. In some cases, during the production of massive castings, ordinary molding mixtures are used, such as sand-clay, sand-cement, etc. After the molds are made, they are filled with liquid metal, while the polystyrene model is gasified under the influence of heat, freeing the cavity of the mold. After the casting is formed, the pot-container is turned over. The molding material is poured, the casting is pulled out and goes to the finishing operations - cutting, processing, cleaning and control.

At the same time, the processes that take place when filling a polystyrene mold with metal, how the speed of filling the mold affects the quality of castings, remain unexplored.

Analysis of the latest research. Such scientists as Movchan V.P., Berezhny M.M., Repiakh S.Y. were engaged in the development of the technology of casting on gasified models. Analyzing the stages of development of the casting process on gasified models, it can be noted that this process develops in two independent directions.

The first direction is related to the production of large, massive castings in the conditions of experimental and small-scale production according to models obtained by mechanical processing of polystyrene plates and blocks and, if necessary, gluing.

The second direction is related to the production of complex castings weighing up to 15 kg with increased dimensional accuracy in conditions of large-scale and mass production according to models obtained from suspension polystyrene that has undergone special heat treatment (pre-foaming) and is finally foamed in molds until complete design configurations of casting models.

Currently, both directions of gasification models are successfully developed in casting, which contributes to the technical progress of various branches of mechanical engineering [1].

There is a well-known work in which it is proposed to improve the quality and durability of castings made of cast iron with the use of special paints [2]. The disadvantage of this method is that the use of tellurium paints without precautionary measures can be accompanied by significant mechanical sticking of the molding mixtures before pouring in the places where molds and rods are painted. To eliminate sticking, it is necessary to use non-stick paint, which is previously applied to the places of the mold that are to be covered with tellurium paint. There is a difficulty in regulating the concentration of tellurium depending on specific technological features, since at a high temperature of pouring and a large number of carbide-forming elements in the chemical composition of cast iron, the content of tellurium in the paint must be reduced, and vice versa, at a low temperature of pouring the metal into the mold and with a small amount of carbide-forming agents, the amount of tellurium in the paint should be increased.

There is also a known method of improving the gas permeability, knock-out, and malleability of molds, according to which chopped polystyrene foam waste is introduced into the mold [3].

The disadvantage of this method is that when drying the molds or when pouring raw molds, the polystyrene bestrides with the formation of a significant number of gases that are released into the atmosphere of the foundry. When more than 25% of polystyrene foam is added to the mixture, the compactibility of the mixture decreases, the surface cleanliness of the molds and rods deteriorates.

The production of gasified models for cast blanks of cutting tools is also known. At the same time, only the element of the model, which forms the cutting part of the cast blank, is made of alloyed polystyrene foam [3].

The disadvantage of this method is the technological complexity of manufacturing a model with different parts due to the need for a container in the mold that cannot be pulled out and separates the volume of the working cavity that forms the alloyed element of the model from the other part of the model made of non-alloyed foamed polystyrene.

There is a well-known method of manufacturing polystyrene models, which includes feeding foamed polystyrene granules into the cavity of the mold simultaneously with alloying or modifying impurities and the final sintering of polystyrene granules together with the impurities [4].

However, in the process of blowing granules and impurities, the amount of rarefaction, which acts on impurities from the side of the polystyrene flow, changes. At the beginning of the blowing operation, the amount of rarefaction is maximum due to the smallest resistance created by the walls of the mold to the flow of air with granules and impurities. Gradually, the volume of the mold fills up, the resistance increases, and the rarefaction gradually decreases. As a result, impurities are placed unevenly in the volume of the mold.

One of the best methods of manufacturing models from polystyrene is the method in which alloying or modifying impurities are applied to granules of foamed polystyrene before sintering them in a mold [5]. The disadvantage of this method is the use of quite expensive binding material.

Therefore, it is quite difficult to predict the movement of metal in polystyrene foam, which can lead to a significant number of shortages of finished products. Therefore, it is advisable to know the basic laws of the behavior of the metal and gas mixture with this method of obtaining blanks.

Presenting main material. The basis is the task of creating a theoretical model that describes the movement of metal and gas transformation of polystyrene in the form of. We will consider the theoretical analysis of the process of filling the mold with a gasified model as the process of filling the mold (Fig. 1) with a closed sprue system [5].

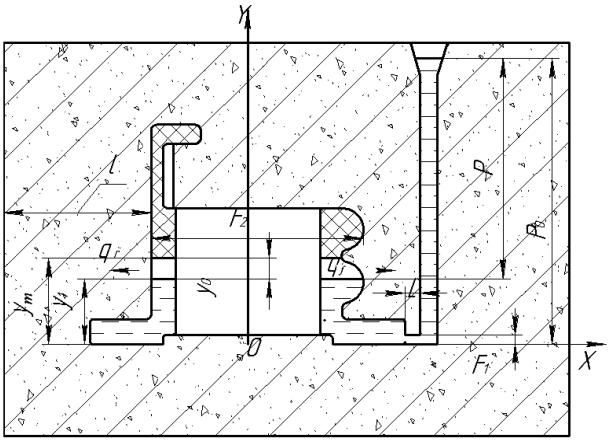


Fig. 1. **Form filling process**

I. To analyze the given task, we will accept the following notations:

τ – time, s; P_o – initial pressure of the metal in the riser, kg/m^2; P_g – pressure of the vapor-gas mixture of decomposition products of the model in the mold cavity, kg/m^2; P_{fr} – pressure losses due to metal friction in the channels of the sprue system, kg/m^2; P_{atm} – atmospheric pressure, kg/m^2; P_{atm} = 1000 kg/m^2; y_o – the gap between the melting front of the model and the metal mirror, m; y_1 – coordinate of the position of the metal level in the form, m; y_m – coordinate of the melting front of the model, m; l – thickness of the mold wall, m; L – feeder length, m; d_{F1} – hydraulic radius of the feeder, m; P – the perimeter of the cross section of the casting in the direction perpendicular to the movement of the metal, m; d_F – hydraulic radius of the mold cavity, m; F_1 – cross-sectional area of the feeder, m^2; F_2 – cross-sectional area of the casting in the direction perpendicular to the movement of the metal, m^2; F_r – riser cross-sectional area, m^2; γ_{met} – specific gravity of liquid metal, N/m^3; ρ_{met} – mass density of liquid metal, N^2/m^4; γ_{mod} – specific weight of the material of the model, N/m^3; γ'' – specific gravity of the steam-gas mixture, N/m^3; m_1 – mass of metal in the sprue system, N^2/m; m_2 – mass of metal in the mold, N^2/m; m_{com} – combined mass of moving material, N^2/m; m_{sp} – mass of metal in to the feeder, N^2/m; G_{sg} – mass of steam-gas mixture in the volume of the mold cavity, kg; T – temperature of the steam-gas mixture in the mold cavity, K; R – gas constant of the steam-gas mixture; v_{met} – speed of metal in the mold cavity, m/s; v_1 – speed of metal in the feeder, m/s; v_{mod} – melting speed of the model, m/s; m_g – specific rate of evaporation and gasification of the liquid phase of the decomposition products of the model, 1/s; K_g – gas permeability of the molding mixture, m^4/N; q_0 – metal consumption through the hole in the sprue bowl, kg/s; q_g – rate of formation of the vapor-gas mixture in the mold cavity, kg/s; q_f – rate of removal of the vapor-gas mixture from the mold cavity, kg/s; λ – metal friction resistance coefficient against the walls of the channels of the sprue of the system; g – acceleration of gravity, m/s^2.

II. Basic conditions and assumptions.

1. P_o – const; at $t = 0$; Pн = Po.

2. The flow of the vapor-gas mixture from the cavity of the mold is assumed [6] to be unidirectional (along the X coordinate), obeying the law of constant filtration. Then the flow rate of the vapor-gas mixture from the mold cavity through the gap will be:

$$q_{ф} = \frac{1{,}36\, y_0 \cdot K_г \left(P_0^2 - P_{атм}^2 \right) \cdot \gamma''}{P_{атм} \cdot \lg \frac{l}{d_{ф}}}. \tag{1}$$

3. The process of expansion of the steam-gas mixture in the mold cavity is diabatic.

III. We obtain the following ratios: $P_н = P_0 - \gamma_{мет} \cdot y_1 - P_{тр} - P_r$ (2)

The rate of formation of a steam-gas mixture in the mold cavity, kg/s:

$$q_r = \frac{v_{мет} F_2 \gamma_{мод} m_г \tau}{(1 + m_г \tau)}; \tag{3}$$

Pressure losses due to metal friction in the channels of the sprue system, kg/m^2:

$$P_{тр} = \lambda \frac{L}{dF_1} \frac{\rho_{мет}}{2} y_2^2; \tag{4}$$

$$y_2 = \frac{F_{ст}}{F_2} v_1; \tag{5}$$

Mass of metal in the sprue system, H^2/m:

$$m_1 = F_{ст} \cdot \rho_{мет} \tag{6}$$

The combined mass of moving metal, H^2/m:

$$m_{пр} = m_1 \cdot \left(\frac{F_2}{F_{сп}} \right)^2 + F_2 \rho_{мет} y_1; \tag{7}$$

Coordinate of the melting front of the model, m;

$$y_{пл} = \int_0^t v_{пл}\, d\tau . \tag{8}$$

IV. Basic equations for the case of a closed spring system: equation of motion of metal:

$$m_{пр} \frac{d^2 y_1}{d\tau^2} = \left(P_0 - \gamma_{мет}\, y_1 - Pmm - P_г\right) F_2 ; \tag{9}$$

- equation of gas balance: $$dG_{пг} = \left(q_г - q_ф\right) d\tau ; \tag{10}$$

- equation of adiabat: $$P_г \cdot V_г^k = G_{пг} \cdot RT ; \tag{11}$$

Adiabatic degree index:: $$K = \frac{C''_P}{C''_V}; \tag{12}$$

Model melting equation:

$$d_{y0} = V_{пл} \cdot d\tau - dy_1 \tag{13}$$

V. Transformation of basic equations.

We introduce additional notations:

$$\dot{y}_1 = y_2 ; P_г = \left(y_3 - 1000\right); \tag{14}$$

where 1000 is atmospheric pressure, kg/m^2.

A system of equations that describe the movement of metal in the form:

$$\dot{y}_0 = \left[\frac{\left(-\frac{\alpha_0 \Delta t}{r\gamma_{мод}(1+N)} \left(1 - \frac{y_0}{\delta_0}\right) + \frac{\lambda_{пг} \Delta t}{r\gamma_{мод}(1+N) y_0} \right)}{\left(1 + \frac{\alpha_0 \Delta t}{r\gamma_{мод}(1+N)} \cdot \frac{\gamma_{мод}}{\gamma'\psi} \cdot \frac{\tau\left(1 - \frac{y_0}{\delta_0}\right)}{(1 + m_r \tau)} \right)} \right] - y_2 ;$$

$$\dot{y}_2 = \left(P_0 F_2 - \gamma_{мет} F_2 y_1 - \lambda \frac{L}{dF_1} \frac{\rho_{мет}}{2} \frac{F_2^3}{F_1^2} y_2^2 - F_2 P_г ; \right) / \left(m_1 \left(\frac{F_2}{F_{ст}}\right)^2 + F_2 \rho_{мет}\, y_1 \right) \tag{15}$$

$$\dot{y}_3 = RT \left(\frac{\gamma_{мод}\, m_г \tau \left(\dot{y}_0 + y_2\right)}{y_0 (1 + m_г \tau)} - \frac{1{,}36\, y_0 K_г \left(P_0^2 - P_{атм}^2\right) \gamma''}{P_{атм} \lg \frac{l}{d_ф}} \right) - \frac{y_3 \dot{y}_0}{y_0} .$$

Solving the derived systems of equations (15) of the form filling process was carried out with the help of the MATHCAD software. The results are presented in Fig. 2.

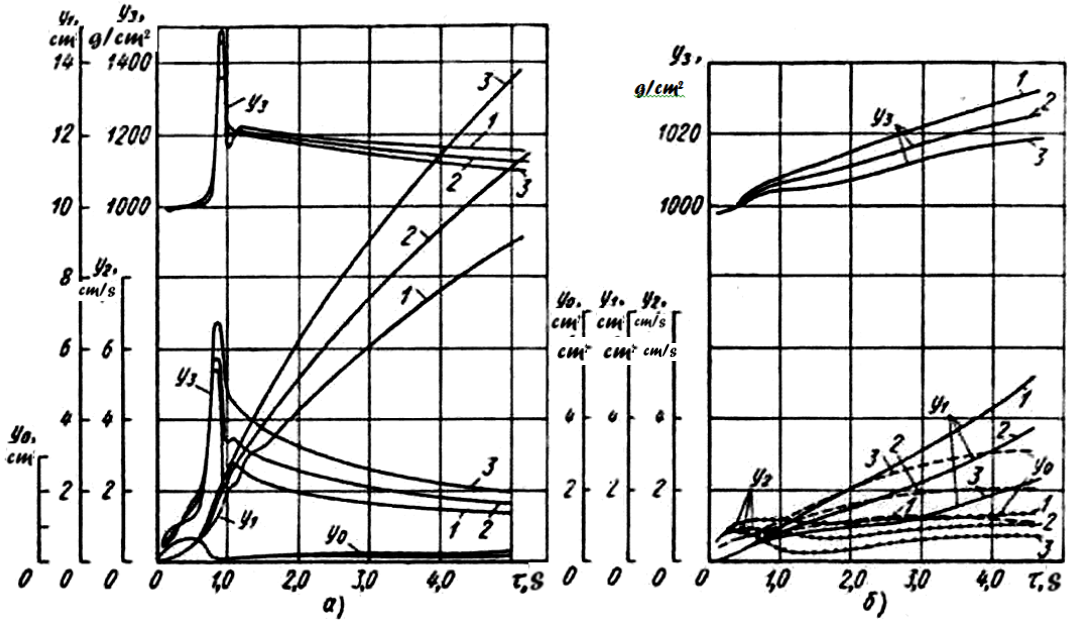


Fig. 2. a) depending on the gas permeability of the form (1-120; 2-240; 3-460 units);
b) depending on the mass rate of pouring (1-740; 2-560; 3-375 g/s)

The analysis of the obtained solutions (Fig. 2, a, b) shows that the movement of the metal has the character of aperiodic oscillations. The speed of the metal in the mold is maximum at the initial moment when the metal enters the mold and decreases as it fills. The pressure of the steam-gas mixture at the initial moment of time exceeds the pressure of the liquid metal in the riser, which indicates the possibility of metal ejection from the bowl. At the same time, the pressure in the mold cavity changes little with an increase in gas permeability of the mold, which is explained by the relatively small gap between the melting front of the model and the metal mirror. However, with an increase in gas permeability due to a decrease in back pressure, the speed of the metal in the mold cavity and the path traveled by it increase.

Conclusions and prospects for the development of the direction

The mathematical model of the process of filling a mold with a gasified model with metal described in this work allows us to draw the following conclusion: when filling a mold with a gasified model through closed spring systems, conditions are created for the occurrence of oscillatory movement of the metal and pressure pulsations in the mold cavity. All this can lead to the ejection of metal from the bowl at the initial moments of filling and a defect in the castings. The occurrence of metal fluctuations in the mold is associated with the transient processes of filling the mold and the spring system. Taking into account these factors, it is possible to design models for casting with a lower percentage of defective products.

References

1. Movchan V.P., Berezhny M.M. (2001). Basics of metallurgy. Dnipropetrovsk: Porogy, 336 p.
2. Repiakh S.Y. (2006). Tekhnolohycheskye osnovy lyttia po vyplavliaemym modeliam. Dnepropetrovsk. Lyra. 1056 p.
3. Marchenko V., Gaponova O.P., Govorun T.P., Kharchenko N.A. (2016). Technology of structural materials: education manual. Sumy: Sumy State University, 146 p.
4. Doroshenko V.S., Berdiev K.H. (2016). Gas dynamic balance in a sand mold when casting on gasified models. Casting of Ukraine. № 4. p. 20–24.
5. Savytskyi Y.V., Tkachuk V.P. (2017). Mathematical model of casting based on the fired gasified model. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. No. 1. p. 34–40.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-268-275
УДК 004.81

САМЧУК ЛЮДМИЛА
Луцький національний технічний університет, Україна
https://orcid.org/0000-0003-2516-045X
Samchuk204@gmail.com
ПОВСТЯНА ЮЛІЯ
Луцький національний технічний університет, Україна
https://orcid.org/0000-0001-5426-4157
yuliapovstyana@ukr.net
ЛІЩИНА НАТАЛІЯ
Луцький національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0002-5200-536X
lischyna@gmail.com
КЛІМЕНКО АРТЕМ
Луцький національний технічний університет
artemklimenko427@gmail.com

ВИКОРИСТАННЯ UML ДІАГРАМ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ НА ВИРОБНИЦТВІ

У статті використано уніфіковану мову моделювання UML для візуалізації елементів виробництва. Дана робота містить UML діаграми та таблиці опису, що дають змогу структурувати діяльність технологічного процесу на виробництві. Показаний технологічний процес виготовлення продукції, який детально представлений на діаграмі станів.

Ключові слова: *UML-діаграми, виробнича система, об'єктно-орієнтоване програмування, технічне обладнання, процес.*

SAMCHUK LUDMILA, POVSTIANA YULIA, LISHCHYNA NATALIIA, KLYMENKO ARTEM
Lutsk National Technical University

USING UML DIAGRAMS FOR THE TECHNOLOGICAL PROCESS IN PRODUCTION

The article uses the unified UML modeling language to visualize production elements. To show some of the advantages of the proposed approach, the main components of the production system are defined: technological machines, operators, materials, products and the production process. A class diagram is used to represent the components. Defined attributes and methods of each class: attributes and methods to each class that define its properties and behavior. The Machine class can have attributes such as machine ID and Destination, and methods such as start() and stop(). Relationships between classes are established: association, aggregation, and composition to represent relationships between classes. The Production Process class can have an aggregation relationship with the Machine class, indicating that the production process consists of multiple machines. This work contains UML diagrams and description tables that make it possible to structure the activity of the technological process in production. The technological process of manufacturing products is shown, which is presented in detail on the state diagram.

Keywords: UML diagrams, production system, object-oriented programming, technical equipment, process.

Постановка проблеми

Для того щоб створити діаграму UML для виробництва, потрібно визначити ключові компоненти системи та зв'язки між ними. Наприклад, як можна створити базову діаграму UML для виробничої системи [1]:

1. Визначаємо основні компоненти виробничої системи: це може включати машини, операторів, матеріали, продукти та виробничий процес.
2. Використаємо діаграму класів для представлення компонентів: створимо діаграму класів і додамо класи для кожного компонента системи. В даному випадку будуть такі класи: Machine, Operator, Material, Product і ProductionProcess.
3. Визначимо атрибути та методи кожного класу: атрибути та методи до кожного класу, які визначають його властивості та поведінку. Клас Machine може мати такі атрибути, як machineID і Destination, а також такі методи, як start() і stop().
4. Визначимо зв'язки між класами: асоціацію, агрегацію та композицію для представлення зв'язків між класами. Клас ProductionProcess може мати зв'язок агрегації з класом Machine, вказуючи, що виробничий процес складається з кількох машин.
5. Використаємо діаграму послідовності, щоб показати взаємодію між компонентами: діаграма послідовності, щоб показати взаємодію між компонентами під час виробничого процесу. Оператор запускає машину, завантажує матеріали та запускає виробничий процес [2].
6. Використаємо діаграму станів, щоб показати поведінку компонентів: діаграма станів, щоб показати поведінку компонентів під час виробничого процесу. Наприклад, різні стани, в яких може перебувати технологічна машина, як-от бездіяльність, робота або зупинка [3, 4].

Загалом, ключем до створення виробничої діаграми UML є визначення ключових компонентів та їхніх зв'язків, а також використання відповідних діаграм UML для представлення поведінки та взаємодії системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Автором роботи [5] показано, що інтеграція нового керування виробничими системами в існуючу виробничу систему вимагає звернення до методу, який забезпечує моделювання взаємодії між апаратними та програмними компонентами, моделювання їх поведінки та їх використання виробничим персоналом. Запропоновано використовувати уніфіковану мову моделювання UML для візуалізації елементів виробництва.

Автором роботи [6] представлено використання підходу UML для специфікацій системи PDM (управління даними про продукт)впровадження, має мету в тому, щоб підкреслити додаткову цінність використання об'єктно-орієнтованого підходу для моделювання, специфікації та впровадження системи PDM на бізнес-кейсі. Обраний об'єктно-орієнтований підхід та використані діаграми UML для моделювання та інтеграції даних про продукт, процес і ресурси.

Мета роботи є використання UML діаграм для створення структури підприємства, саму діяльність та компонентів функціонування системи.

Викладення основного матеріалу

Виробництво – це процес виготовлення товарів за допомогою машин, інструментів і праці. Він передбачає перетворення сировини на готову продукцію, яку потім можна продавати споживачам або використовувати в інших галузях. Виробничий процес зазвичай включає декілька етапів, включаючи проектування, вибір матеріалу, виготовлення, складання, випробування та контроль якості. Точний процес може відрізнятися залежно від типу продукту, що виготовляється, а також матеріалів та інструментів, що використовуються.

Щоб почати виробничий процес, компанія, як правило, спочатку створює дизайн продукту. Це може включати роботу з інженерами, дизайнерами та іншими експертами для розробки креслення або прототипу. Після завершення дизайну компанія вибере матеріали, необхідні для створення продукту, наприклад метали, пластмаси чи іншу сировину. Наступним кроком є виготовлення, яке передбачає формування та формування сировини у потрібну форму та розмір. Це може включати різання, зварювання, згинання або інші методи, залежно від використовуваних матеріалів і продукту, який виготовляється. Після виготовлення виріб, як правило, проходить процес складання, під час якого різні частини та компоненти збираються разом, щоб створити кінцевий продукт. Це може передбачати використання спеціалізованих інструментів і обладнання, наприклад, роботів або автоматизованих складальних ліній.

Як виріб буде зібрано, його перевірять, щоб переконатися, що він відповідає необхідним стандартам якості. Це може включати тестування на довговічність, функціональність, безпеку та інші фактори. Готовий продукт буде упакований і відправлений клієнтам або дистриб'юторам для продажу. Протягом усього виробничого процесу компанії, як правило, застосовують заходи контролю якості, щоб гарантувати, що продукція відповідає їхнім стандартам і є безпечною для споживачів (рисунок 1).

Параметр	Значення
Клас Operator	
Коментар	Оператор, особа яка керую машиною та технологічним процесом.
Атрибути	ID: String – Ідентифікатор особи; Position: String – посада.
Операції	startMachine() – запускає машину; stopMachine() – зупиняє роботу машини; repairMachine() – відновлює роботу машини, в разі поломки.
Клас Machine	
Коментар	Машина, технічне обладнання, що виконує задані операції.
Атрибути	ID: String – ідентифікатор обладнання; DestinationOperation – призначення операцій.
Операції	startOperation() – почати операцію; stopOperation() – зупини операцію; checkValidity() – перевірити відповідність.
Клас Material	
Коментар	Матеріал, сировина для виготовлення продукції.
Атрибути	Type: String – тип сировини; ID: String – ідентифікатор; Supplier: String – постачальник; Quantity: Real – кількість; Unit price: Real – ціна за одиницю; Mass: Real – маса; Density: Real – щільність.
Операції	
Клас ProductionProcess	
Коментар	Процес виробництва, виготовлення кінцевої продукції.
Атрибути	ProcessState: String – стан процесу; OverallInfo: String – загальна інформація.
Операції	stateSuccess() – визнати процес успішним; stateFailure() – визнати процес провальним.
Клас Product	
Коментар	Продукт, готовий виріб.
Атрибути	Description: String – опис товару; Price: Integer – ціна; Quantity: Real – кількість.
Операції	

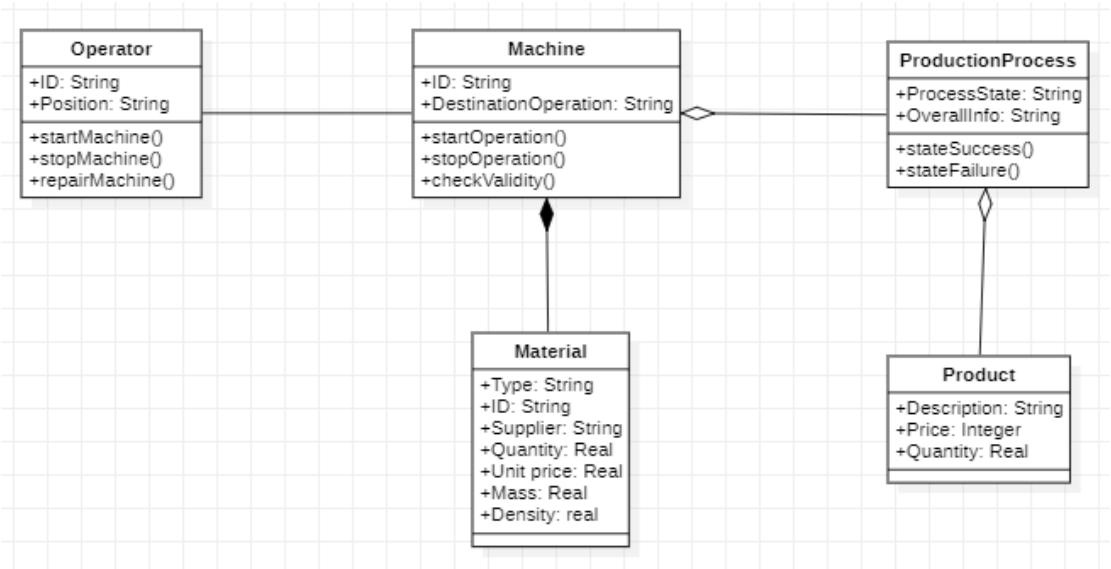


Рис. 1. Діаграма класів, робота виробництва

Оператор, головна особа яка керує технологічною машиною на підприємстві, вмикає або вимикає чи перевіряє справність. Технологічна машина виконує певну операцію яка запрограмована, переробляє сировину в готовий продукт. А сам продукт, повністю в готовий виріб (рисунок 2).

Параметр	**Значення**
Software part	
Коментар	Програмна частина даної машини.
Атрибути	Software version – версія програмного забезпечення.
Операції	Associate – асоціювати команди програми; Version with same part number – версія з таким же номером частини; Version with different part number – версія з різним номером частини; Promote – розповсюдити; Demote – понизити; Open – відкрити.
Performer	
Коментар	Робітник, який керує машиною.
Атрибути	Name – ім'я працівника; Data group – група даних про працівника; Organization – організація; Process group – розподілення працівника на певний виробничий процес.
Операції	Query in VPM – запит у приватну мережу; Realize an action – виконати дію; Import – імпортувати; Export – експортувати.
Activity	
Коментар	Діяльність, абстрактна частина виробництва
Атрибути	Name – назва діяльності; Creator – автор виробу; Relevant data: List – відповідні дані про виробництво; Generic software name – генерувати дані про програмне забезпечення; Duration – дані про тривалість.
Операції	Instantiate – ініціювати зібрані дані.
Action	
Коментар	Дія, описує основне, що відбувається на виробництві.
Атрибути	Name – назва операції; Creator – інформація про виробника; Input relevant data: List – імпортувати відповідні дані; Output relevant data: List – вивести відповідні дані; Software name and version – назва та версія програмного забезпечення; Status – статус операцій; Start date – інформація про початок операції; End date – інформація про кінець операції.
Операції	Promote – поширити операцію; Demote – виконати зворотну дію операції; Add output data – додати вихідні дані.
Process	
Коментар	Процес, містить інформацію про діяльність.
Атрибути	Name – ім'я процесу; Comment – коментар; Iteration – повторення процесу; Owner – власник процесу; Creator – виконавець процесу.
Операції	Instantiate – ініціювати зібрані дані.

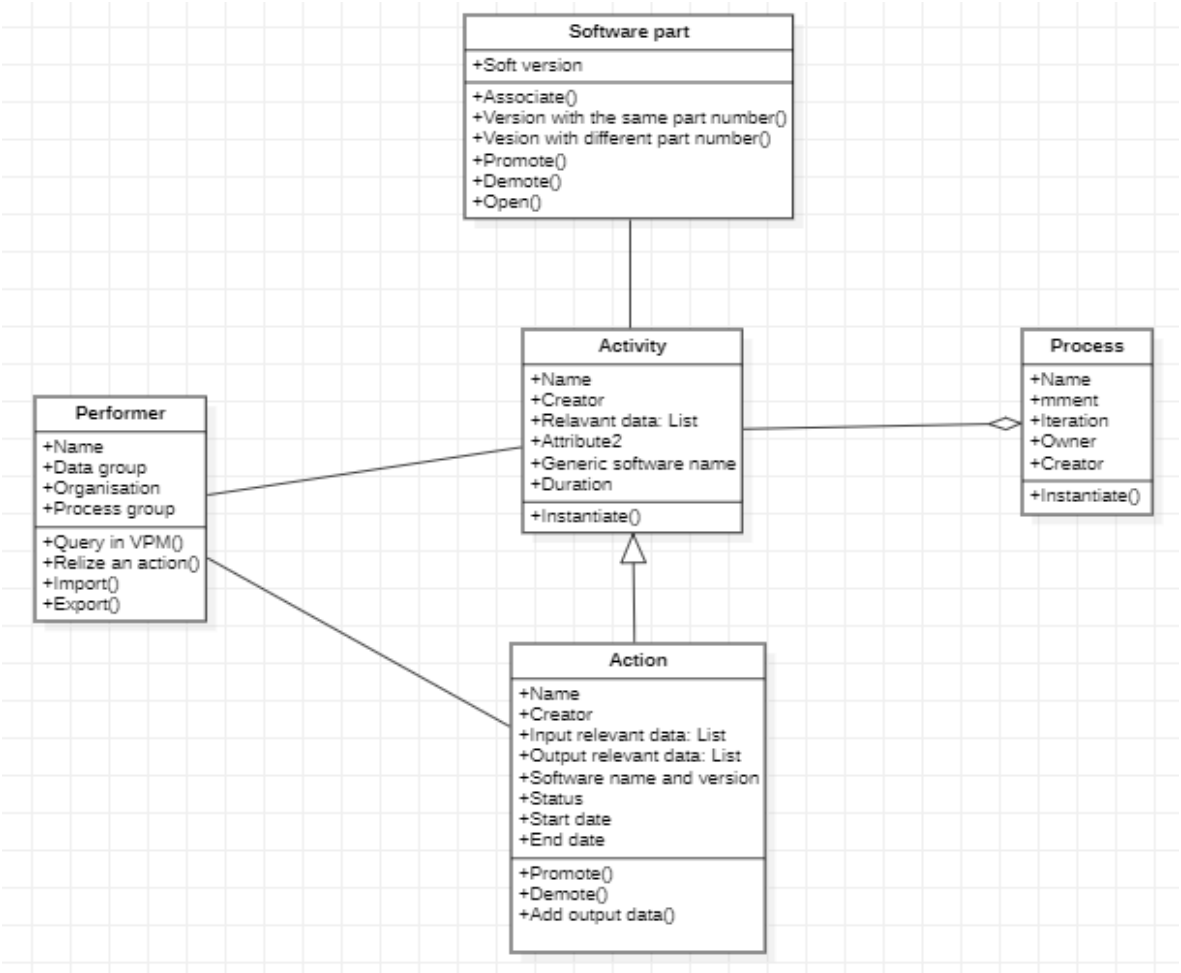


Рис. 2. Принцип роботи виробничої машини

Діаграма станів чітко відображено роботу технологічної машини і проблеми які можуть трапитись під час процесу. Машина здійснює процес, потім робітник вибирає потрібну операцію, далі відбувається перевірка дійсності операції, наприклад, якщо виникне проблема з неправильною роботою машини тоді виріб не буде якісним, після всього машина чекає на сировину, робітник завантажує машину сировиною, якщо машина перенавантажена, тоді відбувається перезавантаження всієї системи. Потрібна кількість сировини обробляється в потрібний продукт за заданою технологією, звичайно ж тестування, неналежної якості товар або переробляється або викидається, якщо все відповідає нормам, тоді відбувається пакування і доставка готової продукції (рисунок 3).

Starting machine	Початок роботи машини
Expecting state	Режим очікування
Init process	Ініціювати процес, запустити машину
Run the operation	Запустити операцію
Production	Процес виготовлення
Checking validity	Перевірити відповідність
Finding hardware issues	Пошук помилок в устаткуванні
Replace damaged element	Заміна пошкодженого елементу
Testing	Тестування роботи машини
Repairing and testing script	Налаштування і тестування скрипта
Waiting for materials	Очікування на сировину
Load with materials	Завантаження машини сировиною
Reboot system	Перезавантаження системи
Processing	Обробка
Produce according to documentation	Виготовлення щодо технології
Testing product	Тестування продукту
Remake or discard	Переробити або викинути не ліквідний виріб
Packaging	Пакування
Deliver	Доставка виготовленої продукції

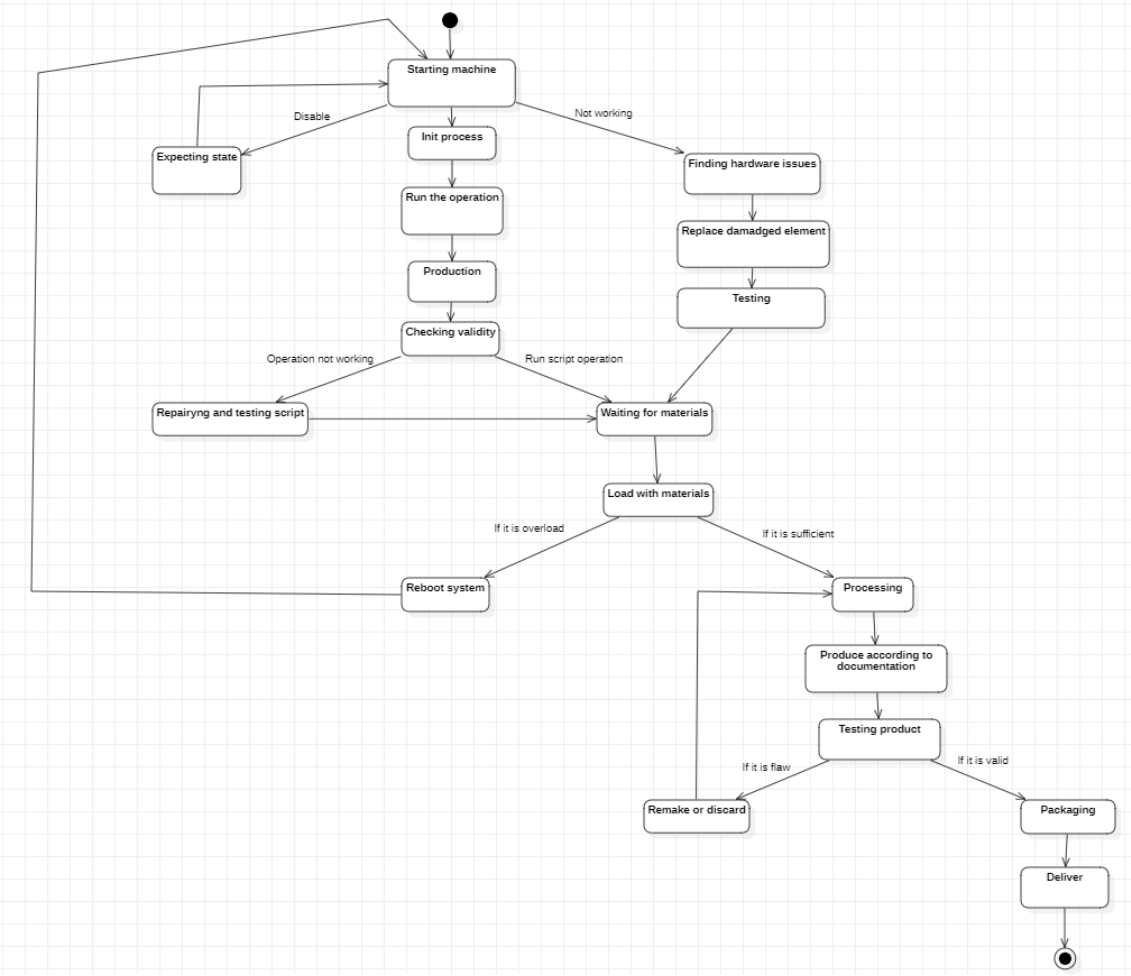


Рис. 3. Діаграма станів, робота технологічної машини

Діаграма послідовності показує взаємодію між компонентами, їхню роботу разом. Оператор запускає машину, отримує сировину для переробки, далі завантажує її в машину, машина в свою чергу робить певні операції, перевіряє чи сировини достатньо для переробки, якщо все гаразд починає свою роботу, вже після виконання операції отримаємо готовий виріб (рисунок 4).

Номер повідомлення	Об’єкт-відправник повідомлення	Об’єкт-одержувач повідомлення	Назва
1	Operator	Machine	Запустити операцію
2	Material	Operator	Отримати сировину
3	Operator	Machine	Завантажити машину сировиною
4	Machine	Material	Перевірити відповідність
5	Machine	ProductProcess	Обробити сировину
6	ProductProcess	Product	Готовий продукт

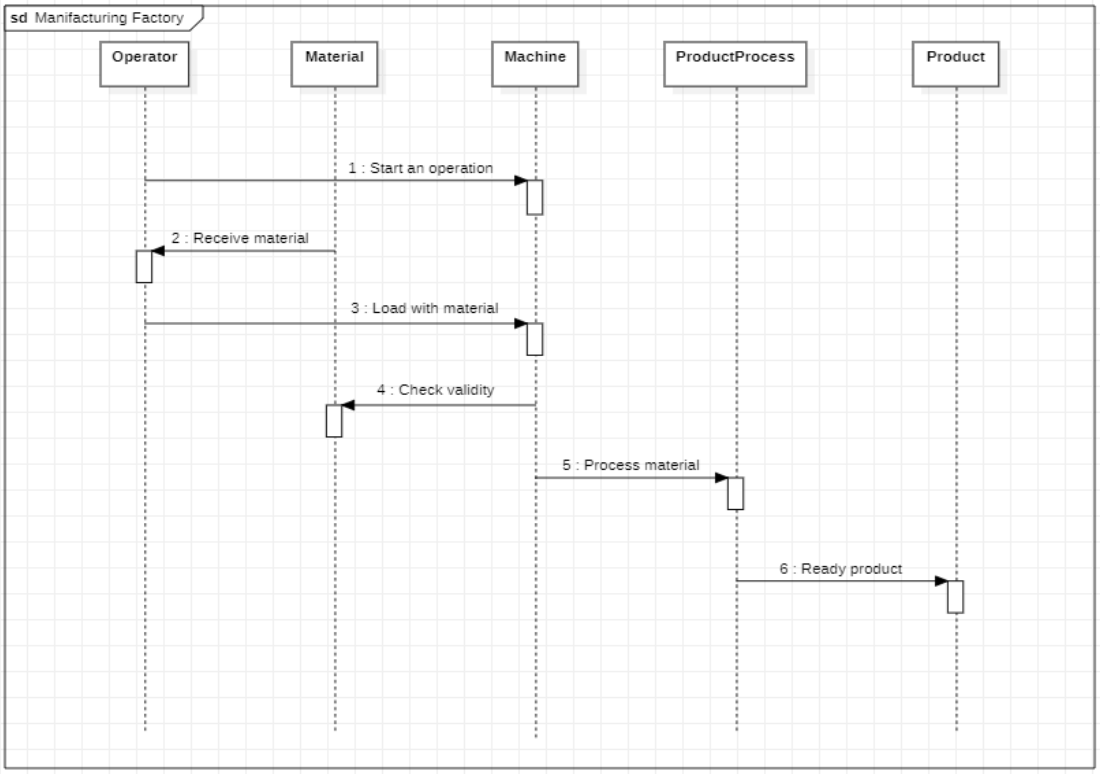


Рис. 4. Діаграма послідовності, взаємодія між компонентами

На рисунку 5 показано діаграму коли технологічна машина зупинена, як здійснюється процес та перевіряється на справність.

Stopped	Машина зупинена
Initprocess	Ініціювати процес, перевірити чи все справне
Idle	Режим очікування
Startproduction	Почати виробництво
Production	Процес виготовлення
Stop the production	Зупинити виробництво
Breakasked	Запит на перерву
Break	Перерва
Emergencystopped	Зупинка при надзвичайній ситуації

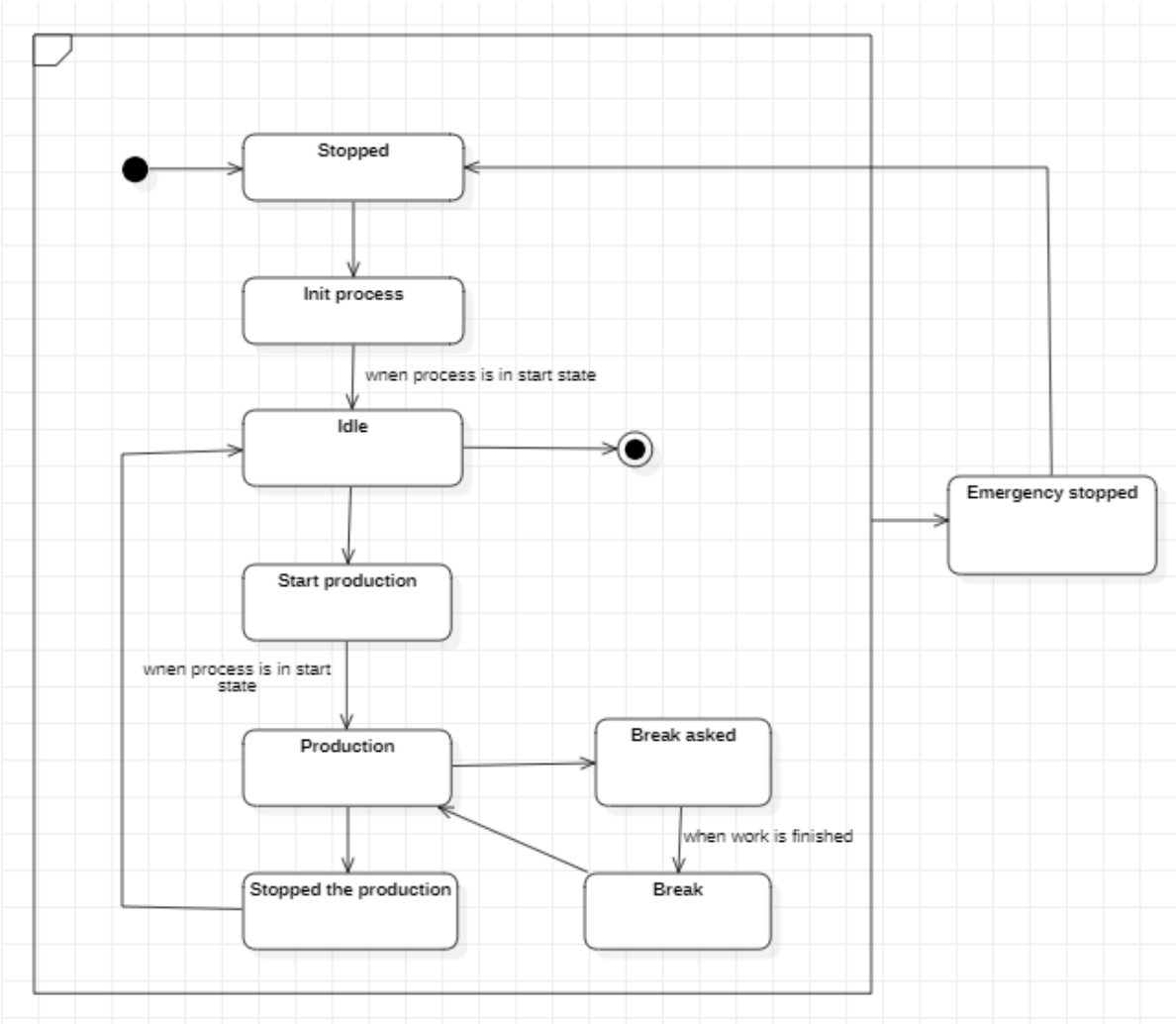


Рис. 5. Принцип процесу технологічної машини з зупинкою

Висновок

Щоб зрозуміти сучасні технології моделювання виробництва, проводиться огляд наукових статей. Існуючі методи моделювання мають обмеження для забезпечення виконання виробничого процесу. З використанням уніфікованої мови UML, було представлено декілька варіантів діаграм, які детально описують процес виробництва, опис всіх компонентів та проблеми які можуть трапитись під час виробничого процесу. Також було представлено взаємодію елементів системи та роботу між ними. Наприклад, діаграма послідовності показує взаємодію між компонентами, їхню роботу разом. Діаграма станів чітко відображено роботу машини і проблеми, які можуть трапитись під час здійснення процесу.

Література

1. Fang M. Process Modeling and Execution in Non-Enterprise System Integration, Master Thesis Software Engineering, Thesis no: MSE2012:107, 05 2012.
2. Witsch M., Vogel-Heuser B. Modeling of Manufacturing Execution Systems: an Interdisciplinary Challenge, 15th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2010.
3. Приклади UML діаграм. URL: https://www.uml-diagrams.org/index-examples.html.
4. UML для бізнес-моделювання: для чого потрібні діаграми процесів. URL: https://evergreens.com.ua/ua/articles/uml-diagrams.html.
5. Pietrac L., Levevé A., Henry S. On the use SysML for Manifacturing Execution System design. 2013. URL: https://hal.science/hal-00767991/document.
6. Eynard B., Gallet T., Nowak P., Roucoulesa L. UML Based Specifications of PDM Product Structure and Workflow. 2019. URL: https://core.ac.uk/download/pdf/231948316.pdf.

References

1. Fang M. Process Modeling and Execution in Non-Enterprise System Integration, Master Thesis Software Engineering, Thesis no: MSE2012:107, 05 2012.
2. Witsch M., Vogel-Heuser B. Modeling of Manufacturing Execution Systems: an Interdisciplinary Challenge, 15th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2010.
3. Pryklady UML diahram. URL: https://www.uml-diagrams.org/index-examples.html.

4. UML dlia biznes-modeliuvannia: dlia choho potribni diahramy protsesiv. URL: https://evergreens.com.ua/ua/articles/uml-diagrams.html.

5. Pietrac L., Levevé A., Henry S. On the use SysML for Manifacturing Execution System design. 2013. URL: https://hal.science/hal-00767991/document.

6. Eynard B., Gallet T., Nowak P., Roucoulesa L. UML Based Specifications of PDM Product Structure and Workflow. 2019. URL: https://core.ac.uk/download/pdf/231948316.pdf.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-276-283
УДК 687.016:687:658.512

СЛАВІНСЬКА АЛЛА
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0003-0663-9422
e-mail: tksv@khnu.km.ua
СИРОТЕНКО ОКСАНА
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0002-6816-6467
e-mail: syrotenko@email.ua
МИЦА ВІКТОРІЯ
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0002-5453-9787
e-mail: mitsa_vv@ukr.net
ДОМБРОВСЬКА ОКСАНА
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0001-6086-5784
e-mail: p_dombrovska@ukr.net

КЛАСТЕРНИЙ АНАЛІЗ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ГРАДАЦІЇ КОНТРОЛЬНИХ ВИМІРІВ ОДЯГУ ДЛЯ ЖІНОК ВЕЛИКИХ РОЗМІРІВ

Виконані дослідження з гармонізації параметричної градації контрольних вимірів одягу для жінок великих розмірів дозволили теоретично обґрунтувати номенклатуру основних і додаткових контрольних вимірів з дотриманням нормативних величин переміщень в шкалі розмірів 54-60. Формування базису контрольних вимірів підтверджено аналітичним методом порівняння пар за схемою «фігура-конструкція-виріб».

Ключові слова: контрольні виміри, величини переміщень, великі розміри, нормування відхилень, гармонізація.

SLAVINSKA ALLA, SYROTENKO OKSANA, MYTSA VICTORIIA, DOMBROVSKA OKSANA
Khmelnytskyi National University

CLUSTER ANALYSIS OF PARAMETRIC GRADATION OF CONTROL MEASUREMENTS OF CLOTHING FOR WOMEN OF LARGE SIZES

The preservation of the functional properties of the sewing product is regulated by technical regulatory documentation. The insufficient filling of the market with an assortment of clothes for women of large sizes is explained by the complexity of the geometry of the body surface, which is regulated by different approaches to the classification of sizes in the current anthropometric standards.

The study of the dimensional variability of the range of large-sized figures in clusters of the main and additional dimensions of outerwear was carried out taking into account the synchronization of complete groups. Harmonization of the typology was carried out by cross-comparing the limitations of the size scale taking into account the type of figure M in the table of dimensions of the technical documentation. Body prototype M, height 168 cm, chest girth 110, 116 cm was chosen based on the frequency of occurrence in 10 models of women's dresses. Graphical interpretation of absolute deviations characterizes the synchronicity of preservation of anthropometric commensurability at all levels of application of regulatory documentation.

Numerical series of displacement values of 9 control measurements were formed for standardizing the basis of deviations for 4 regulatory documents based on the principle of combining in pairs. Confirmed synchronicity of preservation of anthropometric proportionality at all levels of application of regulatory documentation: figure-structure-product.

Keywords: control measurements, movement values, large sizes, normalization of deviations, harmonization.

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

Міжнародне партнерство виробників швейної продукції ґрунтується на збереженні властивостей функціональності готового виробу, які регламентує робоча технічна документація. Аналіз ринку України свідчить про недостатнє наповнення асортиментом швейної продукції для жінок великих розмірів.

Суттєву роль в технічній документації відіграє табель вимірів, в якому персоніфікована антропометрична співрозмірність забезпечена параметричною градацією в регламентованій шкалі розмірів.

Теоретичне обґрунтування діапазону великих розмірів для сучасних жінок підпорядковане рівню застосування систем типових фігур в розмірній типології країн виробників одягу. Складність геометрії поверхні жіночого тіла, розмаїття форм одягу, завдання формалізації антропометричної інформації для застосування в сучасних САПР одягу свідчить про актуальність проведення досліджень, орієнтованих на удосконалення метрологічної бази диференціації груп контрольних вимірів тіла за показником мінливості в системі чинних антропометричних стандартів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Методика застосування контролюючої функції чинних антропометричних стандартів в постановці продукції на виробництво розглянута в [1]. В роботі [2] показано, що загальний діапазон шкали великих розмірів за обхватом грудей для жінок знаходиться в межах від 107,9 см до 146, 0 см. Такий же діапазон рекомендований в практичних рекомендаціях для розробки робочої документації. Зокрема, запропоновані такі групи розмірів – 108-120 (друга), 124-136 (третя). Уточнення регламенту великих розмірів зафіксовано в

ДСТУ ISO/RT 10652:2006 [4], а саме два розміри за обхватом грудей: 110 і 116 см. За типом тіла М це відповідає групі розмірів 108-120 для дослідження табелю вимірів готового одягу.

Групування типових фігур жінок великих розмірів за оцінкою пропорційності тіла [5] дозволяє врахувати однакове зорове сприйняття геометричної форми моделі одягу.

Метод контролю співрозмірності конструкції одягу за допомогою приростів для градації [6] дозволяє використати алгоритм перевірки за чинними розмірними стандартами.

Блочно-модульний підхід до застосування моделі типового представництва розглянуто в [7]. Дослідження комплексної уніфікації на основі кластерів вимірів, що характеризують співрозмірність [8], дозволяє виконати селекцію розмірної мінливості величин переміщень в шкалі великих розмірів.

Метою дослідження є: розробка методу синхронізації параметрів градації нормативних контрольних вимірів для оцінки співрозмірності жіночого одягу великих розмірів.

Виклад основного матеріалу

Порівняльна характеристика віку жінок за різними схемами містить від 8 до 11 періодів зміни будови тіла. Відносно стабільний проміжок будови тіла характеризує 8-й період (30-60 років) медичної схеми та 6-1 період дорослого віку (29-45 років) для швейної промисловості [9].

Теоретичне обґрунтування діапазону розмірів для виділення груп великих розмірів у популяції жіночого населення підпорядкована змінності просторової форми ділянки грудної клітки, відносній стабільності описових ознак, зросту (низький, середній, високий), збільшенню жирових відкладень на тазовій ділянці тіла.

За стандартом ISO система типових фігур антропометричної типології побудована на періодичному змінюванні тотальних вимірів людського тіла: периметр (обхват грудей), довжина (зріст), маса (обхватні периметри талії, стегон). Сучасна розмірна типологія більшості країн світу побудована на багатомодифікаційному варіанті поєднання зросту, обхвату грудей, обхвату стегон (талії) для встановлення чисельності типових фігур [2].

Гармонізація термінології в застосуванні систем класифікації антропометричної інформації виконана перехресним порівнянням обмежень шкали розмірів з урахуванням типу фігури, рівня розміщення на фігурі (верхня або нижня частина), виду одягу, характеристики контрольних вимірів в технічній документації виробника.

Для аналізу використані нормативні документи, чинні в Україні [4, 10, 11, 12, 13]. За визначенням [10], контрольні виміри (control dimensions) – це виміри тіла людини в см, на яких побудована система розмірів, які використовують для визначення відповідного розміру одягу в залежності від його виду. Для жіночого плечового одягу встановлена шкала розмірів [4], таблиця 1.

Таблиця 1

Шкала розмірів жіночого верхнього одягу

Контрольні розміри	Шкала середніх значень, см	Інтервали, см
Обхват грудей - Ог	…96 100 104 110 116	4 та 6
Обхват стегон - Об	цілі значення	перемінні
Зріст - Р	… 156 164 172… ↔ або … 160 168 176… ↔	8 8

Вказані контрольні виміри є основними (primary dimensions) для класифікації типових фігур і типового маркування розмірів одягу для споживача.

Додатковий вимір (secondary dimensions) може бути використаний додатково для позначення розміру ділянки одягу [11, 12], таблиця 2.

Таблиця 2

Одяг для жінок. Контрольні основні й додаткові виміри

Вид одягу	Основні виміри	Додаткові виміри	Рівень застосування в табелі вимірів
Костюм, жакети	Обхват грудей	Зріст	Довжини
		Обхват стегон	Ширини
Пальто	Обхват грудей	Зріст	Довжини
Сукня	Обхват грудей	Зріст	Довжини
		Обхват стегон	Ширина силуетних рівнів
		Обхват талії*	

Примітка: * обхват талії використовується для цифрового кодування розміру в окремих країнах ЄС.

В стандарті [13] регламентовані коди літерних позначень розмірів за величиною обхвату грудей у вигляді трьох груп, таблиця 3.

Таблиця 3

Групова синхронізація літерних кодів позначення розміру одягу

Номер групи	Літерний код	Обхват грудей, см	Діапазон, м	Національний варіант групи розмірів [14]
1	XXS – найменший обхват грудей XS – дуже малий	68, 72 76, 80	66-74 74-82	- 76, 80
2	S – малий M – середній L – великий	84, 88 92, 96 100, 104	82-90 90-98 98-106	- 84-104 -
3	XL – дуже великий XXL – найбільший XXXL – якнайбільший	110, 116 122, 128 134, 140	107-119 119-131 131-143	108-120 124-136 140-148

Синхронізація повнотних груп великих розмірів в жінок за типами тіла наведена в таблиці 4.

Таблиця 4

Система великих розмірів тіла жінок за повнотними типами

Тип тіла	Обхват грудей, см	Зріст, см			Код montoform
		160 (S)	168 (R)	176 (L)	
		Обхват стегон, см			
A	110	-	124	-	110 AR
	116	-	129	-	116 AR
M	110	115	115	-	110 MS 110 MR
	116	-	120	-	116 ML
H	110	-	107	107	110 HS 110HR 110HL

Всього представлено 8 розмірів тіла: тип А - середній зріст, повнотна група 4-а; тип М - середній зріст, повнотна група 2-а; тип Н - низький і середній зріст, повнотна група 1-а.

Базова типова фігура для розробки моделі і конструкції жіночого одягу (в першій повнотній групі 164-116-118, в другій повнотній групі 164-116-122) обрана з класифікації типових фігур жінок великих розмірів 104-124.

Перевірка кількісної характеристики групи великих розмірів за стандартом [4] (таблиця 5) підтвердила синхронність розмірів базової типової фігури.

Таблиця 5

Контрольні виміри жіночого верхнього одягу великих розмірів за ISO

Основні контрольні розміри, см	Розміри			
	Плечовий одяг		Поясний одяг	
Обхват грудей Обхват стегон Зріст	110 115 168	116 120 168	- 112 168	- 116 168
Додаткові розміри, см				
Обхват талії	85	98	88	93
Довжина спини до талії	42	43	-	-
Довжина талії спереду	48	49	-	-
Ширина спини	41	42	-	-
Довжина руки (від плеча до зап’ястку)	61	62	-	-
Зовнішня довжина ноги	106	106	108	108
Внутрішня довжина ноги	-	-	77	76

Наведені значення контрольних вимірів відповідають типу тіла М середні значення кратні 6 (обхват стегон більший обхвату грудей Об>Ог на 4-8 см, зріст - середній R=168 см (164-171 см). Інтервал байдужості за зростом 8 см.

Результати дослідження величин переміщення контрольних вимірів в шкалі великих розмірів за повнотними типами представлені в таблиці 6.

Таблиця 6

Числові ряди величин переміщень контрольних вимірів між розмірами і зростами в шкалі великих розмірів жінок

Контрольні виміри, см	Національна повнотна група				Тип тіла [4]					
	1-а		2-а		А		М		Н	
	розміри	зрости	розміри	зрости	розміри	зрости	розміри	зрости	розміри	зрости
Основні розміри, см										
Обхват грудей, Ог	4,0	0,0	4,0	0,0	6,0	0,0	6,0	0,0	6,0	0,0
Обхват стегон, Об	4,0	0,0	4,0	0,0	5,0	0,0	5,0	0,0	3,0	0,0
Зріст, Р	0,0	6,0	0,0	6,0	0,0	8,0	0,0	8,0	0,0	8,0
Додаткові розміри, см										
Обхват талії, От	5,0	-0,2	4,0	-0,2	6,0	-1,0	6,0	-3,0	4,0	-3,0
Довжина спини до талії, Дтс	0,1	1,2	0,1	1,2	1,0	1,0	1,0	2,0	4,0	1,0
Довжина талії спереду, Дтп	0,8	1,0	0,7	1,0	1,0	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0
Ширина спини Шс	0,8	0,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,5	0,0
Довжина руки (від плеча до зап'ястку), Др	0,2	2,3	0,2	2,7	1,0	2,0	1,0	2,0	0,0	2,0
Довжина ноги від талії збоку, Дб	0,1	4,4	0,1	4,5	0,0	5,0	0,0	5,0	0,0	5,0

Для перевірки можливості застосування стандартних контрольних вимірів за величинами переміщень в шкалі розмірів за табелем вимірювань готової сукні виконане дослідження технічної документації 10 моделей жіночої сукні [1].

В основу регламентації діапазону великих розмірів в шкалі розмірів табелю вимірів закладена методика збереження пропорційності фігури за парами співвідношень основних вимірів в гармонізованих стандартах (таблиця 4) [9].

Загальний вигляд формули для визначення співвідношення основних вимірів має вигляд:

$$K = \frac{T_i}{T_j}, \tag{1}$$

де T_i – обхват грудей ОгрIII;

T_j – перемінний розмір Р, Об.

Послідовність розрахунку представлена в таблиці 7.

Таблиця 7

Розрахунок коефіцієнтів пропорційності контрольних основних вимірів типової фігури жінок великого розміру

Основні контрольні виміри	Розрахункові формули	Значення коефіцієнта пропорційності	
		національний стандарт	стандарт ISO
Обхват грудей, $Ог_{III}$	$K_1 = \frac{Ог_{III}}{P}$	$K_1^{I,II} = \frac{116}{164} = 0,70$	$K_1^1 = \frac{110}{168} = 0,65$; $K_1^2 = \frac{116}{168} = 0,69$
Обхват стегон, Об	$K_2 = \frac{Об}{P}$	$K_2^I = \frac{118}{164} = 0,72$; $K_2^{II} = \frac{122}{164} = 0,74$	$K_2 = \frac{115}{168} = 0,685$
Зріст, Р	$K_3 = \frac{Ог_{III}}{Об}$	$K_3^I = \frac{116}{118} = 0,98$; $K_3^{II} = \frac{116}{122} = 0,95$	$K_3^1 = \frac{110}{115} = 0,956$; $K_3^2 = \frac{116}{120} = 0,966$

Отримані коефіцієнти пропорційності K_1 і K_2 свідчать про належність до широкоскладеного типу фігури.

Коефіцієнт K_3 показує збереження пропорційності фігури в межах «краплі» для типу М.

Для оцінки ознак однакового зорового сприйняття геометричної форми моделей сукні виконано дослідження числового ряду в межах шкали великих розмірів (таблиця 8).

Таблиця 8

Нормування абсолютних величин переміщень контрольних вимірів моделей жіночої сукні в шкалі розмірів 54-60

Контрольні виміри, см	Моделі										$\overline{X_i}$
	М1	М2	М3	М4	М5	М6	М7	М8	М9	М10	
Основні											
Довжина виробу	1,2	0,5	1,2	0,5	1,5	0,7	0,8	0,5	0,5	0,5	0,8
Ширина виробу по лінії грудей	6,3	6,0	6,0	6,3	6,0	5,0	5,5	6,0	4,0	6,0	5,7
Ширина виробу по лінії стегон	6,3	6,0	8,0	6,3	6,0	6,0	5,5	6,0	4,0	6,0	6,0
Додаткові											
Ширина по лінії талії	6,3	6,0	6,0	6,3	6,0	5,5	4,3	6,0	4,0	6,0	6,2
Довжина спинки до талії	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7	0,5	0,5	0,5	0,0	0,47
Довжина переду то талії	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	0,7	0,5	0,5	0,5	0,0	0,69
Ширина спинки	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,4	1,5	1,44
Довжина рукава	0,2	0,5	0,2	-	-	0,3	1,0	1,5	0,75	0,3	0,5
Довжина до кишені	0,5	0,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,45

Для формування базису відхилень контрольних вимірів у дослідженні вибірки нормативних величин використано аналітичний метод порівняння пар в чинній нормативній документації [2, 3] за схемою «фігура – конструкція – виріб». У блоці нормативних даних представлена інформація з антропометричних стандартів про тип фігури М, величини коефіцієнтів градації $K_{гр}$ для сукупності контрольних вимірів.

Конструкцію виробу характеризують величини переміщень в типових схемах градації деталей конструкції [3], готовий виріб сукні характеризує табель вимірів, як обов'язкова форма у складі технічної документації.

Сформовано 4 групи попарної нострифікації відхилень контрольних вимірів шляхом перехресного порівняння. Перша група – повнотна група фігури тип М і середньоарифметична велична вимірів 10 моделей сукні - $\overline{X}_{мод}$; друга група – поєднує величини переміщень антропометричних вимірів в розмірних стандартах - $K_{гр}$ і в типових схемах градації деталей конструкції $T_{гр}$; третя група характеризує статистичну обробку антропометричної інформації, середньоарифметична величина за табелем вимірів – $\overline{X}_{мод}$ і середньоарифметична величина числового ряду з нормативних документів – $\overline{X}_{базис}$. Результати аналітичних досліджень наведені в таблиці 9.

.

Таблиця 9

Нормування базису відхилень контрольних вимірів у вибірці нормативних величин, см

Позна-чення виміру	Нормативні дані					Розрахункові відхилення в парах нормування							
	Тип М	$\overline{X}_{мод}$	$K_{гр}$	$T_{гр}$	$\overline{X}_{базис}$	Тип М	$\overline{X}_{мод}$	$K_{гр}$	$T_{гр}$	Тип М	$K_{гр}$	$\overline{X}_{мод}$	$\overline{X}_{базис}$
Ог	6,0	5,7	4,4	6,0	5,5	0,3	2,57	-1,6	15,4	0,0	0,0	0,2	1,79
Об	5,0	6,0	6,0	5,6	5,65	-1,0	9,1	0,4	3,5	-0,1	9,4	0,35	3,0
Р	1.0	0,8	0,8	0,6	0,8	0,2	11,12	0,2	14,3	0,2	11,12	0,0	0,0
От	6,0	6,2	6,4	4,8	5,85	-0,2	1,64	1,6	14,3	-0,4	3,23	0,35	2,91
Дтс	1,0	0,5	0,5	0,5	0,63	0,5	33,3	0,0	0	0,5	33,3	-0,13	11,5
Дтп	1,0	0,7	0,7	0,9	0,83	0,3	36,1	-0,2	-11,8	0,3	17,7	-0,13	8,5
Др	1,0	0,5	0,6	0,5	0,65	0,5	33,3	0,1	9,09	0,4	25,0	-0.15	13,04
Шс	1,0	1,4	1,2	1,2	1,2	-0,4	16,7	0,0	0	-0,2	9,09	0,2	7,7
Дб	0,6	0,5	0,4	0,5	0,5	0,1	9.09	-0,1	9,09	0,2	22,2	0,0	0,)
$\Sigma KBij$	22,6	22,3	21,0	20,6	21,6	3,2	143,83	13,24	77,48	3,2	131,04	1,51	48,4
Абсолютні величини													
Блок 1	$\sum KBi$ =108,1; $\sum \overline{KBi}$ =21,624; i=5					Блок 2	$\sum KBj$ =11,15; $\sum \overline{KBj}$ =2,79; j=4						
Відносні величини													
ΔKB_1 =15,98%; ΔKB_2 =8,62%; ΔKB_3 =14,56%; ΔKB_4 =5,38%													

Результати розрахунків 36 ΔKBj відхилень контрольних вимірів у блоці 2 утворюють упорядкований числовий ряд: 0 – 5; 0,1 – 3; 0,13 – 2; 0,15 – 1; 0,2 – 9; 0,3 – 3; 0,35 – 2; 0,4 – 4; 0,5 – 3; 1 – 2; 1,6 – 1. Абсолютні значення величин відхилень підтверджують достатній рівень ідентифікації контрольних вимірів від поверхні тіла до поверхні одягу через конструкції виробів для жінок великих розмірів (рис. 1).

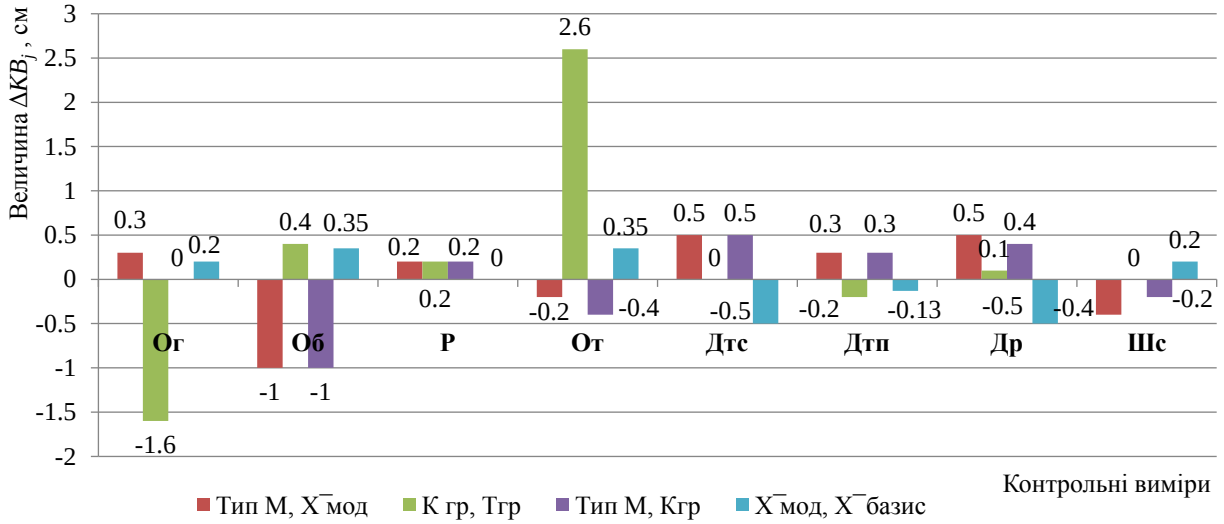


Рис. 1. Графічна інтерпретація абсолютних величин відхилень контрольних вимірів у блоці 1

За величиною входження в допуск 0,3 см [1] із числового ряду величин відхилень входить 8 значень антропометричної співрозмірності, що складає 50,0% від вибірки 36 значень Значення 0,4-1,0 см (30,6 %) характеризують номінальні відхилення за стандартом [14] і присутні в табелі вимірів технічного опису на виріб. Величина ±1,6 см (5,5 %) характеризує силуетні рівні виробу на лінії грудей і талії. Відсутність відхилень 0,0 (13,9 %) характеризує синхронність збереження антропометричної співрозмірності на всіх рівнях застосування нормативної документації.

Графічна інтерпретація достовірності відносних величин контрольних вимірів за рівнем входження в 5 – 10% для виробів легкої промисловості та обсягом від 30 до 50 % у атестації сортності виробів наведена на рис. 2. Для розрахунків використано накопичення відносно величин відхилень (таблиця 9) по 4-х стовпцях пар і 9-и рядках контрольних вимірів (Блок 1, 2). Накопичені частоти відносних відхилень Δ*KBj*, % згруповані в 3 групи рівня достовірності: І-а (5-10%) – 20 Δ*KBj* (55,6 %); ІІ (11-25%) – 12 Δ*KBj* (33,3%); ІІІ (26-36%) – 14 Δ*KBj* (11,1%) та 4 пари сумарного накопичення в стовпцях (1-4).

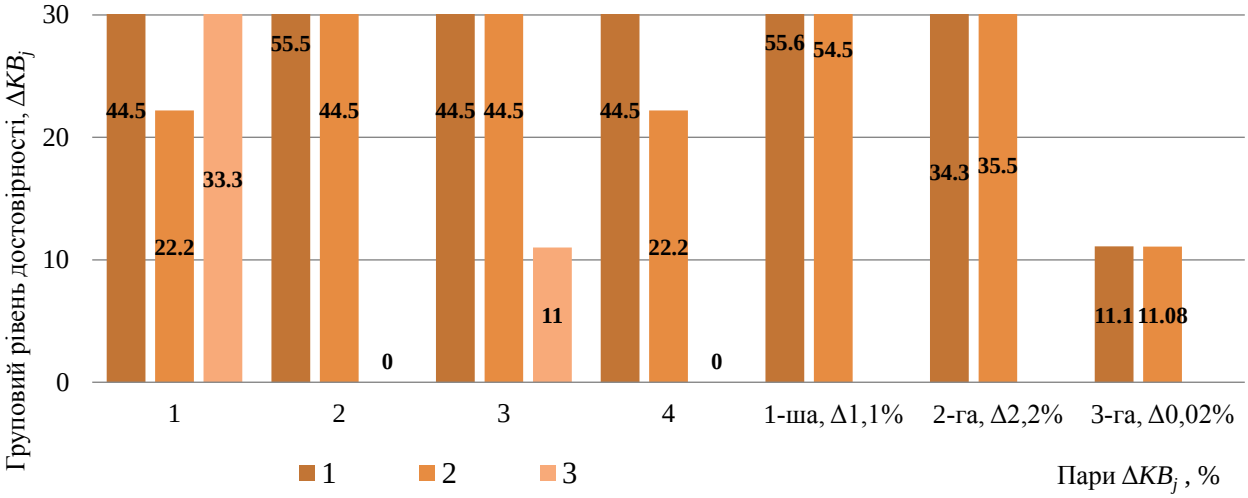


Рис. 2. Графічна інтерпретація рівнів достовірності величин відхилень контрольних вимірів у блоці 2

Відхилення сумарних накопичень перехресної оцінки в парах ΔKB_I-ΔKB_{IV} за рівнем достовірності в групах 1-3 відповідно складає: для першої групи Δ_1=17,1%, для другої групи Δ_2= 2,2%, для третьої Δ_3=0,02 %.

Отже технічні вимоги забезпечення високого рівня якості для продукції легкої промисловості дотримані на всіх етапах підготовки технічної документації.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

За результатами гармонізації переліку контрольних вимірів у національних стандартах України сформовано базис нормування відхилень контрольних вимірів верхнього одягу для жінок великих розмірів. Експериментально підтверджена достовірність входження відносних величин контрольних вимірів в межі 5-

10% для виробів легкої промисловості. Дотримані рекомендації щодо збереження рівня атестації сортності готової продукції в межах відхилення 2%. Подальшого розвитку потребує практична перевірка фігур інших повнотних типів для кластерів малих і середніх розмірів.

Література

1. Славінська А. Л. Методика верифікації стандартних антропометричних вимірювань для одягу / А. Л. Славінська, В. В. Мица, В. В. Альбертович // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2022. – № 4 (265). – С. 241-248.
2. Цимбал Т.В. Антропометрична стандартизація проєктування одягу : монографія / Т.В. Цимбал. – Київ : КНУТД, 2004. – 148 с.
3. Славінська А. Л. Побудова лекал одягу різного асортименту : навч. посібник / А. Л. Славінська. – Хмельницький : ХНУ, 2011. – 222 с.
4. Одяг. Стандартна система визначення розмірів (ISO/TR 10652:1991, IDT) : ДСТУ ISO/TR 10652:2006. – [Чинний від 2007-10-01]. – Київ : Держстандарт України, 2005. – 24 с. – (Національний стандарт України).
5. Міщенко О.В. Групування типових жіночих фігур великих розмірів за оцінкою пропорційності тіла / О.В. Міщенко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2006. – № 4. – С. 80-83.
6. Slavinskaya A. Method of control of the compatibility of the children's clothing design using coefficients of dimentional features gradation / A Slavinskaya., O. Dombrovska, V. Mytsa, J. Koshevko, A. Dombrovskyi, T. Ivanishena // Vlakna a Textile. – 2020. - Volume 27 (1). – P. 76-86. – ISSN: 2585-8890.
7. Славінська А.Л. Функціональний аспект групування уніфікованих форм робочої документації на модель виробничого одягу / А. Л. Славінська, В. В. Мица // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2021. – №2 (295). – С. 254-258.
8. Slavinska A. Simulation model of the morphological field of data for constructing a universal design of trousers / A. Slavinska, O. Syrotenko, O. Dombrovska, V. Mytsa // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – Volume 1(1-103). – P. 52-61. – DOI: 10.15587/1729-4061.2020.192590.
9. Славінська А. Л. Методи і способи антропометричних досліджень для проектування одягу : монографія / А. Л. Славінська. – Хмельницький : ХНУ, 2012. – 191 с.
10. Познаки розмірів одягу. Визначення понять та вимірювання розмірів тіла (ISO3635:1981–IDT) : ДСТУ ISO 3635:2004. – [Чинний від 2005-04-01]. – Київ : Держстандарт України, 2005. – 12 с. – (Національний стандарт України).
11. Одяг. Познаки розмірів. Частина 1. Терміни, визначення понять та вимірювання розмірів тіла (EN 13402-1:2001, IDT) : ДСТУ EN 13402-1:2009. – [Чинний від 2011-07-01]. – Київ : Держстандарт України, 2014. – 3 с. – (Національний стандарт України).
12. Одяг. Познаки розмірів. Частина 2. Основні та додаткові виміри (EN 13402-2:2002, IDT) : ДСТУ EN 13402-2:2009. – [Чинний від 2011-01-01]. – Київ : Держстандарт України, 2011. – 5 с. – (Національний стандарт України).
13. Одяг. Познаки розмірів. Частина 3. Виміри та інтервали (EN 13402-3:2004, IDT) : ДСТУ EN 13402-3:2009. – [Чинний від 2019-01-01]. – Київ : Держстандарт України, 2014. – 3 с. – (Національний стандарт України).
14. Одяг верхній платтяно-блузкового асортименту. Загальні технічні умови (ГОСТ 25295-2003, IDT) : ДСТУ ГОСТ 25294:2005:2006. – [Чинний від 2006-07-01]. – Київ : Держспоживстандарт України. – 6 с. – (Національний стандарт України).

References

1. Slavinska A. L. Metodyka veryfikatsii standartnykh antropometrychnykh vymiriuvan dlia odiahu / A. L. Slavinska, V. V. Mytsa, V. V. Albertovych // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2022. – № 4 (265). – S. 241-248.
2. Tsymbal T.V. Antropometrychna standartyzatsiia proiektuvannia odiahu: monohrafiia / T.V. Tsymbal. – K.: KNUTD, 2004. – 148 s.
3. Slavinska A. L. Pobudova lekal odiahu riznoho asortymentu: navch. posibnyk / A. L. Slavinska. – Khmelnytskyi : KhNU, 2011. – 222 s.
4. Odiah. Standartna systema vyznachennia rozmiriv (ISO/TR 10652:1991, IDT): DSTU ISO/TR 10652:2006. – [Chynnyi vid 2007-10-01]. – Kyiv: Derzhstandart Ukrainy, 2005. – 24 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy).
5. Mishchenko O.V. Hrupuvannia typovykh zhinochykh fihur velykykh rozmiriv za otsinkoiu proportsiinosti tila // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2006. – №4. – S. 80-83.
6. Slavinskaya A. Method of control of the compatibility of the children's clothing design using coefficients of dimentional features gradation / A Slavinskaya., O. Dombrovska, V. Mytsa, J. Koshevko, A. Dombrovskyi, T. Ivanishena // Vlakna a Textile. – 2020. - Volume 27 (1). – P. 76-86. – ISSN: 2585-8890.
7. Slavinska A. L. Funktsionalnyi aspekt hrupuvannia unifikovanykh form robochoi dokumentatsii na model vyrobnychoho odiahu / A. L. Slavinska, V. V. Mytsa // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2021. – №2 (295). – S. 254-258.
8. Slavinska A. Simulation model of the morphological field of data for constructing a universal design of trousers / A. Slavinska, O. Syrotenko, O. Dombrovska, V. Mytsa // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – Volume 1(1-103). – P. 52-61. – DOI: 10.15587/1729-4061.2020.192590.
9. Slavinska A. L. Metody i sposoby antropometrychnykh doslidzhen dlia proektuvannia odiahu : monohrafiia / A. L. Slavinska. – Khmelnytskyi : KhNU, 2012. – 191 s.
10. Poznaky rozmiriv odiahu. Vyznachennia poniat ta vymiriuvannia rozmiriv tila (ISO3635:1981–IDT): DSTU ISO 3635:2004. – [Chynnyi vid 2005-04-01]. – Kyiv: Derzhstandart Ukrainy, 2005. – 12 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy).

11. Odiah. Poznaky rozmiriv. Chastyna 1. Terminy, vyznachennia poniat ta vymiriuvannia rozmiriv tila (EN 13402-1:2001, IDT): DSTU EN 13402-1:2009. – [Chynnyi vid 2011-07-01]. – Kyiv: Derzhstandart Ukrainy, 2014. – 12 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy).

12. Odiah. Poznaky rozmiriv. Chastyna 2. Osnovni ta dodatkovi vymiry (EN 13402-2:2002, IDT): DSTU EN 13402-2:2009. – [Chynnyi vid 2011-01-01]. – Kyiv: Derzhstandart Ukrainy, 2011. – 12 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy).

13. Odiah. Poznaky rozmiriv. Chastyna 3. Vymiry ta intervaly (EN 13402-3:2004, IDT): DSTU EN 13402-3:2009. – [Chynnyi vid 2019-01-01]. – Kyiv: Derzhstandart Ukrainy, 2014. – 12 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy).

14. Odiah verkhnii plattiano-bluzkovoho asortymentu. Zahalni tekhnichni umovy (HOST 25295-2003, IDT): DSTU HOST 25294:2005:2006. – [Chynnyi vid 2006-07-01]. – Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy. – 6 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy).

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-284-288
УДК 621.398

СЛОБОДЯН МАКСИМ
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0002-9277-565X
e-mail: mslobodian@khmnu.edu.ua

МОДЕЛЬ ХАОТИЧНОЇ НАДШИРОКОСМУГОВОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

У статті описано застосування моделі надширокосмугового зв'язку на основі хаотичної синхронізації як малопотужного та ефективного альтернативного рішення для побудови бездротових сенсорних мереж. Використання хаотичних сигналів як носіїв інформації в системах бездротового зв'язку має низку переваг, до яких відноситься широкий спектр сигналу, висока інформаційна ємність, кібербезпека та низьке енергоспоживання кіл-генераторів. Передача цифрового сигналу виконується за допомогою маніпуляції хаотичними радіоімпульсами, прийом і демодуляція яких реалізується на основі використання односпрямованої синхронізації нелінійних динамічних систем. На основі теорії хаотичної синхронізації, в програмному середовищі MATLAB/Simulink була побудована модель та проведено імітаційне моделювання хаотичної надширокосмугової системи передачі інформації. Розглянуто негативний вплив шуму в каналі зв'язку та проблему неідентичності параметрів систем. Запропоновані моделі можуть бути використані для проектування та розробки ефективних бездротових сенсорних мереж для застосування у сфері охорони здоров'я.

Ключові слова: бездротові сенсорні мережі, хаотичний зв'язок, надширокосмугові системи, динамічні системи, синхронізація

SLOBODIAN MAKSYM
Khmelnytskyi National University

MODEL OF A CHAOTIC ULTRA-WIDEBAND INFORMATION TRANSMISSION SYSTEM FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS

Distributer measuring systems, consisting of interconnected wireless sensor nodes with autonomous supply, have plenty of applications in different areas of engineering end technology. Therefore, wireless sensor network design and optimization is a vital problem in informational technologies and computer engineering. Regardless of particular application and architecture, a wireless sensor network consists of several small sensor nodes somehow distributed in an area of inspection. Such a design ensures a distributed parameter measuring, according to which, each node performs preprocessing procedures for the data, which are to be aggregated by a so-called sink node and sent via other networks, e.g., wired or wireless local area network. For healthcare solutions, it is important to ensure a stable connection with the network and server back-end to provide a high-level analysis based on predicting methods of machine learning algorithms. This paper describes an application of an ultra-wideband communication model based on chaos synchronization as a low-power and efficient alternative solution for building wireless sensor networks. Thus, using chaotic signals as information carriers in wireless communication has several advantages, including a wide smooth spectrum, high information capability, cybersecurity, and low power consumption. The synchronization problem is one of the most vital tasks to be solved to design a chaos application for ultra-wide-band communication. Being well-studied for periodic signals, modern synchronization theory contains plenty of solutions for classical telecommunication and radio engineering systems, however, it is not developed enough for chaotic systems. Hence, a one-directional dissipative synchronization between two Chen systems is studied in the first section. The second section is devoted to the computer simulation of the model, described in the previous section. All the models built and the simulations performed have been done using MATLAB/Simulink software. The negative impact of channel noise and inequality of system parameters is considered. The possible way how to improve technical characteristics is also provided. Proposed models are to be used to design and develop low-cost wireless sensor networks for multi-channel healthcare solutions.

Keywords: wireless sensor networks, chaos communication, ultra-wide-band systems, dynamic systems, synchronization

Постановка проблеми та аналіз літературних джерел згідно теми дослідження

Розподілені вимірювальні системи, що складаються із взаємопов'язаних бездротових сенсорних вузлів з автономним живленням, знаходять широке застосування в різних галузях інженерних технологій та сприяють вирішенню різноманітних наукових та інженерно-технічних задач. Тому проектування та оптимізація бездротових сенсорних мереж (БСМ), в т.ч. спеціалізованого програмного забезпечення (ПЗ) для їхніх компонентів, є актуальною проблемою в інформаційних технологіях та комп'ютерній інженерії. Незалежно від конкретного застосування та архітектури, БСМ складається з набору невеликих сенсорних вузлів, розподілених у зоні контролю, наприклад, випадковим чином або рівномірно у критичних місцях, і з'єднаних між собою бездротовим каналом зв'язку [1]. Така конструкція забезпечує вимірювання та контроль розподілених в просторі фізичних величин, наприклад, температури, тиску, вологості; або моніторинг параметрів людського тіла в системах охорони здоров'я, наприклад, пульсових сфігмографічних хвиль (ПСФГ) [2, 3]. Відповідно до структури компонентів БСМ, кожен вузол, який оснащений відповідним сенсором та вимірювальним перетворювачем, виконує процедури попередньої обробки даних та їхню передачу для подальшої агрегації головними вузлами і відправлення через шлюзи локальних мережі, наприклад, дротових або бездротових локальних мереж (LAN), персональних мереж (PAN), або одразу через мережі Інтернет до централізованого сервера обробки та збору даних [1].

Протоколи бездротового зв'язку, що використовуються в промислових і персональних мережах, включно з БСМ і бездротовим Інтернетом речей (IoT), базуються на декількох стандартах [4–6]: IEEE 802.11 (Wi-Fi, LAN), IEEE 802.15.1 (Bluetooth) та IEEE 802.15.4 (PAN). Ці стандарти, як і все сімейство стандартів IEEE 802, здебільшого визначають лише фізичний рівень (PHY) і частково канальний рівень (DLL) [5, 6].

Так, стандарт IEEE 802.15.4 має кілька варіацій базового протоколу, розроблених для задоволення конкретних технічних вимог [6]. Наприклад, технологія ZigBee реалізує базовий протокол IEEE 802.15.4, а також розширює його унікальною моделлю з'єднання вузлів [7].

Методи передачі інформації, що базуються на використанні хаотичних коливань в якості несучих сигналів, беруть свій початок з відкриття явища синхронізації нелінійних динамічних систем (НДС) [8, 9]. Перші результати в цій області дослідження були отримані на початку 90-х років XX ст. і з того часу викликають інтерес у науковців та інженерів-дослідників, що підтверджується численними вітчизняними та зарубіжними публікаціями. Пояснюється це насамперед рядом переваг, яких теоретично можна досягти реалізувавши методи хаотичного прийому-передачі для побудови енергоефективних бездротових систем передачі інформації різного призначення. Так, будучи за своєю природою неперіодичними широкосмуговими сигналами, схожими за формою та спектром до комоподібних сигналів, хаотичні коливання характеризуються широкою смугою частот та стійкістю щодо поширення в багатопроменевому середовищі, у порівнянні із сигналами із обмеженим спектром [10]. Завдяки розвитку теорії та практичної реалізації нелінійних НДС у вигляді простих електричних кіл-осциляторів, можливим є схемотехнічна реалізації генераторів хаотичних коливань, що є ефективним альтернативним рішенням щодо розширення спектру для побудови на їхній базі завадостійких багатоканальних систем передачі, що є особливо актуальним для безпровідних сенсорних мереж. Так, наприклад, стандартом IEEE 802.15.4a хаотичні системи прямої передачі визначаються як опціональне рішення для персональних безпровідних систем зв'язку [11, 12]. В таких системах прийому-передачі аналогова електронна схема генерує хаотичні коливання одразу в заданій смузі частот без перенесення частоти сигналу, аналогічно прийом та обробка такого сигналу на приймальній стороні виконується без проміжного перетворення частоти [11].

Для побудови систем цифрового зв'язку на базі детермінованого хаосу необхідно використовувати одну з декількох можливих стратегій прийому. Так, наприклад, когерентний метод прийому потребує синхронізації між приймачем і передавачем, в складі яких повинні бути відтворені майже ідентичні фрагменти деякої НДС генератора хаотичних коливань [8–10]. Задача синхронізації є однією з найголовніших, які необхідно вирішити для застосування хаотичних сигналів для надширокосмугових (НШС) систем зв'язку. Наприклад, в роботі [13] на основі хаотичної синхронізації спроектовано приймально-передавальний пристрій для кварцового перетворювача сенсора тиску. Будучи добре вивченою для періодичних сигналів, сучасна теорія синхронізації містить багато рішень для класичних телекомунікаційних і радіотехнічних систем, однак стосовно хаотичних систем вона залишається недостатньо розвиненою.

В якості альтернативи, представляючи меншу складність для практичної реалізації і не вимагаючи забезпечення синхронізації, деякі некогерентні методи також можуть бути використані, навіть якщо вони теоретично гірші за технічними характеристиками ніж когерентні методи [11].

Метою роботи є розробка та імітаційне моделювання хаотичної цифрової системи зв'язку на основі загальної синхронізації для передачі даних з хаотичною маніпуляцією (Chaos Shift Keying, CSK). Запропонована модель позиціонується як ефективний альтернативний метод хаотичної НШС бездротової передачі інформації для подальшої реалізації в системах БСМ.

Математична модель хаотичної системи передачі на базі синхронізації НДС

Розглянемо деяку неперервну НДС, що еволюціонує з часом згідно наступного векторного рівняння:

$$d\vec{u}(\tau)/d\tau = \vec{F}\left[\vec{u}(\tau), \vec{k}\right], \quad \vec{u}(\tau) \in \check{Y}^{n}, \quad \vec{k} \in \check{Y}^{m} \tag{1}$$

де $\vec{u}(\tau) = \left[u_1(\tau), u_2(\tau), \ldots, u_n(\tau)\right]$ – вектор стану системи, $\vec{k} = \left[k_1, k_2, \ldots, k_m\right]$ – вектор параметрів, $\vec{F}$ – нелінійна векторна функція, яка вважається відомою на передавальній та приймальній сторонах.

Згідно методу декомпозиції НДС, вихідна система (1) розглядається як така, що може бути представлена у вигляді двох підсистем:

$$\vec{F} = \left[\vec{G}, \vec{H}\right], \quad \vec{u} = \left[\vec{v}(\tau), \vec{w}(\tau)\right] \tag{2}$$

де $\vec{v}(\tau) = \left[u_1(\tau), u_2(\tau), \ldots, u_p(\tau)\right]$, $\vec{w}(\tau) = \left[u_{p+1}(\tau), u_{p+2}(\tau), \ldots, u_n(\tau)\right]$ – вектори стану, а $\vec{G} = \left[F_1(\vec{u}), F_2(\vec{u}), \ldots, F_p(\vec{u})\right]$, $\vec{H} = \left[F_{p+1}(\vec{u}, \vec{k}), F_{p+2}(\vec{u}, \vec{k}), \ldots, F_n(\vec{u}, \vec{k})\right]$ – векторні функції для цих підсистем.

Тоді, вираз (1) можна переписати як:

$$\begin{cases} d\vec{v}(\tau)/d\tau = \vec{G}\left[\vec{v}(\tau), \vec{w}(\tau), \vec{k}\right] \\ d\vec{w}(\tau)/d\tau = \vec{H}\left[\vec{w}(\tau), \vec{w}(\tau), \vec{k}\right] \end{cases}, \quad \begin{matrix} \left[\vec{v}(\tau), \vec{w}(\tau)\right] \in \check{Y}^{n} \\ \vec{k} \in \check{Y}^{m} \end{matrix} \tag{3}$$

де $\vec{v}(\tau)$ та $\vec{w}(\tau)$ – вектори стану для першої та другої системи відповідно.

Тепер розглянемо дві ідентичні НДС, що були піддані декомпозиції згідно правила (2) та позначимо

їх *1* та *2* відповідно. Односторонній зв'язок між цими системами забезпечується вектором $\vec{v}_1(\tau)$ системи *1*, який в свою чергу є керуючим, або «рушійним» сигналом для системи *2*.

Вважатимемо систему *1* головною, або «ведучою» системою – вона буде зберігати свою автономність залишаючись при цьому автоколивальною. На відміно від системи *1*, система *2* є розімкнутою в тому сенсі, що втрачає свою автономність за рахунок повної або часткової заміни власного вектору стану $\vec{v}_2(\tau)$ вектором $\vec{v}_1(\tau)$ системи 1, що надійшов каналом зв'язку.

Таким чином, повна синхронізації між НДС *1* та *2* описується наступною системою рівнянь:

$$\begin{cases} d\vec{v}_1(\tau)/d\tau = \vec{G}_1\left[\vec{v}_1(\tau), \vec{w}_1(\tau), \vec{k}_1\right], \quad d\vec{v}_2(\tau)/d\tau = \vec{G}_2\left[(1-d)\cdot\vec{v}_1(\tau) + d\cdot\vec{v}_1(\tau), \vec{w}_2(\tau), \vec{k}_2\right], \\ d\vec{w}_1(\tau)/d\tau = \vec{H}_1\left[\vec{v}_1(\tau), \vec{w}_1(\tau), \vec{k}_1\right], \quad d\vec{w}_2(\tau)/d\tau = \vec{H}_2\left[(1-d)\cdot\vec{v}_1(\tau) + d\cdot\vec{v}_1(\tau), \vec{w}_2(\tau), \vec{k}_2\right], \end{cases} \tag{4}$$

$$\left[\vec{w}_{1,2}(\tau), \vec{v}_{1,2}(\tau)\right] \in \ddot{Y}^n, \quad \vec{k}_{1,2} \in \ddot{Y}^m$$

де d – коефіцієнт, що визначає ступінь зв'язку між НДС *1* та *2*.

Похибка синхронізації обчислюється на основі різниці векторів $\varepsilon(\tau) = \left\|\vec{w}_1(\tau) - \vec{w}_2(\tau)\right\|$, асимптотичне зменшення якої ($\varepsilon \to 0$ при $\tau \to$ □) свідчить про встановлення режиму повної синхронізації.

Розглянемо в якості прикладу НДС систему Чена [14, 15], яка описується трьома нелінійними диференціальними рівняннями:

$$\begin{cases} dx_1/d\tau = a(x_2 - x_1) \\ dx_2/d\tau = (c-a)x_1 - x_1x_3 + cx_2 \\ dx_3/d\tau = x_1x_2 - bx_3 \end{cases}, \tag{5}$$

де a, b та c – дійсні параметри системи.

Виконаємо наступні підстановки:

$$\begin{gathered} x_i = \mu_i V \quad (i = 1\text{K}\ 3), \quad \tau = \mu_T t, \quad p = a - c, \\ k_1 = a\mu_T\mu_2/\mu_1, \quad k_3 = p\mu_T\mu_1/\mu_2, \quad k_4 = \mu_T\mu_1\mu_3/\mu_2, \quad k_6 = \mu_T\mu_1\mu_2/\mu_3, \\ k_2 = a\mu_T, \quad k_5 = c\mu_T, \quad k_7 = b\mu_T \end{gathered} \tag{6}$$

тоді система (5) може бути записана у вигляді:

$$\begin{cases} dV_1/dt = k_1V_2 - k_2V_1 \\ dV_2/dt = -k_3V_1 - k_4V_1V_3 + k_5V_2 \\ dV_3/dt = k_6V_1V_2 - k_7V_3 \end{cases}, \tag{7}$$

де $k_j = 1 / (R_jC_i)$ – розмірні коефіцієнти, що можуть бути виражені через деякі ємності та опори ($j = 1\ldots7$, $i = 1..3$).

Генератора хаосу, побудований на основі НДС, яка описана у вигляді рівнянь (7), може бути реалізований у вигляді електронної схеми, наприклад, на базі операційних підсилювачів та пасивних елементів.

Проведемо імітаційне моделювання процесу односпрямованої дисипативної синхронізація між двома системами Чена, математична модель якого була представлена вище.

Пакет імітаційних моделей було реалізовано в програмному середовищі MATLAB/Simulink відповідно до математичної моделі.

Імітаційне моделювання хаотичної системи передачі

Імітаційна модель «ведучої» НДС генератора, яка представляє собою частину передавального каскаду структури передавача, зображена на рис. 1,а. Інформаційний двійковий сигнал s, що вводиться в передавальний блок, керує сигналом x, який надсилається в канал зв'язку, за допомогою комутаційного елемента (Switch – 1/0). Таким чином, режими синхронізації та десинхронізації відповідають двійковим "1" та "0" відповідно. Модель НДС приймача аналогічна до моделі НДС передавача – обидві реалізовано згідно рівнянь системи Чена (7) – за винятком розмикання останньої за вектором стану V_2, який виступає в якості рушійного сигналу, а також схеми оцінки похибки синхронізації, згідно якої виконується виділення цифрового сигналу s' на приймальній стороні (рис. 1,б). Загальна модель запропонованої цифрової системи зв'язку показана на рис. 1,в. Система складається з НДС передавача та НДС приймача, які з'єднаних каналом зв'язку з додаванням білого шуму – Add White Gaussian Noise (AWGN). Змінна стану V_2 використовується як носій сигналу. Пройшовши через канал зв'язку, зашумлений сигнал s' надходить на вхідний порт моделі НДС приймача. Вектори стану обох систем – $\vec{V}$ та $\vec{V}'$ – контролюються і відслідковуються в процесі моделювання. Відповідні фазові портрети зображені на рис. 2,б,в та г.

Дисипативна синхронізація двох НДС вимагає майже повного співпадіння параметрів обох систем. Крім того, іншим дестабілізуючим фактором, що перешкоджає встановленню режиму синхронізації, є шуми в каналі зв'язку [10]. Одним з можливих методів зменшення негативного впливу цих двох факторів є керування ступенем зв'язку за рахунок підбору оптимального значення коефіцієнта підсилення в колі

зворотного зв'язку на неавтономної НДС приймача [10]. Можливий варіант реалізації такої схеми показано у вигляді моделі на рис. 2,а – як видно, у приймальній НДС реалізовано коло зворотного зв'язку з коефіцієнтом підсилення *d*, а вхідний сигнал проходить через підсилювач, коефіцієнт підсилення якого дорівнює 1 – *d*. Таким чином, сигнал, який надходить на підсистему G_2 приймальної НДС, є сумою вхідного сигналу та сигналу зворотного зв'язку у відповідності до (4). В результаті такої модифікації контур зворотного зв'язку покращує стійкість системи передачі до дестабілізуючих факторів, зменшуючи нестабільність її та запобігаючи небажаним зривам синхронізації [10]. Значення параметра *d* обирається за допомогою процедури оптимізації та комп'ютерного моделювання.

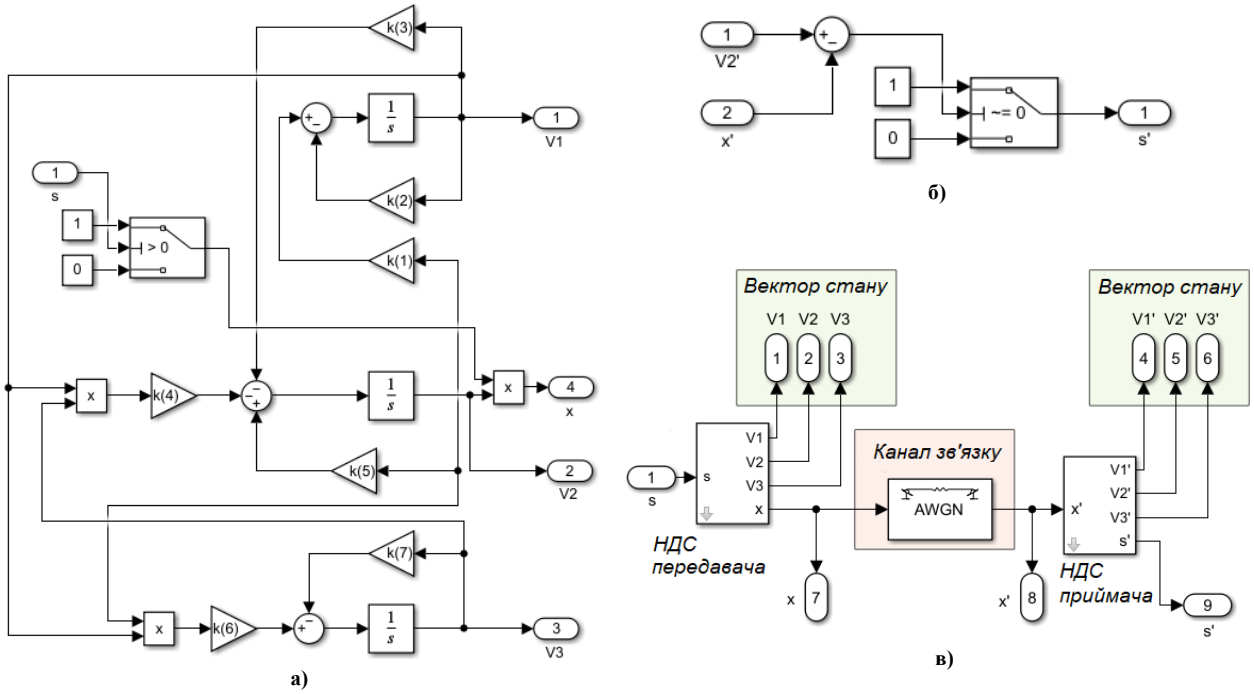


Рис. 1. Імітаційна модель хаотичної системи передачі: а) НДС генератора з уведенням цифрового сигналу; б) спрощена схема виділення інформаційного сигналу на основі оцінки похибки синхронізації; в) узагальнена схема запропонованої системи цифрового зв'язку

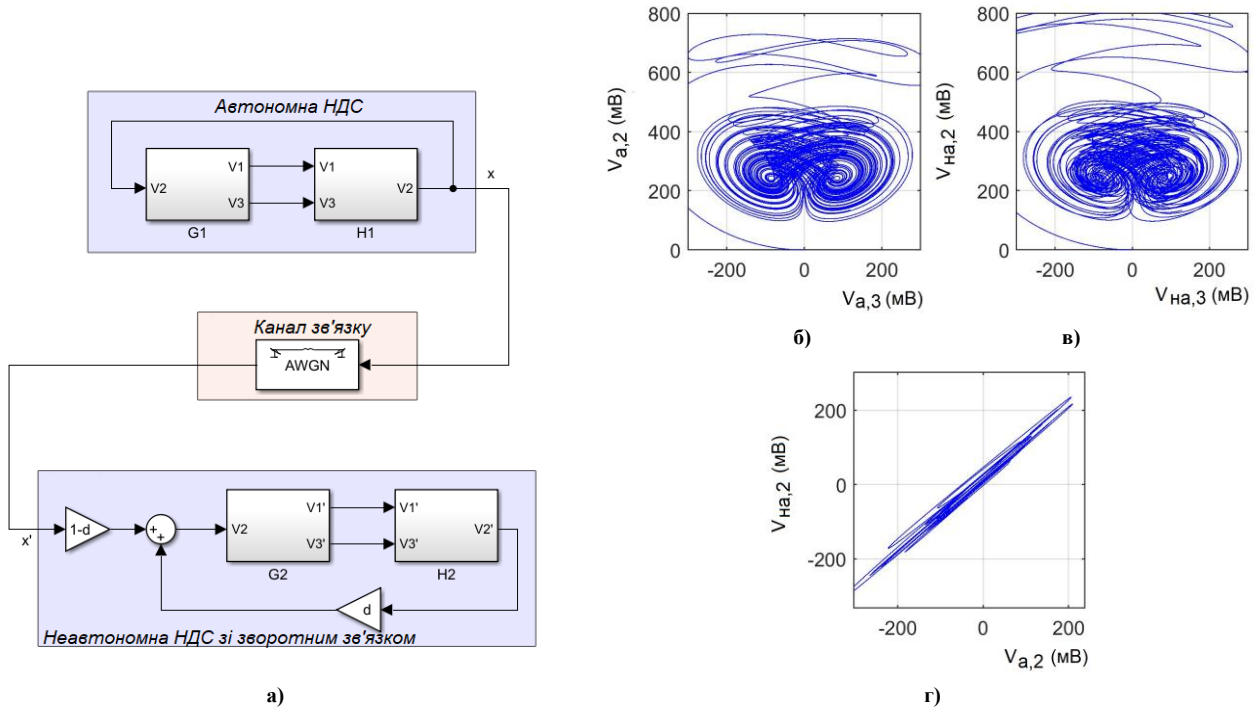


Рис. 2. Імітаційна модель хаотичної системи передачі із контуром зворотного зв'язку в НДС приймача: а) структурна схема системи; б), в) фазові портрети НДС генераторів передавача та приймача відповідно; г) оцінка синхронізації за фазовим портретом керуючого сигналу

У режимі повної синхронізації, що відповідає рівню логічної "1" цифрової системи передачі, фазовий портрет на площині $V_{а,2}$–$V_{на,2}$ керуючого сигналу автономної НДС $x = V_{а,2}$ і сигналу $V_{на,2}$, виробленого неавтономною НДС приймача, має вигляд прямої лінії з кутом нахилу нахилом $\alpha = 45°$ (за однакових масштабах осей) – рис. 2,г. Будь-які спотворення фазового портрета спричинені нерівномірністю параметрів системи, впливом шумів або (у випадку комп'ютерного моделювання) похибками моделювання (рис. 6, в).

Висновки

Системи бездротового зв'язку, які базуються на використанні хаотичних сигналів в якості несучих для передачі інформації, характеризуються низкою переваг у порівнянні із традиційними методами зв'язку, що використовують періодичні несучі сигнали. По-перше, хаотичні сигнали – це простий та ефективний спосіб розширення спектру, який дозволяє організувати багатоканальні системи зв'язку з низькою ймовірністю перекривання каналів. По-друге, завдяки низькому енергоспоживанню електричних кіл генераторів хаотичних коливань, які є фізичними реалізаціями моделей НДС, пристрої, побудовані на їх основі, можуть працювати автономно протягом тривалого часу. Також варто відзначити, що хаотичні носії, будучи за формою та характеристиками шумоподібними і неперіодичними, забезпечують додатковий рівень кібербезпеки, приховуючи передану інформацію від третіх осіб. Останні два факти є ключовими щодо застосування в БСМ, тому в цьому дослідженні було обрано саме таку стратегію прийому-передачі для НШС систем, зокрема згідно зі стандартом IEEE 802.15.4a.

Однак для створення прототипу такого передавача необхідно вирішити низку проблем, серед яких вибір стратегії прийому та демодуляції хаотичного сигналу між когерентним та некогерентним методами; оптимізація параметрів та підвищення стійкості до дестабілізуючих факторів, таких як шуми каналу, власні шуми приймача, розкид параметрів тощо.

Комплекс імітаційних моделей, розроблених і описаних у цій роботі, буде використано в подальших дослідженнях для вирішення задачі оптимізації когерентної схеми прийому хаотичних сигналів на основі повної синхронізації НДС з метою мінімізації дестабілізуючого впливу розкиду параметрів і шумів в каналі зв'язку.

Запропонована модель хаотичної НШС системи передачі інформації буде використана для проектування та розробки недорогих енергоефективних сенсорних вузлів БСМ з метою застосування їх у сфері охорони здоров'я.

Література

1. Fraisse C., McNair J., Onofre T. B. What is a wireless sensor network? UF/IFAS Extension. URL: https://standards.ieee.org/ieee/802.15.4a/3571/. – 11.03.2023.

2. Taranchuk A., Pidchenko S. Quartz pulse wave sensor with a capacitive control for healthcare solutions. IEEE Sensors Journal. 2021. Vol. 21, no. 6. P. 8613-8620. DOI: 10.1109/JSEN.2020.3049065.

3. Taranchuk A. Construction of measuring piezoresonance mechanotrons and their practical implementation for telemedicine diagnostic systems. Telecommunications and Radio Engineering. 2018. Vol. 77, no. 3. P. 269-281. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v77.i3.80.

4. IEEE 802.11 – Wireless local area networks. URL: https://www.ieee802.org/11/. – 11.03.2023.

5. IEEE 802.15.1 Standard for information technology- Local and metropolitan area networks. URL: https://standards.ieee.org/ieee/802.15.1/3513/. – 11.03.2023.

6. IEEE 802.15.4 Standard for low-rate wireless networks. URL: https://standards.ieee.org/ieee/802.15.4/7029/. – 11.03.2023.

7. ZigBee – The full-stack solution for all smart devices. URL: https://csa-iot.org/all-solutions/zigbee/. – 11.03.2023.

8. Eroglua D., Lambb J.S.W., Pereira T. Synchronization of chaos and its applications. Contemporary Physics. 2017. Vol. 58, no. 3. P. 207-243. DOI: 10.1080/00107514.2017.1345844.

9. Sheu L.-J., Chen H.-K., Chen J. H., Tam L. M., Chen W.-Ch., Lao S-K., Lin K. T. Complete synchronization of two Chen-Lee systems. Journal of Physics Conference Series. 2008. Vol. 96, article no. 012138. DOI: 10.1088/1742-6596/96/1/012138.

10. Golevych O., Pyvovar O., Dumenko P. Synchronization of non-linear dynamic systems under the conditions of noise action in the channel. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. 2018. Vol. 5, no. 3. P. 70-76. DOI: 10.2478/lpts-2018-0023.

11. Rebhi N., Zaibi G., Kachouri A., Charge P., Fournier-Prunaret D. Chaotic UWB communicatins for low rate WPAN applications. 2008 2nd International Conference on Signals, Circuits and Systems, Nabeul, Tunisia. 2008. P. 1-7. DOI: 10.1109/ICSCS.2008.4746940.

12. IEEE 802.15.4a Standard for information technology – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 15.4: Wireless medium access control and physical layer specifications for low-rate wireless personal area networks: Amendment 1: Add Alternate physical layers. URL: https://standards.ieee.org/ieee/802.15.4a/3571/. – 11.03.2023.

13. Pidchenko S., Taranchuk A., Slobodian M. Chen system-based chaotic transceiver for frequency output quartz transducers. Radioelectronic and Computer Systems. 2022. No. 2. P. 178-190. DOI: 10.32620/reks.2022.2.14.

14. Chen G., Ueta T. Yet another chaotic attractor. International Journal of Bifurcation and Chaos. 1999. Vol. 9, no. 7. P. 1465-1466. DOI: 10.1142/S0218127499001024.

15. Ueta T., Chen G. Bifurcation analysis of Chen's equation. International Journal of Bifurcation and Chaos. 1999. Vol. 10, no. 8. P. 1917-1931. DOI: 10.1142/S0218127400001183.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-289-293
УДК 62-231

СМУТКО СВІТЛАНА
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0002-7344-3799
e-mail: svsmutko@gmail.com
ПІДГАЙЧУК ССВІТЛАНА
Національна академія Державної прикордонної служби України ім. Богдана Хмельницького
https://orcid.org/0000-0002-9868-6447
e-mail: svitlankayar@gmail.com
ОНОФРІЙЧУК ВОЛОДИМИР
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0002-2914-4986
e-mail: volodymyronofriychuck@gmail.com
РОМАНЕЦЬ ТАРАС
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0002-0848-0825
e-mail: tromanec@gmail.com

РОЗРОБКА ПРИНЦИПІВ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ УНІВЕРСАЛЬНИХ ЗУБЧАСТО-ВАЖІЛЬНИХ МЕХАНІЗМІВ

В роботі наведено результати аналізу методів досліджень та існуючих розробок з проєктування зубчасто-важільних механізмів, встановлені їх особливості, які дозволили визначити принципи формування структур універсальних зубчасто-важільних механізмів приводу робочих органів технологічних машин.

Ключові слова: робочі органи технологічних машин, сателітна крива, зубчасто-важільні механізми.

SMUTKO SVITLANA
Khmelnytskyi National University
PIDHAICHUK SVITLAN
Academy of the State Border Guard Service of Ukraine named after Bohdan Khmelnytskyi
ONOFRIICHUK VOLODYMYR, ROMANETS TARAS
Khmelnytskyi National University

DEVELOPMENT OF THE PRINCIPLES OF FORMING THE STRUCTURE OF UNIVERSAL GEAR AND LEVER MECHANISMS

There are wide possibilities of using gear-lever mechanisms in the transformation of uniform rotary motion of the driving link into reciprocating, oscillating, non-uniform rotary or movement along a complex closed trajectory. The use of satellite curves of planetary mechanisms in combination with lever mechanisms allows to obtain a wide range of trajectories of executive bodies.

But the use of satellite curves in the mechanisms of the working bodies of some technological machines, the dimensions of which movements lie within 5-30 mm, is connected with a number of limitations. Known mechanisms make it possible to obtain a movement of the executive bodies of at least 50 mm, reducing this limit leads to a decrease in the geometric parameters of gear planetary mechanisms, which leads to the impossibility of ensuring technological efforts, or to the complication of the lever part of gear-lever mechanisms. The development of planetary mechanisms, which will provide the required dimensions of the satellite curves, will allow the creation of gear-lever mechanisms, the trajectories of the movement of the executive organs of which will satisfy the laws of movement of the working organs of the required dimensions.

In order to solve the problem of reducing the size of satellite curves, provided that technological efforts are ensured, it is necessary to look for fundamentally new constructive solutions of gear-lever mechanisms. At the same time, it is necessary to strive for simplicity and compactness of machines when transmitting motion in any direction without reducing the accuracy of transmission, which would contribute to the universalization of mechanisms and machines.

The work presents the results of the analysis of research methods and existing developments in the design of gear-lever mechanisms, their features are established, which allowed to determine the principles of the formation of structures of universal gear-lever mechanisms for driving the working bodies of technological machines.

Key words: working bodies of technological machines, satellite curve, gear-lever mechanisms.

Постановка проблеми

Аналіз сучасного технологічного обладнання у різних галузях промисловості показав, що основними напрямками його розвитку є розробка швидкодіючих високоточних машин та агрегатів, у яких функціональне навантаження все більше переноситься від механічних до електронних та комп'ютерних компонентів. Однак, незважаючи на загальну тенденцію до спрощення кінематичних ланцюгів та глибоку інтеграцію механічної та електротехнічної частини з елементами силової електроніки, мікроелектроніки та мікропроцесорними системами керування, все ще існують певні групи технологічного обладнання, у яких реалізація складних траєкторій руху робочих органів за допомогою відповідних механізмів є більш ефективною та економічно виправданою.

Зокрема, можна відмітити щонайменше два типи механізмів, що забезпечують у технологічних машинах реалізацію складних траєкторій виконавчого органу виключно за рахунок механічної складової – кулачкові та шарнірно-важільні.

Разом із незаперечними перевагами кулачкових механізмів, головним недоліком використання їх в якості механізмів приводу робочих органів є те, що при контакті кулачка з роликом за високої швидкості їх

відносного руху, ці механізми не довговічні. Так, частота обертання кулачкових механізмів [1], які мають силове замикання пружиною, не може перевищувати 250 об/хв, з пазовими кулачками – не більше 500 об/хв, з контркулачками – не більше 1000 об/хв. Тому кулачкові механізми не можуть бути використані на технологічних машинах, робочі швидкості яких становлять 1000 об/хв і вище.

Для проєктування високошвидкісного технологічного обладнання, більш ефективним є застосування шарнірно-важільних механізмів, які мають ряд беззаперечних переваг, у порівнянні з кулачковими.

Основним недоліком шарнірно-важільних механізмів є складність точного відтворення необхідного закону руху робочих органів [2]. Аналіз літератури [1–4] показує, що забезпечення необхідного закону переміщення, включаючи й зупинки та вистоювання робочих органів при визначених кутах повороту головного валу машини, вимагає ускладнювати шарнірно-важільні механізми, збільшуючи число їх рухомих ланок. Для реалізації необхідних законів руху робочих органів машини застосовують механізми з двома і навіть трьома ведучими кривошипами, які мають кратне співвідношення кутових швидкостей. Отже, складність законів переміщення органів приводить до створення складних та громіздких механізмів, які важко піддаються уніфікації, а це в свою чергу приводить до збільшення вартості та зменшення надійності технологічного обладнання.

Перед конструкторами стоїть задача розроблення таких механізмів приводу робочих органів, які забезпечували б простоту і малогабаритність машини при передачі руху у будь-якому напрямку без зниження точності передачі і створювали передумови до універсалізації механізмів і машин.

Виклад основного матеріалу

Відомо [5], що зубчасто-важільні механізми забезпечують перетворення рівномірного руху вхідної ланки, зазвичай обертового, у зворотно-поступальний або коливальний рух вихідної ланки, що відповідає характеру переміщення робочих органів технологічних машин.

Встановлено [1, 5, 6], що точки сателітів планетарних та диференціальних зубчасто-важільних механізмів описують так звані сателітні криві, а саме різного виду гіпо- та епіциклоїди. Якщо з сателітом зв`язати виконавчий орган машини, то, проєктуючи відповідним чином механізм, можливо надати виконавчому органу машини рух по певній траєкторії. На сателіті можна розмістити і декілька робочих органів: в цьому випадку можливо отримати більш складні траєкторії, які складаються з різних відрізків. Наведені особливості зубчасто-важільних механізмів є суттєвими для реалізації вимог до механізмів технологічних машин, для яких характерна складність і різноманітність діаграм переміщень робочих органів.

Крім того, залежно від виду сателітної кривої [5], відтвореної планетарним механізмом, та геометричних параметрів приєднаної структурної групи, можливо отримати механізми, в яких вихідна ланка має декілька наближених вистоювань всередині кінематичного циклу, які розташовані в ньому визначеним чином, що задовольняє умову забезпечення вистоювання певної тривалості, у відповідності до заданих діаграм переміщень робочих органів.

Траєкторії руху точок сателітів планетарних механізмів покладені в основу створення ряду механізмів (рис. 1), запропонованих в роботі [6]. Механізми на рис. 1 а, в створені на базі двоступеневих планетарних зубчастих механізмів з зовнішнім зачепленням, а механізми на рис. 1 б, в створені на базі планетарних зубчастих передач з внутрішнім зачепленням.

Найбільш широкого використання набули планетарні механізми з внутрішнім зачепленням, так як форма сателітних кривих, отриманих за допомогою цих механізмів, є найбільш прийнятною для відтворення різноманітних діаграм переміщень робочих органів технологічного обладнання. Але в роботі [5] наголошено, що внутрішнє зачеплення через складність його виготовлення та ряду обмежень на параметри коліс використовують зрідка і звичайно замінюють двома колесами з зовнішніми зачепленнями. Такий триколісний механізм кінематично подібний до двоколісного з внутрішнім зачепленням коліс і не має його недоліків.

Конструктивні рішення деяких механізмів виконавчих органів технологічного обладнання, також базуються на використанні різних видів сателітних кривих та призначені для перетворення рівномірного обертового руху ведучої ланки в коливальний, нерівномірний обертовий рух або рух замкненою траєкторією веденої ланки (рис. 2).

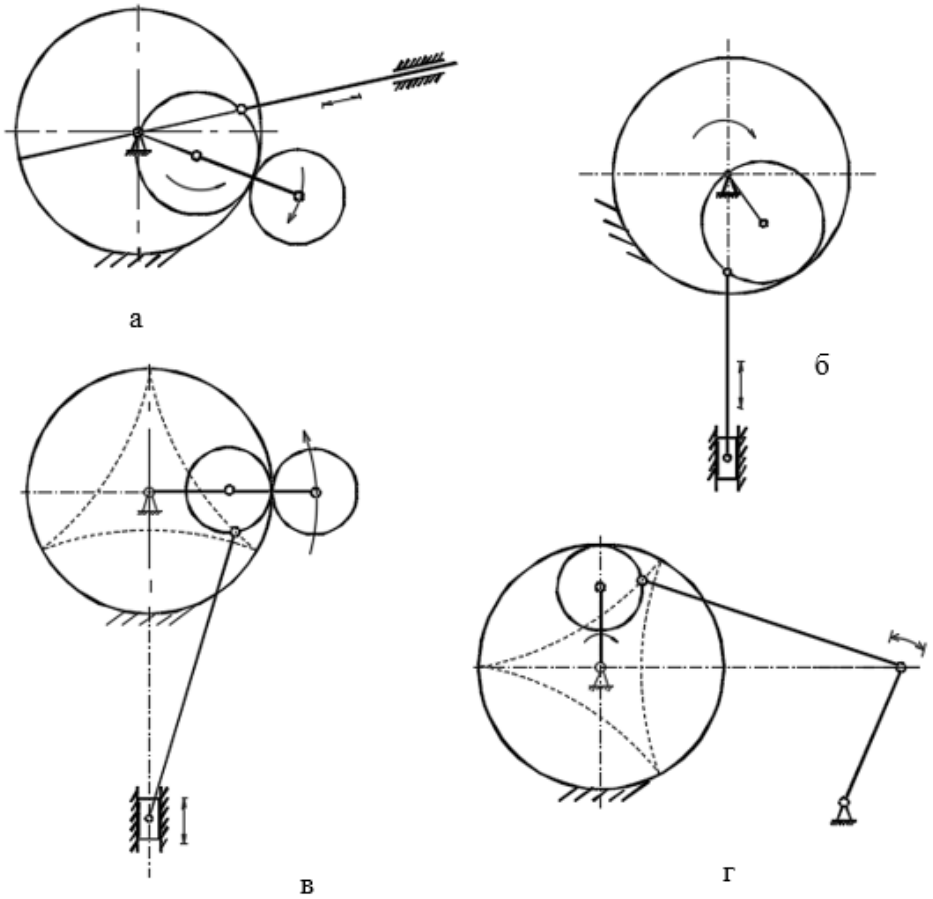


Рис. 1. Зубчасто-важільні планетарні механізми: а - направляючий механізм; б - направляючий механізм преса; в - механізм з зупинкою вихідної ланки; г - механізм з зупинкою коромисла

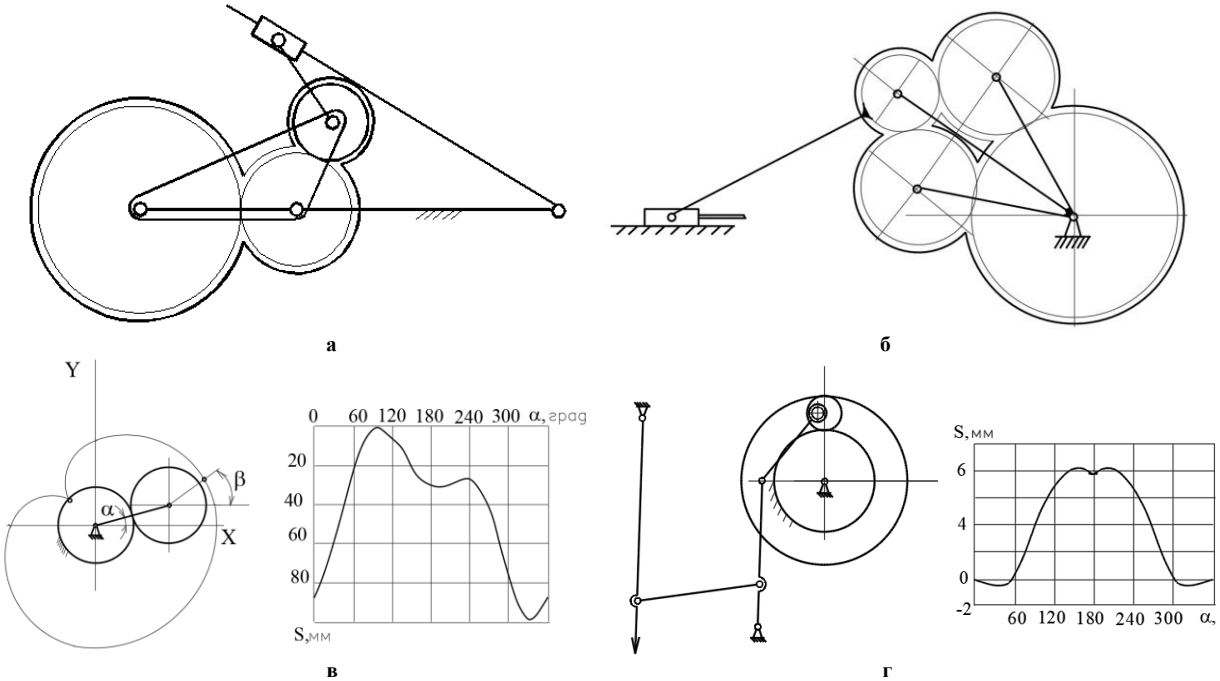


Рис. 2. Зубчасто-важільні механізми: а - механізм з коливальним рухом вихідної ланки; б - механізм приводу рапір ткацького станка типу АТПР; в - планетарний механізм ниткопритягувача швейної машини; г - планетарний механізм відхилення рамки швейної машини

Таким чином, встановлені широкі можливості використання зубчасто-важільних механізмів при перетворенні рівномірного обертового руху ведучої ланки в зворотно-поступальний, коливальний, нерівномірний обертовий або рух по складній замкненій траєкторії. За допомогою зубчасто-важільних механізмів можливо отримати рух веденої ланки з наближеним вистоюванням, розміщеним різним чином в межах кінематичного циклу. Використання сателітних кривих планетарних механізмів у поєднанні з важільними механізмами дозволяють отримати широкий спектр траєкторій руху виконавчих органів.

Але використання сателітних кривих в механізмах робочих органів деяких технологічних машин, розміри переміщень яких лежать в межах 5–30 мм, пов`язано з рядом обмежень. Використання сателітних кривих відомих механізмів дозволяє отримати переміщення виконавчих органів не менше 50 мм, зменшення цієї межі веде за собою до зменшення геометричних параметрів зубчастих планетарних механізмів, що приводить до неможливості забезпечення технологічних зусиль, або до ускладнення важільної частини зубчасто-важільних механізмів. Розробка планетарних механізмів, які забезпечать необхідні розміри сателітних кривих, дозволить створити зубчасто-важільні механізми, траєкторії руху виконавчих органів яких задовольнять закони переміщення робочих органів необхідних розмірів.

Для вирішення задачі зменшення розмірів сателітних кривих, за умови забезпечення технологічних зусиль, потрібно шукати принципово нові конструктивні рішення зубчасто-важільних механізмів. При цьому потрібно прагнути простоти та малогабаритності машин при передачі руху в любому напрямку без зниження точності передачі, що сприяло б універсалізації механізмів і машин. Тому на першому етапі вирішення поставленої задачі потрібно сформулювати принципи формування структури універсальних зубчасто-важільних механізмів робочих органів технологічних машин.

В зубчасто-важільних механізмах періодичним рухом вихідної ланки в якості початкової складової частини використовують трьохланкові зубчасто-важільні механізми [5], які складаються з двох зубчастих коліс, що входять в зачеплення, та ланки, яка забезпечує це зачеплення. При цьому вимагається, щоб точка на зубчатому колесі, яке не пов’язане зі стійкою і виконує складний рух, описувала плоску або просторову криву, близьку до заданої. В простому випадку в якості заданої може бути прийнята сферична крива, пряма лінія, або дуга кола. Таким чином на першому етапі проєктування зубчасто-важільного механізму з періодичним рухом вихідної ланки стоїть завдання проєктування плоского або просторового механізму планетарного типу для наближеного відтворення сфери, прямої лінії або дуги кола.

На другому етапі проєктування зубчасто-важільних механізмів стоїть питання підбору геометричних параметрів механізму для відтворення вихідною ланкою заданої діаграми переміщень [1, 5–7].

Аналіз літератури показав, що динамічні дослідження зубчасто-важільних механізмів стосуються окремих питань, які виникають при використанні згаданих механізмів в тих чи інших системах. В роботі [5] відмічено, що зубчасто-важільні механізми мають хороші динамічні характеристики в порівнянні з характеристиками інших видів періодичного руху, але які саме не конкретизується. Тому виникає потреба дослідити динамічні характеристики цих механізмів за аналогами і зробити висновки стосовно можливості їх застосування в механізмах робочих органів високошвидкісних технологічних машин.

Необхідність таких досліджень обумовлена тим, що використання зубчасто-важільних механізмів, зокрема важільних, веде до переходу від нижчих кінематичних пар до вищих.

Практика експлуатації механізмів, що мають вищі кінематичні пари показала обмеженість їх використання, що стосується швидкості. Таке твердження справедливе для більшості механізмів з вищими кінематичними парами – кулачкові механізми, фрикційні, храпові, мальтійські та ін.

Тому було б доцільним розглянути певні моменти використання зубчасто-важільних механізмів приводу робочих органів високошвидкісних, які в першу чергу стосуються переходу від нижчих кінематичних пар (шарнірно-важільних механізмів), до вищих (зубчастої частини зубчасто-важільних механізмів).

В ряді робіт [1, 7–9] показано, що зубчасті передачі мають суттєві переваги, а саме:

- малі розміри при передачі значної потужності;
- високий ККД (до 0,99);
- велику довговічність та надійність;
- постійність передаточного числа (при круглих колесах);
- простоту експлуатації;
- можливість використання в широкому діапазоні потужностей (до 40 000 кВт), швидкостей (до 150 м/с) та передаточних відношень.

До недоліків зубчастих передач можна віднести:

- необхідність високої точності виготовлення;
- шум при великих колових швидкостях.

На сучасному етапі розвитку машинобудування простежується тенденція використання високотехнологічного обладнання. Отже виготовлення зубчастих передач з достатнім ступенем точності не може бути перешкодою для створення зубчасто-важільних механізмів робочих органів.

Для зменшення шуму необхідно передбачити установку машин на звукоізоляційні прокладки, використати шумозахисні та шумовбираючі кожухи, добре підганяти деталі машини, застосовувати косозубі і шевронні зубчасті колеса, використовувати матеріали на полімерній основі, що значно знижують шум і підвищують зносостійкість.

Висновки

В результаті аналізу методів досліджень та існуючих розробок з проєктування зубчасто-важільних механізмів встановлені їх особливості, які дозволили визначити принципи формування структур універсальних зубчасто-важільних механізмів приводу робочих органів технологічних машин:

1. На першому етапі проєктування необхідно визначити структуру зубчасто-важільного механізму

планетарного типу для відтворення сателітних кривих, що забезпечать необхідний закон руху вихідної ланки технологічних машин.

2. На другому етапі проєктування - розробити структуру приєднаної важільної групи, за рахунок якої можливо отримати механізм, вихідна ланка якого відтворює задану діаграму переміщень робочих органів технологічних машин.

3. Етапи проєктування механізму провести за умови забезпечення можливості відтворення різних діаграм переміщень робочих органів шляхом мінімальних змін геометричних параметрів при збереженні структури зубчасто-важільного механізму.

Література

1. Кіницький Я. Т. Теорія механізмів і машин / Я. Т. Кіницький. – Київ : Наукова думка, 2002. – 660 с.

2. Смутко С. В. Перспективи створення основов'язальної машини з високим ступенем уніфікації механізмів робочих органів / С. В. Смутко. // Вісник технологічного університету Поділля. – 2000. – № 3. – С. 89–33.

3. Неймак В. С. Кінематичні дослідження одноступеневого зубчато-важільного планетарного механізму за допомогою системи параметричного моделювання / В. С. Неймак, Г. Б. Параска, С. В. Смутко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2005. – № 6. – С. 28–32.

4. Неймак В. С. Аналітичні дослідження одноступеневого зубчасто-важільного планетарного механізму / В. С. Неймак, Г. Б. Параска, С. В. Смутко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2008. – № 2. – С. 96–99.

5. Карелин В. С. Проектирование рычажных и зубчато-рычажных механизмов : справочник / В. С. Карелин. – М. : Машиностроение, 1986. – 184 с.

6. Артоболевский И. И. Механизмы в современной технике : справочное пособие. В 7 томах. Т. 4: Зубчатые механизмы / И. И. Артоболевский. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. – 529 с.

7. Ткаченко В. А. Планетарные механизмы (оптимальное проектирование) / В. А. Ткаченко. – Харьков : ХАИ, 2003. – 446 с.

8. Прикладна механіка / [В. М. Булгаков, В. В. Адамчук, О. М. Черниш та ін.]. – Київ : Центр учбової літератури, 2020. – 906 с.

9. Арендаренко В. М. Теорія механізмів і машин в прикладах і задачах : навчальний посібник / В. М. Арендаренко, І. А. Дудніков. – Полтава, 2020. – 176 с.

References

1. Kinytskyi Ya. T. Teoriia mekhanizmiv i mashyn / Ya. T. Kinytskyi. – Kyiv : Naukova dumka, 2002. – 660 s.

2. Smutko S. V. Perspektyvy stvorennia osnovoviazalnoi mashyny z vysokym stupenem unifikatsii mekhanizmiv robochykh orhaniv / S. V. Smutko. // Visnyk tekhnolohichnoho universytetu Podillia. – 2000. – № 3. – S. 89–33.

3. Neimak V. S. Kinematychni doslidzhennia odnostupenevoho zubchato-vazhilnoho planetarnoho mekhanizmu za dopomohoiu systemy parametrychnoho modeliuvannia / V. S. Neimak, H. B. Paraska, S. V. Smutko // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2005. – № 6. – S. 28–32.

4. Neimak V. S. Analitychni doslidzhennia odnostupenevoho zubchasto-vazhilnoho planetarnoho mekhanizmu / V. S. Neimak, H. B. Paraska, S. V. Smutko // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2008. – № 2. – S. 96–99.

5. Karelin V. S. Proektirovanie rychazhnyh i zubchato-rychazhnyh mehanizmov : spravochnik / V. S. Karelin. – M. : Mashinostroenie, 1986. – 184 s.

6. Artobolevskij I. I. Mehanizmy v sovremennoj tehnike : spravochnoe posobie. V 7 tomah. T. 4: Zubchatye mehanizmy / I. I. Artobolevskij. – M. : Nauka. Glavnaja redakcija fiziko-matematicheskoj literatury, 1980. – 529 s.

7. Tkachenko V. A. Planetarnye mehanizmy (optimal'noe proektirovanie) / V. A. Tkachenko. – Har'kov : HAI, 2003. – 446 s.

8. Prykladna mekhanika / [V. M. Bulhakov, V. V. Adamchuk, O. M. Chernysh ta in.]. – Kyiv : Tsentr uchbovoi literatury, 2020. – 906 s.

9. Arendarenko V. M. Teoriia mekhanizmiv i mashyn v prykladakh i zadachakh : navchalnyi posibnyk / V. M. Arendarenko, I. A. Dudnikov. – Poltava, 2020. – 176 s.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-294-299
УДК 027.021:021.4:004]:378.4:62(477.83-25)

СОКІЛ МАРІЯ
Національний університет «Львівська політехніка»
https://orcid.org/0000-0003-3352-2131
e-mail: mariia.b.sokil@lpnu.ua
ЗВОРСЬКИЙ АНДРІЙ
Національний університет «Львівська політехніка»
https://orcid.org/0000-0003-3530-7726
e-mail: andrii.p.zvorskyi@gmail.com

ЕЛЕКТРОННІ РЕСУРСИ В НАУКОВО-ТЕХНІЧНІЙ БІБЛІОТЕЦІ ЛЬВІВСЬКОЇ ПОЛІТЕХНІКИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗРУЧНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ КОРИСТУВАЧІВ

У роботі розглядаються позитивні тенденції, які виникли при обслуговуванні користувачів бібліотеки і пов'язані з наданням доступу до нових електронних ресурсів в Науково-технічній бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (НТБ). Як наслідок процесу трансформації сервісів бібліотеки з традиційної у цифрову форму спостерігаються помітні зміни як зі сторони працівників, так і зі сторони користувачів. Ці нововведення дозволяють оптимізувати процеси пов'язані з задоволенням інформаційних потреб як працівникам, так і користувачам, оскільки дають можливість зекономити час та отримати бажаний результат затрачаючи менші зусилля та ресурси. Автори також звертають увагу на необхідність підготовки користувачів до використання електронних послуг бібліотек та розвитку культури електронної комунікації серед її персоналу. У підсумку статті зроблено висновок про те, що використання електронних ресурсів у бібліотеках дозволяє забезпечити користувачам швидкий та зручний доступ до необхідної інформації та послуг, що підвищує ефективність роботи закладу та задоволеність користувачів

Ключові слова: *інтернет-ресурси, інформаційні ресурси, популяризація, електронні послуги, бібліотечні ресурси.*

SOKIL MARIIA, ZVORSKYI ANDRII
Lviv polytechnic national university

ELECTRONIC RESOURCES IN THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL LIBRARY OF LVIV POLYTECHNIC TO ENSURE USER CONVENIENCE AND EFFICIENCY

The paper explores the impact of electronic services on library users. The paper highlights the importance of implementing electronic services in libraries, which allows users to conveniently and efficiently obtain the necessary information and services. The article presents the results of studies that confirm that electronic services enable users to quickly and efficiently find the required information, access electronic resources, order documents, and other library services. The authors also draw attention to the need to prepare users to use electronic library services and to develop a culture of electronic communication among library staff. The article concludes that using electronic services in libraries allows users to have quick and convenient access to the necessary information and services, increasing the library's efficiency and user satisfaction.

Keywords: *Internet resources, information resources, popularization, electronic services, library resources.*

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

В сучасних умовах одним з найцінніших ресурсів є інформація. В ситуації практично безперешкодного доступу до інформаційних ресурсів мережі Інтернет отримати інформацію на довільну тематику не є проблемою. Звісно, у даній публікації обмежимось інформацією навчального та наукового характеру. У світі існує багато постачальників інформації, які надають доступ на безкоштовній чи платній основі. Проблеми, з якими зіткнеться користувач – доступність та достовірність джерела. Тому бібліотека, яка є по своїй суті менеджером інформаційних ресурсів, може допомогти користувачеві вирішити ці проблеми. Вирішення лежить в площині експертного досвіду працівників бібліотеки (а це виходить за межі теми публікації), а також інструментів, які цей досвід можуть перетворити у практичний результат. Такі інструменти розроблені та реалізовані у програмних рішеннях: автоматизованих бібліотечних системах, спеціалізованих веб-сервісах. Вони дозволяють отримати доступ до інформації з будь-якого місця з підключенням до Інтернету. Це особливо корисно для тих, хто живе в віддалених місцях чи має обмежені можливості для поїздок до бібліотек або для тих, хто має фізичні обмеження. Забезпечують швидкий доступ до інформації та можуть бути використані безпосередньо з дому або робочого місця. Це дозволяє економити час та зусилля на пошуки та доступ до інформації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Завдяки існуванню кіберпростору перед людством відкрились нові можливості, нові горизонти. Якщо кілька десятиліть тому центром інформації була бібліотека, то тепер все змінилось – центром стала пошукова система у мережі Інтернет. І це нормально, що змінюється суспільство. Змістився центр інформації, змінились інструменти її отримання та опрацювання і відповідно інформаційні потоки. Змінитись повинна і бібліотека. Наприклад у 2010 році Бібліотека конгресу США отримала доступ до публічних твітер-повідомлень та у результаті до її архівів було поміщено 160 млрд повідомлень із 2006

року. Оскільки з'вився новий інформаційний потік – користувачі повинні вміти з ним працювати і місія бібліотеки знайти та надати інструмент роботи із цим потоком.

Як показує аналіз світового досвіду роботи бібліотек [6, 4], для ефективнішої роботи в напрямку задоволення інформаційних потреб користувачів потрібно перелаштовувати їх роботу на онлайн-сервіси та ресурси. Така стратегія дасть можливість оптимізувати свою роботу як працівникам так і користувачам.

Обґрунтування доцільності запровадження електронних сервісів та ресурсів в бібліотеках у своїх працях описували зокрема: Андрухів А. [1], Чумак Є. [2], Білоус С. [3].

Сучасний розвиток автоматизації бібліотечних процесів у вищих навчальних закладах проходить досить швидкими темпами. Впровадження комп'ютерних та телекомунікаційних технологій в роботу бібліотек є вже не модою, а нагальною вимогою до підвищення продуктивності та якості бібліотечно-інформаційного обслуговування на основі створення, використання та інтеграції електронних ресурсів, а також автоматизації бібліотечних процесів. Створені електронні каталоги та масиви цифрових документів разом із засобами телекомунікацій необхідні для виконання основного завдання – забезпечення доступу користувачів до різних типів інформаційних ресурсів бібліотек при мінімальних загальних витратах. Комплектування та організаційні процеси бібліотеки ЗВО відрізняються від бібліотек інших типів за рахунок зв'язку із навчальним процесом. До таких особливостей можна віднести:

- цільове комплектування фондів (в основному для навчального процесу);
- циклічність навчального процесу призводить до циклічності книговидачі (пікові навантаження книговидачі відбуваються на початку семестру і в кінці – повернення літератури);
- відносна стабільність кількості користувачів бібліотеки (кількість випускників приблизно рівна кількості вступників);
- постійний моніторинг показників книгозабезпеченості для своєчасної закупівлі чи списання літератури, що використовується в навчальному процесі.

Бібліотека вищого навчального закладу займає важливе місце при підготовці майбутніх кваліфікованих фахівців різних галузей, забезпечуючи їх необхідними інформаційними ресурсами. Саме на це орієнтовані всі її технологічні процеси. Забезпечення інформаційного супроводу із застосуванням сучасних інформаційних технологій дозволить:

- підсилити інформаційно-управлінську роль бібліотеки;
- активізувати взаємозв'язки навчального процесу;
- забезпечити принцип однократного введення та опрацювання даних;
- забезпечити персональну відповідальність за якість цієї інформації;
- зменшити кількість помилок під час трансформації чи передачі інформації.

Формулювання мети статті

Метою роботи є дослідження впливу нових електронних ресурсів запроваджених в Науково-технічній бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» на кількість оброблених інформаційних запитів та задоволення інформаційних потреб користувачів.

Виклад основного матеріалу

У процесі перехідного періоду від інформаційного суспільства до суспільства знань, можна виділити три основних ресурси, якими варто навчитися розпоряджатися, щоб досягнути успіху: час, інформація, технічні рішення. Правильне володіння кожним з цих ресурсів може забезпечити можливість пристосуватися до будь-якої предметної галузі та досягти в цьому керунку певного успіху. Якщо брати до розгляду академічну спільноту, то бібліотека дає можливість науковцям раціонально використовувати свої ресурси для полегшення роботи та забезпечити механізм їх раціональної та оптимальної взаємодії. Власне для того, щоб зекономити час як працівників бібліотеки, так і користувачів, в НТБ Львівської політехніки впровадили ряд ресурсів та послуг. Поряд з традиційними послугами все більшої популярності набувають послуги, які можна отримати в дистанційному форматі. На це є ряд своїх причин:

- економія часу.
- проблеми з доступом до фізичних приміщень та ресурсів пов'язані з нестабільною ситуацією в країні.
- задоволення інформаційних запитів користувача можливо реалізувати не покидаючи робочого місця (як для читачів, так і для працівників), тобто не потрібно бігати бібліотекою у пошуках потрібного кабінету.

На рис. 1 представлені ресурси та послуги для користувачів, якими можна скористатися віддалено, з свого робочого місця.

Оскільки НТБ є академічною бібліотекою, основними користувачами тут є працівники та студенти університету, які використовують її ресурси для написання наукових робіт, курсових робіт, індивідуальних завдань, тощо. І власне виходячи з цього послуги можна розділити на 2 групи: електронні ресурси та послуги з доступу до літератури та супровідні послуги. В даній роботі розглядаються лише ресурси орієнтовані на підтримку навчально-наукового процесу.

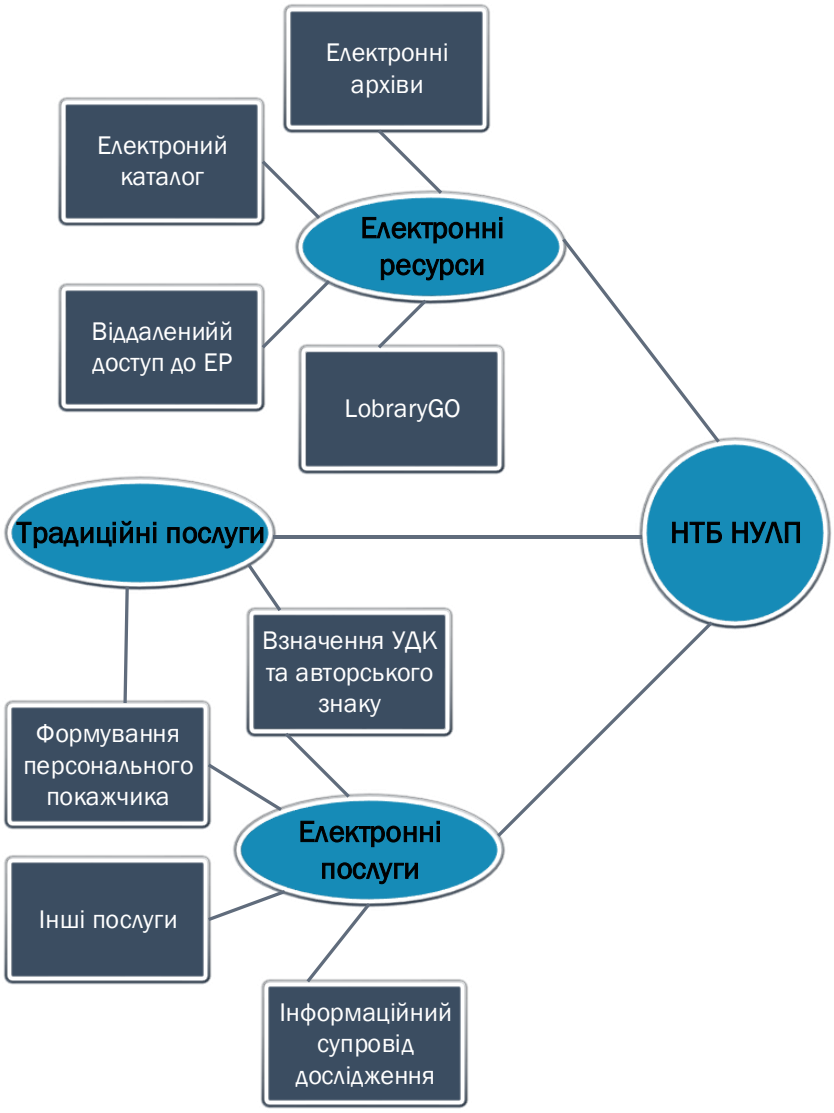


Рис. 1. Класифікація послуг, які надає НТБ НУЛП

Електронні ресурси доступу до літератури

1. Електронний науковий архів (https://ena.lpnu.ua)

Електронний архів наукових публікацій (ЕНА) – це відкритий репозиторій, що містить наукові опубліковані матеріали з 2000 року. Відкритий означає, що матеріали туди може депонувати будь хто після реєстрації, а працівники бібліотеки перевірять коректність внесення даних.

Робота над розгортанням ресурсу та його наповненням почалася ще у 2006 році. На початковому етапі туди потрапляли документи (статті, тези конференцій, монографії, навчальна література) переважно працівників університету, а це кілька тисяч документів. На даний час вже є понад 50000 документів. Логічна структура документів ЕНА зображена на рис. 2 і складається з 3 основних частин. Для зручнішого користування та пошуку сформована певна логічна структура електронного архіву.

Архів працює на програмній платформі Dspcae (https://dspace.org). Це дає можливість легкого та зручного доступу, пошуку, розміщення документів з боку користувача, зручного адміністрування та налаштування з боку адміністраторів системи.

Архів надає доступ до повнотекстових документів. Пошук здійснюється за навігаційною складовою і за ключовими словами – датою публікації, чи ISSN та ін. Тобто створені всі умови, щоб все ж таки користувач отримав хоч якусь інформацію в напрямку досліджень який його цікавить.

Особливою перевагою даного ресурсу є те, що знайдені електронні документи можна не тільки переглядати, а також завантажувати на власний ПК для подальшого використання. Причому, оскільки в архів потрапляють вже опубліковані документи (які пройшли етап рецензування та публікації у виданнях), в їх достовірності та правдивості можна не сумніватися.

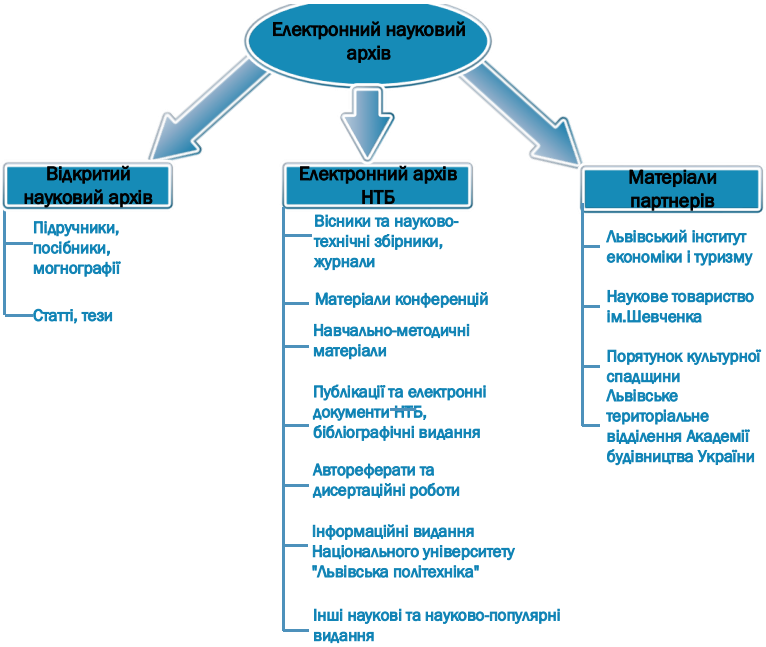


Рис. 2. Структура електронного архіву НУЛП

2. Електронний каталог НТБ НУЛП (https://opac.lpnu.ua)

В 2019 році в НТБ була впроваджена автоматизована бібліотечна інформаційна система Koha. Завдяки цьому користувачі отримали нові можливості для доступу до ресурсів бібліотеки. Логічний і простий інтерфейс електронного каталогу, який є частиною системи, дає можливість користувачам швидко та якісно здійснювати пошук. Але основним модулем який викликає особливе зацікавлення є Електронний формуляр. Він дає можливість замовити потрібну літературу в дистанційному форматі, заповнивши відповідну форму читацької вимоги. Після цього запит потрапляє на опрацювання до працівників бібліотеки, які в свою чергу повідомляють користувача коли і де можна відібрати замовлення. Цей сервіс набув широкої популярності серед користувачів. Завдяки цьому суттєво економиться час користувача. Недоліком є те, щоб забрати фізичний примірник книжки все ж таки доведеться йти до бібліотеки (деякі бібліотеки України надсилають замовлення через Нову Пошту за кошт замовника).

3. Передплачені електронні ресурси.

Бібліотека здійснює передплату електронних баз даних. Традиційно – доступ до них надається із кампусу університету. Для більш ефективної роботи із ресурсами у бібліотеці був впроваджений проксі-сервер із авторизацією. Кожен працівник/студент може доступитись до цих ресурсів з будь-якої точки світу. На рис. 3 представлено перелік передплачених електронних ресурсів, станом на січень 2023 року. Слід зазначити що цей ресурс є достатньо динамічним і перелік постійно змінюється.

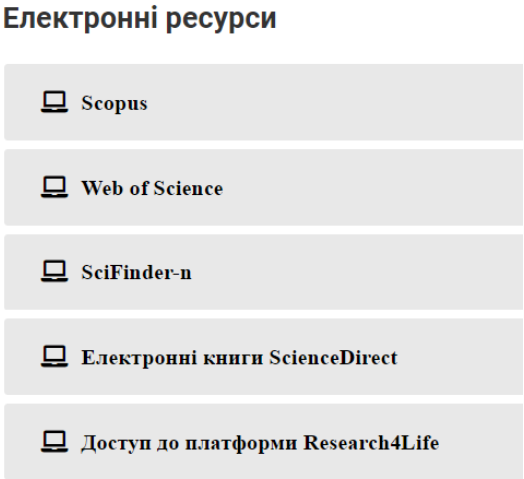


Рис. 3. Електронні ресурси НТБ (станом на кінець 2022 року)

4. Віртуальна бібліотека LibraryGO (https://librarygo.lpnu.ua).

Основне завдання цього ресурсу – надання користувачеві доступ до електронних версій оцифрованих видань, що знаходяться у фонді НТБ. На відміну від документів електронного архіву, в даному випадку читати документ можна тільки з екрану свого пристрою і нема можливості його завантаження. На даний момент в розпорядженні читачів понад 200 книг. Проте їх кількість поступово збільшується пропорційно до темпів оцифрування. Даний ресурс є достатньо популярним серед користувачів бібліотеки,

оскільки дає можливість переглядати літературу з свого робочого місця безпосередньо. І не потрібно затрачати зайвих зусиль та часу, щоб добратися до читального залу чи відділу абонементу. Хоча ресурс звичайно не є досконалий, проте завдяки ньому кількість користувачів бібліотеки суттєво збільшилась. Загалом, ресурс є доступний для усіх – будь-хто може отримати доступ до метаданих книги, проте повний доступ до книги може отримати тільки студент та працівник Львівської політехніки.

Наявність електронних ресурсів дозволяє отримати певні переваги як для користувачів, так і для працівників:

Для користувачів	**Для працівників**
Отримати результат за меншу кількість кроків	Економія часу на обслуговування користувача при заповненні електронного формуляру
Отримати результат за менший час	Не потрібно залучати працівників для пошуку літератури з допомогою електронного каталогу
Електронний документ залишається в користувача на постійній основі, не потрібно продовжувати термін дії читацького квитка.	Не потрібно залучати додаткових працівників для обслуговування користувача

Тобто можна зробити висновок, що в зальному НТБ обробляє більшу кількість запитів та інформаційних потреб користувачів залучаючи ті самі ресурси.

Загалом, якщо говорити про оптимізацію та критерії – тут важко говорити про якісь конкретні функціональні залежності, оскільки важко їх описати математичними співвідношеннями. Можна лише спробувати оцінити відносні показники обробки інформаційних запитів для кожного з описаних електронних ресурсів. І вже виходячи з конкретних чисел аналізувати. На основі зібраних статистичних даних можна оцінити, на скільки змінилася кількість опрацьованих запитів, після надання доступу до нових сервісів:

$$I_E = \frac{P_{EA}}{N_{EA}} + \frac{P_{EK}}{N_{EK}} + \frac{P_{ER}}{N_{ER}} + \frac{P_{LG}}{N_{LG}}$$

Де I_E - показник наданих інформаційних послуг (за рік);

P_{EA}, P_{EK}, P_{ER}, P_{LG} - кількість наданих інформаційних послуг відповідним ресурсом (електронний архів, електронний каталог, віддалені електронні ресурси, LibraryGO);

N_{EA}, N_{EK}, N_{ER}, N_{LG} - кількість документів які є у розпорядженні користувачів у кожному з сервісів.

На рис. 4 представлені графіки зміни обробки інформаційних запитів за останні 5 років.

Рис. 4. Динаміка змін кількості наданих інформаційних послуг за останні 5 років

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В результаті проведеного аналізу було встановлено, що кількість звернень до електронних ресурсів за останній рік збільшилася на 14 %. Це достатньо хороший показник, враховуючи особливості функціонування закладу, а також негативні наслідки, спричинені військовими діями.

Розвиток електронних послуг у бібліотеках є важливою тенденцією в сучасному світі. Бібліотеки стали активно впроваджувати різноманітні інформаційні технології для полегшення доступу до ресурсів, забезпечення комфортної роботи користувачів та розвитку нових форм обслуговування.

Одним з найбільш поширених електронних послуг є електронний каталог бібліотеки. Він дозволяє швидко знаходити книги, журнали, статті та інші ресурси, що є у фонді бібліотеки.

Іншим важливим напрямком розвитку електронних послуг є електронне замовлення та доставка літератури. Користувач може відправити замовлення на книгу онлайн, а потім отримати її в зручний для нього час. Це особливо зручно для тих, хто не має можливості прийти до бібліотеки в робочий час, але цю послугу надають не всі бібліотеки.

Також бібліотеки можуть надавати доступ до електронних ресурсів, таких як бази даних наукових статей, електронні книги та інші цифрові ресурси. Зазвичай такий доступ може бути наданий тільки з місць, що належать до бібліотеки/університету або ж через проксі сервер для віддаленого доступу. Для забезпечення комфортної роботи з цими електронними послугами, бібліотеки можуть надавати безкоштовний доступ до Wi-Fi, комп'ютерів, принтерів та іншого обладнання. Врешті, можна зазначити, що електронні послуги в бібліотеках є важливим кроком у розвитку створення єдиної цифрової бібліотеки України.

Література

1. Андрухів А. Формування та управління фондом електронних документів бібліотеки / А. Андрухів, О. Харгелія // Інформація, комунікація, суспільство : матеріали 7-ї Міжнар. наук. конф. ICS-2017. – Львів, 2017. – С. 320–321.
2. Чумак Є. Трансформація інформаційних ресурсів публічних бібліотек України в сучасних умовах / Є. Чумак // Український журнал з бібліотекознавства ти інформаційних наук. – 2022. – Вип. 10. – С. 12–28.
3. Білоус В. Бібліотечні сервіси на допомогу адаптації університетської науки у глобальний інформаційний простір [Електронний ресурс] / В. С. Білоус // Вимірювання в бібліотеках: оцінка ефективності та якості роботи : матеріали Інтернет-конференції, 6–10 черв. 2017 р., м. Харків / Харків. нац. ун-т радіоелектроніки, Наукова бібліотека. – Режим доступу : http://openarchive.nure.ua/handle/document/3668
4. Lepkowska E. Kilka refleksji na temat bibliotek naukowych i ich działań on-line w czasie pandemii. Bibliotekarz. nr 2. 2021, str. 4-7.
5. Knop U. E-booki w zdalnym dostępie w bibliotekach politechnik w polsce – wybrane oferty w czasie pandemii (lockdownu). Bibliotheca Nostra. nr 1 (59). 2020, s. 33-44.
6. Федушко С. Е-бібліотеки Канади і Словенії / С. С. Федушко, Ю. О. Сєров // Бібліотечний вісник. – 2020. – № 2. – С. 3–9.

References

1. Andrukhiv A. Formuvannia ta upravlinnia fondom elektronnykh dokumentiv biblioteky / A. Andrukhiv, O. Kharheliia // Informatsiia, komunikatsiia, suspilstvo : materialy 7-yi Mizhnar. nauk. konf. ICS-2017. – Lviv, 2017. – S. 320–321.
2. Chumak Ye. Transformatsiia informatsiinykh resursiv publichnykh bibliotek Ukrainy v suchasnykh umovakh / Ye. Chumak // Ukrainskyi zhurnal z bibliotekoznavstva ty informatsiinykh nauk. – 2022. – Vyp. 10. – S. 12–28.
3. Bilous V. Bibliotechni servisy na dopomohu adaptatsii universytetskoi nauky u hlobalnyi informatsiinyi prostir [Elektronnyi resurs] / V. S. Bilous // Vymiriuvannia v bibliotekakh: otsinka efektyvnosti ta yakosti roboty : materialy Internet-konferentsii, 6–10 cherv. 2017 r., m. Kharkiv / Kharkiv. nats. un-t radioelektroniky, Naukova biblioteka. – Rezhym dostupu : http://openarchive.nure.ua/handle/document/3668
4. Lepkowska E. Kilka refleksji na temat bibliotek naukowych i ich działań on-line w czasie pandemii. Bibliotekarz. nr 2. 2021, str. 4-7.
5. Knop U. E-booki w zdalnym dostępie w bibliotekach politechnik w polsce – wybrane oferty w czasie pandemii (lockdownu). Bibliotheca Nostra. nr 1 (59). 2020, s. 33-44.
6. Fedushko S. E-biblioteky Kanady i Slovenii / S. S. Fedushko, Yu. O. Sierov // Bibliotechnyi visnyk. – 2020. – № 2. – S. 3–9.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-300-307
УДК 004.043

ТКАЧИК ОЛЕКСАНДР
Національний університет "Львівська політехніка"
https://orcid.org/0000-0002-0728-4208
e-mail: oleksandr.a.tkachyk@lpnu.ua

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ ДАНИХ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ЦІЛЬОВИХ ГРУП КОРИСТУВАЧІВ НА РИНКУ НЕРУХОМОСТІ

У цій статті проведено неконтрольовану кластеризацію різнотипних даних щодо записів клієнтів із бази даних компанії з нерухомості. Сегментація клієнтів у групи — це практика розподілу клієнтів на певні групи, які відображають схожість між клієнтами в кожному кластері. Однією із задач поділу клієнтів на сегментовані групи є збільшення значущості кожного клієнта для бізнесу. У результаті поділу кожній групі можна буде запропонувати конкретні пропозиції, а також швидше знайти індивідуальний підхід для кожної одиниці певної групи. Це також дозволить допомогти бізнесу задовольнити потреби різних клієнтів та швидше скерувати їх у потрібному напрямку. Ключовим кроком є підготовка датасету для майбутньої кластеризації. Для роботи було взято зріз бази даних із 2000 користувачів, які зацікавлені ринком нерухомості. Після проведення аналізу даних, реалізовано підготовку та нормалізацію даних. Зменшено розмірність даних із допомогою методу PCA. Проведено кластеризацію даних і на їх основі створено та описано цільові групи користувачів.

Ключові слова: k-means, різнотипні дані, кластеризація даних, машинне навчання, ринок нерухомості, навчання без нагляду.

TKACHYK OLEXANDR
Lviv Polytechnic National University

APPLYING DATA CLUSTERING METHODS FOR CREATING TARGETING USER GROUPS FOR REAL ESTATE

In this paper applied unsupervised clustering to a dataset examines the application of k-means clustering to create target user groups for a real estate platform. The goal is to segment the user base into meaningful groups to better understand their preferences and behaviors, and tailor marketing campaigns and product features to the needs of each group. The key step in the application of k-means clustering to real estate data is data preparation. Real estate data can be particularly messy and incomplete, and thus requires careful cleaning and normalization before clustering can be applied. Data preparation includes several key steps, such as removing irrelevant or redundant features, creating new features as feature scaling is also an important step in data preparation. K-means clustering is sensitive to the scale of the data, so features may need to be normalized to ensure that they are on the same scale, handling missing or erroneous data, and scaling or transforming features to ensure they are on the same scale. Dataset of 2000 customers interested in real estate with the various types of data was taken as a basis. Then the data was observed, investigated and based on results it was prepared for clustering by doing data cleaning as irrelevant data or empty data points may include features that do not significantly contribute to the clustering process, data normalization as it is necessary to ensure that all features are on the same scale, feature selection to determine most relevant features for clustering, feature encoding and dimensionality reduction which was achieved through principal component analysis (PCA). By carefully cleaning, normalizing, and selecting relevant features, clustering algorithms such as k-means were applied more effectively and target user groups were identified.

Keywords: k-means, various types of data, data clustering, machine learning, real estate, unsupervised clustering

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

Ринок нерухомості постійно розвивається, вдосконалюється та розширюється. З'являються нові та прогресивні рішення, кількість пропозицій, варіантів та опцій стає все більшою. Станом на сьогодні вже існує багато різноманітних інформаційних систем, Інтернет-ресурсів, порталів та площадок, які акумулюють пропозиції забудовників та дозволяють знайти ту чи іншу нерухомість, у відповідності до побажань. За останні декілька років ті ж Інтернет-ресурси та портали також удосконалились та пропонують клієнтам досить гнучкі системи пошуку нерухомості, реалізовані з допомогою різноманітних фільтрів. Крім цього, системи пропонують клієнтам підписуватись на їхні розсилки, які будуть періодично надсилати ті чи інші пропозиції, керуючись останніми пошуковими запитами клієнтів. Окрім цього, існують компанії які надають можливість клієнту спілкуватись із персональними ріелторами, котрі, на основі побажань, допомагають підібрати необхідну нерухомість і тим самим економлять час клієнта. Як правило, на початкових етапах складається портрет користувача - проводиться збір персональної інформації, вподобання, уточнюються вимоги до пошуку. В подальшому проводиться пошук пропозицій та їх демонстрація клієнту. Впродовж співпраці ріелтор постійно намагається максимально описати портрет клієнта, щоб у майбутньому підібрати оптимальну пропозицію. Цей крок також потрібний і для того, щоб, у разі необхідності, партнер ріелтора міг без проблем перейняти на себе обов'язки та продовжити роботу. Всі ці дані, які утворюють портрет користувача можна аналізувати у рамках деяких моделей, які можуть визначатись певними вхідними регресійними умовами. У свою чергу, регресійні моделі можуть використовуватись для того, щоб передбачити та зрозуміти зв'язки між змінними, спрогнозувати чи оцінити якусь тенденцію. Одним із прикладів може бути попереднє прогнозування портретів користувачів систем продажу та оренди нерухомості для кращого підбору пропозицій та розсилок.

Аналіз досліджень та публікацій

Із постійним розвитком ринку нерухомості, платформи, які пропонують пошук, підбір та пропозиції варіантів також повинні вдосконалюватись та підлаштовуватись під вимоги користувачів і, власне, самого ринку. Вчасне реагування на зміни дозволяє утримати та збільшити клієнтську базу, але саме виявлення тієї чи іншої зміни залишається складним питанням. Необхідно постійно моніторити ринок, слідкувати за зміною поведінки споживачів та враховувати нові побажання. Фактори можуть набувати різних форм і не завжди корелюються між собою. Це може бути, наприклад, еволюція чи зміна мислення користувачів, які з певним часом починають шукати той чи інший елемент інфраструктури (зелені зони, школи із наявністю певних параметрів тощо), або ж зміна підходів до будівництва нерухомості [1]. Зміна цінових пропозицій

також є дуже вагомим та впливовим фактором для платформ ринку нерухомості. В межах лише одного міста ціни можуть відносно швидко та значним чином змінюватись, у відповідності до чинників, які впливають на ці зміни. Цими чинниками можуть бути як макроекономічні параметри, так і локальні зміни, як-от розвиток інфраструктури [2]. Тому, зараз активно залучаються різноманітні моделі машинного навчання та підходи. Якість роботи цих моделей сильно залежить від повноти даних та правильності постановки завдання. Через це наразі не існує єдиного підходу для визначення портрету користувача та підбору пропозицій для нього [3].

Формулювання цілей статті

Метою роботи є процес підготовки та кластеризації масиву різнотипних даних клієнтів для поділу їх на цільові групи для подальшої систематизації подачі пропозицій та цільової розсилки пропозицій.

Виклад основного матеріалу

Датасет складається із 2000 одиниць даних та 11 атрибутів. Атрибути містять у собі різні набори даних, які необхідно структурувати та об'єднати у певні групи. Після завантаження датасету, було проведено поверхневий огляд загальної структури (рис. 1).

```
[4]: user_listing_data.head()
```

[4]:

id	date_of_birth	gender	family_status	kids_count	social_benefits	employment_status	employed_since	net_income	interested_in	search_performed_count
1	2000	male	Single	0	No	Employed	2021	2952.0	Rent	49
2	1962	male	Single	0	No	Unemployed	1982	9519.0	Rent	12
3	1973	male	Married	2	No	Employed	1993	9313.0	Buy	60
4	1959	male	Married	0	Yes	Employed	1980	5341.0	Rent	55
5	1979	female	Married	0	No	Employed	2002	9285.0	Rent	51

Рис. 1. Огляд структури даних

Для того, щоб отримати повне уявлення про те, які кроки потрібно вжити для очищення та підготовки набору даних, необхідно переглянути інформацію про дані (рис. 2).

```
user_listing_data.info()
```

```
<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
Int64Index: 2000 entries, 1 to 2000
Data columns (total 10 columns):
 #   Column                  Non-Null Count  Dtype
---  ------                  --------------  -----
 0   date_of_birth           2000 non-null   int64
 1   gender                  2000 non-null   object
 2   family_status           2000 non-null   object
 3   kids_count              2000 non-null   int64
 4   social_benefits         2000 non-null   object
 5   employment_status       2000 non-null   object
 6   employed_since          2000 non-null   int64
 7   net_income              1942 non-null   float64
 8   interested_in           1876 non-null   object
 9   search_performed_count  2000 non-null   int64
dtypes: float64(1), int64(4), object(5)
memory usage: 171.9+ KB
```

Рис. 2. Інформація про дані

Із наведеного вище зведеного огляду про дані можна зробити наступний висновок:

- Існують пусті значення у деяких полях;
- Існують поля із набором різнотипних даних з типом object, які необхідно буде проаналізувати, згрупувати та декодувати у числові значення.

Для початку необхідно видалити рядки, які містять пусті значення (рис. 3).

```
[9]: user_listing_data = user_listing_data.dropna()
     print("The total number of data-points after removing the rows with missing values are:", len(user_listi
```

```
The total number of data-points after removing the rows with missing values are: 1819
```

Рис. 3. Видалення рядків із пустими значеннями

Далі проводиться створення ряду нових функцій, видалення зайвих атрибутів та конвертація різнотипних значень типу object у числовий для того, щоб можна було краще працювати із даними (рис. 4). Набір функцій наступний:

- Витягування інформації про те, скільки років користувач офіційно працевлаштований;
- Витягування віку користувача;
- Формування кількості людей у сім'ї;
- Формування статусу батьківства.

```
#Feature for deriving gender
user_listing_data["Gender"] = user_listing_data["gender"].replace({"male": 1, "female":2})
#Feature for deriving employment status
user_listing_data["Employment_Status"] = user_listing_data["employment_status"].replace({"Employed": 1, "Unemployed":2})
#Feature for deriving customer interests
user_listing_data["Interested_In"] = user_listing_data["interested_in"].replace({"Rent": 1, "Buy":2})
#Feature for deriving employed since status
user_listing_data["Employed_For"] = 2023 - user_listing_data["employed_since"]
user_listing_data["Employed_For"] = user_listing_data["Employed_For"][user_listing_data["Employed_For"] >= 0]
user_listing_data = user_listing_data.dropna()
#Feature for deriving customers age
user_listing_data["Age"] = 2023 - user_listing_data["date_of_birth"]
#Feature for deriving family size
data["family_status"]=data["family_status"].replace({
    "Married":"Married",
    "Together":"Married",
    "Widow":"Single",
    "Divorced":"Single",
    "Single":"Single",})
user_listing_data["Family_Size"] = user_listing_data["family_status"].replace({"Single": 1, "Married":2}) + user_listing_data["kids_count"]
#Feature pertaining parenthood
user_listing_data["Is_Parent"] = np.where(user_listing_data.kids_count> 0, 1, 0)
# For clarity
user_listing_data=user_listing_data.rename(columns={
    "net_income": "Income",
    "search_performed_count":"Search_Activity"
})
#Dropping some of the redundant features
to_drop = [
    "gender",
    "interested_in",
    "date_of_birth",
    "social_benefits",
    "employed_since",
    "employment_status",
]
user_listing_data = user_listing_data.drop(to_drop, axis=1)
user_listing_data.describe()
```

Рис. 4. Формування нових функцій

Після створення попередньо описаних функцій можна оглянути загальні статистичні характеристики даних (рис. 5).

	kids_count	Income	Search_Activity	Gender	Employment_Status	Interested_In	Employed_For	Age	Family_Size	Is_Parent
count	1824.000000	1824.000000	1824.000000	1824.00000	1824.000000	1824.000000	1824.000000	1824.000000	1824.000000	1824.000000
mean	0.355811	8440.408443	71.314693	1.50932	1.163925	1.428180	28.549890	49.885965	1.718750	0.262061
std	0.667430	3287.230877	49.385224	0.50005	0.370309	0.494951	15.619963	15.554873	0.983885	0.439876
min	0.000000	2330.000000	1.000000	1.00000	1.000000	1.000000	0.000000	21.000000	1.000000	0.000000
25%	0.000000	5574.000000	29.000000	1.00000	1.000000	1.000000	15.000000	36.000000	1.000000	0.000000
50%	0.000000	8157.500000	65.000000	2.00000	1.000000	1.000000	29.000000	50.000000	1.000000	0.000000
75%	1.000000	11329.750000	105.000000	2.00000	1.000000	2.000000	42.000000	63.000000	2.000000	1.000000
max	3.000000	14496.000000	307.000000	2.00000	2.000000	2.000000	58.000000	76.000000	5.000000	1.000000

Рис. 5. Статистичні характеристики моделі

Далі необхідно провести більш детальний огляд певної інформації. Для цього потрібно побудувати графік із обраних підмножин ознак (рис. 6). Графік дозволить візуально проаналізувати наявні дані та провести подальше коригування датасету.

Із графіка видно, що такі дані як стать та зайнятість (працевлаштований чи безробітний) не несуть корисної інформації, тому, при побудові кластерів, вони будуть видалені з загального обсягу інформації. Далі можна провести кореляційний аналіз між функціями (рис. 7).

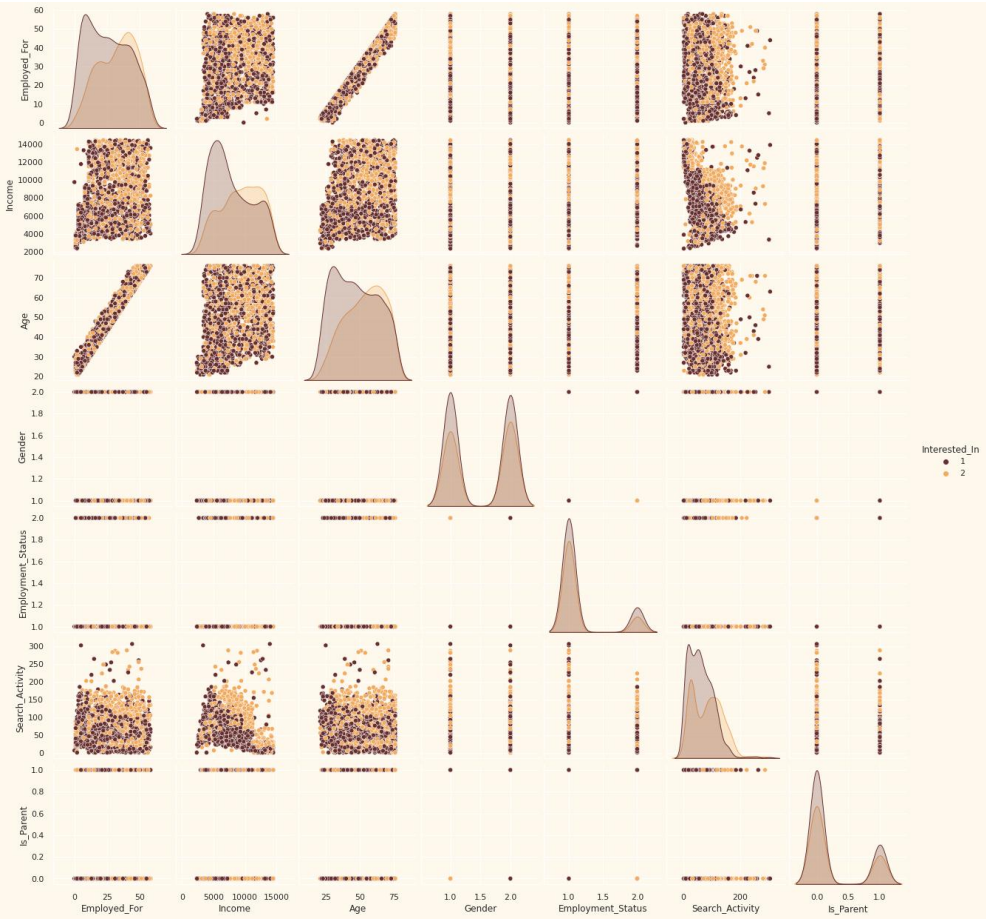


Рис. 6. Графічне відображення даних

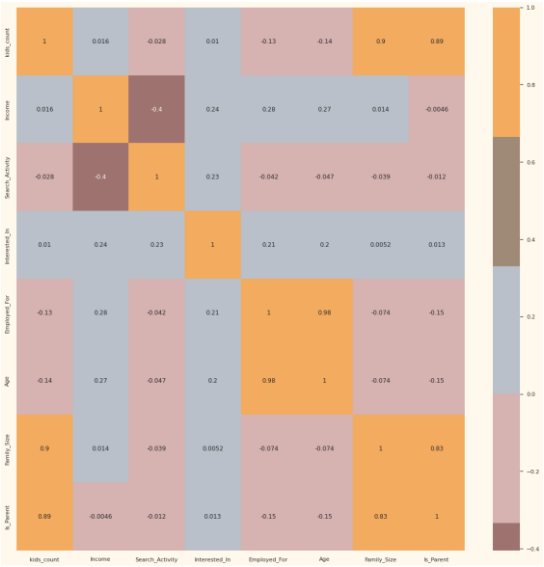


Рис. 7. Інфографіка кореляції між функціями

Кореляційний аналіз показує, що дані відносно чисті, тому ці функції можна додати та використовувати. Попри те, що кореляція між розміром сім'ї та доходом є невисокою, ця функція допоможе точніше описати майбутні кластери. Наступним кроком є препроцесинг даних. Для попередньої обробки застосовуються наступні кроки: мітка, що кодує категоріальні ознаки, масштабування функцій за допомогою стандартного масштабувальника та створення підмножини даних для зменшення розмірності. Після проведення обробки можна оглянути набір даних для подальшого моделювання (рис. 8).

Dataframe to be used for further modelling:

	family_status	kids_count	Income	Search_Activity	Interested_In	Employed_For	Age	Family_Size	Is_Parent
0	0.754790	0.965443	-1.670072	-0.451973	-0.865333	-1.700207	-1.728933	0.285935	1.678064
1	0.754790	-0.533253	0.328206	-1.201391	-0.865333	0.797283	0.714701	-0.730723	-0.595925
2	-1.324872	2.464138	0.265522	-0.229174	1.155624	0.092862	0.007333	2.319250	1.678064
3	-1.324872	-0.533253	-0.943122	-0.330446	-0.865333	0.925359	0.907619	0.285935	-0.595925
4	-1.324872	-0.533253	0.257001	-0.411464	-0.865333	-0.483481	-0.378504	0.285935	-0.595925

Рис. 8. Зразок оброблених даних

Наступним кроком буде зменшення розмірності даних. Ця задача містить у собі багато факторів, на основі яких буде зроблена остаточна класифікація. Всі ці фактори в основному є атрибутами або особливостями. В загальному, чим більше функцій існує в наборі даних, тим важче із ними працювати. Деякі з цих функцій є корельовані, а отже, зайві. Саме для цього зменшення розмірності для вибраних об'єктів є необхідним кроком. Процес зменшення розмірності – це зменшення кількості випадкових величин, що розглядаються, шляхом отримання набору головних змінних. Аналіз головних компонентів (PCA) – це техніка, яка використовується для зменшення розмірності таких наборів даних, підвищуючи інтерпретацію, але в той же час мінімізуючи втрати інформації [5]. Для цієї задачі розмірність буде зменшена до 3 вимірів (рис. 9).

```
#PCA method to reduce dimentions to 3
pca = PCA(n_components=3)
pca.fit(scaled_ds)
PCA_ds = pd.DataFrame(pca.transform(scaled_ds), columns=(["col1","col2", "col3"]))
PCA_ds.describe().T
```

	count	mean	std	min	25%	50%	75%	max
col1	1824.0	5.258951e-17	1.802498	-1.827483	-1.362546	-0.839866	1.171528	5.393486
col2	1824.0	2.337312e-17	1.488450	-3.437680	-1.152381	-0.105609	1.121915	3.574351
col3	1824.0	-1.947760e-17	1.153267	-2.471730	-0.831271	-0.013209	0.852033	4.504870

Рис. 9. Застосування методу PCA

Після зменшення атрибутів до трьох вимірів, можна провести кластеризацію за допомогою методу Elbow для визначення кількості кластерів, які мають бути сформовані (рис. 10). Це алгоритм неконтрольованого навчання, який використовується для вирішення проблем кластеризації в машинному навчанні [6].

```
print('Elbow Method to determine the number of clusters to be formed:')
Elbow_M = KElbowVisualizer(KMeans(), k=10)
Elbow_M.fit(PCA_ds)
Elbow_M.show()
```

Elbow Method to determine the number of clusters to be formed:

Рис. 10. Визначення кількості кластерів

Наведена вище інфографіка показує, що оптимальною кількістю кластерів для цих даних буде 4. Далі буде потрібно створити кластери та згрупувати їх за зазначеними вище характеристиками, використовуючи метод агломеративної кластеризації. Цей метод використовує принцип знизу-вгору,

об'єднуючи пари кластерів, які містять у собі найближчу пару елементів, які ще не належать до спільного кластера. Результат кластеризації зображений на рис. 11.

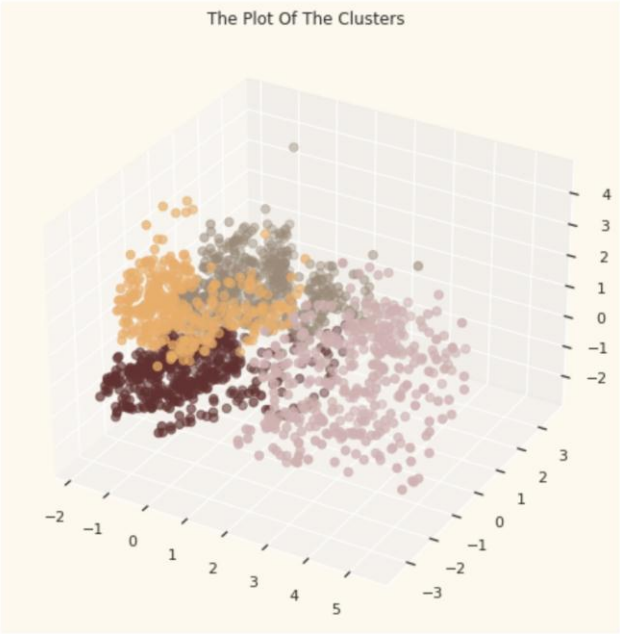


Рис. 11. Сформовані кластери

Оскільки проводиться неконтрольоване кластеризування, відповідно, немає конкретної функції з тегами, яка могла би допомогти оцінити або оцінити створену модель. Основною метою є вивчення закономірностей у сформованих кластерах та визначення характеру структур кластерів. Для цього дані можна оглянути за допомогою дослідницького аналізу даних і на їх основі зробити необхідні висновки. Із допомогою точкової діаграми (рис. 12) можна візуально оглянути профілі кластерів, сформованих на основі пошукової активності та доходів користувача.

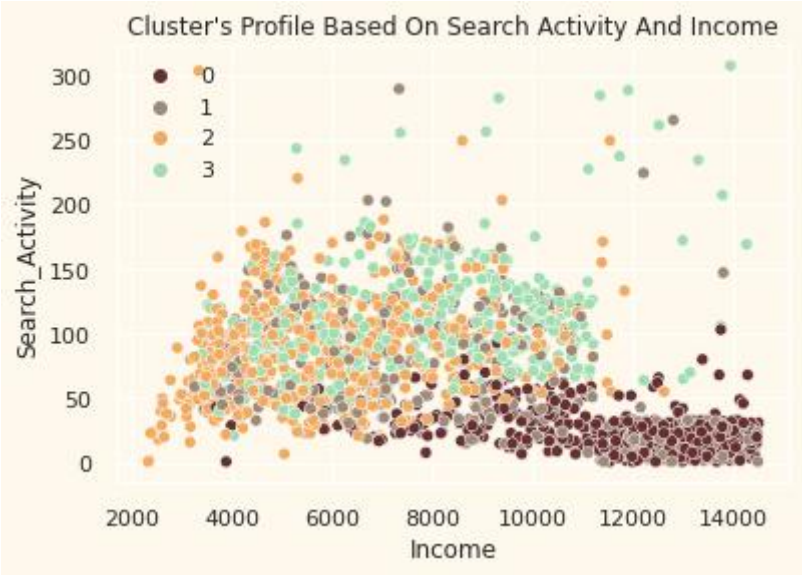


Рис. 12. Точкова діаграма на основі пошукової активності та доходів

Як результат, можна провести попередній опис чотирьох груп кластерів:

- Перша група (0-й кластер): високий дохід і низька пошукова активність;
- Друга група (1-й кластер): в основному високий дохід і дещо вища пошукова активність;
- Третя група (2-й кластер): низький та середній дохід і, відповідно, середня та висока пошукова активність;
- Четверта група (3-й кластер): середній дохід та висока пошукова активність.

Наведені вище дані є досить інформативні, проте, потребують більшого аналізу. Потрібно детальніше зрозуміти, які саме групи користувачів є в цих кластерах. Для цього сформовані кластери будуть візуалізовані із допомогою спільної діаграми (рис. 13). Спільні діаграми корисні для дослідження взаємозв'язку між двома змінними, такими як їх кореляція, кластеризація або розподіл. Поєднуючи різні типи графіків, спільні діаграми можуть надати більш повне уявлення про дані, ніж окремі графіки. Вони також можуть бути настроєні для виокремлення певних особливостей або патернів в даних, таких як викиди, тенденції або кластери [7]. На основі спільних діаграм можна буде дійти висновку про те, яка група може бути цільовою, а також дізнатись, хто потребує більше уваги з боку маркетингової команди.

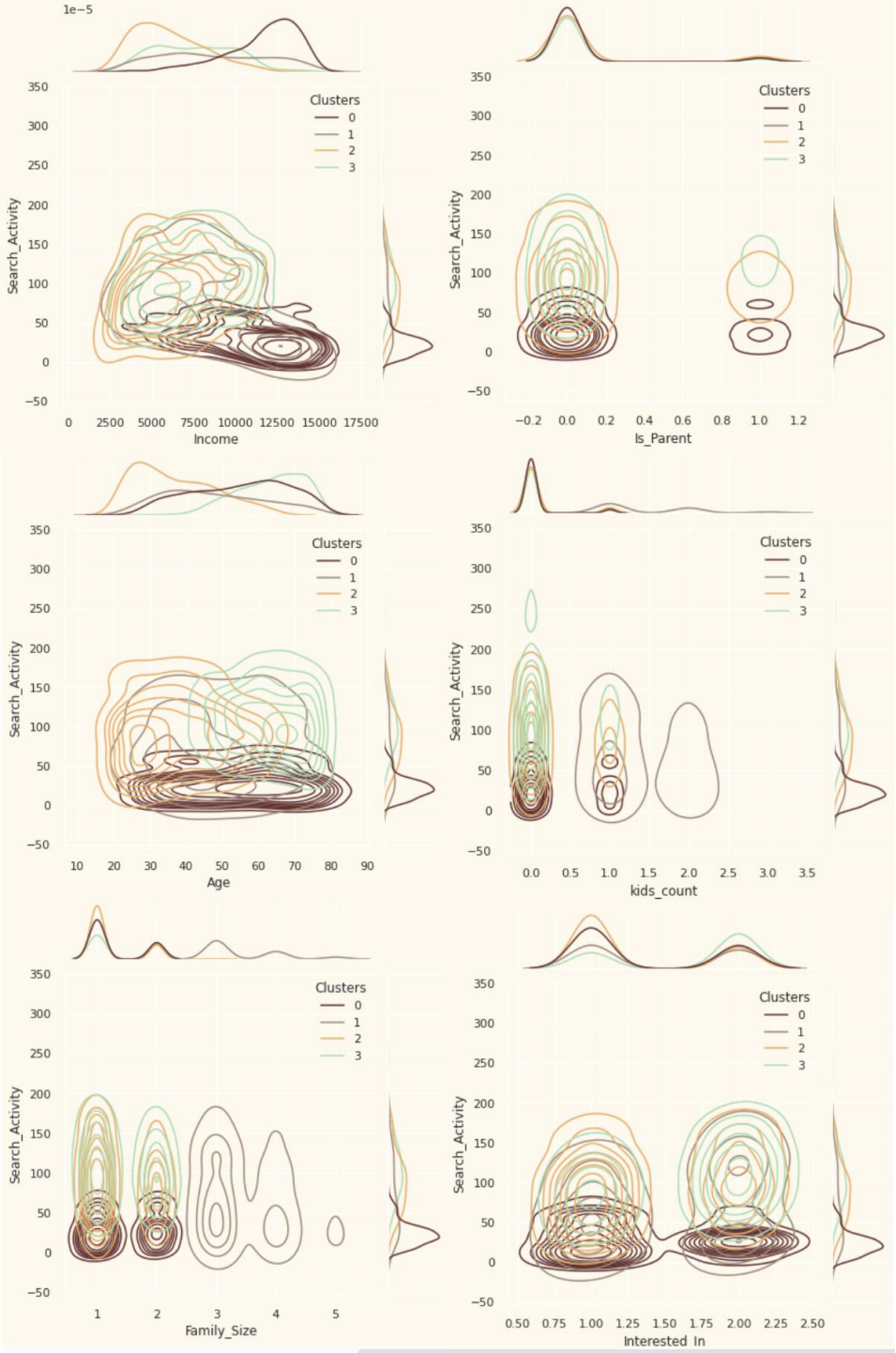


Рис. 13. Набір спільних діаграм на основі зазначених параметрів

Після огляду та аналізу наведених вище діаграм можна зробити загальне профілювання цільових груп:

- Перша група (0-й кластер) має високий дохід, в основному без дітей, вікова група переважно від 38 до 70 років. У більшості випадків користувачі є без пари і більше зацікавлені у купівлі чи інвестиції у нерухомість.
- Друга група (1-й кластер) має дохід вище середнього, в середньому має 1-2 дитини, вікова група переважно від 30 до 50 років. У більшості випадків користувачі мають пару та здебільшого зацікавлені у купівлі нерухомості.
- Третя група (2-й кластер) має невеликий дохід, більшість не має дітей, переважає у віці 20–30 років. В основному користувачі без пари та зацікавлені у оренді нерухомості.
- Четверта група (3-й кластер) має середній дохід, в загальному вже немає малих дітей. Вікова група 60–80 років. По розміру сім'ї можна бачити, що статистичні дані розподілені більш-менш рівномірно – можуть бути як із парою, так і без. Більшість зацікавлена в купівлі чи інвестиції нерухомості, хоча є група, яка зацікавлена в оренді.

На основі цих даних працівники агентства ринку нерухомості матимуть можливість краще оцінити які групи користувачів у них існують, а також сформувати якісні маркетингові кампанії. Також, враховуючи низьку активність першої групи користувачів, а також зважаючи на високий дохід цієї групи, можна певним чином стимулювати співпрацю.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У даній роботі проведено аналіз та підготовку даних, а саме видалення зайвих значень, нормалізацію, зменшення розмірності, а також створення нових функції, таких як розмір сім'ї, групування даних за певними ознаками та ін. На основі цих даних проведено кластеризацію і створено профільовані групи користувачів, із якими можна проводити маркетингові кампанії. В подальшому, до датасету можна буде додати більше неструктурованих даних, наприклад різноманітні метрики із соцмереж та створити на їх основі нові функції, які допоможуть виявити нові групи користувачів, або удосконалити інформацію про наявні групи.

Література

1. Zheng S., Hu W., Wang R. (2016). How much is a good school worth in Beijing? Identifying price premium with paired resale and rental data. Journal of Real Estate Finance and Economics, 53(2), 184–199.

2. Прогнозування цін на нерухомість в умовах фінансово-економічної кризи. Сейл Прайс Компані. URL: http://www.saleprice.com.ua/ua/publications/real_estate_price_forecasting.html (01.02.2023).

3. Interpretable machine learning for real estate market analysis. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/1540-6229.12397 (07.02.2023).

4. Seo W. (2018). Does neighborhood condition create a discount effect on house list prices? Evidence from physical disorder. Journal of Real Estate Research, 40(1), 69–88.

5. Principal component analysis (PCA) definition. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Principal_component_analysis (07.02.2023).

6. K-Means Clustering Algorithm in Machine Learning. URL: https://www.javatpoint.com/k-means-clustering-algorithm-in-machine-learning (07.02.2023).

7. Seaborn jointplot Method. URL: https://www.educba.com/seaborn-jointplot/ (11.02.2023).

References

1. Zheng S., Hu W., Wang R. (2016). How much is a good school worth in Beijing? Identifying price premium with paired resale and rental data. Journal of Real Estate Finance and Economics, 53(2), 184–199.

2. Prohnozuvannia tsin na nerukhomist v umovakh finansovo-ekonomichnoi kryzy. Seil Prais Kompani. URL: http://www.saleprice.com.ua/ua/publications/real_estate_price_forecasting.html (01.02.2023).

3. Interpretable machine learning for real estate market analysis. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/1540-6229.12397 (07.02.2023).

4. Seo W. (2018). Does neighborhood condition create a discount effect on house list prices? Evidence from physical disorder. Journal of Real Estate Research, 40(1), 69–88.

5. Principal component analysis (PCA) definition. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Principal_component_analysis (07.02.2023).

6. K-Means Clustering Algorithm in Machine Learning. URL: https://www.javatpoint.com/k-means-clustering-algorithm-in-machine-learning (07.02.2023).

7. Seaborn jointplot Method. URL: https://www.educba.com/seaborn-jointplot/ (11.02.2023).

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-308-313
УДК 004.896

ТКАЧУК АНДРІЙ
Державний університет «Житомирська політехніка»
https://orcid.org/0000-0003-2466-6299
e-mail: aikt_tag@ztu.edu.ua
ГРОМОВИЙ ОЛЕКСІЙ
Державний університет «Житомирська політехніка»
e-mail: agromovoy@ukr.net
БЕЗВЕСІЛЬНА ОЛЕНА
НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
https://orcid.org/0000-0002-6951-1242
e-mail: o.bezvesilna@gmail.com
БОНДАРЧУК ВАСИЛЬ
Державний університет «Житомирська політехніка»
https://orcid.org/0000-0003-2793-8720
e-mail: kvm_bvm@ztu.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ НА УДАРНІ НАВАНТАЖЕННЯ МОБІЛЬНОЇ ГУСЕНИЧНОЇ ПЛАТФОРМИ ІЗ АВТОНОМНОЮ СИСТЕМОЮ СТАБІЛІЗАЦІЇ

У роботі наведено розроблену 3D модель мобільної роботозиваної платформи з автономною системою стабілізації для проведення розвідувальних операцій. Проведено дослідження на ударні навантаження мобільної гусеничної платформи із автономною системою стабілізації та описано отримані результати.

Ключові слова: робототехніка, мобільна платформа, стабілізація, ударні навантаження, 3D модель, розвідка, моделювання.

TKACHUK ANDRII, GROMOVYI OLEKSIY
State University «Zhytomyr Polytechnic»
BEZVESILNA OLENA
NTUU «Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky»
BONDARCHUK VASIL
State University «Zhytomyr Polytechnic»

RESEARCH ON IMPACT LOADING OF A MOBILE TRACKED PLATFORM WITH AN AUTONOMOUS STABILIZATION SYSTEM

The work presents a developed 3D model of a mobile robotic platform with an autonomous stabilization system for reconnaissance operations. Mobile robotic platforms have been found to be widely used in intelligence because they can help gather information from dangerous and hard-to-reach places and reduce the risk to the lives of intelligence personnel. Unmanned aerial vehicles and mobile robotic platforms with tracks are mainly used in reconnaissance. An important distinguishing quality of tracked mobile robots is their maneuverability. Having an independent drive for each of the tracks separately, the mobile robot can easily change the direction of its own movement. A study on shock loads (external influences on the system that can cause deformation, damage or destruction) of a mobile tracked platform with an autonomous stabilization system was conducted and the obtained results were described. The SOLIDWORKS software environment was used to model the design of the mobile platform. For numerical studies on impact loads, it is advisable to use linear elastic isotropic materials and bilinear Mises plastic materials. The results of the simulation of the movement of the mobile platform of the developed structure and the stresses in the collision with different speeds of 1, 5, 10, 25 m/s and the platform material carbon steel and rubber are presented. It was established that when a mobile platform collides with speeds of up to 25 m/s, the maximum stresses do not exceed 1.85 MPa, which gives a sufficient margin of strength in the event of impact loads for the selected material of the mobile platform. The use of steel inserts allows you to reduce the value of the maximum contact stresses under impact load, but increases the cost of the mobile platform, increases the total weight and, accordingly, reduces the operating time from the installed power batteries.

Keywords robotics, mobile platform, stabilization, shock loads, 3D model, reconnaissance, modeling.

Постановка проблеми

Мобільні роботизовані платформи – це автономні пристрої, що складаються з механічних, електричних та електронних компонентів, що дозволяють їм переміщуватись по землі, поверхні води або в повітрі. Ці платформи можуть бути використані в різноманітних галузях, включаючи промисловість, медицину, дослідження та розвідку, а також військові застосування. Наприклад, мобільні роботизовані платформи можуть використовуватись у виробничому середовищі для автоматизації процесів та зниження витрат на працю. У медицині вони можуть бути використані для транспортування медичних інструментів та обладнання або для надання допомоги хворим. У дослідницькій сфері вони можуть використовуватись для дослідження складних середовищ, наприклад, для дослідження морського дна чи космосу.

Оскільки мобільні роботизовані платформи можуть працювати автономно, вони забезпечують високу ефективність та точність роботи, а також знижують ризик людських помилок та нещасних випадків на робочому місці. Вони також можуть бути дистанційно керовані, що дозволяє їх використовувати в умовах, коли пряма людська присутність небезпечна або неможлива.

Мобільні роботизовані платформи широко використовуються в розвідці, оскільки вони можуть допомогти збирати інформацію з небезпечних та важкодоступних місць, а також зменшити ризик для життя людей, що займаються розвідкою. В основному в розвідці використовуються БПЛА та мобільні

роботизовані платформи з колесами або гусеницями. Ці платформи зазвичай складаються з базової платформи з колесами або гусеницями, на якій розміщені різні сенсори, виконавчі механізми та системи керування. Вони можуть бути обладнані камерами, лазерними сканерами, радарами, мікрофонами та іншими сенсорами, що дозволяють їм збирати інформацію про оточуюче середовище.

Важлива відмінна якість гусеничних мобільних роботів полягає в їх маневреності. Володіючи незалежним приводом для кожної з гусениць окремо, мобільний робот може легко змінювати напрямок власного руху. Завдяки тому, що швидкість кожної з гусениць регулюється окремо, досить легко управляти рухом мобільного робота. Для завдання будь-якого напрямку руху необхідно змінити відносну швидкість приводів. Гусеничні роботи є найбільш ефективними внаслідок більш високих можливостей в плані подолання перешкод.

Аналіз останніх джерел

Сьогодні існує багато досліджень спрямованих на розробку систем спостереження на базі мобільних платформ (літальних, плаваючих, колісних тощо).

У роботах [1, 2] описано стан і перспективи розвитку самохідних дистанційно-керованих розвідувальних машини для потреб Збройних Сил України, вказано їх недоліки.

У статтях [3, 4] описано стан і перспективи розвитку роботизованих дистанційно-керованих мобільних платформ, які можуть використовуватись як у військових, так і цивільних цілях.

У публікації [5] описано метод визначення кутової швидкості за допомогою MEMS-гіроскопа, принцип роботи якого подібний до «ефекту Sagnac». Запропоновано методи підвищення точності даного чутливого елемента.

У роботах [6–8] описано новий чутливий елемент системи стабілізації озброєння легкої броньованої техніки, який може використовуватись і для системи стабілізації оптичних пристроїв для розвідувальних операцій.

Метою роботи є проведення дослідження на ударні навантаження мобільної гусеничної платформи із автономною системою стабілізації.

Виклад основного матеріалу. Науковцями Державного університету «Житомирська політехніка» розроблено мобільну роботизовану платформу для проведення розвідувальних операцій (рис. 1) [9]. Мобільна роботизована платформа побудована на базі малошумного гусеничного шасі. Гусениці платформи зроблені з інженерного пластика, який забезпечує відмінну еластичність, чудовий демпфуючий ефект і високе зчеплення шасі з дорогою. На шасі розміщені аналогова камера нічного бачення та тепловізор. Обидва оптичні сенсори закріплені на спеціалізованій рухомій башті з власною системою стабілізації. Для моделювання конструкції мобільної платформи було використано програмне середовище SOLIDWORKS.

Рис. 1. 3-D модель мобільної гусеничної платформи зі встановленою системою спостереження та автономною стабілізацією

Для спрощення процесу конструювання та виготовлення прототипу було вирішено використовувати технологію 3D друку. Такий метод проектування потребує значно менших затрат часу та коштів в порівняні з іншими методами. Най більш зручним матеріалом для 3D друку є PLA пластик, він виділяється міцністю, порівняно низькою температурою плавлення і малою токсичністю.

Даний робот не призначений безпосередньо для виконання польових військових задач. Дана модель спроектована для відпрацювання алгоритмів та тестування програмного забезпечення мобільного робота.

Спроектоване шасі роботизованої гусеничної платформи (рис. 2) обрано також із аналізу існуючих варіантів гусеничних платформ. Дана конструкція має найбільшу маневреність та прохідність.

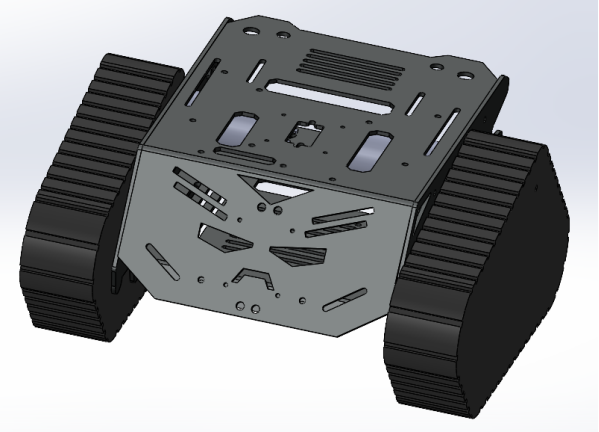


Рис. 2. 3-D модель шасі мобільної гусеничної платформи

Проведемо дослідження на ударні навантаження для мобільної платформи в програмному середовищі Solidworks Simulation. Ударні навантаження – це зовнішні впливи на систему, що можуть викликати деформацію, пошкодження або руйнування. Удари можуть бути викликані взаємодією з іншими об'єктами, наприклад, коли мобільна гусенична платформа зіткнеться з перешкодою на своєму шляху. Дослідження ударних навантажень на мобільних гусеничних платформах можуть бути корисними для покращення дизайну та створення більш стійких та безпечних систем. Вивчення впливу різних факторів, таких як швидкість руху, маса платформи та характер перешкоди, можуть допомогти визначити оптимальні параметри для роботи мобільної гусеничної платформи в умовах з великим ризиком ударних навантажень.

Для чисельних досліджень на ударні навантаження доцільно використовувати лінійні пружні ізотропні матеріали та білінійні пластичні по Мізесу.

На відміну від матеріалів з лінійною пружністю, пластичні по Мізесу матеріали можуть зазнавати залишкової деформації внаслідок удару.

У властивостях дослідження зазвичай використовують постановку задач для малого чи великого переміщення. Однак, за замовчуванням використовується постановка задачі для великого переміщення (нелінійне рішення) для всіх досліджень. Якщо всі матеріали є лінійно-пружними є можливість задавати малі переміщення. Якщо в моделі є пластичні по Мізесу матеріали, завжди використовується задачі для великих переміщень. Рішення з великим переміщенням дозволяє отримати більш точні результати.

Матеріалами корпусних деталей досліджуваної мобільної платформи є вуглецева сталь та гума (лінійні пружні ізотропні матеріали). Їх фізико-механічні властивості представлені на рис. 3 та рис. 4.

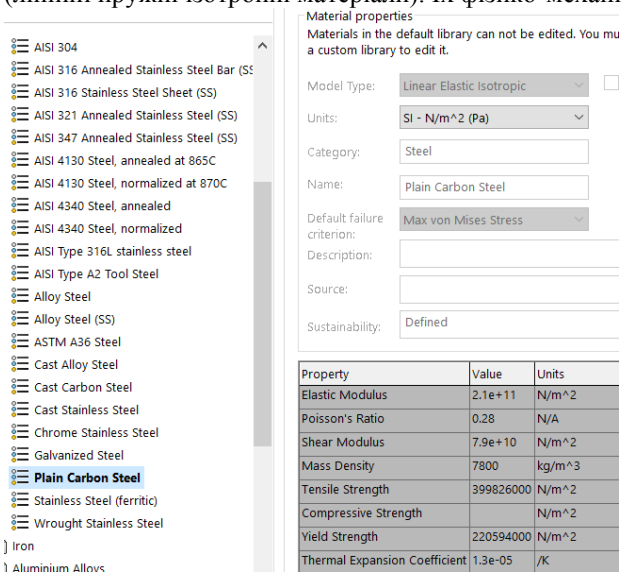


Рис. 3. Фізико-механічні властивості вуглецевої сталі

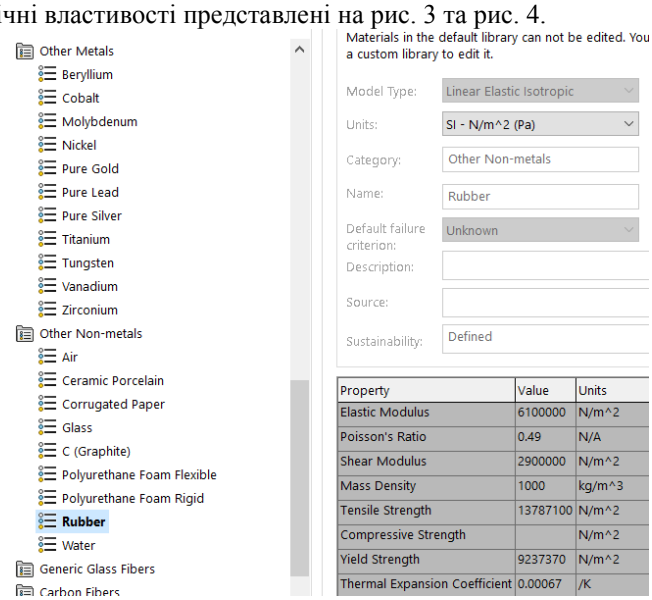


Рис. 4. Фізико-механічні властивості гумових траків платформи

Дослідження на ударне навантаження в SolidWorks Simulation (рис. 5) призначені для визначення впливу удару деталі або зборки об жорстку або гнучку плоску поверхню.

Задамо для мобільної платформи напрямок руху, швидкість та орієнтацію площини зіткнення. Параметри моделювання представлені на рис. 6.

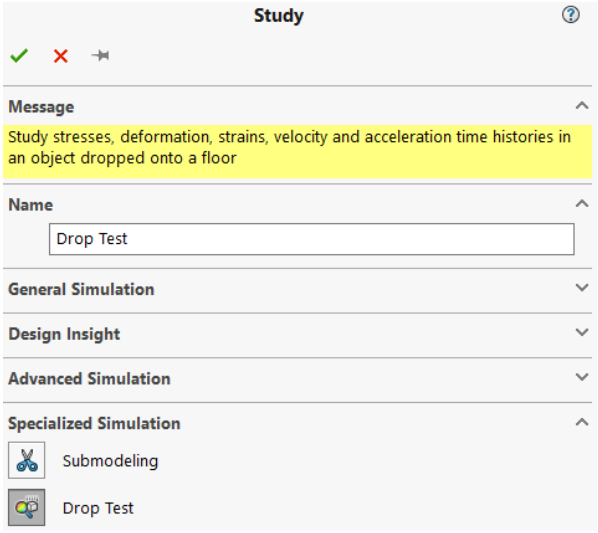


Рис. 5. Визначення параметрів моделювання

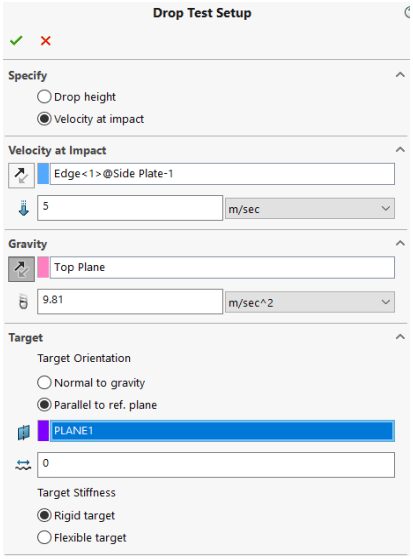


Рис. 6. Параметри моделювання ударного зіткнення мобільної платформи

Загальний вигляд налаштувань напрямку руху збірки, площі дії сил тяжіння та площини удару при зіткненні показані на рис. 7.

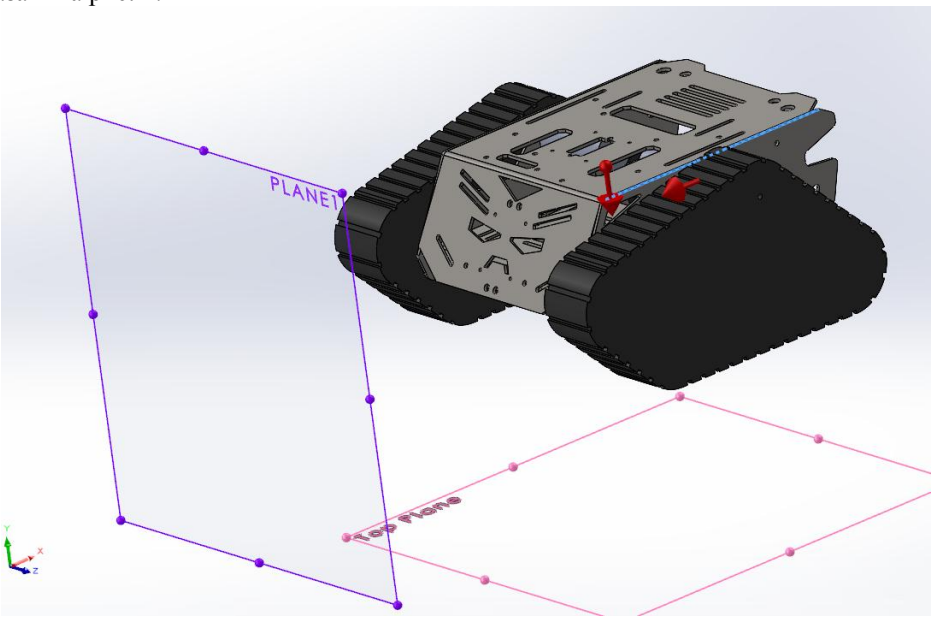


Рис. 7. Напрямку руху збірки напрямку сили тяжіння, площі дії сил тяжіння та площини удару

Визначимо напруження, деформації та контактні сили. Вирішимо динамічну задачу у вигляді залежності всіх сил від часу.

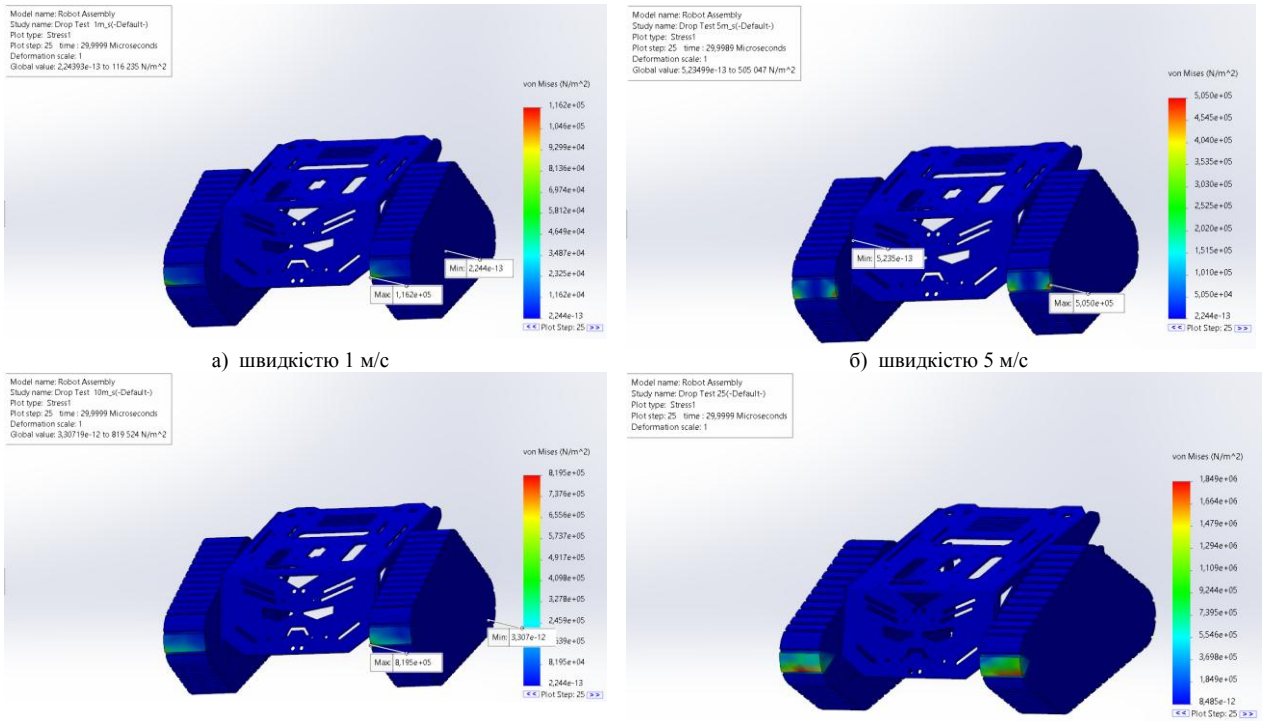
Основне рівняння руху:

$$F_1(t) + F_D(t) + F_E(t) = R(t),$$

де $F_1(t)$ – сила інерції; $F_D(t)$ – сили демпфування; $F_E(t)$ – сили пружності; $R(t)$ – зовнішні сили, які включають гравітаційні сили та сили ударного навантаження.

Програма Solidworks Simulation автоматично визначає умови контакту між тілом та площину удару. Умови контакту компонентів збірки визначаються спряженнями, які були реалізовані під час проектування – співпадіння поверхонь, співвісність, дотичність та інші. Допустимими для моделювання є умови відсутності зазорів або проникнення поверхонь.

На рис. 8, а, б, в, г представлені результати моделювання руху мобільної платформи розробленої конструкції з вище визначеними фізико-механічними характеристиками матеріалів компонентів збірки та відповідною швидкістю руху.



а) швидкістю 1 м/с б) швидкістю 5 м/с

в) швидкістю 10 м/с г) швидкістю 25 м/с

Рис. 8. Моделювання руху мобільної платформи та напружень при зіткненні з різними швидкостями

Результати моделювання (табл. 1, рис. 9) показують наступне. Значення межі пружності для матеріалу трака платформи 6,1 МПа.

Таблиця 1

Значення максимальних контактних напружень при ударі мобільної платформи в залежності від швидкості руху

№	Швидкість руху платформи, *v*, м/с	Максимальні контактні напруження, σ, МПа
1	1	0,1162
2	5	0,505
3	10	0,8195
4	15	0,9466
5	20	1,381
6	25	1,849
7	30	2,352

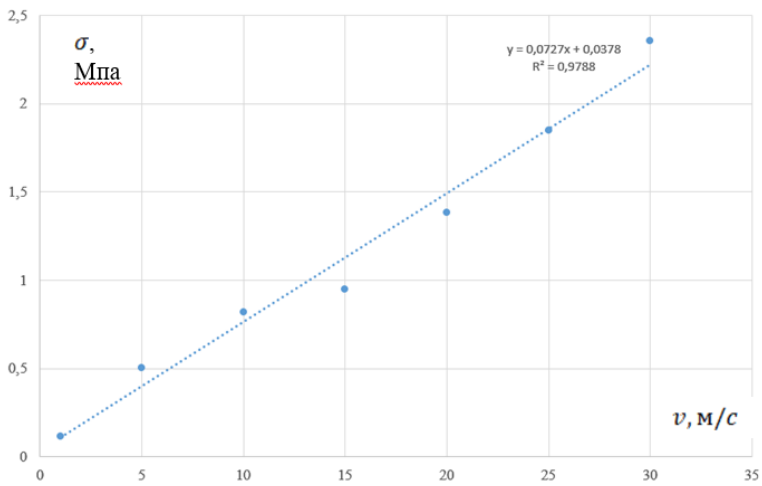


Рис. 9. Значення максимальних контактних напружень σ, МПа при ударі мобільної платформи в залежності від швидкості руху *v*, м/с

Це дозволяє з імовірністю 0,98 встановити, що при зіткненні мобільної платформи зі швидкостями до 25 м/с максимальні напруження не перевищують 1,85 МПа, що дає достатній запас міцності при виникненні ударних навантажень для даного матеріалу траку мобільної платформи. Використання сталевих вставок дозволяє зменшити значення максимальних контактних напружень при ударному навантаженні,

однак збільшує вартість мобільної платформи, збільшує загальну вагу та, відповідно, знижує час роботи від встановлених батареях живлення.

Висновки

Наведено розроблену 3D модель мобільної роботозиваної платформи з автономною системою стабілізації для проведення розвідувальних операцій. Встановлено, що мобільні роботизовані платформи широко використовуються в розвідці, оскільки вони можуть допомогти збирати інформацію з небезпечних та важкодоступних місць, а також зменшити ризик для життя людей, що займаються розвідкою. Проведено дослідження на ударні навантаження (зовнішні впливи на систему, що можуть викликати деформацію, пошкодження або руйнування) мобільної гусеничної платформи із автономною системою стабілізації та описано отримані результати. Для моделювання конструкції мобільної платформи було використано програмне середовище SOLIDWORKS. Представлені результати моделювання руху мобільної платформи розробленої конструкції та напружень при зіткненні з різними швидкостями 1, 5, 10, 25 м/с та матеріалом платформи із вуглецевої сталі та гуми. Встановлено, що при зіткненні мобільної платформи зі швидкостями до 25 м/с максимальні напруження не перевищують 1,85 МПа, що дає достатній запас міцності при виникненні ударних навантажень для обраного матеріалу мобільної платформи.

Література

1. Калінін О.М. Стан і перспективи розвитку самохідних дистанційно-керованих машини для потреб Збройних Сил України / О.М. Калінін, В.В. Костюк, П.О. Русіло, Ю.В. Варванець // Вісник НТУ «ХПІ». – 2016. – № 39.

2. Yu T.C., Lin C.C., Chen C.C., et al. Wireless sensor networks for indoor air quality monitoring. Medical engineering & physics. 2013. № 35(2). P. 231-235.

3. Son Kuswadi, Mohamad Nasyir Tamara, Dwi Nugroho H.W. Development of Gun Turret Drive Stabilization System with a Microcontroller and Implementation on a Model Tank. International Journal of Engineering Research and Applications. 2014. Vol. 555. pp. 217-221.

4. Nasyir Moh T., Nurhadi H., Pramujati B., Pitowarno E. Control Simulation of An Automatic Turret Gun Based on Force Control Method. Proceeding of INAGENTSYS, August 19-21, 2014, Bandung, Indonesia.

5. Chikovani V.V. Influence of shock on the vibration amplitude stabilization system of Coriolis vibratory gyroscope resonator / V.V. Chikovani // Електроніка та системи управління. – 2012. – № 4(34). – С. 56-63.

6. Ткачук А.Г. Новий прецизійний чутливий елемент автоматизованої системи стабілізації озброєння : монографія з грифом Державного університету «Житомирська політехніка» / Ткачук А.Г., Безвесільна О.М. – 2022. – 272 с.

7. Ткачук А.Г. Дослідження основних напрямків розвитку сучасних системи стабілізації озброєння / А.Г. Ткачук, О.М. Безвесільна, А.А. Гуменюк, В.М. Янчук, І.В. Крижанівська // Технічна інженерія. – 2020. – Вип. 2(86). – С. 73-80.

8. Ткачук А.Г. Проектування стабілізованої платформи інформаційно-вимірювальної системи для проведення розвідувальних операцій / А.Г. Ткачук, О.М. Безвесільна, В.М. Бондарчук, І.В. Крижанівська // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: «Технічні науки». – 2022. – № 2. – С. 141-145.

9. Ткачук А.Г. Проектування інформаційно-вимірювальної системи для моніторингу наявності шкідливих та вибухонебезпечних газів на базі роботизованої гусеничної платформи / А.Г. Ткачук, О.О. Добржанський, М.В. Богдановський, А.Р. Кравчук // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2022. – Том 33 (72). № 2. – С. 108-113.

References

1. Kalinin O.M. Stan i perspektyvy rozvytku samokhidnykh dystantsiino-kerovanykh mashyny dlia potreb Zbroinykh Syl Ukrainy / O.M. Kalinin, V.V. Kostiuk, P.O. Rusilo, Yu.V. Varvanets // Visnyk NTU «KhPI». – 2016. – № 39.

2. Yu T.C., Lin C.C., Chen C.C., et al. Wireless sensor networks for indoor air quality monitoring. Medical engineering & physics. 2013. № 35(2). P. 231-235.

3. Son Kuswadi, Mohamad Nasyir Tamara, Dwi Nugroho H.W. Development of Gun Turret Drive Stabilization System with a Microcontroller and Implementation on a Model Tank. International Journal of Engineering Research and Applications. 2014. Vol. 555. pp. 217-221.

4. Nasyir Moh T., Nurhadi H., Pramujati B., Pitowarno E. Control Simulation of An Automatic Turret Gun Based on Force Control Method. Proceeding of INAGENTSYS, August 19-21, 2014, Bandung, Indonesia.

5. Chikovani V.V. Influence of shock on the vibration amplitude stabilization system of Coriolis vibratory gyroscope resonator / V.V. Chikovani // Elektronika ta systemy upravlinnia. – 2012. – № 4(34). – S. 56-63.

6. Tkachuk A.H. Novyi pretsyziinyi chutlyvyi element avtomatyzovanoi systemy stabilizatsii ozbroiennia : monohrafiia z hryfom Derzhavnoho universytetu «Zhytomyrska politekhnika» / Tkachuk A.H., Bezvesilna O.M. – 2022. – 272 s.

7. Tkachuk A.H. Doslidzhennia osnovnykh napriamkiv rozvytku suchasnykh systemy stabilizatsii ozbroiennia / A.H. Tkachuk, O.M. Bezvesilna, A.A. Humeniuk, V.M. Yanchuk, I.V. Kryzhanivska // Tekhnichna inzheneriia. – 2020. – Vyp. 2(86). – S. 73-80.

8. Tkachuk A.H. Proektuvannia stabilizovanoi platformy informatsiino-vymiriuvalnoi systemy dlia provedennia rozviduvalnykh operatsii / A.H. Tkachuk, O.M. Bezvesilna, V.M. Bondarchuk, I.V. Kryzhanivska // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriia: «Tekhnichni nauky». – 2022. – № 2. – S. 141-145.

9. Tkachuk A.H. Proektuvannia informatsiino-vymiriuvalnoi systemy dlia monitorynhu naiavnosti shkidlyvykh ta vybukhonebezpechnykh haziv na bazi robotyzovanoi husenychnoi platformy / A.H. Tkachuk, O.O. Dobrzhanskyi, M.V. Bohdanovskyi, A.R. Kravchuk // Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriia: Tekhnichni nauky. – 2022. – Tom 33 (72). № 2. – S. 108-113.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-314-318
УДК 539.376

ХОДЯЧИЙ ВЛАДИСЛАВ
Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»
vladhod22@gmail.com
НІКІТІН ОЛЕКСАНДР
Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»
vargin_@ukr.net

ПАРАМЕТРИ ПОТОКІВ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Необхідність вирішення питань, пов'язаних з вивченням потоків сипких матеріалів, обумовлена розробкою сучасних сенсорів параметрів потоків сипких матеріалів. Зокрема, мова може йти про сенсори обтікання. Даний тип сенсорів є одним з найбільш привабливих для використання в каналах управління і регулювання сучасних автоматизованих систем керування виробництвом в аграрній і харчовій промисловості.

Питання, які розглядаються в даній роботі, відносяться до механіки потоків сипких матеріалів. Основна увага приділяється вільному гравітаційному потоку. В якості сипкого матеріалу розглядається зерновий матеріал.

В роботі було розглянуто, як веде себе сипкий матеріал при вільному падінні з бункера у безповітряному просторі і, також, в повітряному. Приведені формули розрахунку швидкості потоку сипкого матеріалу в гравітаційному потоці.

Ключові слова: сипкий матеріал, бункер, сенсор, витрата, потік сипкого матеріала.

KHODIACHIY VLADYSLAV, NIKITIN OLEXANDER
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

PARAMETERS OF FLOWS OF GRAIN MATERIALS

Solving the issue related to the study of flows of loose materials is due to the development of modern sensors of flow parameters of loose materials. In particular, it can be about flow sensors. This type of sensors is one of the most attractive for use in the control and regulation channels of modern automated production control systems in the agricultural and food industry.

The issues considered in this article relate to the mechanics of flows of loose materials. The field of mechanics, which studies the static and dynamic aspects of loose materials, is one of the basic branches of mechanics in general. The main focus is on free gravity flow. Grain material is considered as loose material. Taking into account the peculiarities of loose material and the specifics of various industries, the problem of creating flow parameter sensors was and will be relevant. The definition of the object and process for which the sensor is being developed, namely the study of flows of loose materials, is also relevant.

The article considered how loose material behaves during free fall from silos in an airless space and also in an airy one. The consumption of bulk materials from the bottom opening of the silo, in most cases, is not stable and leads to the formation of a variable flow of bulk material. After the grain leaves the silos opening, a gravitational flow is formed, consisting of dispersed grains and an air flow. The formed flow of bulk material can be considered as an information factor for determining the consumption of bulk material and a factor in creating effective sensors for automated control systems of technological processes. Formulas for calculating the flow rate of loose material in a gravity flow and the flow volumes at different states were also given in the article.

Key words: loose material, sensor, flow of loose material, mass flow silos.

Постановка проблеми

В таких автоматизованих технологічних процесах, де використовуються сипкі матеріали, обов'язково повинен бути реалізований процес визначення витрати сипких матеріалів. До сипких матеріалів відносяться: зерновий матеріал (пшениця, ячмінь, кукурудза, горіх, насіння соняшника), крупа, цукор, сіль, борошно, вугілля, цемент тощо. Тому питання, пов'язане з дослідженням параметрів процесів, є одним з основних в галузі сипких матеріалів.

Враховуючи особливості сипкого матеріалу та специфіку різних виробництв в аграрних, хімічних, харчових, фармацевтичних, металургійних та інших галузях, проблема створення сенсорів параметрів потоків була, є і буде актуальною. Визначення об'єкту і процесу, для якого розробляється сенсор, а саме вивчення потоків сипких матеріалів, також є актуально значимою.

Аналіз основних досліджень і публікацій

Галузь механіки, що вивчає статичні та динамічні аспекти сипких матеріалів, є однією з базових в механіці в цілому. Основним об'єктом вивчення у багатьох дослідженнях є процеси, що мають місце при взаємодії сипкого матеріалу з внутрішніми поверхнями ємностей [1, 2, 3, 4, 5]. Як правило, в ємностях при витоку сипкого матеріалу утворюються склепінчасті структури, які суттєво впливають на витік сипкого матеріалу. Особливо суттєво це має місце при витоці вологих зернових матеріалів. Процес утворення склепінчастої форми приводить до суттєвої зміну виходу сипкого матеріалу з вихідного отвору бункера. На підприємствах для усунення цього використовують різні механічні пристрої. Вивченню процесів утворення склепінь присвячено багато робіт. [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]

Багато дослідників вивчають процес витоку сипкого матеріалу з бункера виходячи з детермінованості його протікання. Ряд дослідників вивчають процес витоку сипкого матеріалу як стохастичний процес, що залежить від багатьох випадкових факторів. [13, 14, 15]

Вивченням процесу витоку сипких матеріалів через отвір бункера займались такі дослідники, як Добровольская С.Г.[16], Комченко Е.В.[17], Платонов П.Н.[18], Скудина А.А.[19], Богомягких В.А.[20] та

багато інших. Встановлено, що на швидкість витоку сипкого матеріалу з бункера впливають діаметр отвору виходу, середня висота стовпа сипкого матеріалу, розмір частинок, кути природнього укосу матеріалу, кут внутрішнього матеріалу, кут внутрішнього тертя частинок, кут нахилу стінок даної частини бункеру. Формули, які запропоновані різними авторами для визначення витрат сипких матеріалів мають різний вид і дають різні результати.

Виклад основного матеріалу

В роботі розглядаються процеси, що мають місце в гравітаційному вільному потоці сипкого матеріалу, наприклад, зерна пшениці, який формується після виходу з бункера через даний отвір. Необхідність розгляду цього питання пов'язана з вивченням процесу взаємодії гравітаційного потоку з твердими тілами.

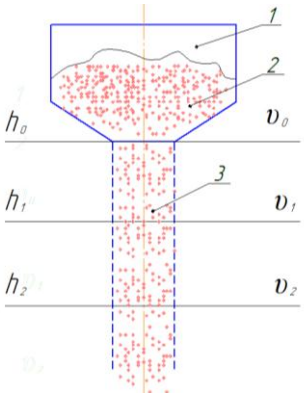


Рис. 1. Витік зерна з донного отвору бункера:
1 – бункер, 2 – зерно, 3 – потік зерна

Гравітаційний потік зерна, що формується в процесі витоку з данного отвору, наведено на рис.1. Якщо припустити, що зернини падають в безповітряному просторі, то їх швидкість весь час буде збільшуватися і дорівнювати (1). Потік буде, умовно кажучи, розтягуватися. Графік зміни швидкості зернини від відстані h наведено на рис.2.

$$V = \sqrt{2gh} \tag{1}$$

де υ – швидкість падіння зернини, g – прискорення вільного падіння, h – висота падіння.

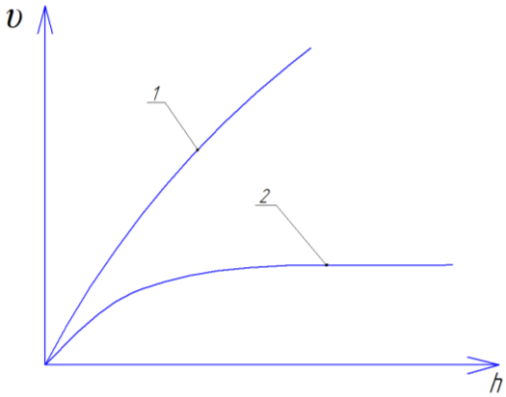


Рис. 2. Графік залежності швидкості падіння зернини в безповітряному просторі (графік 1) і в повітряному просторі (графік 2) від висоти h.

Якщо зернина падає в повітряному просторі, то її швидкість буде збільшуватися до досягнення умов рівноваги:

$$\overline{G} = \overline{F}_A + \overline{F}_g \tag{2}$$

де G – вага зернини, F_R – сила Архімеда, F_g – сила, що обумовлена динамічним тиском.

Відповідно:

$$G = mq$$

$$F_A = \rho_П g V$$

$$F_g = \alpha \frac{\rho_П \upsilon^2}{2} S \tag{3}$$

де υ– швидкість падіння зернини; h – відстань від отвору бункера до зерна; m – маса зернини, $\rho_п$ – щільність повітря, V – Об'єм зернини, α - коефіцієнт опору, S – середній міделевий переріз зернини.

$$\upsilon = \sqrt{\frac{2}{S\alpha}(m\frac{q}{\rho_{П}} - gV)} \quad (4)$$

При находженні зерна в бункер, має місце насипна щільність сипкого матеріалу. Діапазон варіювання цього показника для пшениці складає (860…660) кг/м^3. Після послідовного виходу зернин з отвору бункера, утворюється гравітаційний потік, що складається з розсерджених зернин і повітряного потоку.

Уточнимо, як змінюється кількість зернин в одиниці об'єму потоку при її падінні. В умовах падіння в безповітряному просторі, час витоку зерна з бункеру в загальному випадку визначається формулою:

$$t = \frac{V}{q_v}$$

де t – час витоку зерна з бункера; V – об'єм зерна в бункері; q_v – об'ємна витрата зерна.

Другим шляхом визначення часу витоку зерна з бункера є експериментальне визначення цієї величини. В цьому випадку довжина потоку зерна буде складати:

$$l = \frac{gt_e^2}{2}$$

де l – довжина потоку зерна; t_e – експериментально визначений термін витоку зерна з бункера.

Об'єм потоку сипкого матеріалу $V_п$ дорівнює:

$$V_n = l \cdot S_0$$

де S_o – площа отвору бункера.

Середня щільність зернин в потоці $\rho_п$ буде складати

$$\rho_n = \frac{m}{V_n}$$

де m – загальна маса зерна в потоці (в бункері).

Довжина потоку зерна при умові відсутності динамічного тиску буде складати:

$$l = \frac{gt^2}{2}$$

Відповідно, об'єм дорівнює:

$$V = l \cdot S$$

де S – площа поперечного перерізу потоку.

Якщо врахувати опір повітря, то маємо розглянути два етапу руху зернини (рис 3):

1) потік збільшує швидкість;
2) потік рухається з постійною швидкістю.

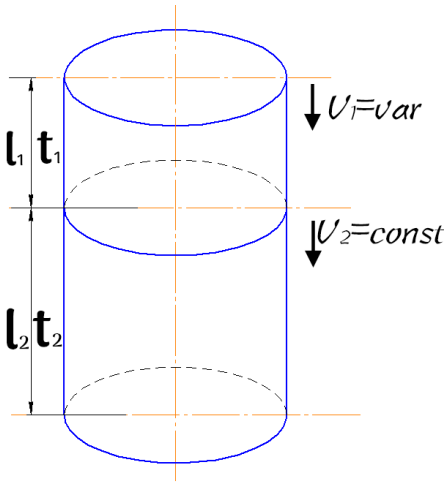


Рис. 3. Гравітаційний потік сипкого матеріалу

Швидкість V_2 визначаємо по формулі 4. Величина l_1 і l_2 при цьому буде дорівнювати:

$$l_1 = \frac{\upsilon_2}{2}t_2; l_2 = \frac{\upsilon_2^2}{2g}$$

Знаючи довжину відповідного етапу, можна визначити об'єм потоку сипкого матеріалу і середню густину потоку сипкого матеріалу в русі. Це дасть можливість оцінювати механічний вплив гравітаційного

потоку сипких матеріалів на тверді тіла обтікання в залежності від місцезнаходження тіл відносно отвору бункеру.

Висновки

Наведений матеріал дозволяє зробити наступні висновки:

1. Витрата сипких матеріалів з донного отвору бункеру в більшості випадків не є стабільною і призводить до формування змінного потоку сипкого матеріалу.

2. Після витоку з бункера, сипкий матеріал рухається в гравітаційному полі Земної кулі і в повітряному просторі. При русі у потоці з'являються параметри сипкого матеріалу. Змінюється умовна густина потоку – кількість частинок сипкого матеріалу в одиниці об'єму гравітаційного потоку.

3. Сформований потік сипкого матеріалу може розглядатися як інформаційний фактор визначення витрати сипкого матеріалу і бути фактором створення ефективних сенсорів для автоматизованих систем керування технологічними процесами.

4. Динамічний силовий вплив гравітаційного потоку сипкого матеріалу на тверді тіла обтікання залежить від відстані між отвором витоку сипкого матеріалу з бункера та твердими тілами обтікання.

Література

1. Алферов К. В. Бункеры, затворы и питатели. Основы проектирования и расчета / К. В. Алферов., 1946. – 177 с.

2. Алферов К. В. Бункерные установки / К. В. Алферов, Р. Л. Зенков., 1955. – 308 с.

3. Банит Е. А. Исследование процесса истечения сыпучих материалов из отверстия сосудов : дис. канд. техн. наук / Банит Е. А., 1978. – 180 с.

4. Седов Л. И. Методи подобие и размерности в механике / Л. И. Седов., 1972. – 470 с.

5. Blair-Fish P. M. Flow Patterns and Wall Stresses in a Mass-Flow Bunker / P. M. Blair-Fish, P. L. Bransby. // Manufacturing science and engineering. – 1973. – №95. – P. 17–26.

6. Бернштейн М. С. Форма истечення и давления зерна в силосах / М. С. Бернштейн. // Исследовательские работы по инженерным конструкциям. – 1949. – С. 139–168.

7. Богомягких В. А. Условия истечения сыпучих материалов из бункера / В. А. Богомягких, В. И. Приленский. // Вопросы механизации и электрификации сельскохозяйственного производства. – 1969. – №12. – С. 147–152.

8. Богомягких В. А. Теория и расчет бункеров для зернистых материалов / В. А. Богомягких., 1973. – 148 с.

9. Ермакова И. А. Изменение механизма истечения сыпучего материала из бункера при использовании конических разделителей потока / И. А. Ермакова. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2003. – №5. – С. 33–37.

10. Morrison H. L. A one-dimensional analysis of granular flow in bunkers / Morrison. // Chemical Engineering Science. – №33. – P. 241–251.

11. Perry M. G. Model studies of mass-flow bunkers: I. Development of the radio pill technique for dynamic pressure and velocity measurements / M. G. Perry, E. Rothwell, W. T. Woodfin. // Powder Technology. – 1975. – №12. – P. 51–56.

12. Perry M. G. Model studies of mass-flow bunkers II. Velocity distributions in the discharge of solids from mass-flow bunkers / M. G. Perry, E. Rothwell, W. T. Woodfin. // Powder Technology. – 1976. – №14. – P. 81–92.

13. Кенеман Ф. Е. Исследование вероятности сводообразований при свободном истечении сыпучих тел / Ф. Е. Кенеман, Н. Г. Залогин, О. С. Антошина. // Энерготехнологическое использование топлива. – 1963. – №5. – С. 145–151.

14. Голубков К. Н. Исследования явлений сводообразования материала на модели бункера / К. Н. Голубков. // Труды института УНИИПромедь. – 1963. – №7. – С. 149–154.

15. Диктерук М. Г. Исследование закономерностей движения сыпучих материалов в вертикальных ёмкостях (силосы/бункеры): мониторинг статического напряжённого состояния и анализ истечения по второй форме в общей постановке / М. Г. Диктерук, В. Т. Кравчук, А. С. Заслуженный. // Вісник ХНТУ. – 2018. – №3. – С. 55–73.

16. Добровольская С. Г. Теоретические расчеты по условиям устойчивого истечения разных видов зернового сыпучего материала из глубокого бункера / С. Г. Добровольская. // Научная молодежь — агропромышленному комплексу. – 2003. – №5. – С. 84–89.

17. Комченко Е. В. Совершенствование процесса истечения мелких сыпучих материалов из бункеров сельскохозяйственного назначения : дис. канд. техн. наук / Комченко Е. В., 2004. – 192 с.

18. Платонов Н. П. Пропускная способность выпускных отверстий силосов и бункеров / Н. П. Платонов. // Мукомольно-элеваторная промышленность. – 1958. – №8. – С. 28–30.

19. Скудина А. А. Влияние некоторых сводообразующих факторов на время истечения зерновых из бункера наибольшего расхода / А. А. Скудина, В. А. Богомягких. // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2015. – №5. – С. 1–13.

20. Богомягких В. А. Влияние некоторых сводообразующих факторов на время истечения зерновых из бункера наибольшего расхода / В. А. Богомягких, А. А. Скудина. // Молодой ученый. – 2015. – №14. – С. 133–136.

References

1. Alferov K. V. Bunkery, zatvory i pitateli. Osnovy proektirovaniya i rascheta / K. V. Alferov., 1946. – 177 s.

2. Alferov K. V. Bunkernye ustanovki / K. V. Alferov, R. L. Zenkov., 1955. – 308 s.\

3. Banit E. A. Issledovanie processa istecheniya sypuchih materialov iz otverstiya sosudov : dis. kand. tehn. nauk / Banit E. A., 1978. – 180 s.

4. Sedov L. I. Metodi podobie i razmernosti v mehanike / L. I. Sedov., 1972. – 470 s.

5. Blair-Fish P. M. Flow Patterns and Wall Stresses in a Mass-Flow Bunker / P. M. Blair-Fish, P. L. Bransby. // Manufacturing science and engineering. – 1973. – №95. – P. 17–26.

6. Bernshtejn M. S. Forma istechennya i davleniya zerna v silosah / M. S. Bernshtejn. // Issledovatelskie raboty po inzhenernym konstrukciyam. – 1949. – S. 139–168.

7. Bogomyagkih V. A. Usloviya istecheniya sypuchih materialov iz bunkera / V. A. Bogomyagkih, V. I. Prilenskij. // Voprosy mehanizacii i elektrifikacii selskohozyajstvennogo proizvodstva. – 1969. – №12. – S. 147–152.

8. Bogomyagkih V. A. Teoriya i raschet bunkerov dlya zernistyh materialov / V. A. Bogomyagkih., 1973. – 148 s.

9. Ermakova I. A. Izmenenie mehanizma istecheniya sypuchego materiala iz bunkera pri ispolzovanii konicheskih razdelitelej potoka / I. A. Ermakova. // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. – 2003. – №5. – S. 33–37.

10. Morrison H. L. A one-dimensional analysis of granular flow in bunkers / Morrison. // Chemical Engineering Science. – №33. – P. 241–251.

11. Perry M. G. Model studies of mass-flow bunkers: I. Development of the radio pill technique for dynamic pressure and velocity measurements / M. G. Perry, E. Rothwell, W. T. Woodfin. // Powder Technology. – 1975. – №12. – P. 51–56.

12. Perry M. G. Model studies of mass-flow bunkers II. Velocity distributions in the discharge of solids from mass-flow bunkers / M. G. Perry, E. Rothwell, W. T. Woodfin. // Powder Technology. – 1976. – №14. – P. 81–92.

13. Keneman F. E. Issledovanie veroyatnosti svodoobrazovanij pri svobodnom istechenii sypuchih tel / F. E. Keneman, N. G. Zalogin, O. S. Antoshina. // Energotehnologicheskoe ispolzovanie topliva. – 1963. – №5. – S. 145–151.

14. Golubkov K. N. Issledovaniya yavlenij svodoobrazovaniya materiala na modeli bunkera / K. N. Golubkov. // Trudy instituta UNIIPromed. – 1963. – №7. – S. 149–154.

15. Dikteruk M. G. Issledovanie zakonomernostej dvizheniya sypuchih materialov v vertikalnyh yomkostyah (silosy/bunkery): monitoring staticheskogo napryazhyonnogo sostoyaniya i analiz istecheniya po vtoroj forme v obshej postanovke / M. G. Dikteruk, V. T. Kravchuk, A. S. Zasluzhennyj. // Visnik HNTU. – 2018. – №3. – S. 55–73.

16. Dobrovolskaya S. G. Teoreticheskie raschety po usloviyam ustojchivogo istecheniya raznyh vidov zernovogo sypuchego materiala iz glubokogo bunkera / S. G. Dobrovolskaya. // Nauchnaya molodezh — agropromyshlennomu kompleksu. – 2003. – №5. – S. 84–89.

17. Komchenko E. V. Sovershenstvovanie processa istecheniya melkih sypuchih materialov iz bunkerov selskohozyajstvennogo naznacheniya : dis. kand. tehn. nauk / Komchenko E. V., 2004. – 192 s.

18. Platonov N. P. Propusknaya sposobnost vypusknyh otverstij silosov i bunkerov / N. P. Platonov. // Mukomolno-elevatornaya promyshlennost. – 1958. – №8. – S. 28–30.

19. Skudina A. A. Vliyanie nekotoryh svodoobrazuyushih faktorov na vremya istecheniya zernovyh iz bunkera naibolshego rashoda / A. A. Skudina, V. A. Bogomyagkih. // Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE». – 2015. – №5. – S. 1–13.

20. Bogomyagkih V. A. Vliyanie nekotoryh svodoobrazuyushih faktorov na vremya istecheniya zernovyh iz bunkera naibolshego rashoda / V. A. Bogomyagkih, A. A. Skudina. // Molodoj uchenyj. – 2015. – №14. – S. 133–136.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-319-322
УДК 510.51

ЩЕРБАНЬ ВОЛОДИМИР
Київський національний університет технологій та дизайну
https://orcid.org/0000-0002-4274-4425
e-mail: scherbanvu@ukr.net
ШИЛІНГОВ СЕРГІЙ
Київський національний університет технологій та дизайну
https://orcid.org/0000-0002-0730-3739
e-mail: s.shilingov@gmail.com
ЛУКАШЕВ АНДРІЙ
Київський національний університет технологій та дизайну
https://orcid.org/0000-0002-7724-7744
e-mail: applereg1@gmail.com
КОЛИСКО ОКСАНА
Київський національний університет технологій та дизайну
https://orcid.org/0000-0003-4043-1238
e-mail: kipt@i.com.ua
ЩЕРБАНЬ ЮРІЙ
Київський фаховий коледж прикладних наук
https://orcid.org/0000-0001-5024-8387
e-mail: scherban@i.ua

СТРУКТУРА КОМП'ЮТЕРНОГО МОДУЛЯ ПРОГРАМИ KDAM ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВХІДНОЇ ЛАНКИ

Розробка комп'ютерного модуля програми KDAM для визначення кінематичних та динамічних параметрів вхідної ланки механізмів машин легкої промисловості дозволяє визначати координати, проекції швидкостей та прискорень центру мас кривошипу та точки приєднання ланок груп Асура. При динамічному аналізі роботи вхідної ланки визначаються проєкції повної реакції в шарнірі закріплення вхідної ланки. Отримані результати використовуються в програмі для оцінки напруженості технологічних процесів легкої та текстильної промисловості при визначенні зміни відносного натягу нитки по зонам заправки на технологічному обладнанні.

Ключові слова: комп'ютерний модуль, кінематичні параметри, динамічні параметри, вхідна ланка.

SHCHERBAN VOLODYMYR, SHILINGOV SERGEY, LUKASHEV ANDREW, KOLISKO OKSANA
Kyiv National University of Technologies and Design
SHCHERBAN YURYJ
Kyiv Professional College of Applied Sciences

STRUCTURE OF THE COMPUTER MODULE OF THE KDAM PROGRAM FOR DETERMINING KINEMATIC AND DYNAMIC PARAMETERS OF THE INPUT LINK

The development of the computer module of the KDAM program for determining the kinematic and dynamic parameters of the input link of the mechanisms of light industry machines allows to determine the coordinates, projections of speeds and accelerations of the center of mass of the crank and the point of attachment of the links of the Asura groups. During the dynamic analysis of the operation of the input link, the projections of the full reaction in the hinge of the input link are determined. The obtained results are used in the program to assess the intensity of technological processes of the light and textile industry when determining the change in the relative tension of the thread in the filling zones on the technological equipment.

Lever mechanisms are widely used in light and textile industry machines. The working bodies of the lever mechanisms come into contact with the threads during operation. Depending on the trajectory of the movement, the angle of coverage of the working bodies of the mechanisms of the light and textile industry machines changes. A change in the value of the angle of coverage leads to a change in the tension of the threads. When the coverage angle increases to critical values, the thread may break and the technological equipment may stop. The tension of the thread increases when moving through the refueling zones of the thread feeding system on the technological equipment. This increase is due to the interaction of the thread with the guides and tension devices. The maximum tension value will be in front of the working area. A sharp increase in tension leads to a violation of the normal course of the technological process of thread processing. The development of new schemes of the thread feeding system requires an operational assessment of the value of the tension in front of the working zone. The development of special computer programs for determining the tension in the working area makes it possible to determine the necessary technological parameters. The objective function in the tasks of optimization of technological processes is the minimum necessary tension. The variable parameter in the objective function is the sum of the angles of coverage of the working bodies by the thread. The use of a computer program allows you to determine the tension and change in relative tension in the filling zones of technological machines, which allows you to optimize the shape of the thread supply line even at the stage of designing the technological process.

Computer determination of kinematic and dynamic parameters of flat mechanisms allows to determine the parameters used in determining the intensity of technological processes. The study of the influence of the design of the thread tension device on the conditions of its interaction with the thread, taking into account its unevenness in the diameter of the cross section, is important in determining the thread tension. The tension of the thread increases when moving through the refueling zones of the thread feeding system on the technological equipment.

Keywords: computer module, kinematic parameters, dynamic parameters, input link.

Постановка проблеми

Розробка комп'ютерного модуля програми KDAM для визначення кінематичних та динамічних параметрів вхідної ланки механізмів машин легкої промисловості дозволяє визначати координати, проекції швидкостей та прискорень центру мас кривошипу та точки приєднання ланок груп Асура. При динамічному аналізі роботи вхідної ланки визначаються проекції повної реакції в шарнірі закріплення вхідної ланки. Отримані результати використовуються в програмі для оцінки напруженості технологічних процесів легкої та текстильної промисловості при визначенні зміни відносного натягу нитки по зонам заправки на технологічному обладнанні.

Важільні механізми знаходять широке використання в машинах легкої та текстильної промисловості. Робочі органи важільних механізмів в процесі роботи контактують з нитками. В залежності від траєкторії руху змінюється кут охоплення робочих органів механізмів машин легкої та текстильної промисловості. Зміна величини кута охоплення призводить до зміни натягу ниток. При зростанні кута охоплення до критичних величин може відбутися обрив нитки та зупинка технологічного обладнання. Натяг нитки збільшується при переході по зонах заправки системи подачі нитки на технологічному обладнанні. Це збільшення обумовлено взаємодією нитки з напрямними та пристроями для натягу. Максимального значення натягу буде перед робочою зоною. Різке збільшення натягу призводить по порушення нормального проходження технологічного процесу переробки нитки. Розробка нових схем системи подачі нитки потребує оперативної оцінки значення натягу перед робою зоною. Розробка спеціальних комп'ютерних програм для визначення натягу в робочій зоні дозволяє визначати необхідні технологічні параметри. Цільовою функцією в задачах оптимізації технологічних процесів виступає мінімально необхідний натяг. Змінним параметром в цільовій функції виступає сума кутів охоплення ниткою робочих органів. Використання комп'ютерної програми дозволяє визначати напруженість та зміну відносного натягу по зонам заправки технологічних машин, що дозволяє ще на стадії проектування технологічного процесу оптимізувати форму лінії подачі нитки.

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

Аналіз джерел

Комп'ютерне визначення кінематичних та динамічних параметрів плоских механізмів дозволяє визначати параметри, які використовуються при визначенні напруженості технологічних процесів [1, 2]. Дослідження впливу конструкції пристрою натягу нитки на умови його взаємодії з ниткою з урахуванням її нерівномірності по діаметру поперечного перетину мають важливе значення при визначенні натягу нитки. Натяг нитки збільшується при переході по зонах заправки системи подачі нитки на технологічному обладнанні. Це збільшення обумовлено взаємодією нитки з напрямними та пристроями для натягу [3]. Максимального значення натягу буде перед робочою зоною. Основним параметром оптимізації системи подачі ниток на технологічному обладнанні текстильної та трикотажної промисловості є мінімально необхідний натяг в робочій зоні [4–7]. Збільшення натягу в робочій зоні призводить до обриву ниток і, як наслідок, до зупинки технологічного обладнання [2, 9]. Простої устаткування, пов'язані з ліквідацією обриву, складають в даний час 75-80% від загального часу простоїв [1, 2].

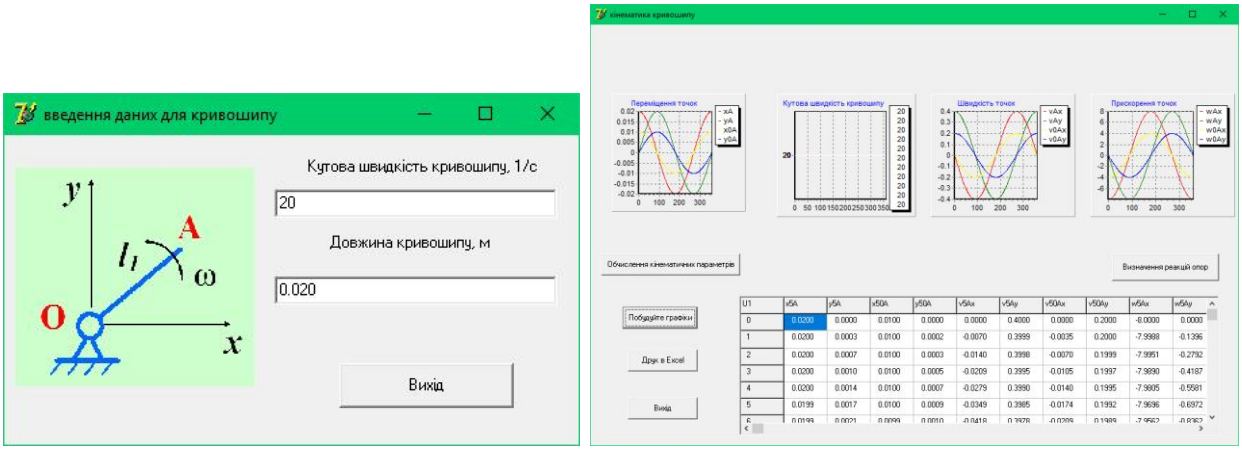
Аналіз дефектів, що приводять до обриву нитки при переробці, показав, що найбільш вагомими є: слабкі місця на нитці (стоншування), шишки і потовщення, моховитість [5–9]. Якщо виникнення перших двох дефектів пояснюється низькою якістю початкової сировини і порушенням технологічного процесу при виробництві, то останній, як наголошувалося вище, виникає безпосередньо при взаємодії ниток з робочими органами технологічного устаткування [6]. Розробка прикладних пакетів комп'ютерних програм дозволяє максимально скоротити час на проектування технологічних процесів в легкій та текстильній промисловості. Це пов'язано з модернізацією лінії заправки ниток на технологічному обладнанні, що дозволяє мінімізувати натяг нитки в робочій зоні. Мінімізація натягу забезпечується оптимізацією форми лінії заправки нитки, при якій сумарний кут охоплення напрямних буде мінімальним.

Мінімізація натягу перед робочою зоною має важливе значення для удосконалення технологічних процесів текстильної та швейної промисловості з позиції підвищення продуктивності технологічного устаткування та якості продукції що випускається.

Метою роботи є розробка комп'ютерного модуля програми KDAM для визначення кінематичних та динамічних параметрів вхідної ланки механізмів машин легкої промисловості дозволяє визначати координати, проекції швидкостей та прискорень центру мас кривошипу та точки приєднання ланок груп Асура.

Виклад основного матеріалу

На рис. 1а представлена форма TFormKr0 = class(TForm) комп'ютерного модуля unit kr0 для завдання вхідних даних комп'ютерного модуля KDAM. На формі TFormKr0 = class(TForm) розташовані наступні компоненти ButtonKR01: TButton; Edit1KR0: TEdit; Edit2KR0: TEdit; Label1: TLabel; Label2: TLabel; Image1: TImage. Компонент Image1: TImage представляє розрахункову схему вхідної ланки (кривошипа). Показана орієнтація вхідної ланки відносно координатних осей X та Y. Одно строкові компоненти Edit1KR0: TEdit, Edit2KR0: TEdit призначені для задання значень кутової швидкості та довжини кривошипу.



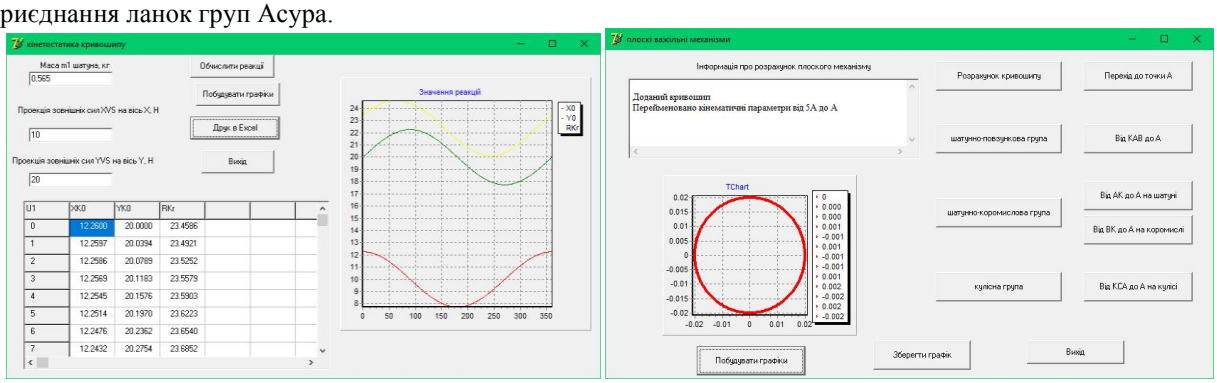
а) б)

Рис. 1. Форми комп'ютерної програми KDAM для вхідної ланки при кінематичному та динамічному дослідженні: а) форма TFormKr0 = class(TForm) комп'ютерного модуля unit kr0 для завдання вхідних даних; б) форма TFormKr1 = class(TForm) комп'ютерного модуля unit kr1 для кінематичного дослідження

Компонент ButtonKR01: TButton призначений для ініціалізації процедури procedure TFormKr0.ButtonKR01Click(Sender: TObject). При цьому здійснюється перехід на форму TFormKr1 = class(TForm) комп'ютерного модуля unit kr1 для кінематичного дослідження.

На рис. 1б представлена форма TFormKr1 = class(TForm) комп'ютерного модуля unit kr1, який призначений для визначення кінематичних параметрів: координат; проекцій векторів швидкостей та прискорень центру мас кривошипу та точки приєднання ланок груп Асура на координатні осі X та Y. На формі TFormKr1 = class(TForm) розташовані наступні компоненти: btnkrpo: TButton; Chart1: TChart; Series1: TLineSeries; Series2: TLineSeries; Series3: TLineSeries; Series4: TLineSeries; Button1ks: TButton; Button2ks: TButton; Chart2: TChart; Chart4: TChart; Series8: TLineSeries; Series10: TLineSeries; Series11: TLineSeries; Series12: TLineSeries; Series13: TLineSeries; Series14: TLineSeries; Series15: TLineSeries; Series16: TLineSeries; Series17: TLineSeries; StringGrid1: TStringGrid; Button1: TButton; Button2: TButton; Chart3: TChart. Компоненти Chart1: TChart, Chart2: TChart, Chart3: TChart та Chart4: TChart призначені для відображення координат, кутової швидкості, проекцій векторів швидкості та прискорення на координатні осі X та Y для вхідної ланки. В комп'ютерному модулі unit kr1 передбачена можливість передачі розрахункових даних з багато строкового вікна редагування StringGrid1: TStringGrid в таблиці Microsoft Excel. Компонент Button1: TButton призначений для ініціалізації процедури procedure Button1Click(Sender: TObject). При цьому здійснюється перехід на форму TFormKr2 = class(TForm) комп'ютерного модуля unit kr2 для динамічного дослідження руху вхідної ланки.

На рис. 2а представлена форма TFormKr2 = class(TForm) комп'ютерного модуля unit kr2 для визначення проекцій повної реакції в шарнірі закріплення вхідної ланки на координатні осі X та Y. На формі TFormKr2 = class(TForm) розташовані наступні компоненти: Edit1: TEdit; Label1: TLabel; Button1: TButton; Button2: TButton; Button3: TButton; StringGrid1: TStringGrid; Chart1: TChart; Series1: TLineSeries; Series2: TLineSeries; Series4: TLineSeries; Button4: TButton; Label2: TLabel; Edit2: TEdit; Label4: TLabel; Edit3: TEdit. Одно строкові вікна редагування Edit1: TEdit, Edit2: TEdit та Edit3: TEdit призначені для задання маси вхідної ланки, проекцій результуючої сили зовнішніх сил на осі X та Y. На рис. 2б представлена форма TPMForm2 = class(TForm), на якій за допомогою компонента Chart1: TChart будується траєкторія руху точки приєднання ланок груп Асура.



а) б)

Рис. 2. Форми комп'ютерної програми KDAM для вхідної ланки: а) форма TFormKr2 = class(TForm); б) форма TPMForm2 = class(TForm)

В табл. 1 представлені результати розрахунку для вхідної ланки механізму для п'яти положень кривошипу: 0^0; 90^0; 180^0; 270; 360^0.

Таблиця 1

Кінематичні та динамічні параметри для точок вхідної ланки

U1	x5A	y50A	v5Ax	v5Ay	w50Ax	w50Ay	XK0	YK0	RKr
0	0.0200	0.0000	0.0000	0.4000	-4.0000	0.0000	12.2600	20.0000	23.4586
90	0.0000	0.0100	-0.4000	0.0000	0.0000	-4.0000	10.0000	22.2600	24.4030
180	-0.0200	0.0000	0.0000	-0.4000	4.0000	0.0000	7.7400	20.0000	21.4455
270	0.0000	-0.0100	0.4000	0.0000	0.0000	4.0000	10.0000	17.7400	20.3644
360	0.0200	0.0000	0.0000	0.4000	-4.0000	0.0000	12.2600	20.0000	23.4586

При виконанні розрахунків кутова швидкість кривошипа дорівнювала 20 $с^{-1}$, довжина кривошипа дорівнювала 0.020 м, маса вхідної ланки дорівнювала 0.565 кг, проекції результуючої сили зовнішніх сил на осі X та Y дорівнювали 10 Н та 20 Н відповідно. При розрахунках враховували, що вхідна ланка розташована у вертикальній площині.

Висновки

Розроблений комп'ютерний модуль програми KDAM для визначення кінематичних та динамічних параметрів вхідної ланки механізмів машин легкої промисловості дозволяє визначати координати, проекції швидкостей та прискорень центру мас кривошипу та точки приєднання ланок груп Асура. При динамічному аналізі роботи вхідної ланки визначаються проекції повної реакції в шарнірі закріплення вхідної ланки.

Література

1. Щербань В.Ю. Механіка нитки. К. : Освіта України, 2018. 533 с.

2. Щербань В.Ю., Волков О.И., Щербань Ю.Ю. САПР оборудования и технологических процессов легкой и текстильной промышленности. К. : Бумсервис, 2004. 519 с.

3. Scherban V. Yu., Kolisko O.Z., Sholudko M.I., Kalashnik V. Yu. Algorithmic, software and mathematical components of CAD in the fashion industry. K.: Education of Ukraine, 2017. 745 p.

4. Shcherban V.Y., Kolisko O.Z., Melnyk G.V., Sholudko M.I., Kalashnik V.Y. Computer systems design: software and algorithmic components. K.: Education of Ukraine, 2019. 902 p.

5. Scherban V.Yu., Krasnitsky S.M., Rezanov V.G. Mathematical Models in CAD. Selected sections and examples of application. K.: KNUTD, 2011. 220 p.

6. Базове проектуюче забезпечення САПР в індустрії моди / [В.Ю. Щербань, Ю.Ю. Щербань, О.З. Колиско, Г.В. Мельник, М.І. Шолудько, В.Ю. Калашник]. К. : Освіта України, 2018. 902 с.

7. Щербань В.Ю., Калашник В.Ю., Колиско О.З., Шолудько М.І. Дослідження впливу матеріалу нитки і анізотропії тертя на її натяг і форму осі. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2015. 223(2). С. 25–29.

8. Shcherban V., Melnyk G., Sholudko M., Kalashnyk V. Warp yarn tension during fabric formation. Fibres and Textiles. 2018. volume 25. № 2. P. 97–104.

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

References

1. Scherban V.Yu. Mechanics of Threads. K.: Formation of Ukraine, 2018. 533 p.

2. Scherban V.Yu., Volkov O.I., Shcherban Yu.Yu. CAD equipment and technological processes for light and textile industries. K.: Boomservice, 2004. 519 p.

3. Scherban V. Yu., Kolisko O.Z., Sholudko M.I., Kalashnik V. Yu. Algorithmic, software and mathematical components of CAD in the fashion industry. K.: Education of Ukraine, 2017. 745 p.

4. Shcherban V.Y., Kolisko O.Z., Melnyk G.V., Sholudko M.I., Kalashnik V.Y. Computer systems design: software and algorithmic components. K.: Education of Ukraine, 2019. 902 p.

5. Scherban V.Yu., Krasnitsky S.M., Rezanov V.G. Mathematical Models in CAD. Selected sections and examples of application. K.: KNUTD, 2011. 220 p.

6. Shcherban V.Yu., Shcherban Y.Y., Kolisko O.Z., Melnik G.V., Sholudko M.I., Kalashnik V.Y. Basic design support of CAD in the fashion industry. Kyiv: Education of Ukraine, 2018. 902 p.

7. Scherban V.Yu., Kalashnik V.Yu., Kolisko O.Z., Sholudko M.I. Investigation of the influence of the thread material and the anisotropy of friction on its tension and the shape of the axis. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. 2015. Volume 223. Issue 2. p. 25-29.

8. Shcherban V., Melnyk G., Sholudko M., Kalashnyk V. Warp yarn tension during fabric formation. Fibres and Textiles. 2018. volume 25. № 2. P. 97–104.

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

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-323-328
УДК 004.358

ЮСКОВИЧ-ЖУКОВСЬКА ВАЛЕНТИНА
Міжнародний економіко-гуманітарний університет імені академіка Степана Дем'янчука
https://orcid.org/0000-0002-4236-1467
e-mail: valivanivna@i.ua
ЯСІНСЬКИЙ АНДРІЙ
Міжнародний економіко-гуманітарний університет імені академіка Степана Дем'янчука
https://orcid.org/0000-0002-1894-1314
e-mail: yasinskiy@meta.ua
ЛОТЮК ЮРІЙ
Міжнародний економіко-гуманітарний університет імені академіка Степана Дем'янчука
https://orcid.org/0000-0001-6696-5583
e-mail: lotyuk@ukr.unet
СОЛОВЕЙ ЛЮДМИЛА
Міжнародний економіко-гуманітарний університет імені академіка Степана Дем'янчука
https://orcid.org/0009-0001-2832-1741
e-mail: lyuda_solovej@ukr.net

ТЕХНОЛОГІЇ VR/AR ДЛЯ E-LEARNING

Стаття присвячена аналізу новітніх інформаційних технологій, процесу віртуалізації світового освітнього простору та впровадженню технологій віртуальної та доповненої реальності в навчальний процес закладів вищої освіти. Виявлено та охарактеризовано взаємозв'язок між реальним та віртуальним освітнім середовищем.

Ключові слова: інформаційні технології, цифрові компетентності, e-learning, віртуальна та доповнена реальність, цифровий освітній простір, Інтернет-середовище.

YUSKOVYCH-ZHUKOVSKA VALENTINA, YASINSKIIY ANDRIY, LOTIUK YURII, SOLOVEI LIUDMYLA
Academician Stepan Demianchuk International University of Economics and Humanities, Rivne

VR/AR TECHNOLOGIES FOR E-LEARNING

The article is devoted to the analysis of the latest information technologies, the process of virtualization of the world educational space and the introduction of virtual and augmented reality technologies into the educational process of higher education institutions. The relationship between the real and virtual educational environment is identified and characterized. Mastery of modern information and communication technologies (ICT) is a prerequisite for a digital society. Modern students are a network generation for which the electronic way of receiving educational information is a component of their life. ICT has become their usual everyday tool, and e-learning gives them access to global educational resources and improves the quality of the educational process as a whole. In e-education, all educational content is presented only in electronic form. A feature of the development of higher education is the use of the latest advances in ICT and the emergence of a new environment - virtual, which transforms the traditional system of higher education into electronic. In many countries around the world, e-learning has become an integral part of modern education. Ukrainian higher education institutions are also moving towards e-learning as one that aims to acquire in-depth professional competencies and knowledge. Virtual reality technologies challenge researchers to increase access to the practical application of these technologies in solving professional problems.

The purpose of the article is to substantiate the feasibility of using the latest digital technologies, namely virtual reality technologies in the educational process of the higher education system of Ukraine. The article uses methods of application of the latest digital technologies, namely virtual reality technologies in the educational process of the higher education system of Ukraine. The main feature of the digital space is its unique opportunities for communication, self-expression and self-determination. The Internet activity of higher education students is accompanied by a number of motives, goals, needs, attitudes, phenomena, knowledge associated with this new environment. There are many useful applications and interesting educational channels through which you can learn something new.

Keywords: information technology, digital competences, e-learning, virtual and augmented reality, digital educational space, Internet environment.

Постановка проблеми

Новітні технологічні винаходи та нове програмне забезпечення, засноване на машинному навчанні, кардинально змінюють інформаційне суспільство, створюють нові цифрові галузі та одночасно впливають на освітнє середовище підготовки IT-фахівців. Високотехнологічні рішення застосовуються практично в усіх сферах промисловості. Потенціал 3D-моделювання та 3D-друку стає частиною медичної практики в хірургії, стоматології, травматології та інших галузях. Фітнес-браслети та натільні сенсори відстежують стан здоров'я та передають сигнали «SOS» в разі критичного стану. Симулятори віртуальної та доповненої реальності здатні контролювати правильність поведінки студентів медичних напрямків під час хірургічних втручань. Використання технологій VR/AR в e-learning спрямована на підвищення якості фахівців.

Для того, щоб зробити застосування технологій VR/AR в e-learning ефективним, необхідно визначитись зі спеціальними компонентами e-learning. Розглянемо компоненти технологій.

Рис. 1. Компоненти VR/AR для e-learning

Візуалізація навчального контенту під час різних видів занять дозволяє відтворити та деталізувати складні технологічні процеси, які відбуваються в реальному світі без ризиків для всіх учасників навчального процесу.

Володіння сучасними інформаційно-комунікаційними технологіями (ІКТ) є необхідною умовою цифрового суспільства. Сучасні студенти – це мережеве покоління, для якого електронний спосіб отримання навчальної інформації є складовою їх життєдіяльності. ІКТ стали їх звичним повсякденним інструментом, а електронне навчання відкриває їм доступ до світових освітніх ресурсів та підвищує якість навчального процесу загалом. В електронній освіті весь навчальний контент представлено лише в електронній формі. Особливістю розвитку вищої освіти є використання новітніх досягнень ІКТ та виникнення нового середовища – віртуального, яке трансформує традиційну систему вищої освіти в електронну. В багатьох країнах світу електронна освіта стала невід'ємною частиною сучасної освіти. Українські заклади вищої освіти також крокують до електронної освіти, як такої, що спрямована на здобуття поглиблених професійних компетенцій і знань. Технології віртуальної реальності ставлять перед дослідниками завдання підвищити доступ до практичного застосування цих технологій у розв’язанні професійних задач.

Аналіз останніх джерел

Питання впровадження цифрових технологій в навчальний процес досліджується у працях Б.Л. Аграновича, А.І. Аржанової, В.Ю. Бикова, О.О. Глущенко, Г.В. Єльнікової, Н.А. Кудас, В.І. Маслова, С.О. Сисоєвої, О.В. Співаковського, А.Н. Тихонова, Я.Б. Федорової та інших. Розвиток цифрової компетентності у викладачів та студентів закладів вищої освіти досліджували Р.С. Гуревич, М.І. Жалдак, В.О. Калінін, С.М. Іванова, О.В. Майценко, Н.В. Морзе, О.Д. Нестерова, О.В. Овчарук, С.Д. Петрович, О.В. Співаковський, Л.Л. Хоружа та ін.

Такі вчені як В.І. Гриценко, С.П. Кудрявцева, С.Г. Литвинова, В.В. Колос, Е.В. Веренич, А.М. Манако приділили увагу теоретичним аспектам проектування відкритого інформаційно-комунікаційного освітнього простору. Цінний досвід інформатизації навчального процесу, набутий вищою освітою європейських країн та США, потребує порівняльного аналізу та впровадження цінних надбань передового досвіду у вітчизняну підготовку висококваліфікованих фахівців.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: обґрунтування доцільності застосування новітніх цифрових технологій, а саме технологій віртуальної реальності у навчальному процесі системи вищої освіти України.

Виклад основного матеріалу

Європейський парламент і Рада Європейського Союзу 17 січня 2018 року схвалили Рамкову програму оновлених ключових компетентностей для навчання протягом життя. Такі компетентності розвиваються в процесі навчання протягом усього життя, шляхом формального, неформального та інформального навчання.

Оновлено перелік і назви ключових компетентностей, визначених Європейським Союзом, порівняно з попередньою редакцією. Серед 8 ключових компетенцій Європейський Союз визначив цифрову компетентність (Digital competence) [1]. Цифрова компетентність — це відповідальне використання та взаємодія з цифровими технологіями для навчання, професійної діяльності та участі у житті суспільства. Вона включає цифрову та інформаційну грамотність, комунікацію та створення цифрового контенту (зокрема програмування) та кібербезпеку. Вона передбачає знання базових функцій та використання різних пристроїв, програмного забезпечення та цифрових мереж. Цифрові навички включають можливість використання, доступу, фільтрування, оцінки, створення, програмування та обміну цифровим змістом.

Важливими є вміння захищати інформацію, зміст, особисті дані, а також ефективно взаємодіяти з програмним забезпеченням, пристроями, штучним інтелектом або роботами [1].

В даний час інформатизація освіти визнана одним з пріоритетних державних завдань в усіх розвинених країнах світу. На сьогодні Інтернет-середовище містить безліч освітніх, наукових та інших корисних ресурсів. Основним напрямом застосування ІКТ в освітньому просторі є впровадження та використання електронних систем навчання.

Під електронними освітніми ресурсами (ЕОР) розуміють засоби навчання на цифрових носіях будь-якого типу або розміщені в інформаційно-телекомунікаційних системах, які відтворюються за допомогою електронних технічних засобів і застосовуються в освітньому процесі [2].

Електронне навчання (e-*learning*, *Electronic Learning*) — система навчання, за допомогою інформаційних, електронних технологій. Є синонімом таких понять як дистанційне навчання, мережеве навчання, віртуальне навчання, мультимедійне навчання, мобільне навчання.

За визначенням фахівців ЮНЕСКО: «e-Learning» — навчання за допомогою Інтернет і мультимедіа» [3].

E-learning із застосуванням сучасних цифрових технологій відкриває перед закладами вищої освіти безліч можливостей для вдосконалення навчального процесу.

Головною особливістю цифрового простору є його унікальні можливості для комунікацій, самовираження та самовизначення. Інтернет-активність здобувачів вищої освіти супроводжується цілим рядом мотивів, цілей, потреб, установок, феноменів, пізнань, пов'язаних з цим новітнім середовищем. Існує чимало корисних додатків та цікавих освітніх каналів, за допомогою яких можна навчитись новому.

Інформаційно-комунікаційні технології за короткий час стали невід'ємною складовою сучасного суспільства. У багатьох країнах світу, зокрема у США, вільне володіння цими технологіями є складовою базової освіти. Науковці слушно вважають, що інформаційне освітнє середовище передбачає використання комп'ютерної техніки та програмно-телекомунікаційних систем, які реалізуються єдиними технологічними засобами та взаємопов'язаним змістовим наповненням. Інформаційне середовище – це частина інформаційного простору, яка формує найближче інформаційне оточення індивіда, виступає як сукупність умов, що забезпечують його продуктивну діяльність [4].

На основі використання сучасних ІКТ навчальна діяльність (формальна, неформальна та інформальна) відбувається на перетині двох світів: реального і віртуального. Методологія й методи педагогічних досліджень класичної педагогіки потребують перегляду й удосконалення в контексті сучасних реалій навчально-виховного процесу, потреб та інтересів усіх його суб'єктів [5].

У системі вищої освіти також розпочався пошук нових чітко спрямованих професійних практико-орієнтованих форм навчання, метою яких є ефективне забезпечення формування професійних компетентностей майбутніх фахівців на засадах електронного навчання та використання технологій віртуальної реальності.

Але не слід плутати віртуальну реальність з доповненою реальністю. Їх корінна відмінність полягає в тому, що віртуальна реальність конструює новий, штучний світ, а доповнена реальність лише вносить окремі штучні елементи в сприйняття реального світу.

Нормативно-правовими документами України, зокрема Законами Україну «Про освіту», «Про вищу освіту», Національною стратегією розвитку освіти в Україні на період до 2021 року одними із пріоритетних завдань реформування освіти були визначені інформатизація освіти та вдосконалення інформаційно-ресурсного забезпечення освіти і науки. Оцінювання якості вищої освіти передбачається за сукупністю результатів навчання, за сформованими професійними компетентностями, що зумовлено потребою зацікавлених сторін освітнього ринку (роботодавців, держави й суспільства).

Процес формування професійної компетентності у майбутніх фахівців буде ефективним, якщо він здійснюватиметься на основі впровадження у систему професійної підготовки розвитку цифрової компетентності викладачів і студентів.

Розроблені та впроваджені в Міжнародному економіко-гуманітарному університеті імені академіка Степана Дем'янчука електронні курси на платформі LMS Moodle формують цифрові компетентності, які можуть бути використані для викладачів, студентів, магістрантів в процесі професійної підготовки фахівців.

Прогрес у галузі мобільного зв'язку робить доступним Інтернет на основі технології GPRS, а впровадження технологій 4G (в перспективі 5G) забезпечує ефективне мобільне навчання з використанням спецефектів віртуальної реальності. Такі мобільні додатки формують новітню систему вищої освіти.

Віртуальна реальність (VR) – це створене комп'ютером тривимірне середовище, з яким може взаємодіяти людина. VR-можливості дуже широкі: абітурієнти можуть ознайомитися із своїми майбутніми університетами та прогулятися їхніми територіями, навіть не виходячи з дому [6].

У дослідженні компанії Perkins Coie у 2018 році сфера освіти вже посіла друге місце за показником популярності віртуальної реальності. Віртуальну реальність в освіті підтримують і фонди, і спільноти. Віртуальна реальність не змінює того факту, що викладання – прерогатива викладачів. Технології можуть тільки доповнити процес навчання, аж ніяк не замінити викладача повністю. Але вони надають безліч інструментів, щоб демонструвати 3D проекції, заохочувати студентів, що навчаються віддалено, використовувати інтерактивні дошки, організовувати практичні заняття тощо.

За допомогою віртуальної реальності студенти можуть відвідати будь-яке місце в режимі он-лайн. Технологія Anatomyou VR 2.0 демонструє, як виглядають та функціонують наші органи. Відомо, що лише певна частина сучасних студентів сприймає матеріал за допомогою читання чи прослуховування лекцій.

Решта ж краще сприймає візуальну інформацію. Віртуальні технології дозволяють візуалізувати чимало складних речей – механізми, формули, плани тощо. Ефект присутності надає такому формату навчання всі шанси обігнати у популярності звичні нам практичні заняття. Однією з таких технологій є Story Spheres. Це сайт, який поєднує віртуальну реальність та діджитал інструменти, дозволяє студентам додавати свої фотографії чи зображення з Google Maps та супроводжувати їх власними коментарями. Так, студенти можуть робити доповіді про певні історичні події, виступаючи в ролі ведучого, що веде репортаж з місця події. Пристрій Panoform дозволяє перетворювати 2D зображення у 3D моделі. За його допомогою, студенти, що вивчають хімію чи біологію, можуть самостійно зображувати молекули, а потім роздивлятись та адаптувати їх у режимі віртуальної реальності. Із запровадженням віртуальної реальності студенти зможуть користуватися гаджетами під час занять в освітніх цілях.

Ефективність технологій віртуальної реальності також можна спостерігати й серед фахівців з різних галузей. Наприклад, хірурги, що використовували навчальні пристрої віртуальної реальності впродовж двох годин, покращили свій час та ефективність на операціях на 83% та 70% відповідно. Солдати, що навчалися за допомогою гейміфікованої програми віртуальної реальності, випередили решту своїх колег на 17% при демонстрації навичок на практиці [7].

UX та контент для e-learning застосунків віртуальної реальності створюють ефект присутності, тобто переносить користувачів в іншу реальність. Тому ці технології можуть бути ефективними освітніми інструментами. VR допомагає набувати знання, які можна використовувати у майбутній професії. Віртуальна реальність пропонує безліч можливостей для освітніх закладів. Вона допомагає перезапустити процес навчання та зробити його дослідницьким. У студентів мають виникати нові ідеї, а також вони мають продукувати нові знання. Віртуальна реальність дозволяє відобразити те, що важко чи навіть не можливо побачити.

VR – це можливість подивитись та взаємодіяти з віртуальним світом. а з іншої ми можемо лише спостерігати за ним без особливої активної участі. Окуляри доповненої реальності (mixed reality), розробка “Microsoft Hololens 2” сприяють взаємодії з об’єктами, що виходить за межі віртуальних і прямує до реального світу.

Віртуальна та додана реальність вже стали частиною розваг і навчання. Віртуальна реальність (VR) — це повністю цифровий світ, створений за допомогою комп’ютерних систем, які забезпечують повний спектр відчуттів. Віртуальна реальність занурює людину в повністю нереальний, штучно створений світ.

Доповнена реальність (AR) – це сучасна технологія, яка доповнює звичну реальність елементами, яких насправді не існує, але люди можуть їх бачити і частково навіть взаємодіяти з ними в режимі реального часу. Для використання доданої реальності часто достатньо звичайних гаджетів, наприклад, смартфону або планшету.

VR та AR почали активно застосовувати в навчанні. Зокрема у симуляційних іграх, які готують до реальних ситуацій в практичній діяльності, як-то проведення хірургічної операції або пілотування літака. Програма Froggipedia дозволяє оперувати, не наносячи шкоди живим тваринам. А програма доданої реальності Star Walk 2 дозволяє активніше вивчати зоряне небо.

Віртуальна реальність також збагачує відвідування музеїв через реалістичну реконструкцію минулих часів. Так, у Національному музеї Фінляндії можна відвідати одну з картин та зануритися у реальність позаминулого століття, вдягнувши обладнання VR [8].

Використання систем віртуальної реальності в ЗВО – це новий підхід до подачі і засвоєння наукового і методичного матеріалу. Здобувачі вищої освіти можуть попрацювати в унікальних експериментальних лабораторіях, спостерігати за історичними подіями та навіть взяти участь в них, побувати в космосі, відправитися в подорож в будь-яку точку земної кулі, будувати об'ємні діаграми і проводити хімічні досліди. Об'єкти віртуальної реальності зазвичай поводять себе близько до поведінки аналогічних об'єктів матеріальної реальності. Користувач може впливати на ці об'єкти згідно з реальними законами фізики (гравітація, властивості води, зіткнення з предметами, відображення тощо) [4].

В даний час умови та спосіб життя відрізняються новими характеристиками інформаційного суспільства. Молоді люди, які виступають «основними споживачами» освітніх послуг, відчувають ці відмінності дуже гостро і саме тому все більше і більше висувають вимоги до змісту, рівня та якості освітнього процесу. Тому віртуальні технології допоможуть індивідуалізації навчальних програм, відкриють доступ до освітніх ресурсів, підвищать комунікабельність студентів та викладачів, гнучкість та керованість навчального процесу. Віртуалізація освітнього середовища підготовки висококваліфікованих фахівців у ЗВО, а також науково обґрунтоване запровадження елементів технологій віртуального навчання сприятиме становленню принципово нової системи освіти.

Найпоширенішим засобом занурення у віртуальну реальність, є спеціалізовані шоломи/окуляри. Шолом складається з корпусу, дисплею, системи лінз та датчиків відстеження руху. Базові станції та контролери дозволяють взаємодіяти з іншими предметами у віртуальному просторі.

У підсумку, користувач має можливість «озирнутися» всередині віртуальної реальності і відчувати себе в ній, як в реальному світі. Науковці з Цюриха, наприклад, розробили прилад, який дозволяє отримати повноцінне відчуття польоту [6].

Об'єкти віртуальної реальності зазвичай поводять себе близько до поведінки аналогічних об'єктів матеріальної реальності.

Сучасні смартфони є високопродуктивними і здатні самостійно обробляти навіть самий «важкий» 3D-контент. Монітори смартфонів мають досить високу роздільну здатністю. Практично на кожному смартфоні є датчики визначення положення пристрою в просторі.

Технології віртуальної реальності можуть зробити процес навчання більш цікавим. Наприклад, студенти можуть отримати можливість «бачити на власні очі» різні події та складні і небезпечні процеси, описувані в підручниках та посібниках.

Для розробки застосунків віртуальної реальності існує два основних середовища: Unreal Engine та Unity.

Unreal Engine – ігровий двигун, що розробляється і підтримується компанією Epic Games. Написаний на мові C ++, двигун дозволяє створювати ігри для більшості операційних систем і платформ: Microsoft Windows, Linux, Mac OS і Mac OS X; консолей Xbox, Xbox 360, Xbox One, PlayStation 2, PlayStation 3, PlayStation 4, PSP, PS Vita, Wii, Dreamcast, GameCube і ін., а також на різних портативних пристроях, наприклад, пристроях Apple (iPad, iPhone), керованих системою iOS і інших.

В Unreal Engine 3 з'явився Кісмет (Kismet) - редактор особливої скриптової мови для створення інтерактивних і анімованих рівнів, в якому використовуються блок-схеми і ніякої роботи з UnrealScript. Тісно пов'язаний з утилітою Matinee завдання анімації / переміщення об'єктів в певний час. Дозволяє оперувати багатьма властивостями об'єктів, наприклад, кольором освітлення, поворотом муверів, прозорістю матеріалів і т. ін.

Unity – міжплатформне середовище розробки комп'ютерних ігор. Unity дозволяє створювати додатки, що працюють під більш ніж 20 різними операційними системами, що включають персональні комп'ютери, ігрові консолі, мобільні пристрої, Інтернет-додатки та інші. Основними перевагами Unity є наявність візуального середовища розробки, міжплатформеної підтримки і модульної системи компонентів.

Концепція Unity пропонує гнучкий підхід візуального редагування об'єктів, але з іншого боку, редагування таких шаблонів є складним. Також, WebGL-версія движка, в силу специфіки своєї архітектури (трансляція коду з C # в C ++ і далі в JavaScript), має ряд невирішених проблем з продуктивністю, споживанням пам'яті і працездатністю на мобільних пристроях. На Unity написані сотні ігор, додатків та симуляцій, Unity використовується як великими розробниками (наприклад, Blizzard), так і в створенні інді-ігор [9].

Висновки

Узагальнюючи результати проведеного дослідження, можна зробити висновок, що використання технологій VR/AR дозволяють моделювати та створювати проекти в різних наукових та освітніх напрямках. Для конкретної предметної галузі є свої унікальні технології VR/AR. З розвитком технологій VR/AR збільшується їх частка в e-learning та швидше розвивається цифровий освітній простір. Потребує подальшого дослідження та методичного обґрунтування застосування технологій віртуальної реальності в електронному навчанні, як підвищення якості засвоєння навчального матеріалу забезпечення новітніх умов навчання та формування професійних та цифрових компетенцій у здобувачів вищої освіти.

Література

1. Ключові компетентності для навчання протягом життя. Рамкова програма оновлених ключових компетентностей для навчання протягом життя. URL: http://dlse.multycourse.com.ua/ua/page/15/53

2. Положення про електронні освітні ресурси : затверджене МОН України в редакції від 29 травня 2019 р. № 749. URL: https://ips.ligazakon.net/document/view/Re33637?an=1

3. https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B5_%D0%BD%D0%B0%D0%B2%D1%87%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F

4. Мокра М. Інформаційно-комунікаційне середовище в освітній системі США. Зарубіжний досвід. URL: http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb/23849/1/28-213-222.pdf

5. Биков В., Лещенко М. Цифрова гуманістична педагогіка відкритої освіти. Теорія і практика управління соціальними системами, 4‘2016. С. 115–130. URL: http://www.tipuss.com.ua/wp-content/uploads/2016/12/%D0%91%D1%8B%D0%BA%D0%BE%D0% %BD%D0%B8%D1%8F.pdf

6. Можливості технологій віртуальної реальності в різних сферах. URL: https://www.radiosvoboda.org/a/28903722.html

7. Віртуальна реальність в освіті: нові можливості для навчання. URL: https://www.intellias.ua/blog/vr-possibilities-in-education

8. Віртуальна та додана реальність. Безпека дітей в інтернеті. Цифровий світ: виклики та перспективи. URL: https://osvita.diia.gov.ua/uploads/0/535-vrandar.pdf

9. Арестов А. В. Особливості застосування технології віртуальної реальності у навчальному процесі : магістерська дисертація зі спеціальності 171 Електроніка / Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/27306/1/Arestov_magistr.pdf

References

1. Kliuchovi kompetentnosti dlia navchannia protiahom zhyttia. Ramkova prohrama onovlenykh kliuchovykh kompetentnostei dlia navchannia protiahom zhyttia. URL: http://dlse.multycourse.com.ua/ua/page/15/53
2. Polozhennia pro elektronni osvitni resursy : zatverdzhene MON Ukrainy v redaktsii vid 29 travnia 2019 r. № 749. URL: https://ips.ligazakon.net/document/view/Re33637?an=1
3. https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B5_%D0%BD%D0%B0%D0%B2%D1%87%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F
4. Mokra M. Informatsiino-komunikatsiine seredovyshche v osvitnii systemi SShA. Zarubizhnyi dosvid. URL: http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb/23849/1/28-213-222.pdf
5. Bykov V., Leshchenko M. Tsyfrova humanistychna pedahohika vidkrytoi osvity. Teoriia i praktyka upravlinnia sotsialnymy systemamy, 4‘2016. S. 115–130. URL: http://www.tipuss.com.ua/wp-content/uploads/2016/12/%D0%91%D1%8B%D0%BA%D0%BE%D0%%BD%D0%B8%D1%8F.pdf
6. Mozhlyvosti tekhnolohii virtualnoi realnosti v riznykh sferakh. URL: https://www.radiosvoboda.org/a/28903722.html
7. Virtualna realnist v osviti: novi mozhlyvosti dlia navchannia. URL: https://www.intellias.ua/blog/vr-possibilities-in-education
8. Virtualna ta dodana realnist. Bezpeka ditei v interneti. Tsyfrovyi svit: vyklyky ta perspektyvy. URL: https://osvita.diia.gov.ua/uploads/0/535-vrandar.pdf
9. Arestov A. V. Osoblyvosti zastosuvannia tekhnolohii virtualnoi realnosti u navchalnomu protsesi : mahisterska dysertatsiia zi spetsialnosti 171 Elektronika / Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy «Kyivskyi politekhnichnyi instytut imeni Ihoria Sikorskoho». URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/27306/1/Arestov_magistr.pdf

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-329-337
УДК 637.5.02

ЯРЕМЧЕНКО ОЛЕКСАНДР
Національний університет «Львівська політехніка»
https://orcid.org/0009-0001-2002-2704
e-mail: Oleksandr.D.Yaremchenko@lpnu.ua
ПУКАЧ ПЕТРО
Національний університет «Львівська політехніка»
https://orcid.org/0000-0002-0359-5025
e-mail: Petro.Y.Pukach@lpnu.ua

РОЗРОБКА ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ РОЗПІЗНАВАННЯ МІКРОМІМІКИ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЛЮДИНИ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕМОЦІЙНОГО ШІ

У цій статті пропонується використовувати мікроміміку, невеликі рухи м'язів обличчя, які важко помітити неозброєним оком, для оцінки психологічного стану за допомогою штучного інтелекту. Метою дослідження є розробка та вдосконалення методів аналізу мікроміміки для точного розпізнавання емоцій та психологічного стану індивідів. У цьому дослідженні ми провели експериментальне дослідження запропонованого методу з використанням відеозаписів осіб у різних емоційних станах. Крім того, наш підхід має кілька переваг порівняно з попередніми методами аналізу мікроміміки. Наприклад, наш метод не покладається на анотацію вручну, яка займає багато часу та може призвести до помилок людини. Натомість наш підхід використовує автоматизований процес, який є більш ефективним і послідовним. У порівнянні з попередніми дослідженнями запропонований метод має ряд переваг, включаючи аналіз мікроміміки в реальному часі, можливість обробки великомасштабних наборів даних і здатність аналізувати складні вирази обличчя. Крім того, запропонований метод долає обмеження традиційних алгоритмів машинного навчання, які є менш ефективними у захопленні часових залежностей у відеоданих. Загалом, запропонований метод продемонстрував багатообіцяючі результати в аналізі мікроміміки та забезпечує міцну основу для майбутніх досліджень у сфері емоційного ШІ.

На завершення, результати нашого експерименту та їх порівняння з результатами попередніх досліджень демонструють ефективність та застосовність запропонованого нами методу в аналізі мікроміміки для оцінки психологічного стану за допомогою алгоритмів глибокого навчання. Це дослідження сприяє розвитку емоційного штучного інтелекту та відкриває нові можливості для оцінки психологічного стану за допомогою мікроміміки. Результати цього дослідження можуть бути корисними в різних сферах застосування, включаючи психічне здоров'я, взаємодію людини з комп'ютером і соціальну робототехніку.

Ключові слова: мікроміміка, емоційний ШІ, психологічний стан, штучний інтелект, розпізнавання виразу обличчя, машинне навчання, аналіз відео, розпізнавання емоцій, взаємодія людини з комп'ютером, психічне здоров'я.

YAREMCHENKO OLEKSANDR, PUKACH PETRO
Lviv Polytechnic National University

RESEARCH OF STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF MEAT AS AN OBJECT OF PROCESSING IN MEAT COMMINUTOR

This paper proposes the use of micro mimics, small facial muscle movements that are difficult to detect with the naked eye, for the assessment of psychological states using artificial intelligence. The aim of the research is to develop and improve methods for the analysis of micro mimics to accurately recognize emotions and psychological states of individuals. In this study, we conducted an experimental investigation of the proposed method using video recordings of individuals in various emotional states. Additionally, our approach has several advantages over previous methods in micro mimics analysis. For instance, our method does not rely on manual annotation, which is time-consuming and prone to human error. Instead, our approach uses an automated process that is more efficient and consistent. In comparison with the previous studies, the proposed method has several advantages, including real-time analysis of micro mimics, the capability to handle large-scale datasets, and the ability to analyze complex facial expressions. Moreover, the proposed method overcomes the limitations of traditional machine learning algorithms, which are less effective in capturing the temporal dependencies in video data. Overall, the proposed method has demonstrated promising results in micro mimics analysis and provides a solid foundation for future research in the field of emotional AI. In conclusion, the results of our experiment and their comparison with the results of previous research demonstrate the effectiveness and applicability of our proposed method in analyzing micro mimics for assessing the psychological state using deep learning algorithms. This study contributes to the field of emotional AI and opens up new opportunities for the assessment of psychological states using micro mimics. The results of this study could be useful in a variety of applications, including mental health, human-computer interaction, and social robotics.

Keywords: Micro mimics, emotional AI, psychological state, artificial intelligence, facial expression recognition, machine learning, video analysis, emotion recognition, human-computer interaction, mental health.

Постановка проблеми

Останніми роками в галузі емоційного штучного інтелекту спостерігається значний прогрес: дослідники та практики використовують алгоритми машинного навчання для виявлення тонких моделей виразу обличчя, які розкривають емоційний і психологічний стан людини. Одним із найбільш перспективних підходів у цій галузі є аналіз мікроміміки, короткої міміки, яка може виявити справжні емоції людини, навіть якщо вона намагається їх приховати. Чому це важливо: оскільки штучний інтелект вчиться інтерпретувати людські емоції та реагувати на них, керівники вищої ланки повинні розглянути, як він може змінити їхні галузі та відігравати вирішальну роль у їхніх компаніях [1].

Актуальність цього дослідження: точні та надійні методи оцінки психологічного стану людини можуть мати значний вплив на психічне здоров'я, охорону здоров'я, освіту, маркетинг та інші сфери. Удосконалюючи та розвиваючи методи оцінки психологічного стану за допомогою мікроміміки та штучного інтелекту, дослідники можуть надати більш точне та детальне уявлення про емоційний та психологічний стан людей.

Метою цього дослідження є покращення нашого розуміння мікроміміки та її потенційного застосування в оцінці психологічного стану людей. Зокрема, ми прагнемо розробити алгоритми машинного навчання, які можуть аналізувати мікроміміку в режимі реального часу, забезпечуючи точне й надійне уявлення про емоційний і психологічний стан людини. Щоб досягти цієї мети, ми виконаємо кілька завдань, включаючи огляд літератури з аналізу мікроміміки та емоційного ШІ, розробку алгоритмів машинного навчання для аналізу мікроміміки в реальному часі та оцінку цих алгоритмів у різноманітних налаштування, включаючи діагностику психічного здоров'я, охорону здоров'я, освіту, маркетинг і взаємодію людини з комп'ютером.

Загалом це дослідження має потенціал зробити значний внесок у сферу емоційного штучного інтелекту, забезпечуючи нове розуміння емоційного та психологічного стану людей і відкриваючи нові шляхи діагностики, лікування та підтримки.

Аналіз останніх джерел

Міміка або вираз обличчя (ВО) є високоефективним і універсальним засобом людського спілкування, який тісно пов'язаний із психічними станами, установками та намірами [2]. Крім звичайного ВО, з яким ми стикаємося щодня, емоції також можна виражати за допомогою мікровиразів (МВ) за певних обставин. МВ — це тонкі та швидкі рухи обличчя, які виникають у ситуаціях сильного стресу, коли люди намагаються приховати свої справжні почуття. На відміну від макровиразів, МВ є спонтанними, і їх важко виявити, оскільки вони тривають лише від 1/25 до 1/3 секунди. Феномен МВ вперше був відкритий у 1966 році Хаггардом та Айзексом, а пізніше Екманом та Фрізеном [3] у 1969 році під час дослідження психіатричних пацієнтів. Екман та ін. продовжили свої дослідження МВ та розробили систему кодування дій обличчя (FACS) [4] та інструмент навчання мікровираженню (METT) [5]. FACS аналізує ВО в окремих м'язових рухах, які називаються одиницями дії (AU) [4], щоб підвищити ефективність розпізнавання виразу обличчя [6]. З іншого боку, METT допомагає підвищити емоційну обізнаність людей і ефективність виявлення МВ.

Просто виявити МВ складно через їх тонкість, швидкоплинність і мимовільну природу, а їх класифікація за різними категоріями емоцій навіть складніша, ніж розпізнавання виразу обличчя. Крім того, на МВ може впливати культурний контекст і емоційний фон. Таким чином, збір і анотування даних МВ є складним завданням, що призводить до невеликих наборів даних і існуючих методів, які не можуть впоратися з тонкістю та швидкоплинністю. Розпізнавання мікровиразів (MER) стає все більш важливим у багатьох системах взаємодії людина-комп'ютер [7, 8]. Дослідники використовували локальний бінарний шаблон із трьох ортогональних площин (LBP-TOP), а також особливості зовнішнього вигляду та геометрії для MER, але з появою глибокого навчання дослідники зараз досліджують підходи на основі DL. Незважаючи на дефіцит зразків МВ та низьку інтенсивність, ефективні мілкі мережі та генеративні змагальні мережі (GAN) сприяли значному прогресу в MER з DL, який наразі досягає найсучаснішої продуктивності.

Нещодавні дослідження в області емоційного штучного інтелекту показали, що аналіз мікроміміки може надати цінну інформацію про емоційний і психологічний стан людини. У цьому розділі ми надаємо детальний огляд останніх розробок в області аналізу мікроміміки та штучного інтелекту для оцінки психологічного стану. Одне нещодавнє дослідження Jinsheng Wei та ін. (2021) [9] пропонує новий підхід для розпізнавання мікровиразів обличчя за допомогою ансамблю глибоких згорткових нейронних мереж (CNN). Запропонований підхід використовує етап попередньої обробки для виявлення цікавих областей на обличчі та виділення відповідних рис обличчя. Потім група CNN тренується на вилучених ознаках для класифікації мікровиразів. Запропонований підхід оцінюється на трьох різних наборах даних, і результати показують, що сукупність CNN перевершує інші найсучасніші підходи до розпізнавання мікровиразів. Дослідження робить висновок, що запропонований підхід може бути використаний як перспективний інструмент для розпізнавання мікровиразів у реальному часі в різних програмах, таких як взаємодія людини з комп'ютером і системи безпеки.

Інше дослідження He Zhang і Hanling Zhang (2022) [10] обговорює важливість MER у різних сферах, таких як виявлення брехні, аналіз депресії, системи взаємодії людини з комп'ютером і комерційні переговори. Він підкреслює характеристики мікровиразів, які відображають справжні емоції людини і зазвичай виникають, коли вони намагаються приховати свої почуття в середовищі високого ризику. Вивчення мікровиразів традиційно проводилося з психологічної точки зору, що вимагало спеціальних навичок. Однак останнім часом MER на основі глибокого навчання набув популярності та включає попередню обробку зображень, виділення ознак і класифікацію емоцій. У статті представлено огляд проблем, з якими стикається MER, типових наборів даних і методів попередньої обробки зображень. Він також описує методи MER на основі глибокого навчання та класифікує їх відповідно до структури мережі. Крім того, у статті представлено метрики та протоколи оцінювання, а також порівнюються різні алгоритми на складеному наборі даних.

Нарешті, стаття завершується висвітленням майбутніх перспектив MER. Загалом, стаття містить всебічний аналіз останніх досягнень MER на основі глибокого навчання та їх потенційного застосування в різних сферах. Загалом ці дослідження демонструють потенціал аналізу мікроміміки та штучного інтелекту для оцінки психологічного стану в різноманітних умовах. Наше дослідження спрямоване на розвиток цих розробок шляхом розробки нових і вдосконалених методів аналізу мікроміміки в реальному часі з кінцевою метою покращення нашого розуміння емоційного та психологічного стану людей. Є кілька компаній і дослідницьких груп, які працюють над розробкою систем емоційного штучного інтелекту, які включають аналіз мікроміміки. Ось кілька прикладів.

Affectiva: Affectiva — це компанія, яка спеціалізується на технології розпізнавання емоцій, включаючи мікроаналіз експресії. Їхнє програмне забезпечення для розпізнавання емоцій використовує алгоритми машинного навчання для аналізу виразу обличчя в режимі реального часу та ідентифікації мікроміміки, пов'язаної з певними емоціями.

Emotient: компанія Emotient була придбана Apple у 2016 році. Вони розробили програмне забезпечення для розпізнавання емоцій, яке використовувало алгоритми машинного навчання для аналізу виразу обличчя та ідентифікації мікроміміки. Вважається, що Apple використовує цю технологію у власних продуктах і послугах.

Realeyes: Realeyes – це компанія, яка використовує технологію розпізнавання емоцій, щоб допомогти рекламодавцям оцінити емоційний вплив їхніх оголошень. Їхнє програмне забезпечення аналізує мікровирази та інші риси обличчя, щоб визначити, як глядачі емоційно реагують на рекламу.

Noldus Information Technology: Noldus — це компанія, яка спеціалізується на програмних і апаратних рішеннях для дослідження поведінки, включаючи розпізнавання емоцій. Вони розробили ряд інструментів, які можна використовувати для аналізу мікровиразів та інших тонких поведінкових показників емоцій.

Університет Карнегі-Меллона: Інститут взаємодії людини та комп'ютера при Університеті Карнегі-Меллона провів широке дослідження аналізу мікровираження та розпізнавання емоцій. Їхня робота зосереджена на розробці нових алгоритмів і технологій, які можна використовувати для аналізу виразу обличчя та інших тонких сигналів для визначення емоційного стану людини.

Це лише кілька прикладів компаній і дослідницьких груп, які працюють над аналізом мікроміміки та розпізнаванням емоцій за допомогою ШІ. Оскільки сфера емоційного штучного інтелекту продовжує розвиватися, цілком ймовірно, що з'явиться більше конкурентів, а технологія продовжить розвиватися.

Вивчення мікроміміки та її ролі в емоційному вираженні та розпізнаванні має багату історію, яка охоплює кілька десятиліть. Ось деякі ключові віхи в історії досліджень мікроміміки.

1. Пол Екман [11]: психолог, який широко визнаний як один із піонерів дослідження мікроміміки. У 1960-х роках він почав вивчати міміку людей з різних культур і розробив таксономію міміки, яка включала як макровирази (такі як посмішка чи нахмурений лоб), так і мікровирази (тонкі, короткі вирази, які важко виявити). без ретельного спостереження). Пол Екман розробив кілька навчальних програм, які можна використовувати як інструменти [12] для навчання та глибокого розуміння емоцій, мікроміміки та стосунків:

a. Інструмент навчання мікровиразам (METT та інтенсивний MEITT) для навчання мікроміміки за фотографіями реальних людей.

b. Навчальний інструмент тонких експресій (SETT), щоб зрозуміти, як відбуваються емоції. SETT дає чітке розуміння злиття емоцій на обличчі людини.

в. Навчальний інструмент профілю Micro Expressions (MEPT): для вивчення того, як емоції змінюються під різними кутами.

2. Мікровирази та обман: у 1970-х і 1980-х роках дослідники почали досліджувати роль мікровиразів у виявленні обману. Дослідження показали, що люди, які брешуть, як правило, демонструють більше мікровиразів, ніж люди, які говорять правду, і що ці мікровирази часто свідчать про негативні емоції, такі як страх або відраза.

3. Технологія розпізнавання емоцій: у 2000-х роках, із появою машинного навчання та технологій комп'ютерного зору, дослідники почали розробляти алгоритми, які могли б автоматично аналізувати вираз обличчя та виявляти мікроміміку. Це призвело до розробки технології розпізнавання емоцій, яку можна було б використовувати в різноманітних програмах, таких як безпека та спостереження, реклама та діагностика психічного здоров'я.

4. Критика досліджень мікроміміки: хоча дослідження мікроміміки зробили значний внесок у наше розуміння емоційного вираження та розпізнавання, воно також було предметом певної критики. Деякі дослідники сумніваються в надійності та достовірності виявлення мікровиразів, стверджуючи, що важко розрізнити справжні мікровирази та інші рухи обличчя, які можуть бути не пов'язані з емоціями. Інші висловлюють занепокоєння щодо можливого зловживання технологією розпізнавання емоцій, наприклад, у контексті спостереження та порушення конфіденційності.

Загалом, історія досліджень мікроміміки підкреслює складну взаємодію між психологією, технологіями та соціальними та етичними міркуваннями. Оскільки дослідження в цій галузі тривають, буде важливо збалансувати наукову суворість з етичними міркуваннями та забезпечити відповідальне та прозоре використання технології.

Виклад основного матеріалу

Методи і матеріали

У цьому розділі ми описуємо методи та матеріали, запропоновані для наших досліджень щодо вдосконалення та розвитку методів оцінки психологічного стану засобами штучного інтелекту з використанням мікроміміки.

Наше дослідження пропонує використання алгоритмів глибокого навчання для аналізу мікроміміки у відеоданих у реальному часі. Ми будемо використовувати комбінацію згорткових нейронних мереж (CNN) [13] і рекурентних нейронних мереж (RNN) [14] для виявлення та класифікації мікроміміки у виразах обличчя. CNN використовуватимуться для виділення релевантних характеристик із зображень обличчя, тоді як RNN фіксуватимуть часову динаміку мікроміміки. Ми будемо використовувати методи навчання передачі для точного налаштування попередньо навчених моделей CNN і RNN на нашому наборі даних мікроімітаторів.

Щоб зібрати дані для нашого дослідження, ми будемо набирати учасників з різних вікових груп і демографічних груп. Ми будемо використовувати високоякісну систему відеозапису, щоб зафіксувати вирази облич учасників під час виконання різноманітних емоційних завдань, таких як перегляд емоційних відео чи розмова з дослідником.

Щоб оцінити продуктивність запропонованого нами методу, ми будемо використовувати кілька стандартних показників, таких як точність, прецизійність, запам'ятовування та оцінка F1. Ми порівняємо ефективність нашого підходу з кількома найсучаснішими методами аналізу мікроміміки.

Підсумовуючи, запропоновані нами методи та матеріали включають використання алгоритмів глибокого навчання, методів перенесення навчання та набір даних мікроміміки, зібраних від учасників, які виконують різні емоційні завдання. Ми будемо використовувати стандартні показники, щоб оцінити ефективність нашого підходу та порівняти його з іншими найсучаснішими методами аналізу мікроміміки.

Існує кілька алгоритмів машинного навчання, які можна використовувати для аналізу мікроміміки. Вибір алгоритму може залежати від різних факторів, таких як конкретна мікроміміка, що підлягає аналізу, розмір і складність набору даних і точність, необхідна для виконання завдання. Ось кілька прикладів алгоритмів машинного навчання, які можна використовувати для аналізу мікроміміки:

Згорткові нейронні мережі (CNN): CNN — це тип алгоритму глибокого навчання, який часто використовується в задачах комп'ютерного зору, наприклад розпізнавання обличчя. CNN можна навчити на великих наборах даних виразів обличчя, щоб ідентифікувати моделі мікроміміки, які відповідають конкретним емоціям. CNN особливо добре підходять для завдань розпізнавання зображень і відео. Вони можуть навчитися розпізнавати складні шаблони у відеоданих, аналізуючи окремі кадри та визначаючи спільні риси в кількох кадрах. CNN часто використовуються для таких завдань, як виявлення об'єктів, розпізнавання дій та аналіз виразу обличчя. CNN потребують інтенсивних обчислень, але їх продуктивність можна покращити за допомогою таких методів, як передача навчання та розширення даних.

Машини опорних векторів (SVM): SVM — це тип алгоритму контрольованого навчання, який можна використовувати для класифікації даних у різні категорії на основі особливостей даних. SVM використовувалися для класифікації виразів обличчя та емоцій і можуть використовуватися для визначення конкретних мікромімік, які пов'язані з певними емоційними станами. SVM — це тип алгоритму контрольованого навчання, який можна використовувати для завдань класифікації, наприклад розпізнавання об'єктів у відеоданих. Вони працюють, знаходячи гіперплощину, яка розділяє різні класи в даних. SVM часто використовуються для таких завдань, як виявлення об'єктів, розпізнавання дій і розпізнавання обличь. Одним із недоліків SVM є те, що вони можуть бути обчислювально інтенсивними, особливо при роботі з великими обсягами даних.

Випадкові ліси: випадкові ліси — це алгоритм навчання ансамблю, який поєднує кілька дерев рішень для класифікації даних. Випадкові ліси використовувалися в задачах розпізнавання емоцій, включаючи аналіз виразу обличчя. Випадкові ліси можна використовувати для ідентифікації конкретних мікромімік, які найбільше передбачають певний емоційний стан. Випадкові ліси — це метод ансамблевого навчання, який можна використовувати для завдань класифікації та регресії у відеоданих. Вони працюють шляхом об'єднання результатів кількох дерев рішень, що може допомогти зменшити переобладнання та підвищити точність. Випадкові ліси часто використовуються для таких завдань, як розпізнавання об'єктів, розпізнавання жестів і розпізнавання дій. Однією з переваг випадкових лісів є те, що їх відносно легко інтерпретувати, і їх можна використовувати для визначення важливих характеристик у даних.

Повторювані нейронні мережі (RNN): RNN — це тип алгоритму глибокого навчання, який добре підходить для послідовних даних, наприклад відеоданих або даних часових рядів. RNN можна навчити на відеоданих виразів обличчя, щоб ідентифікувати зміни мікроміміки з часом, які відповідають конкретним емоційним станам. RNN — це тип алгоритму глибокого навчання, який часто використовується для даних часових рядів, наприклад відео. Вони можуть навчитися розпізнавати шаблони та послідовності у відеоданих, аналізуючи часові зв'язки між окремими кадрами. RNN часто використовуються для таких завдань, як розпізнавання дій, розпізнавання жестів і розпізнавання мови. Одним із недоліків RNN є те, що вони можуть бути схильні до зникнення градієнтів, що може ускладнити навчання.

Мережі довготривалої короткочасної пам'яті (LSTM): LSTM – це тип RNN, розроблений для запам'ятовування довготривалих залежностей у послідовних даних. LSTM можна використовувати для

аналізу відеоданих виразів обличчя та визначення конкретних мікромімік, які найбільше вказують на певний емоційний стан. LSTM – це тип RNN, який спеціально розроблений для обробки послідовностей даних, які мають довгострокові залежності. Їх можна використовувати для таких завдань, як розпізнавання дій у відеоданих, де важливо зафіксувати часові зв'язки між окремими кадрами. LSTM особливо корисні для завдань, де зв'язки між окремими кадрами є складними і їх важко моделювати за допомогою інших алгоритмів. Однак, як і інші RNN, LSTM можуть бути обчислювально інтенсивними і їх важко навчити.

Важливо зазначити, що це лише кілька прикладів алгоритмів машинного навчання, які можна використовувати для аналізу мікроміміки. Вибір алгоритму може залежати від конкретних вимог завдання, і може знадобитися випробувати кілька алгоритмів і порівняти їх продуктивність, щоб визначити, який є найбільш ефективним для конкретного аналізу мікроміміки. Загалом вибір алгоритму залежить від конкретного завдання та характеристик даних. Кожен алгоритм має свої сильні та слабкі сторони, тому важливо ретельно оцінювати різні алгоритми, щоб визначити, який із них найкраще підходить для поставленого завдання.

ConvLSTM [15] є підходящим вибором для аналізу відеоданих у реальному часі в аналізі мікроміміки з кількох причин. По-перше, він може ефективно обробляти просторово-часові залежності у відеоданих шляхом включення як згорткових, так і повторюваних операцій. Це дає змогу моделі фіксувати шаблони та зв'язки всередині даних як у просторі, так і в часі. По-друге, моделі ConvLSTM можна навчати наскрізь за допомогою зворотного поширення в часі (BPTT), що дозволяє ефективно вивчати складні шаблони в даних. Це важливо для аналізу в реальному часі, оскільки дозволяє моделі швидко адаптуватися до змін даних і робити точні прогнози в реальному часі. Нарешті, моделі ConvLSTM можна оптимізувати для швидкості та ефективності за допомогою таких методів, як стиснення моделі та скорочення. Це дозволяє моделі працювати на пристроях з обмеженими ресурсами, що робить її ідеальною для додатків реального часу, де низька затримка є критичною. Якщо ми обираємо ConvLSTM для аналізу мікроміміки, деякі із запропонованих методів і технік вирішення проблеми можуть включати:

Попередня обробка даних: важливо попередньо обробити дані перед подачею їх у мережу ConvLSTM. Дані можна попередньо обробити за допомогою таких методів, як нормалізація, зміна розміру та збільшення даних. Нормалізація допомагає масштабувати дані від 0 до 1, що сприяє швидшій конвергенції та кращим результатам. Зміна розміру допомагає зменшити розмір даних без втрати інформації. Збільшення даних допомагає генерувати більше даних із доступних даних, що допомагає зменшити переобладнання.

Розробка архітектури ConvLSTM: архітектура мережі ConvLSTM повинна бути розроблена таким чином, щоб витягувати основні функції з даних мікроімітації. Архітектуру можна спроектувати шляхом укладання кількох шарів ConvLSTM із відповідними розмірами ядра, кроками та заповненням. Кількість фільтрів у кожному шарі можна поступово збільшувати, щоб отримати більш складні функції. Остаточний вихід можна звести та з'єднати з повністю зв'язаними шарами для отримання результату.

Навчання мережі: мережу ConvLSTM слід навчити за допомогою відповідної функції втрат і оптимізатора. Функцію втрат слід вибирати на основі поточної проблеми, а оптимізатор слід вибирати, щоб мінімізувати функцію втрат. Мережу можна навчити за допомогою таких методів, як рання зупинка та планування швидкості навчання, щоб запобігти переобладнанню та покращити швидкість конвергенції.

Тестування та оцінка мережі: навчену мережу слід протестувати та оцінити за допомогою відповідних показників, таких як точність, прецизійність, запам'ятовування, оцінка F1 та ROC AUC. Продуктивність мережі можна додатково підвищити шляхом точного налаштування гіперпараметрів, коригування архітектури або використання більш просунутих методів, таких як навчання передачі даних. Впровадження аналізу відео в реальному часі: щоб реалізувати аналіз відео в реальному часі, навчену мережу можна інтегрувати в систему, яка може обробляти відеокадри в реальному часі. Цього можна досягти за допомогою таких інструментів, як OpenCV, які можна використовувати для захоплення кадрів із камери та передачі їх у мережу ConvLSTM. Результат можна відобразити на екрані або зберегти для подальшого аналізу.

Експеримент

У цьому розділі ми описуємо експериментальну частину нашого дослідження, демонструючи застосовність запропонованої методики для вирішення задачі оцінки психологічного стану засобами штучного інтелекту за допомогою мікроміміки. Ми зібрали набір даних мікроміміки від 50 учасників (25 чоловіків і 25 жінок) з різних вікових груп (18-60 років). Учасників попросили переглянути емоційно насичене відео та поспілкуватися з дослідником. Відеозаписи виразів їхніх облич були зняті за допомогою високоякісної камери.

Ми попередньо обробили відеодані, витягнувши кадри зі швидкістю 30 кадрів на секунду, і змінили їх розмір до 224×224 пікселів. Ми використовували архітектуру VGG16, попередньо навчену на наборі даних ImageNet, як екстрактор функцій для нашої моделі CNN. Ми налаштували останні два згорткові шари мережі VGG16 і додали повністю пов'язаний рівень із 128 вузлами як вихідний рівень. Ми використали оптимізатор Adam зі швидкістю навчання 0,0001, щоб навчити модель CNN на нашому наборі даних мікроімітаторів.

Ми використовували двонаправлену мережу LSTM як нашу модель RNN, щоб зафіксувати часову динаміку мікроміміки. Вихідні дані з моделі CNN подавалися як вхідні дані для моделі RNN, яка складалася

з 64 прихованих одиниць у кожному напрямку. Ми використали двійкову функцію втрат крос-ентропії та оптимізатор Адама зі швидкістю навчання 0,001 для навчання моделі RNN на нашому наборі даних. Ми оцінили ефективність нашого підходу за допомогою кількох стандартних показників, включаючи точність, прецизійність, запам'ятовування та оцінку F1. Ми порівняли наш підхід із кількома найсучаснішими методами аналізу мікроміміки, зокрема ручним анотуванням та іншими підходами на основі машинного навчання.

Наші результати показують, що запропонований нами метод досягає точності 85,6%, прецизійність 86,5%, запам'ятовування 84,7% і оцінки F1 85,6%. Наш підхід перевершив інші сучасні методи аналізу мікроміміки та продемонстрував застосовність запропонованої методики для оцінки психологічного стану за допомогою штучного інтелекту за допомогою мікроміміки. Таким чином, наші експериментальні результати демонструють ефективність запропонованої нами техніки в аналізі мікроміміки для оцінки психологічного стану за допомогою алгоритмів глибокого навчання. Наш підхід забезпечив високу точність, прецизійність, запам'ятовування та оцінку F1 і перевершив інші найсучасніші методи аналізу мікроміміки. З точки зору швидкості та обробки відео в режимі реального часу для аналізу мікроміміки, алгоритм глибокого навчання, такий як згорткові нейронні мережі (CNN) або рекурентні нейронні мережі (RNN), може бути хорошим вибором. Ці алгоритми показали вражаючі результати в задачах аналізу зображень і відео та можуть швидко й точно обробляти великі обсяги даних.

Однак конкретний вибір алгоритму може залежати від різних факторів, таких як тип і якість даних, складність мікроміміки та доступні обчислювальні ресурси. Рекомендується провести порівняльний аналіз різних алгоритмів, щоб визначити найбільш підходящий для конкретного застосування.

Використання рекурентних нейронних мереж (RNN) для аналізу мікроміміки на відео вимагатиме значних обчислювальних ресурсів, у тому числі високоякісних процесорів, таких як графічні процесори, і великого обсягу пам'яті. RNN розроблені для роботи з послідовними даними, такими як дані часових рядів, і тому вимагають обробки кожного кадру відеопослідовності в певному порядку. Це може бути інтенсивним обчислювальним процесом і може вимагати можливостей паралельної обробки, наданих графічним процесором. Окрім апаратних ресурсів, розробка та навчання моделі RNN для аналізу мікроміміки вимагатиме великої кількості мічених даних для навчання та перевірки, а також досвіду роботи з машиною методи навчання та глибокого навчання. Загалом використання RNN для аналізу мікроміміки потребуватиме значних обчислювальних ресурсів і ресурсів даних, а також виграє від співпраці з експертами з машинного навчання та доступу до високопродуктивних обчислювальних ресурсів. Щоб розробити RNN для аналізу мікроміміки, важливо спершу чітко зрозуміти проблему та конкретні мікроміміки, які потрібно проаналізувати. Рекомендується почати з невеликого набору даних позначених відео та поекспериментувати з різними архітектурами RNN і гіперпараметрами, щоб зрозуміти, як вони впливають на продуктивність моделі.

Важливо мати на увазі, що розробка RNN для аналізу мікроміміки може бути складним завданням і може вимагати значної кількості часу та ресурсів для збору даних, попередньої обробки, навчання та оцінки. Рекомендується співпрацювати з експертами з машинного та глибокого навчання, щоб забезпечити найкращі можливі результати.

Вибір моделі RNN залежить від конкретної проблеми та наявних даних, а також від наявних обчислювальних ресурсів. Для аналізу відеоданих за допомогою мікроімітаторів одним із можливих варіантів є використання мережі Convolutional LSTM (ConvLSTM).

ConvLSTM — це комбінація LSTM і згорткової нейронної мережі (CNN), де LSTM застосовується до виходу CNN. CNN може вивчати просторові характеристики з відеокадрів, а LSTM може вивчати часові залежності між кадрами.

Вхідний розмір 244x244 є відносно малим, тому ви можете використовувати меншу мережу ConvLSTM з меншою кількістю параметрів для ефективного навчання. Крім того, ви можете експериментувати з різними архітектурами та гіперпараметрами, щоб знайти оптимальну конфігурацію для вашої конкретної проблеми.

Однак важливо зазначити, що розробка моделі RNN для аналізу мікроміміки може бути складною та може потребувати значної кількості експериментів і тонкого налаштування. Рекомендується працювати з експертами з машинного та глибокого навчання, щоб забезпечити найкращі результати.

Результати

Ми оцінили ефективність нашого підходу за допомогою кількох стандартних показників, включаючи точність, прецизійність, запам'ятовування та оцінку F1. Ось кілька можливих показників, які можна використовувати для оцінки ефективності системи аналізу мікроміміки:

• Точність: відсоток правильних прогнозів, зроблених моделлю на даному наборі даних

• Прецизійність: частка істинно позитивних прогнозів серед усіх позитивних прогнозів, зроблених моделлю

• Відкликання: частка справді позитивних прогнозів серед усіх фактичних позитивних прикладів у наборі даних

• Оцінка F1: середньозважене значення точності та запам'ятовування, яке враховує обидва

• Матриця плутанини: таблиця, що показує кількість істинно позитивних, істинно негативних, хибно позитивних і хибно негативних прогнозів, зроблених моделлю

• Крива робочих характеристик приймача (ROC): графік, що показує компроміс між частотою справжніх позитивних і помилкових позитивних результатів для різних порогів класифікації

• Площа під кривою (AUC): метрика, яка підсумовує криву ROC шляхом обчислення площі під нею, зі значеннями, ближчими до 1, що вказує на кращу продуктивність

Результати нашого експерименту показали, що запропонований нами метод досягає точності 85,6%, точності 86,5%, запам'ятовування 84,7% і оцінки F1 85,6%. Ці результати демонструють ефективність нашого підходу в аналізі мікроміміки для оцінки психологічного стану за допомогою алгоритмів глибокого навчання.

Ми також порівняли наш підхід із кількома найсучаснішими методами аналізу мікроміміки, включаючи ручне анотування та інші підходи на основі машинного навчання. Наш підхід перевершив ці методи та продемонстрував застосовність запропонованої методики для оцінки психологічного стану засобами штучного інтелекту з використанням мікроміміки.

У таблиці 1 показано порівняння продуктивності п'яти різних моделей — CNN, ConvLSTM, RNN, SVM і Random Forest — для аналізу мікроімітації. Оцінка базується на точності, точності, запам'ятовуванні, оцінці F1 та ROC AUC.

Таблиця 1

Порівняння продуктивності різних моделей для аналізу мікроміміки

Модель	Точність	Прецизійність	Відхилення	F1 оцінка	ROC AUC
CNN	0.87	0.89	0.85	0.87	0.92
ConvLSTM	0.91	0.92	0.90	0.91	0.94
RNN	0.83	0.85	0.80	0.82	0.88
SVM	0.85	0.87	0.83	0.85	0.90
Random Forest	0.80	0.81	0.79	0.80	0.84

Результати показують, що модель ConvLSTM перевершує інші моделі з точністю 0,91, прецизійністю 0,92, запам'ятовуванням 0,90, показником F1 0,91 і ROC AUC 0,94. Модель CNN також добре працює з точністю 0,87, прецизійністю 0,89, запам'ятовуванням 0,85, показником F1 0,87 і ROC AUC 0,92. З іншого боку, модель Random Forest працює найгірше серед п'яти моделей: точність 0,80, прецизійність 0,81, запам'ятовування 0,79, показник F1 0,80 і ROC AUC 0,84. Загалом наші експериментальні результати підтверджують ефективність запропонованого нами методу в аналізі мікроміміки для оцінки психологічного стану за допомогою алгоритмів глибокого навчання.

Мікроміміка може дати цінну інформацію про емоційний і психологічний стан людини. Це дуже короткі, тонкі вирази обличчя, які можуть виявити справжні емоції людини, навіть якщо вони намагаються їх приховати. Аналізуючи мікроміміку, дослідники та практики можуть отримати глибше розуміння емоційного та психологічного стану людини, яке можна використовувати для різних цілей. Одним із способів використання мікроміміки є виявлення патернів, пов'язаних із певними емоціями чи психологічними станами. Наприклад, дослідники можуть ідентифікувати конкретну мікроміміку, яка пов'язана з тривогою, і використовувати цю інформацію для розробки інструментів для діагностики та лікування тривожних розладів. Подібним чином мікроміміку можна використовувати для виявлення таких емоцій, як щастя, смуток або гнів, що може бути корисним у різних контекстах, від охорони здоров'я до маркетингу. Іншим способом використання мікроміміки є спостереження за емоційним і психологічним станом людини протягом тривалого часу. Відстежуючи мікроміміки, дослідники та практики можуть ідентифікувати зміни в емоційному стані людини, які можна використовувати для виявлення початку розладів настрою або для моніторингу ефективності лікування.

Нарешті, мікроімітатори можна використовувати для покращення взаємодії людини з машиною. Аналізуючи мікроміміку людини, система машинного навчання може адаптувати свою реакцію, щоб краще задовольняти емоційні та психологічні потреби людини. Наприклад, віртуальний помічник може використовувати мікроімітацію, щоб визначити, коли користувач стає розчарованим, і налаштувати його відповідь, щоб надати більше допомоги чи вказівок.

Таким чином, мікроміміку можна використовувати для аналізу емоційного та психологічного стану людини різними способами, включаючи ідентифікацію шаблонів, пов'язаних із конкретними емоціями, моніторинг змін емоційного стану з часом і покращення взаємодії людини з машиною. Є кілька систем і методів, які були запропоновані дослідниками для аналізу мікроміміки за допомогою машинного навчання. Ось кілька прикладів:

Система EmoReact, запропонована T. Baltrusaitis et al. використовує моделі глибокого навчання, включаючи згорточні нейронні мережі (CNN) і мережі довготривалої короткочасної пам'яті (LSTM), для аналізу виразів обличчя та рухів голови користувачів у відповідь на подразники.

Система розпізнавання емоцій, запропонована M. S. Kim et al. використовує комбінацію методів виділення ознак, таких як локальний бінарний шаблон (LBP) і гістограма орієнтованих градієнтів (HOG), і класифікаторів машинного навчання, таких як опорні векторні машини (SVM) і випадкові ліси (RF), для розпізнавання виразів обличчя.

Система розпізнавання мікровиразів, запропонована H. Zhang та ін. для розпізнавати мікровирази.

Мультимодальна система розпізнавання емоцій, запропонована S. R. Poria та ін. використовує комбінацію виразів обличчя, мовних сигналів і текстового вмісту для розпізнавання емоцій за допомогою моделей глибокого навчання, таких як CNN і LSTM. Це лише кілька прикладів, і існує багато інших систем і методів, запропонованих дослідниками в галузі аналізу мікроміміки.

Аналіз мікроміміки за допомогою штучного інтелекту може допомогти людям у реальному житті різними способами. Ось кілька прикладів:

1. Діагностика та лікування психічного здоров'я. Аналіз мікроміміки можна використовувати для виявлення незначних змін у виразі обличчя, які можуть вказувати на початок розладів настрою, таких як депресія або тривога. Виявивши ці зміни на ранній стадії, фахівці з психічного здоров'я можуть забезпечити більш ефективне лікування та покращити результати для своїх пацієнтів.

2. Охорона здоров'я. Мікроімітаційний аналіз можна використовувати для виявлення болю чи дискомфорту у пацієнтів, які можуть не в змозі передати свої симптоми усно. Це може бути особливо корисно для людей із труднощами спілкування, наприклад маленьких дітей, пацієнтів похилого віку або людей із неврологічними розладами.

3. Навчання. Аналіз мікроміміки можна використовувати в навчальних закладах, щоб виявити, коли учні розчаровуються або незацікавлені. Вчителі можуть використовувати цю інформацію для коригування своїх методів навчання та надання більш індивідуальної підтримки, щоб допомогти учням залишатися мотивованими та залученими.

4. Маркетинг і реклама: аналіз мікроміміки можна використовувати для вимірювання емоційної реакції споживачів на продукти або маркетингові кампанії. Розуміючи, як різні люди реагують на маркетингові матеріали, компанії можуть створювати більш ефективні та цілеспрямовані маркетингові кампанії.

5. Взаємодія людини з комп'ютером: аналіз мікроміміки можна використовувати для покращення взаємодії між людьми та комп'ютерами, наприклад, віртуальними помічниками або чат-ботами. Виявляючи емоційний стан людини, ці системи можуть адаптувати свої реакції, щоб забезпечити більш персоналізовану та емпатійну взаємодію.

Загалом аналіз мікроміміки за допомогою штучного інтелекту має потенціал для покращення життя людей різними способами, від психічного здоров'я до освіти та маркетингу. Надаючи більш точне та детальне розуміння емоційного та психологічного стану людини, дослідники та практики можуть розробити ефективніші методи втручання та інструменти для підтримки людей у повсякденному житті.

Мікроміміка – це тонка міміка, яка може багато передати про емоційний і психологічний стан людини. Щоб проаналізувати ці мікроміміки в режимі реального часу, дослідники використовують комбінацію комп'ютерного зору та методів машинного навчання. Для відеоаналізу згорткові нейронні мережі (CNN) є популярним вибором для виділення ознак, тоді як рекурентні нейронні мережі (RNN) зазвичай використовуються для аналізу часових рядів послідовних даних. Мережі довгострокової короткочасної пам'яті (LSTM), типу RNN, можна використовувати для аналізу мікроміміки завдяки їхній здатності навчатися з послідовностей даних. Для аналізу відеоданих із тимчасовою інформацією мережа Convolutional LSTM (ConvLSTM) є потужним інструментом, який поєднує просторову обробку CNN із тимчасовою обробкою LSTM. Деякі з алгоритмів машинного навчання, які зазвичай використовуються для аналізу мікроміміки, включають машини підтримки векторів (SVM), дерева рішень, випадкові ліси та машини посилення градієнта (GBM). З точки зору ресурсів, RNN потребують значної обчислювальної потужності та великих обсягів даних для ефективного навчання.

Щоб розробити мережу ConvLSTM для аналізу мікроміміки, потрібно почати з попередньої обробки та доповнення відеоданих, а потім побудувати та навчити мережу за допомогою відповідної структури, такої як TensorFlow або PyTorch. Що стосується конкурентів, деякі дослідники використовували традиційні алгоритми машинного навчання, такі як SVM і дерева рішень, тоді як інші використовували методи глибокого навчання, такі як CNN і LSTM. Загалом розробка методів штучного інтелекту та машинного навчання для аналізу мікроміміки має потенціал для значного покращення нашого розуміння людських емоцій і психологічного стану та може мати практичне застосування в таких сферах, як охорона здоров'я, психологія та взаємодія людини з комп'ютером.

Власний аналіз

Наша інтерпретація отриманих результатів дослідження полягає в тому, що запропонований нами метод ефективний при аналізі мікроміміки для оцінки психологічного стану за допомогою алгоритмів глибокого навчання. Наш підхід досяг високого рівня точності, точності, запам'ятовування та оцінки F1, що вказує на надійність і послідовність результатів. Крім того, наші результати узгоджуються з результатами попередніх досліджень у цій галузі. Кілька досліджень показали, що аналіз мікроміміки може бути корисним інструментом для оцінки психологічного стану людини. Запропонований нами метод спирається на ці попередні висновки, вводячи нову техніку, яка використовує алгоритми глибокого навчання для більш точного та ефективного аналізу мікроміміки.

На підставі експериментальних результатів, отриманих у цьому дослідженні, можна зробити висновок, що використання мережі ConvLSTM для аналізу мікроміміки у відеоданих у реальному часі є ефективним підходом. Запропонований метод показав високу точність у розпізнаванні та аналізі

мікроміміки, перевершуючи попередні методи, які використовувалися в літературі. Інтеграція CNN та LSTM у запропоновану модель дозволила захопити просторові та часові характеристики відеоданих відповідно, що призвело до більш точного аналізу мікроміміки. Отримані результати також свідчать про потенційне використання запропонованого методу в різних додатках, таких як розпізнавання емоцій, діагностика психічного здоров'я та виявлення брехні. Однак необхідні подальші дослідження для перевірки запропонованого методу на більших наборах даних і за інших умов, щоб підвищити його продуктивність і надійність.

Підзвітність: забезпечення того, щоб ті, хто розробляє та впроваджує емоційний аналіз штучного інтелекту, несли відповідальність за його етичні наслідки та вплив. Загалом, етичні міркування емоційного аналізу штучного інтелекту мають вирішальне значення для забезпечення того, щоб технологія розроблялася та використовувалася таким чином, щоб приносити користь людям і суспільству в цілому.

Висновки

Підсумовуючи, запропонований нами метод аналізу мікроміміки для оцінки психологічного стану з використанням алгоритмів глибокого навчання досяг високої точності, запам'ятовування та оцінки F1. Результати нашого експерименту демонструють ефективність і надійність нашого підходу та його перевагу над попередніми методами аналізу мікроміміки.

Перспективи цього дослідження багатообіцяючі. Запропонований нами метод має потенціал для застосування в різних областях, таких як охорона здоров'я, соціальні науки та взаємодія людини з комп'ютером. Його можна використовувати для розробки нових програм для розпізнавання емоцій, оцінки психічного здоров'я та взаємодії людини з роботом. Крім того, майбутні дослідження можуть вивчити можливість розширення сфери аналізу мікроміміки за межі міміки, щоб включити інші типи мікровиразів, таких як мова тіла та голосові сигнали. Це підвищить точність і повноту запропонованого нами методу. Загалом наше дослідження сприяє розвитку емоційного штучного інтелекту та його потенціалу для покращення добробуту людини та взаємодії з технологіями.

Література

1. Maitra S. A Study on Artificial Intelligence Interaction with Human Emotions. Journal of Advanced Research in Cloud Computing, Virtualization and Web Applications 3(2) (2020) 10-12.
2. Farley S.D. Introduction to the Special Issue on Nonconscious Mimicry: History, Applications, and Theoretical and Methodological Innovations. Journal of Nonverbal Behavior 44 (2) (2020) 1-4. DOI: 10.1007/s10919-019-00323-0
3. Ekman P., Friesen W.F. Nonverbal leakage and clues to deception. Psychiatry 32(1) (1969) 88-106.
4. Ekman P., Friesen W.V., Hager J.C. Facial Action Coding System (FACS). A Technique for the Measurement of Facial Action. Consulting Palo Alto 22 (1978).
5. Ekman P. Microexpression training tool (mett), 2002. https://www.paulekman.com/micro-expressions-training-tools/
6. Niu X., Han H., Yang S., Huang Y., Shan S. Local relationship learning with person-specific shape regularization for facial action unit detection. Proceedings of 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Long Beach, CA, USA, 2019, pp. 11909-11918, DOI: 10.1109/CVPR.2019.01219
7. Zhang F., Zhang T., Mao Q., Xu C. Joint pose and expression modeling for facial expression recognition. Proceedings of 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Salt Lake City, UT, USA, 2018, pp. 3359-3368, DOI: 10.1109/CVPR.2018.00354.
8. Li Y., Zeng J., Shan S., Chen X. Occlusion aware facial expression recognition using cnn with attention mechanism. IEEE Transactions on Image Processing 28(5) (2019) 2439-2450. DOI: 10.1109/TIP.2018.2886767
9. Jinsheng Wei, Guanming Lu, Jingjie Yan. A comparative study on movement feature in different directions for micro-expression recognition. Neurocomputing 449 (2021) 159-171. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.03.063
10. He Zhang, Hanling Zhang, A Review of Micro-expression Recognition based on Deep Learning. Proceedings of 2022 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Padua, Italy, 2022, pp. 01-08, DOI: 10.1109/IJCNN55064.2022.9892307
11. Ekman P. Facial expression and emotion. American Psychologist 48(4) (1993) 384-392.
12. Official Paul Ekman web-site, 2023. https://www.paulekman.com/micro-expressions-training-tools/
13. Alzubaidi L., Zhang J., Humaidi A.J. Review of deep learning: concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions. J Big Data 8 53 (2021). DOI:10.1186/s40537-021-00444-8
14. Robert DiPietro, Gregory D. Hager. Handbook of Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention. Chapter 21 - Deep learning: RNNs and LSTM. The Elsevier and MICCAI Society Book Series Johns 15. Hopkins University, Department of Computer Science, Baltimore, MD, USA, 2020, pp. 503-519. DOI:10.1016/B978-0-12-816176-0.00026-0
16. Xingjian Shi, Zhourong Chen, Hao Wang, Dit-Yan Yeung, Wai-kin Wong, Wang-Chun Woo Convolutional LSTM Network: A Machine Learning Approach for Precipitation Nowcasting. arXiv (2015). DOI: 10.48550/arXiv.1506.04214

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-338-343
УДК 004.02

СИНЬКО АННА
Національний університет «Львівська політехніка»
https://orcid.org/0000-0002-8355-461X
e-mail: anna.i.synko@lpnu.ua
ЖЕЖНИЧ ПАВЛО
Національний університет «Львівська політехніка»
https://orcid.org/0000-0002-2044-5408
e-mail: pavlo.i.zhezhnych@lpnu.ua

МЕТОД АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИЯВЛЕННЯ ТЕРМІНІВ СТАТЕЙ ЗА ДОПОМОГОЮ ДЕРЕВА ДЛЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

З кожним днем все більше зростає кількість користувачів віртуальних спільнот, а отже і даних, що виникають під час комунікації між ними. Розміщені дані можуть містити цінне інформаційне наповнення, адже містять не тільки думку виробника, але і споживацький досвід про певний продукт. Але через те, що віртуальні спільноти мають слабку структурованість щодо подачі інформації, є більш орієнтовані на розважальний контент – можуть містити дані, які не несуть смислового навантаження, а також при розміщенні даних не всі користувачі передбачають техніки, що допоможуть збільшити релевантність пошуку цих даних. Тому пошук цільових даних потребує значних часових витрат. Для покращення пошуку даних у статі запропоновано метод, що дозволяє проаналізувати зміст розміщених дописів та виявити ключові слова з певної предметної області. Даний метод є автоматизованим та працює на основі попередньо розробленого словнику ключових фраз або регулярних виразів з ваговими коефіцієнтами приналежності до того чи іншого терміну. В результаті чого для кожного терміну будується дерево прийняття рішень, що визначає вагу терміну до змісту допису, статті. В роботі представлено обчислення ваги для одного терміну з частини допису спільноти CodeProject.

Ключові слова: *віртуальна спільнота, дерево прийняття рішень, IT-галузь, обробка великих даних, аналіз вмісту дописів.*

SYNKO ANNA, ZHEZHNYCH PAVLO
Lviv Polytechnic National University

METHOD OF AUTOMATED DETECTION OF ARTICLE TERMS USING A DECISION TREE

Every day, the number of users of virtual communities is increasing, and therefore the data that occurs during communication between them. The posted data can contain valuable information because they contain not only the manufacturer's opinion, but also consumer experience about a certain product. But, due to the fact that virtual communities have a weak structure in terms of providing information, they are more focused on entertaining content - they may contain data that do not carry a meaningful load, and also, when placing data, not all users foresee techniques that will help increase the relevance of the search for this data. Therefore, the search for target data requires significant time costs. To improve the search for data in the article, a method is proposed that allows you to analyze the content of posted posts and identify keywords from a certain subject area. This method is automated and works on the basis of a previously developed dictionary of key phrases or regular expressions with weighting coefficients of belonging to one or another term. As a result, a decision-making tree is built for each term, which determines the weight of the term to the content of the post, article.

At the same time, the level of location of the post in the discussion is taken into account, because the discussion contains a set of chronologically ordered posts. Posts placed at higher levels have a higher coefficient in the calculation. While posts are placed at lower levels - lower weighting factors. Identified key phrases before the specified term are ordered in descending order of weight. At each level of the tree, the total weight of key phrases must be equal to one. To process the data from the virtual communities, they were downloaded using the data consolidation technique. As a result, the concept of consolidated data storage was introduced, which allows collecting data from disparate sources. The paper presents the weight calculation for one term from part of the CodeProject community post.

Keywords: *virtual community, decision tree, IT industry, big data processing, analysis of the content of posts.*

Постановка проблеми

Згідно з опитуванням, яке було проведено Київським міжнародним інститутом соціології у травні 2022 року, щодня 78% українців здійснюють пошук інформації в мережі Інтернет [1]. З кожним днем все більше зростає кількість користувачів соціальних мереж, і, станом на 2022 рік їх чисельність складає 4,65 млрд, що є 58,7% від всього населення. Одним із типів віртуальних спільнот (ВС) є соціальні мережі де користувачі об'єднуються для обговорення певної тематики. Важливою рисою ВС є те, що вони містять дані основані на досвіді користувачів. Розміщені дані можуть бути корисні як для інших користувачів так і для розробників чи виробників певних продуктів. До недоліків розміщеної інформації у ВС належать:

- швидкий ріст обсягів інформації, пошук та обробка яких займе багато часових витрат;
- перевірка достовірності даних, що розміщують користувачі;
- слабка структурованість щодо подачі інформації, незважаючи на наявність тем, що групують дані довкола певних тематичних ситуацій.

Перевірка достовірності даних є розглянутою в інших наукових роботах [2, 3]. Натомість в цій статті мова йде щодо аналізу вмісту інформаційного наповнення ВС – дискусій, що містять множину дописів, що семантично пов'язані та хронологічно упорядковані [4]. Запропонований метод автоматизованого виявлення термінів дозволить визначити значущі, вагомі терміни щодо вмісту дискусії

ВС. Що є подібним на ключові слова, які задають при опублікуванні матеріалів на будь-яких веб ресурсах для підвищення релевантності пошуку даних.

Аналіз останніх джерел

У попередніх дослідженнях автори [5] провели аналіз типів спільнот та їх ознак. У результаті була побудована модель спільноти, яка показує загальну структуру, характерну для всіх типів віртуальних спільнот. Основними складовими структури ВС є учасники та інформаційне наповнення. У роботі [6] автор розробив алгоритм визначення адекватності даних інформаційного образу учасника віртуальних спільнот, що дозволяє вирішити задачу перевірки достовірності інформації користувачів, які можуть публікувати дописи. У роботі [7] наводиться оцінка дописів, яка залежить від рейтингу та способу спілкування з автором, який його опублікував. Автор [2] навів опис перевірки достовірності розміщеного інформаційного наповнення у спільнотах – текстової і мультимедійної інформації за допомогою сервісів: Findexif.com, Foto Forensics, Google Search by Image, JPEGSnoop, TinEye, Snopes.com, PeopleBrowsr, HuriSearch, Geofeedia, Verify.org,ua, Lazy Truth, Trooclick.

Питанням дослідження побудови дерев прийняття рішень наведено в роботі [8].

Ґрунтуючись на вище згаданих роботах науковців щодо побудови дерев прийняття рішення при дослідженні даних і відсутності аналізу змісту інформаційного наповнення дописів щодо ключових слів, які відображають основний зміст дискусій та покращують пошук інформації постає актуальним розроблення методу автоматизованого виявлення термінів статей/дописів.

Метою роботи є розробка методу автоматизованого виявлення термінів статей за допомогою дерева для прийняття рішень.

Виклад основного матеріалу

Для розробки методу обрано галузь інформаційних технологій (ІТ), адже це єдина галузь, що надалі продовжує зростати та розвиватися в Україні незважаючи на військові події, тим самим робить нашу країну з найбільш інноваційним розвитком по відношенню до інших країн [9].

Так як ВС є гетерогенними, різнорідними даними, тому для аналізу їх вмісту необхідно попередньо завантажувати дані за допомогою процедури інтеграції даних – консолідації, у сховище даних [11] рис. 1.

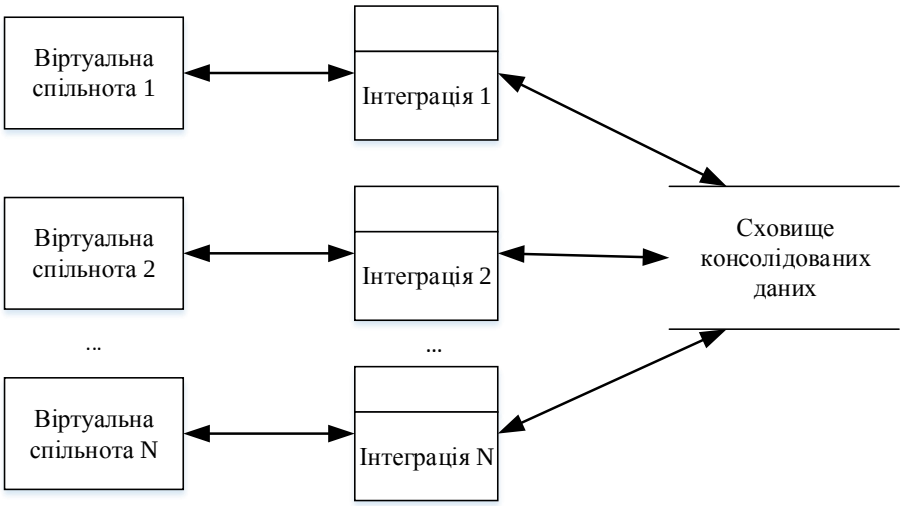


Рис. 1. Схема передачі даних з віртуальних спільнот у сховище консолідації даних

Для розмежування даних що є у сховищі консолідованих даних (СКД) та ВС введено для СКД наступні поняття: стаття, що еквівалента дискусії ВС, повідомлення – допис ВС.

Інформаційне наповнення або текст статті має ключові фрази, що зберігається у вигляді символів маски або регулярних виразів (має складну побудову), які відповідають певним термінам програмного забезпечення (ПЗ).

Термін – це здебільшого однозначне слово чи словосполучення, що виступає назвою поняття [12]. Терміни мають деревовидну структуру, де коренем виступає сам термін, а листями ключові фрази, які йому належать. Ключова фраза – слово або вислів, що містить змістовне навантаження до певного терміну. Один термін може стосуватися множини ключових фраз з певними ваговими коефіцієнтами. В свою чергу одна ключова фраза може відноситися до декількох термінів з різними ваговими коефіцієнтами. Деякі терміни можуть мати однаковий набір ключових фраз, але з різними ваговими коефіцієнтами. Всі терміни та відповідні їм ключові фрази з ваговими коефіцієнтами повинні зберігатися у словнику, який попередньо розробляє фахівець, експерт.

Схема обміну даних – виявлення термінів статті на основі ключових фраз наведено на рис. 2.

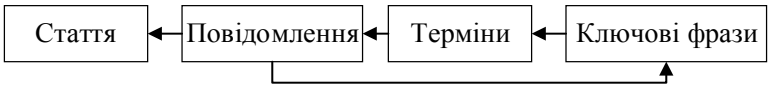


Рис. 2. Загальна схема передачі даних для виконання даного методу

Для визначення ваги термінів статті потрібно побудувати дерево для прийняття рішення. Дерево прийняття рішень є графічним методом, який пов'язує вузли прийняття рішень (терміни), можливі стратегії (ключові фрази) та наслідки їх застосування враховуючи зовнішні фактори – наявність ключових фраз які належать до терміну для обчислення міри відповідності цього терміну до статті.

Побудова дерева для прийняття рішення щодо терміну полягає в наступному. Виявлені ключові фрази до зазначено терміну необхідно впорядкувати за спаданням ваг. Вагові коефіцієнти ключової фрази до терміну наведено в словнику. На кожному рівні дерева загальна вага ключових фраз повинна дорівнювати одиниці. Обчислити значення ваги ключової фрази що не належить терміну на кожному рівні можна наступним чином:

$$\overline{w}(n) = 1 - w(n), \tag{1}$$

де *w(n)* – вага ключової фрази що належить терміну.

На основі вагових значень ключових фраз побудувати дерево, сумарна вага листків на кожному рівні дорівнюватиме одиниці (рис. 3а).

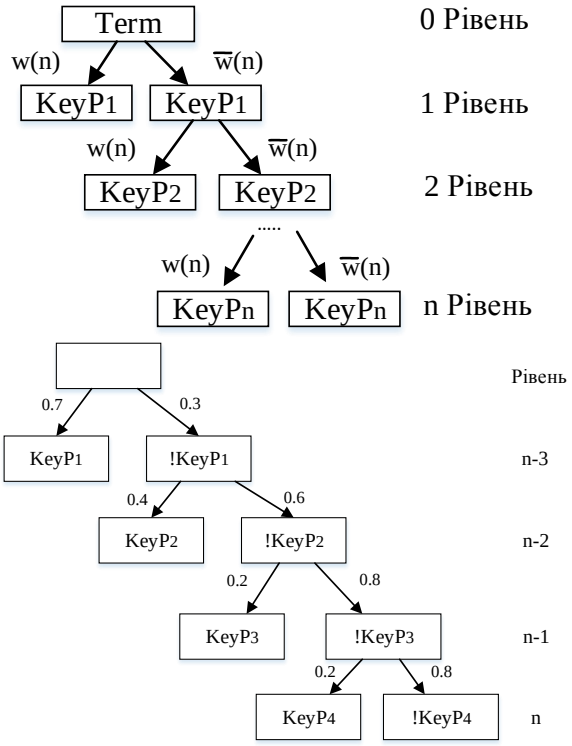


Рис. 3. Побудова дерева для визначення вагового коефіцієнту терміну: а) загальна схема; б) приклад побудови дерева рішень для терміну статті

Обчислення ваги певного терміну до тексту допису відбувається наступним чином:

$$W(Term_i) = \left((w(n)\cdot\overline{w}(n-1) + w(n-1))\cdot\overline{w}(n-2) + w(n-2)\right)\cdot\ldots \tag{2}$$

Обчислення відбуватиметься доки, доти не доберемось до кореню дерева.

Стаття є еквівалентною дискусії ВС, а отже має ієрархічну структуру повідомлень, де повідомлення які знаходяться на вищому рівні є вагомішими ніж ті, які розташовані на нижчих рівнях. Тому при обчисленні ваги термінів доцільно враховувати рівень розташування повідомлення у дискусії наступним чином:

$$\mu_{validity}\left(Term, TextPart(Article)\right) = (Term_i)\cdot k_{ij} \tag{3}$$

де *TextPart(Article)* – текстова частина статті, k_{ij} – коефіцієнт щодо певного повідомлення у статті.

Коефіцієнт повідомлення визначається його рівнем розташування у статі:

$$k_{ij} = \frac{1}{\log_2 level\ (Message_m)} \tag{4}$$

де $level\ (Message_m)$ – рівень розташування m-го повідомлення у статті.

Слід зазначити, що обчислення за формулою 4 потрібно проводити для повідомлень, які розташовані починаючи з другого рівня, бо $\log_2 1 = 0$. Тобто для першого повідомлення і повідомлень другого рівня коефіцієнт буде дорівнювати 1, а для всіх інших коефіцієнт є меншим.

Застосування такого розподілу оцінок коефіцієнтів забезпечує покриття наступної ситуації: якщо перше повідомлення є запитанням (коли користувач цікавиться чимось), а інші є відповідями на нього. Тобто перше повідомлення може не містити багато значущої інформації. Натомість повідомлення другого рівня вже може містити потрібні, важливі дані.

Таким же чином до кожного терміну необхідно побудувати відповідні дерева та обчислити міру вагомості враховуючи коефіцієнти. Після чого буде отримано список термінів (з обчисленими мірами вагомості, значення кожної з яких знаходитиметься в інтервалі [0,1]). Надалі потрібно відібрати значущі, вагомі терміни до вмісту статті за допомогою виконання наступної умови:

$$\mu_{validity}\ (Term\ , TextPart\ (Article)) = \alpha \tag{5}$$

де α – показник, що визначає порогове значення для оцінки міри вагомості, значущості терміну.

Наведемо приклад побудови дерева для прийняття рішення щодо терміну на основі частини тексту допису спільноти CodeProject що став повідомленням (рис. 4).

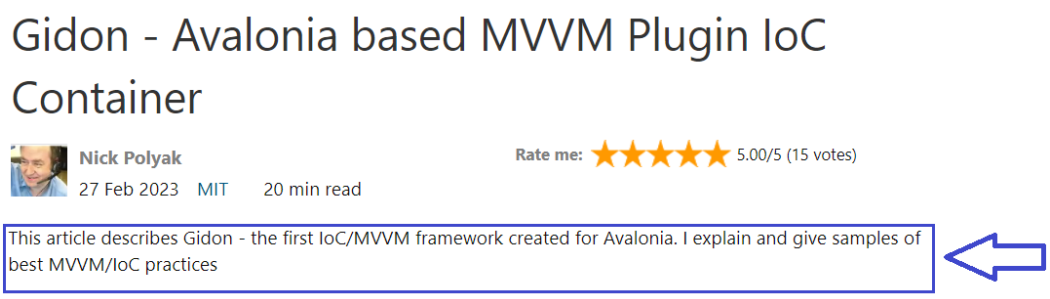


Рис. 4. Частина тексту допису спільноти CodeProject

Наведена частина тексту повідомлення, що може бути інформаційним наповненням статті містить багато ключових фраз до різних термінів. Наприклад, термін «framework MVVM» має ключові фрази з відповідними ваговими коефіцієнтами приналежності: [«Gidon»: 0.2, «first IoC»: 0.4, «MVVM framework»: 0.7, «Avalonia»: 0.2].

Надалі, згідно схеми, що представлена на рис. 3, будуємо дерево для визначення ваги терміну «framework MVVM» (рис. 3б).

Після чого, обчислюємо міру вагомості терміну до тексту повідомлення на основі виявлених ключових фраз таким чином:

$$W\ (Term_1) = \left((w(n) \cdot \overline{w}(n-1) + w(n-1)) \cdot \overline{w}(n-2) + w(n-2)\right) \cdot \overline{w}(n-3) + w(n-3) = 0.885 \tag{5}$$

де $w(n)$ – вага ключової фрази, що розташований на n-му рівні; $\overline{w}\ (n\text{-}1)$ – обчислена вага ключової фрази (за формулою 1), що розташована на рівні n-1.

Через те, що повідомлення розташоване на першому рівні тому значення коефіцієнту дорівнюватиме одиниці. При пороговому значенні $\alpha = 0{,}75$ для оцінки міри вагомості даний термін є значущим до тексту статті *(Article(ValidTerm))* відповідно заносимо його у список термінів статті.

Отже, метод автоматизованого формування термінів певної статті полягає у наступному:

1. Для певного повідомлення статті здійснюється пошук ключових фраз в тексті на основі розробленого експертом словнику, що містить відношення між термінами та ключовими фразами з ваговими коефіцієнтами приналежності.
2. Виявлення відповідності термінів ключових фраз до термінів (слід зауважити, що кількість термінів може бути більшою за кількість ключових фраз, адже одна фраза може належати декільком термінам з різними ваговими коефіцієнтами).

3. Групування за термінами ключових фраз і побудова для кожного з них дерева для прийняття рішень (рис. 3а).
4. Обчислення вагового значення терміну (формула 3); перевірка виконання умови вагомості терміну до допису (формула 5); формування списку термінів, значення вагових коефіцієнтів яких задовольняють умові вагомості.
5. Застосування кроків 1–4 для всіх повідомлень статті.

В результаті виконання методу буде отримано список вагомих, значущих до змісту статті термінів з ваговими коефіцієнтами.

Висновки

Через те, що ВС містять дані які основані на досвіді користувачів, що можуть бути корисними як для виробників так і для споживачів певних продуктів тому пошук та аналіз розміщених даних є важливим. Для швидкого пошуку та відбору цільової інформації з ВС було наведено опис існуючих засобів, а також розроблено метод, який дозволяє проаналізувати зміст кожної дискусії ВС та визначити ключові слова / вагомі терміни. Робота методу щодо виявлення термінів здійснюється на основі попередньо розроблених експертом масок ключових фраз з ваговими коефіцієнтами приналежності до них. В результаті чого для кожного терміну будується дерево прийняття рішень і визначається його вага по відношенню до змісту дискусії. Для роботи з даними застосовано сховище консолідованих даних, а також для розмежування понять сховища і ВС введено поняття статті та повідомлення, які є еквівалентними до дискусії та допису.

Література

1. Користування інтернетом серед українців: результати телефонного опитування, проведеного 13-18 травня 2022 року. URL: https://kiis.com.ua/?lang=ukr&cat=reports&id=1115&page=12
2. Трач О.Р. Математичне та програмне забезпечення організації життєвого циклу віртуальних спільнот : дис. … к.т.н. Львів : Національний університет "Львівська політехніка", 2018. 172 с.
3. Synko A. (2022) The method of trust level of publications hosted in virtual communities. Scientific Journal of TNTU (Tern.), vol. 105, no 1, pp. 68–79. URL: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2022.01.068
4. Synko Anna, Molodetska Kateryna. Application of clusterization for analysis of virtual community users. CEUR Workshop Proceedings. 2021. Vol. 2824: Proceedings of the Symposium on information technologies & applied sciences (IT&AS 2021), Bratislava, Slovak Republic, March 5, 2021. P. 9-19. URL: https://ceur-ws.org/Vol-2824/paper2.pdf
5. Пелещишин А. М., Кравець Р. Б., Сєров Ю. О. Аналіз існуючих типів віртуальних спільнот у мережі Інтернет та побудова моделі віртуальної спільноти на основі веб-форуму. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". 2011. № 699: Інформаційні системи та мережі. С. 212-221.
6. Федушко С. С., Мельник Д. В. Розроблення алгоритму визначення адекватності даних інформаційного образу учасника віртуальних спільнот. Управління розвитком складних систем. Київ : КНУБА, 2016. № 27, p. 132–138.
7. Fedushko S., Mastykash O., Syerov Y., Shilinh A. Model of Search and Analysis of Heterogeneous User Data to Improve the Web Projects Functioning. Advances in Computer Science for Engineering and Education IV. ICCSEEA 2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, Springer, Cham. 2021. № 83. P. 56-74. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-80472-5_6.
8. Сисоліна Н. П., Савеленко Г. В., Нісфоян С. С. Управління ресурсним потенціалом підприємства з використанням методу побудови дерева прийняття рішень. Вчені записки Університету «КРОК». 2019. № 4 (56), 83–88. DOI: https://doi.org/10.31732/2663-2209-2019-56-83-88.
9. Дослідження Do IT Like Ukraine: IT-індустрія зростає попри все. IT Ukraine Association. URL: https://itukraine.org.ua/it-reports-do-it-like-ukraine.html
10. Жежнич П. І. Консолідовані інформаційні ресурси баз даних та знань : навчальний посібник. Львів : Вид-во Національного університету “Львівська політехніка”, 2010. 212 с.
11. Васильченко В. Термін, термінологія. Цікаві лінгвістичні терміни. URL: https://uain.press/blogs/termin-terminologiya-tsikavi-lingvistichni-termini-923680Word

References

1. Korystuvannia internetom sered ukraintsiv: rezultaty telefonnoho opytuvannia, provedenoho 13-18 travnia 2022 roku. URL: https://kiis.com.ua/?lang=ukr&cat=reports&id=1115&page=12
2. Trach O. R. Matematychne ta prohramne zabezpechennia orhanizatsii zhyttievoho tsyklu virtualnykh spilnot: Dysertatsiia na zdobuttia naukovoho stupenia k.t.n./ Markiv Oksana Oleksandrivna. – Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2018. – 172s.3. Fedushko S. Development of a software for computer-linguistic verification of socio-demographic profile of web-community member. Webology. – 2014. – №11(2), article 126.
3. Synko A. (2022) The method of trust level of publications hosted in virtual communities. Scientific Journal of TNTU (Tern.), vol. 105, no 1, pp. 68–79. Available at: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2022.01.068
4. Synko Anna, Molodetska Kateryna. Application of clusterization for analysis of virtual community users // CEUR Workshop Proceedings. – 2021. – Vol. 2824: Proceedings of the Symposium on information technologies & applied sciences (IT&AS 2021), Bratislava, Slovak Republic, March 5, 2021. – P. 9-19. – Available at: https://ceur-ws.org/Vol-2824/paper2.pdf
5. 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, Y. O. Sierov // The Journal of Lviv Polytechnic National University "Information Systems and Networks" – 2011. – Volume 699. – S. 212-221.

6. Fedushko S. S. Rozroblennia alhorytmu vyznachennia adekvatnosti danykh informatsiinoho obrazu uchasnyka virtualnykh spilnot / S. S. Fedushko, D. V. Melnyk // Management of development of difficult systems. – Kyiv: KNUBA, 2016. – № 27, pp. 132 – 138.

7. Fedushko S. Model of Search and Analysis of Heterogeneous User Data to Improve the Web Projects Functioning / S. Fedushko, O. Mastykash, Y. Syerov, A. Shilinh // Advances in Computer Science for Engineering and Education IV. ICCSEEA 2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, Springer, Cham. – 2021. – № 83. – P. 56-74. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-80472-5_6

8. Sysolina, N. P., Savelenko, H. V., & Nisfoyan, S. S. (2019). Upravlinnia resursnym potentsialom pidpryiemstva z vykorystanniam metodu pobudovy dereva pryiniattia rishen. Scientific Notes of «Krok» University, №4 (56), 83–88. DOI: https://doi.org/10.31732/2663-2209-2019-56-83-88.

9. Doslidzhennia Do IT Like Ukraine: IT-industriia zrostaie popry vse. IT Ukraine Association. URL: https://itukraine.org.ua/it-reports-do-it-like-ukraine.html

10. Zhezhnych P. I. Konsolidovani informatsiini resursy baz danykh ta znan: education manual / P.I. Zhezhnych. – Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic National University, 2010. – 212 s.

11. Vasylchenko V. Termin, terminolohiia. Tsikavi linhvistychni terminy. URL: https://uain.press/blogs/termin-terminologiya-tsikavi-lingvistichni-termini-923680Word

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-344-350
УДК 004.93

ЛИСЕНКО СЕРГІЙ
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0001-7243-8747
САХНЮК ВІТАЛІНА
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0009-0003-7888-2904
БОНДАРУК Олег
Хмельницький національний університет

МЕТОД СИНТЕЗУ АПАРАТНО-ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ КОРПОРАТИВНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ

В роботі представлено метод та програмно-технічний засіб забезпечення стійкості корпоративної комп'ютерної мережі під дією загроз різного виду. У даній статті буде представлено огляд аспектів стійкості та існуючі підходи до забезпечення стійкої маршрутизації. Ця стаття є результатом багатьох досліджень та експериментів, і, оцінюючи кінцевий результат, можна зауважити, що даний метод може успішно відображати можливу важливість вузла, коли йдеться про динаміку епідемії для різних мережевих моделей для забезпечення стійкості мережі.

Ключові слова: комп'ютерна мережа, стійкість корпоративної комп'ютерної мережі ,стійка маршрутизація

.LYSENKO SERGII, VITALINA SAKHNIUK, BONDARUK OLEG
Khmelnytskyi National University

A METHOD FOR SYNTHESIZING HARDWARE AND SOFTWARE TOOLS TO ENSURE THE STABILITY OF A CORPORATE COMPUTER NETWORK

The paper represents a method for ensuring the resilience of a corporate computer network under the influence of various types of threats. This article will provide an overview of the aspects of resilience and existing approaches to ensuring resilient routing. This article is the result of many studies and experiments, and evaluating the final result, it can be noted that this method can successfully reflect the possible importance of a node when it comes to epidemic dynamics for various network models to ensure network resilience. A possible way to solve the problem was to use the theory of linear stationary systems and the phenomenon of propagation in networks as the basis of the method. Complex interdependencies between their elements characterize various systems.

The method of synthesizing hardware and software means of ensuring the stability of a corporate computer network consists of such steps as representing networks as a linear stationary system, modelling the stability of a computer network in the context of epidemics by using virtual network expansion, studying the stability of a computer network in the context of uncertain data transmission and virtual network expansion, processing input data received from the modelled computer network, etc.

To solve the problem, the method involves the theory of linear stationary systems and the use of the NiR metric, which can successfully reflect the possible importance of a node when it comes to the dynamics of an epidemic for various network models to ensure network resilience.

The method is tested by simulations, the results of which show a high correlation with the actual propagation dynamics modeled by SI and SIR processes. NiR also shows a small variance, which means it is reliable for different computer network topologies. The method also involves finding the most critical nodes in a computer network, for which a cascading failure model was used, which models overloaded nodes as non-functional.

Keywords: computer network resilience, computer network, resilient routing

Вступ. Несправності елементів комунікаційної мережі є неуникненним. Причинами цих несправностей можуть бути різні фактори, такі як природні катаклізми, людські помилки або зловмисні атаки, і це лише кілька з них [1]. Незважаючи на різноманітність характеристик цих несправностей, вони мають одну спільну рису: їх неможливо повністю усунути [2]. Наше повсякденне життя все більше стає залежним від комунікаційних мереж, оскільки обмін інформацією росте експоненційно. В результаті, нові збої в мережевих каналах або вузлах призводять до серйозних втрат даних і прибутку [3-6]. Оскільки комунікаційні мережі все більше охоплюють різні сфери нашого суспільства, очікується, що негативні наслідки від несправностей будуть лише зростати [7-9].

Більшість випадків порушень маршрутизації в мережах зв'язку виникає внаслідок випадкових несправностей каналів або комутаційних пристроїв [10-12], таких як відключення кабелю під час робіт на вулицях, пошкодження підводних кабелів рибальськими суднами або відмови в електропостачанні. Згідно з [13], окремі випадки відмов в каналах відіграють важливу роль у глобальних мережах, становлячи більше 70% від усіх випадків збоїв. В мережах дальнього зв'язку на кожні 10 км оптоволоконного зв'язку припадає в середньому одна відмова кабелю за 12 років [14]. Випадки відмов можуть тривати декілька днів або навіть тижнів, призводячи до серйозного зниження продуктивності мережі. У бездротових мережах проблема ще складніша через те, що характеристики зв'язку залежать від різних факторів, включаючи погодні умови. Однак в локальних мережах з проводовими з'єднаннями відмови в вузлах зазвичай більше, оскільки коротші з'єднання можуть бути краще захищені фізично. Локалізація несправностей та подальший ремонт з'єднань або вузлів може займати від годин до декількох днів, що веде до серйозних збоїв в роботі мережевих служб.

Отже, необхідність розробки мережевих механізмів автоматичної реконфігурації, зокрема для відновлення мережевих послуг до моменту фізичного усунення несправностей елементів мережі, має обґрунтовану потребу. Відсутність вбудованого механізму відновлення пошкодженого трафіку може призвести до значних негативних наслідків для клієнтів, які втратять доступ до мережевих послуг. Щоб впоратися з несправностями елементів мережі, необхідно спочатку аналізувати причини, що призводять до їх виникнення. Таким чином, основною метою дослідження є синтез апаратно-програмних засобів, спрямованих на забезпечення стійкості корпоративної комп'ютерної мережі.

Аспекти стійкості та існуючі підходи до забезпечення стійкої маршрутизації

Згідно з джерелами [15-19], поняття стійкості можна розділити на дві основні категорії: толерантність до викликів, що зосереджена на підходах до проектування мережі з метою забезпечення неперервності обслуговування навіть у випадку виникнення проблем, та достовірність, яка відображає вимірювані характеристики аналізованих систем зв'язку. Взаємодія між цими двома категоріями, відома як надійність, вказує на продуктивність мережі в умовах викликів. Виявлення несправностей також повинно включати локалізацію та ізоляцію несправностей, тобто визначення несправного вузла або зв'язку, необхідних для припинення подальшої передачі інформації через пошкоджений елемент, який потребує відновлення, згідно з джерелами [20-26].

В основі поширення збоїв у мережах лежать дві динаміки - каскади та епідемії, які мають спільні характеристики, такі як обмежена кількість вузлів, в яких вони виникають, та здатність поширюватися по мережі, спричиняючи глобальні перебої. Однак механізм та наслідки цих збоїв відрізняються. Каскадні збої виникають через дефіцит пропускної здатності, тоді як епідемії пояснюються властивістю вірусів поширюватися. Кожен збій також має свій власний тригер. Каскадні збої виникають через вийдення з ладу вузлів або зв'язків, що може бути викликане випадковими збоями, географічно пов'язаними збоями або навмисними атаками. Епідемії спричиняються шкідливим вірусним зараженням, яке поширюється на ретельно вибрані вузли мережі за допомогою шкідливого програмного забезпечення, що поширюється на фізично та логічно підключених сусідніх вузлах. Згідно з [27, 28], можна виділити певні фази порушення роботи системи, такі як підготовка, реагування та фаза відновлення, і вибір стратегії для підвищення стійкості мережі залежить від фази, на якій буде застосована дана стратегія.

Дослідження методів моделювання збоїв корпоративної комп'ютерної мережі

Існують два основних підходи до моделювання - аналітичні та чисельні методи. Аналітичний підхід дозволяє отримати рішення про стан системи без використання симуляцій та великих обчислювальних потужностей. Методи теорії систем застосовуються для аналізу мереж, розглядаючи їх як LTI-системи та оцінюючи реакції системи на вхідні впливи. Отримані результати використовуються для оцінки потужності поширення вузлів та визначення найбільш критичних елементів [29].

Чисельні методи моделювання широко використовуються для спостереження за динамікою всередині мережі. Моделювання мереж є поширеним методом дослідження мереж. Воно дозволяє отримати уявлення про динаміку процесу та надати багато інформації, яку не можна передбачити заздалегідь. Для цього використовується MATLAB - математичне програмне забезпечення, яке охоплює багато аспектів математики та може бути використане для моделювання та обчислень мереж.

Основним підходом до аналізу є використання міри кореляції, зокрема тау-коефіцієнта рангової кореляції Кендалла, який застосовується для перевірки припущень при оцінці вузлів. Ця непараметрична міра зв'язку між ранжованими даними є потужним інструментом для порівняння результатів, отриманих різними методами моделювання [30].

Існує велика кількість методів моделювання збоїв корпоративної комп'ютерної мережі, які далі будуть використані для розробки методу синтезу апаратно-програмних засобів для забезпечення резилієнтності (стійкості) корпоративної комп'ютерної мережі [31].

Метод синтезу апаратно-програмних засобів забезпечення стійкості корпоративної комп'ютерної мережі

З метою вирішення задачі забезпечення стійкості комп'ютерних мереж необхідним є розроблення методу синтезу апаратно-програмних засобів забезпечення стійкості корпоративної комп'ютерної мережі. Одним з можливих шляхів розв'язку задачі є залучення теорії лінійних стаціонарних систем та явища розповсюдження в мережах як основи методу синтезу апаратно-програмних засобів забезпечення стійкості. Різноманітні системи характеризуються складними взаємозалежностями між їхніми елементами.

Для вирішення задачі метод передбачає залучення теорії лінійних стаціонарних систем, та використання метрики NiR, яка може успішно відображати можливу важливість вузла, коли йдеться про динаміку епідемії для різних мережевих моделей для забезпечення стійкості мережі.

Апробація методу здійснюється шляхом моделювання, результати якого показують високу кореляцію з фактичною динамікою поширення, змодельованою за допомогою процесів SI та SIR.

NiR також показує невелику дисперсію, що означає його надійність для різних топологій комп'ютерних мереж. Також метод передбачає знаходження найбільш критичних вузлів в комп'ютерній мережі, для чого було використано модель каскадних відмов, яка моделює перевантажені вузли як нефункціональні.

Одним з найважливіших кроків є дослідження стійкості. Для цього етапу слід врахувати можливі варіант інфікувань. Інфікування загрозою може моделюватись, починаючи з одного і того ж початкового

вузла для вихідної та розширеної мереж. В ході роботи було здійснено спостереження за кумулятивною кількістю заражених вузлів з плином часу. На рисунку 1 показано майже ідеальний збіг результатів моделювання для вихідної та розширеної мереж, що доводить можливість застосування методу розширення мережі для забезпечення стійкості корпоративної комп'ютерної мережі в умовах епідемій.

Для дослідження стійкості важливе також порівняння динаміки інфікування вихідної мережі *G(V, E)* та реакції системи, отриманої з розширеної мережі $G_E(V_E, E_E)$. Подібно до прикладу, показаного на рисунку 1, спочатку моделюється динаміка поширення за допомогою моделі SI. На кожному часовому кроці t заражений вузол намагається заразити сприйнятливого сусіда. Інфекція передається з ймовірністю $p = 0.4$. Таким чином, сприйнятливий вузол заражається з ймовірністю $P = 1 - (1 - p)k$, де k - кількість інфікованих сусідів. Дані, зібрані за допомогою симуляції, включають кумулятивну кількість інфікованих вузлів $\underline{vu}(n)$ та кількість інфікованих вузлів на кожному часовому кроці $\underline{vu}(n)$, яка є похідною від $\underline{vu}(n)$.

Потім система створюється з розширеної мережі *GE(VE, EE)* з ймовірністю інфікування $p = 0.4$. На рисунку 2 зображено динаміку епідемії як vu(n), змодельовану на вихідній мережі з ймовірністю інфікування $p = 0{,}4$. Значення $\underline{vu}(n)$ порівнюються зі ступінчастою реакцією $\underline{y_H}(n)$ системи, створеної на основі розширеної вихідної мережі. Результати, отримані в результаті моделювання та реакція системи сильно корелюють.

Рис. 1. Лінійна стаціонарна система з розрахунком крокової та імпульсної реакції

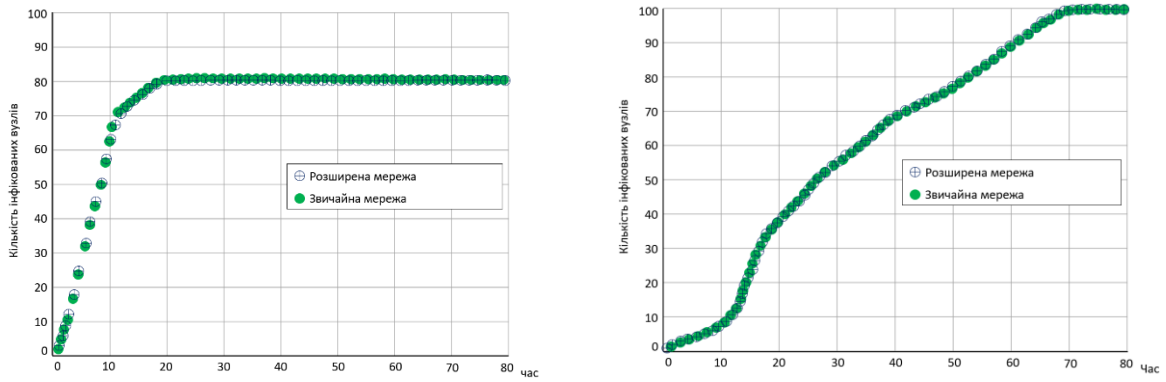


Рис. 2. Динаміка поширення загрози в звичайній мережі та розширеній

Наступним кроком методу забезпечення стійкості корпоративної комп'ютерної мережі є оброблення вхідних даних, отриманих з комп'ютерної мережі. Три типи мереж, що використовуються в моделюванні, генеруються випадковим чином за трьома різними мережевими моделями.

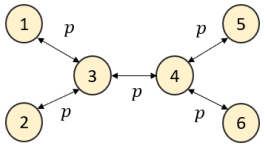


Рис. 3. Неорієнтована мережа з M = 6 вузлами та N = 5 зв'язками та ймовірністю передачі p

Щоб продемонструвати можливість застосування ЛСС підходу до аналізу динаміки поширення було взяти неорієнтовану мережу *G(V, E)* з $|V| = 6$ вузлів і $|E| = 5$ ребер (рис. 3) і застосовано підхід ЛСС.

Ймовірність передачі змінюється з $p1 = 0.6$ до $p2 = 0.2$. Ймовірність передачі однакова для всіх пар сусідніх вузлів, і вважається, що інфекція походить з вузла. На основі інформації про топологію *G(V, E)* ми будуємо дві системи ЛСС: першу з $p_1 = 0.6$ і другу з $p_2 = 0.2$. Потім було обчислено ступінчасті відгуки для отриманих систем. Було виявлено різницю між нахилами двох отриманих кривих (рис. 4). Крива з більшим

нахилом представляє ступінчасту характеристику системи, отриману від мережі з більшою швидкістю передачі. Таким чином, аналізуючи реакцію даної системи, можна оцінити динаміку епідемії у відповідній мережі. Нахил кривої відповідає швидкості поширення епідемії в кожний момент часу. Ця ж величина відповідає і імпульсному відгуку.

0,6 та p = 0,2

Наступним кроком запропонованого методу є вирішення проблеми модифікації комп'ютерної мережі. Це вимагає додаткової модифікації топології шляхом віртуального розширення мережі. Пропонований метод використовує міру Node Imposed Response (NiR), яка фіксує потенціал поширення вузла. Алгоритми видалення циклів можуть змінити топологію мережі так, що деякі шляхи стають недоступними, особливо в неорієнтованих мережах, де потрібно вибирати напрямок ребра. Щоб зберегти найважливіші шляхи з вихідного вузла і мінімізувати кількість видалених ребер, слід були знайти правильний метод видалення циклів. Після маніпуляцій з вихідним графом ми створюємо матрицю системи A таким чином, що $A = A^T_{adj}$. Всі ненульові елементи замінились значенням d, так що $\forall a_{ij} = 0 : a_{ij} = d$, і $0 < d < 1$. Додаткове дослідження показує, що дисперсія між значеннями NiR для всіх вузлів стає вищою при меншому d.

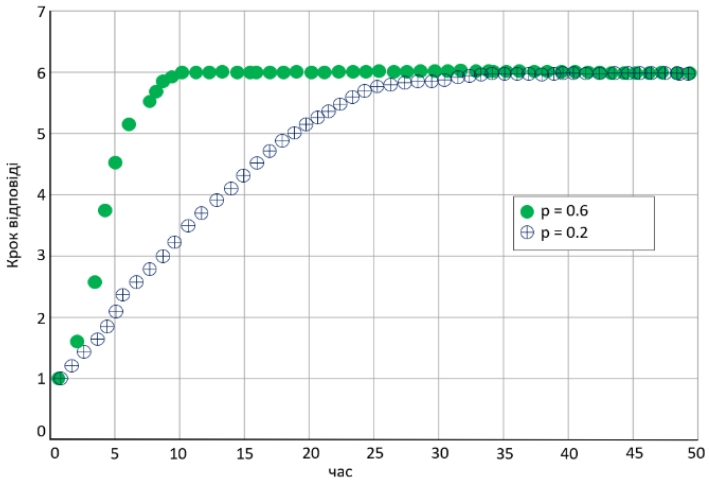


Рис. 4. Покрокові реакції системи, отримані з мережі з використанням двох ймовірностей зараження p =

Наступним кроком методу забезпечення стійкості корпоративної комп'ютерної мережі є знаходження найбільш критичних вузлів в комп'ютерній мережі. Для вирішення даної підзадачі було використано модель каскадних відмов, яка моделює перевантажені вузли як нефункціональні. Модель дозволяє встановити факт, що атака на один важливий вузол (з високим початковим навантаженням) може викликати каскадний ефект, який може призвести до збою всієї мережі та, як наслідок, серйозного збою служби.

Таким чином, вважатимемо найбільш критичним вузлом той, видалення якого спричинить найбільшу шкоду мережі. Пошкодження визначається як зворотна величина найбільшого підключеного компонента, що залишився після моделювання каскаду. Після видалення вузла і відносний розмір найбільшого з'єднаного компонента, що залишився, дорівнює G_i і так само після видалення j відносний розмір найбільшого з'єднаного компонента дорівнює G_j . Якщо $G_i < G_j$, ми робимо висновок, що вузол і є більш критичним.

Для вирішення підзадачі знаходження множини k найбільш критичних вузлів мережі було використано генетичний алгоритм. Набір з 100 найбільш критичних вузлів включається в додаткову оцінку. Початковий простір розв'язків різко зменшується, але все ще має значний розмір (F_n=10 = 1,73 × 1013). Генетичний алгоритм уможливлює знайти розв'язок через поступове покращення пристосованості всього покоління. Оптимізація, що проводилася, була цілочисельною задачею, де рішенням є масив з n цілих чисел в діапазоні від 1 до 100, і кожне значення зіставляється з відповідним ідентифікатором вузла. Максимально 100 вузлів можна було об'єднати в групи, що складаються з k елементів кожна. Набір з 100 вузлів було визначено за допомогою попереднього аналізу впливу окремих вузлів. Підхід генетичного алгоритму для знаходження критичної групи представлено у вигляді псевдокоду нижче.

1: Вхід: G(V, E)

2: Параметри ініціалізації: розмір популяції встановлено на pop = 200 з обмеженням на максимальне Ngen = 1200 поколінь

3: Створення початкової популяції: початкова популяція створюється випадковим чином із рівномірним розподілом

4: поки кількість поколінь досягає максимуму до t> Ngen

5: виконати кросовер

6: тоді як для всіх рішень у популяції

7: видалити вузли t ініціалізувати каскад

8: виконати оцінку t, значенням функції пристосованості, яка є розміром найбільшої компоненти.

9: відсортувати рішення з останнього покоління

10: повернути групу вузлів

Підхід ГА дає однакові або гірші результати для всіх критичних груп. Додаткова перевірка за допомогою генетичного алгоритму підтримує рішення зосередити пошук на відносно невеликій кількості критичних вузлів.

Таким чином, метод синтезу апаратно-програмних засобів забезпечення стійкості корпоративної комп'ютерної мережі можна умовно розділити на такі кроки:

1) представлення мережі як лінійної стаціонарної системи;
2) моделювання стійкості комп'ютерної мережі в умовах епідемій шляхом застосування віртуального розширення мережі;
3) дослідження стійкості комп'ютерної мережі в умовах невизначеної передачі даних та віртуального розширення мережі;
4) обробка вхідних даних, отриманих зі змодельованої комп'ютерної мережі;
5) виявлення впливових розповсюджувачів, що порушують стійкість мережі;
6) знаходження найбільш критичних вузлів в комп'ютерній мережі;
7) знаходження множини k найбільш критичних вузлів мережі.

Експериментальні дослідження апаратно-програмних засобів забезпечення стійкості корпоративної комп'ютерної мережі

З метою здійснення апробації та перевірки ефективності запропонованого методу синтезу апаратно-програмних засобів забезпечення стійкості корпоративної комп'ютерної мережі було здійсненого ряд експериментальних досліджень. На рисунку 5 показано приклад невеликої мережі з n = 10 вузлами. Кожен з вузлів має своє значення NiR, вказане вище. Значення NiR вказує на потужність поширення загрозу, тобто вузол космп'ютерної мережі з вищим NiR швидше заразить всю мережу або більшу її частину.

Моделювання проводилося наступним чином: інфекція зароджується в одному вузлі; інфекція поширюється зі швидкістю передачі p, і в кінцевому підсумку охоплює всю мережу; потім розраховується час, необхідний для повного інфікування. Твердження підтвердилось моделюванням динаміки поширення SI та порівнянням результатів з отриманими значеннями NiR. Моделювання проводилося наступним чином: інфекція зароджується в одному вузлі; інфекція поширюється зі швидкістю передачі p, і в кінцевому підсумку охоплює всю мережу; потім розраховується час, необхідний для повного інфікування. Якщо час повного інфікування коротший, то вузол має потенціал для швидшого поширення інфекції і вважається більш важливим (тобто більш впливовим). Для того, щоб порівняти значення NiR та змодельований потенціал розповсюдження, здійснюється сортування вузлів як за значенням NiR, так і за потужністю розповсюдження, отриманою в результаті здійсненого моделювання.

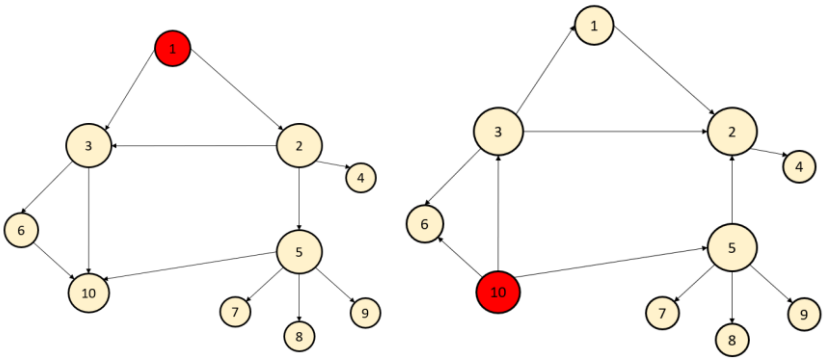


Рис. 5. Виявлення впливових розповсюджувачів, що порушують стійкість мережі

Таким чином, було визначено кілька окремих груп вузлів з різним потенціалом поширення (рис. 6).

У випадку невеликої мережі значення NiR точно відображає потенціал розповсюдження, оскільки групування вузлів збігається з отриманим в результаті чисельного моделювання. Ймовірно, що для великих мереж, де n>10, буде багато вузлів з дуже схожими значеннями NiR, що відповідає вродженому принципу безмасштабності багатьох мереж, з великою часткою не-вузлів.

Для того, щоб перевірити кореляцію між NiR та результатами моделювання для всіх сімейств мереж, використаних для аналізу було проведено експерименти. Моделювання проводилось на декількох мережах з використанням моделей SI та SIR. Базовим значенням для моделі SI є час t, необхідний для часткового (50% або 70% вузлів) інфікування у випадку одного вузла-джерела i. Для моделі SIR значенням, яке використовується для порівняння, є розмір спалаху (загальна кількість вузлів, які заразилися) після t часових кроків виконання. Результати, отримані за допомогою моделювання для кожного з вузлів, порівнюються з NiR та п'ятьма іншими мірами центральності (міжцентровість, центральність, ступінь, DS та центральність за H-індексом). Показник NiR демонструє високу кореляцію з результатами моделювання разом з низькою дисперсією, часто перевершуючи всі п'ять показників як у моделях SI, так і SIR.

Єдиним показником, який показує однакові результати, є центральність DS, параметри якого залежать від динаміки поширення загроз.

У випадку відмови критичного вузла, будь-яка частка між 0,02 до 0,1 найменш навантажених вузлів може бути вилучена, щоб запобігти подальшого каскадування. На рисунку 4.4б показано порівняння розміру компоненти після каскаду з заходами захисту та без них для десяти найбільш критичних вузлів. Частка видалених вузлів після початкової атаки була обрана такою f = 0.04. Для кожного критичного вузла і каскад пом'якшується таким чином, що результуюче значення G завжди більше, якщо захисні заходи реалізовано належним чином. Ідея полягає в тому, щоб визначити набір вузлів, які слід підготувати до вилучення у випадку найнебезпечніших відмов. Відмова одного з десяти найбільш критичних вузлів з Таблиці 1 спричинить найбільшу шкоду. Тому проводиться наступний аналіз: Для кожного з найбільш критичних вузлів моделюється відмова і вибираються найменш навантажені вузли. Саме ці вузли є кандидатами на навмисне видалення після початкової атаки. Певна кількість вузлів часто з'являється у списку кандидатів на різні відмови і. Це ті вузли, які, швидше за все, матимуть менше навантаження у випадку навмисної атаки. Механізм захисту повинен видалити частку f з усіх вузлів, крім вузлів-кандидатів.

Рис. 6. Потенціал поширення

В абсолютних числах кількість вершин, які будуть навмисно видалені, становить 23 ≤ nir ≤ 115. Не має значення, яку саме вершину буде видалено, доки число nir не виходить за межі.

Таблиця 1

Вплив видалення вузлів з синтезованої мережі

№ вузла мережі	$G_{\alpha=1.01}$	$G_{\alpha=1.10}$	$G_{\alpha=1.30}$	$G_{\alpha=1.50}$
10	0.312	0.230	0.310	0.409
19	0.289	0.348	0.528	0.542
42	0,439	0.467	0.455	0.387
12	0.458	0.492	0.912	0.915
41	0.532	0.485	0.676	0.687

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У роботі було досліджено наявні методи забезпечення стійкості корпоративної комп’ютерної мережі, а також розроблено удосконалений метод, який враховує різні загрози у мережах.

Також було запропоновано вдосконалений метод синтезу апаратно-програмних засобів для забезпечення стійкості корпоративної комп'ютерної мережі. Цей метод використовує теорію лінійних стаціонарних систем та метрику NiR, яка дозволяє відображати важливість вузлів в контексті динаміки поширення епідемії для різних мережевих моделей. Метод був протестований шляхом моделювання, результати якого показали високу кореляцію з фактичною динамікою поширення, що була змодельована за допомогою процесів SI та SIR. Метрика NiR також демонструє невелику дисперсію, що свідчить про її надійність для різних топологій комп'ютерних мереж. Парадигма, на якій базується підхід ЛСС, дозволяє використовувати різні варіації вихідної метрики, наприклад, вибір декількох вхідних та вихідних точок, що дозволяє оцінити вплив багатьох вузлів мережі на процес поширення.

Більш вразливі вузли з більшою ймовірністю будуть досягнуті з набору обраних вхідних вузлів. Аналіз не обмежується незваженими мережами. Той самий підхід може бути використаний навіть для зважених мереж, просто включивши ваги в матрицю системи.

Також метод передбачає знаходження найбільш критичних вузлів в комп'ютерній мережі, для чого було використано модель каскадних відмов, яка моделює перевантажені вузли як нефункціональні.

Література

1. Agarwal P.K., Efrat A., Ganjugunte, S., Hay, D., Sankararaman, S., Zussman, G.: The resilience of WDM networks to probabilistic geographical failures. *Proc. 30th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societie*s, 2013. pp. 1521–1529.
2. Asthana R., Singh Y.N., Grover W. p-cycles: an overview. *IEEE Commun. Surv. Tutorials*. 2013. 12(1), 97–111.
3. Avizienis, A., Laprie, J.-C., Randell, B., Landwehr, C. Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing. *IEEE Trans. Dependable and Secure Comput*. 2014. 1(1), 11–33.
4. Caini C., Cruickshank, H., Farrell, S., Marchese, M.: Delay- and disruption-tolerant networking (DTN): an alternative solution for future satellite networking applications. *Proc. IEEE* 2021. 99(11).
5. Cetinkaya, E.K., Sterbenz, J.P.G.: A taxonomy of network challenges. *Proc. 9th International Conference on Design of Reliable Communication Networks*, 2013. pp. 322–330 ()
6. Chołda P., Jajszczyk A. Recovery and its quality in multilayer networks. IEEE/OSA J. *Lightwave Technol.* 2010. 28(4), 372–389.
7. Chołda, P., Tapolcai, J., Cinkler, T., Wajda, K., Jajszczyk, A.: Quality of Resilience as a network reliability characterization tool. *IEEE Netw.* 2011, 23(2), 11–19.
8. Colle, D., De Maesschalck, S., Develder, C., Van Heuven, P., Groebbens, A., Cheyns, J., Lievens, U., Pickavet, M., Lagasse, P., Demeester, P.: Data-centric optical networks and their survivability. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 2012. 20(1), 6–20.
9. Cucurull, J., Asplund, M., Nadjm-Tehrani, S., Santoro, T.: Surviving attacks in challenged networks. IEEE Trans. Dependable and Secure Comput. 2015. 9(6), 917–929.
10. Fangming L., Bo L., Lili Z., Baochun L., Hai J., Xiaofei L. Flash crowd in P2P livestreaming systems: fundamental characteristics and design implications. *IEEE Trans. Parallel. Distrib. Syst.* 2012. 23(7), 1227–1239.
11. Geva M., Herzberg A., Gev Y. Bandwidth Distributed Denial of Service: attacks and defences. *IEEE Secur. Priv.* 2014. 12(1), 54–61 ()
12. Grover, W.D. Mesh-based Survivable Networks. Options and Strategies for Optical, MPLS, SONET, and ATM Networks. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River (2014) Grover, W.D.: The protected working capacity envelope concept: an alternate paradigm for automated service provisioning. *IEEE Commun. Mag*. 2014. 42(1), 62–69 ()
13. Grover, W.D., Shen, G. Extending the p-cycle concept to path-segment protection. In: Proc. IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC'03), 2, pp. 1314–1319 (2013)
14. Haddadi H., Rio, M., Iannaccone G., Moore A., Mortier R. Network topologies: inference, modeling, and generation. IEEE Commun. Surv. Tutorials 10(2), 48–69 (2009)
15. Haider, A., Harris, R. Recovery techniques in Next Generation Networks. *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, 2014 9(3), 2–17
16. Heegaard, P.E., Trivedi, K.S. Network survivability modeling. *Comput. Netw*. 53(8), 1215–1234 (2011)
17. Ho, P.-H. State of the art progress in developing survivable routing schemes in mesh WDM networks. *IEEE Commun. Surv. Tutorials* 6(4), 2–16 (2014)
18. Ho, P.-H., Tapolcai, J., Cinkler, T. Segment shared protection in mesh communication networks with bandwidth guaranteed tunnels. *IEEE/ACM Trans. Networking* 12(6), 1105–1118 (2022)
19. Ho, P.-H., Tapolcai, J., Mouftah, H.: On achieving optimal survivable routing for shared protection in survivable Next-Generation Internet. *IEEE Trans. Reliab.* 53(2), 216–225 (2014)
20. Jaumard, B., Rocha, C., Baloukov, D., Grover, W.D. A column generation approach fordesign of networks using path-protecting p-cycles. *In: Proc. 6th International Workshop on Design of Reliable Communication Networks (DRCN'07)*, pp. 1–8 (2017)
21. Jung J., Krishnamurthy B., Rabinovich M. Flash crowds and denial of service attacks: characterization and implication for CDNs and web sites. *Proc. 11th International Conference on World Wide Web (WWW'02*), 2012. pp. 293–304.
22. Kappenman, J. A perfect storm of planetary proportions. *IEEE Spect. Mag*. 2012. 49(2), 26–31.
23. Khabbaz, M.J., Assi, C.M., Fawaz, W.F. Disruption-tolerant networking: a comprehensive survey on recent developments and persisting challenges. *IEEE Commun. Surv. Tutorials* 14(2), 2012. 607–640.
24. Kitamura, Y., Lee, Y., Sakiyama, R., Okamura, K. Experience with restoration of Asia Pacific network failures from Taiwan earthquake. *IEICE Trans. Commun*. E90-B(11), 2017. 3095–3103.
25. Kodian, A., Grover, W.D. Failure-independent path-protecting p-cycles: efficient and simple fully preconnected optical-path protection. *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.* 2015. 23(10), 3241–3259.
26. Kompella, K., Swallow, G. Detecting Multi-Protocol Label Switched (MPLS) Data Plane Failures, IETF RFC 4379. 2016.
27. Maruyama, H., Legaspi, R., Minami, K., Yamagata, Y. General resilience: taxonomy and strategies. *Proc. 2014 International Conference and Utility Exhibition on Green Energ for Sustainable Development (ICUE'14),* 2014. pp. 1–8.
28. Mingsen X., Wen-Zhan S., Deukhyoun H., Jong-Hoon K., Byeong-Sam K. ECPC: preserve downtime data persistence in disruptive sensor networks. *Proc. IEEE Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems* (MASS'13), 2013 pp. 281–289.
29. Misseri X., Gojmerac I., Rougier J.-L. IDRD: enabling inter-domain route diversity. *Proc. IEEE International Conference on Communications*, 2013. pp. 3536–3541.
30. Mukherjee, B.: Optical WDM Networks. Springer, New York. 2016.
31. *Nicol D.M., Sanders W.H., Trivedi K.S. Model-based evaluation: from dependability to security. IEEE Trans. Dependable and Secure Comput.* 2017. 1(1), 48–65.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-351-359
УДК 512.2

ТИМЧИШИН ВАСИЛЬ
Західноукраїнський національний університет
https://orcid.org/0000-0001-8574-2561
e-mail: v.tymchyshyn@wunu.edu.ua
ОТОО ФРАНК
Західноукраїнський національний університет
e-mail: f.otoo@wunu.edu.ua

АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАБРУДНЕННЯ ГРУНТІВ ВНАСЛІДОК ДИФУЗІЇ ДІОКСИДУ АЗОТУ В ГРУНТАХ ТА ГРУНТОВИХ ВОДАХ

У роботі запрпоновано архітектуру програмного забезпечення, яке дозволить моделювати процеси забруднення грунтів внаслідок дифузії діоксиду азоту в ґрунтах і грунтових водах. Для досягнення цієї мети використані математичні моделі для прогнозування динаміки концентрацій шкідливих викидів, а також модель дифузії діоксиду азоту у ґрунті і водоймі Застосування математичних моделей дозволить прогнозувати зміни концентрацій діоксиду азоту в певній точці забруднення. Крім того, модель дифузії діоксиду азоту у ґрунті і водоймі допоможе визначити шляхи поширення забруднення та його вплив на навколишнє середовище. Такі моделі базуються на різницевих рівняннях або диференціальних рівняннях в частинних похідних, які дозволяють описати залежність між різними факторами. Архітектура програмного забезпечення включає необхідні модулі для введення початкових умов, виконання обчислень, візуалізації результатів та можливості внесення коректив в моделі при необхідності. Наведено ряд діаграм, які ілюструють особливості взаємодії модулів системи на рівні класів та компонентів.

Ключові слова: екологічний моніторинг, дифузія діоксиду азоту математичне моделювання, архітектура програмного забезпечення.

TYMCHYSHYN VASYL, OTOO FRANK
West Ukrainian National University

ARCHITECTURE OF A SOFTWARE SYSTEM FOR SOIL POLLUTION PROCESSES MODELING AS A RESULT OF DIFFUSION OF NITROGEN DIOXIDE IN SOILS AND GROUNDWATER

The work proposes a software architecture that will allow simulating the processes of soil pollution due to the diffusion of nitrogen dioxide in soils and groundwater. To achieve this goal, mathematical models were used to predict the dynamics of concentrations of harmful emissions, as well as a model of diffusion of nitrogen dioxide in the soil and reservoir. The use of mathematical models will allow predicting changes in concentrations of nitrogen dioxide at a certain point of pollution. In addition, the model of diffusion of nitrogen dioxide in the soil and reservoir will help to determine the ways of the spread of pollution and its impact on the environment. Such models are based on difference equations or differential equations in partial derivatives, which allow to describe the dependence between various factors. The software architecture includes the necessary modules for entering initial conditions, performing calculations, visualizing results, and making adjustments to the model if necessary. A number of diagrams are presented that illustrate the features of interaction of system modules at the level of classes and components

.Keywords: environmental monitoring, diffusion of nitrogen dioxide, mathematical modeling, software architecture.

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

Забруднення довкілля внаслідок антропогенної діяльності людини є важливою проблемою людства, яка суттєво впливає на якість життя людей, та й усієї флори і фауни, спричинюючи різноманітні захворювання та патології. Особливої уваги потребує дослідження стану та ідентифікації особливо небезпечних джерел забруднення ґрунтів та ґрунтових вод. Як відомо [1] основними джерелами хімічного забруднення ґрунтів є хімічні речовини, використовувані в сільському господарстві (мінеральні добрива, пестициди, ядохимікати і т.д.); атмосферні опади в радіусі дії промислових підприємств (особливо хімічний і металургійних); видобуток корисних копалин; теплові й атомні електростанції, а також автотранспорт.

Значна частина джерел забруднення призводить до локальних забруднень, але деякі з них діють у регіональному і навіть у глобальному масштабі, особливо у випадку забруднення через атмосферні опади або унаслідок використання добрив на значних площах.

Хімічне забруднення ґрунтів переважно має дві першопричини [2]:

1. поглинанням верхнім шаром ґрунту викидів шкідливих речовин в атмосферу;
2. безпосереднім внесенням хімічних речовин у виді добрив, пестицидів, гербіцидів.

Перший спосіб забруднення особливо є актуальним для великих міст та ґрунтів, які знаходяться у безпосередній близькості до міст. Саме на цьому виді забруднень сконцентрована увага наведених у статті досліджень. Варто зазначити, що через випадання опадів, або через безпосередню близькість джерела викидів до ґрунту, відбувається забруднення ґрунтових вод і прилеглих водойм. Оскільки мова йде про дифузійні процеси в ґрунтах, на територіях прилеглих до великих міст, то найбільшим забрудником хімічними речовинами для великих міст є автотранспорт [3]. Тим більше, що сучасні тенденції планування та розбудови міст полягають у розміщені шкідливих виробництв далеко за межами міста.

У вихлопних газах автотранспорту є цілий спектр шкідливих речовин, найбільш небезпечним серед яких у великих концентраціях є діоксид азоту. Хімічне забруднення ґрунтів через поглинання верхнім шаром ґрунту викидів шкідливих речовин в атмосферу автотранспорту є актуальним для великих міст, а також для прилеглих джо них ґрунтів та водойм. Варто зазначити, що дослідження забруднення ґрунтів через атмосферне повітря розглянуто у працях [4,5]. Разом з тим, моніторингу даного виду забруднень ґрунтів і водойм приділено недостатньої уваги. Переважно розглядають опосередковане забруднення ґрунтів через випадання опадів [5]. Разом з тим, не беруть до уваги, наприклад забруднення ґрунтів та водойм шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту. У таких випадках, через високу вологість повітря цей вид забруднень через безпосередню близькість джерела викидів до ґрунту та водойм внаслідок дифузійних процесів спричинює забруднення грунтів, ґрунтових вод і прилеглих водойм [6]. На перший погляд такі забруднення не є критичними у порівнянні із іншими видами, наприклад забруднення діоксидом азоту чи іншими шкідливими речовинами теплоелектростанціями чи іншими хімічними виробництвами. Разом з тим, переважно такі об’єкти викидають забруднюючі речовини в атмосферу на великі відстані від приземистого шару і це сприяє частковому розсіюванню та перенесенню цих забруднюючих речовин в інші місця на великі відстані, за межі прилеглих територій, де вони осідають на ґрунт у меншій концентрації. Тому увага була сконцентрована саме на дифузійних процесах у верхніх шарах ґрунту діоксиду азоту, походження якого – вихлопні гази автотранспорту[7].

Іншою проблемою яка стосується забруднення питання забруднення грунтів сполуками азоту є наявність відповідних засобів для моніторингу цього процесу і для моделювання наслідків. Переважно на сьогоднішній день використовують Гауссівські моделі розсіювання та перенесення забруднень від шкідливих викидів[8-10] Також для мониіторингу прогнозування на основі зазначених моделей розроблено ряд програмних середовищ[11]. Разом з тим уневерсальність цих середовищ недає можливість реалізувати інші не Гаусівські математичні моделі перенесення шкідливих викидів. Особливо це стосується процесів динаміки зміни концентрації діоксиду азоту на поверхні приземестого шару атмосфери і його переходу для соплук азотної кислоти. Така математична модель в достатній мірі описана в працях[3,7] проте авторами цих праць не надано можливість створення і застосування інструментальних засобів для оперування такого класу моделями тому метою даної праці є представлення програмнго середовища для моделювання процесів забруднення грунтів внаслідок дифузії діоксиду азоту в грунти та грунтові води.

Постановка проблеми

Проблематика даної праці повязана зі шкілдивими викидами діоксиду азоту внаслідок інтенсивного руху автотраспортних засобів та його дифузії у поверхневих шарах грунту і утворення солей азотної кислоти. Математичні моделі цих процесів в достатній мірі описані в працях[12, 13].

Метою праці є розробка та представлення інтрументальних програмних засобів для моделювання та прогнозування зазаначених процесів.

Математичне забезпечення

Математичні моделі прогнозування динаміки концентрацій діоксиду азоту в точці

Для кращого розуміння негативних наслідків забруднення повітря на здоров'я людини важливо провести точну оцінку його впливу. Епідеміологічні дослідження надали велику кількість доказів, що підтверджують негативний вплив добової концентрації забруднювачів зовнішнього повітря на здоров'я людини. У таких дослідженнях зазвичай зосереджуються на масових концентраціях шкідливих часток та обраних газоподібних забруднювачів. Математичні моделі, які описують динаміку розповсюдження концентрації забруднень через шкідливі викиди у вихлопних газах автотранспорту[14], виражені у вигляді різницевих рівнянь, які є аналогами диференціальних рівнянь в частинних похідних, таких як моделі турбулентної дифузії. Однією з особливостей цих моделей є можливість врахування інтенсивності джерел концентрацій для розподіленого об'єкта, такого як автотранспорт

У цих моделях використовуються різницеві рівняння, які є дискретними аналогами диференціальних рівнянь. Вони розглядають розподіл концентрацій забруднень на певній просторові сітці та визначають його зміну в часі. Для автотранспорту ці моделі дозволяють враховувати інтенсивність викидів з рухомих джерел та їх вплив на оточуюче середовище.

Математичні моделі розповсюдження концентрацій забруднень у вихлопних газах автотранспорту постійно вдосконалюються та адаптуються на основі нових наукових досліджень та експпериментальних даних. Вони включають у себе різні фізичні та хімічні процеси, які відбуваються під час розповсюдження забруднень, такі як дифузія, конвекція, хімічні реакції та взаємодія з атмосферними компонентами.

Математичні моделі динаміки поширення концентрацій забруднень на основі різницевих рівнянь мають такий вигляд:

$$[\hat{v}_k] = [\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] = \vec{f}^T([\hat{v}_{k-d}], \ldots, [\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_0, \ldots, \vec{u}_{d-1}, \vec{u}_k) \cdot \vec{\varphi}(\vec{g}), k = d, \ldots, K, \quad (1)$$

де $[\hat{v}_k], [\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+]$ – інтервальний вигляд модельованої концентрації шкідливих викидів на часовій дискреті k ,

$[\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+]$ – відповідно, нижня та верхня межі інтервалу можливих значень концентрації шкідливих викидів,

$\vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k$ – вектори вхідних змінних (управлінь),

d – порядок дискретної динамічної моделі (ДДМ),

$\vec{g}$ – вектор параметрів моделі,

$\vec{f}^T(\bullet)$ – вектор базисних функцій,

$\vec{\varphi}(\bullet)$ – вектор базисних функцій для параметрів.

Оскільки вимірювання можуть містити похибки, а межові значення відомі, результати спостережень в k-й момент часу можна представити у вигляді інтервалу.

$$[z_k] = [z_k^-; z_k^+] = [z_k - z_k \cdot \varepsilon; z_k + z_k \cdot \varepsilon;], k = 0, \dots, N \quad (2)$$

де z_k – виміряне значення концентрації,

$z_k^-; z_k^+$ – гарантований інтервал іміряної концентрації,

ε – відносна похибка вимірювань.

За умови, що прогнозовані значення належать відповідному інтервалу виміряних значень, вектор параметрів $\vec{g}$ різницевого оператора можна оцінити, незалежно від того, що сам вектор параметрів є невідомим[15]. Умови такої оцінки представлені наступним чином:

$$[\hat{v}_k] = [\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] \subseteq [z_k^-; z_k^+], k = 0, \dots, N \quad (3)$$

де $[\hat{v}_k] = [\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+]$ – прогнозований інтервал в загальному випадку обчислюється за формулою:

$$[\hat{v}_k] = \vec{g}^T \cdot \vec{f}\left([\hat{v}_0], \dots, [\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k\right), k = 0, \dots, N \quad (4)$$

де $\vec{g}$ – вектор оцінок параметрів різницевого оператора, який отримуємо із умов належності (3).

Оператор, який використовує інтервальну арифметику для обчислення інтервалу прогнозованої концентрації $\hat{v}_k$ за формулою (4), називається інтервальним різницевим оператором (ІРО).

Якщо підставити інтервальні оцінки $[\hat{v}_k]$, які були обчислені за формулою (4), з початковими наближеннями $([\hat{v}_0], \dots, [\hat{v}_{k-1}]$ у вираз (3), то отримаємо інтервальну систему нелінійних алгебраїчних рівнянь (ІСНАР)], яка буде мати наступний вигляд:

$$\hat{v}_k^- \le \vec{g}^T \cdot \vec{f}\left([\hat{v}_0], \dots, [\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k\right) \le \hat{v}_k^+, k = d, \dots, N \quad (5)$$

Для знаходження хоча б одного розв'язку ІСНАР, використовуються методи параметричної ідентифікації [16], які, в свою чергу, базуються на методах випадкового пошуку. Для визначення структури моделі було використано метод структурної ідентифікації, побудований на основі поведінкових моделей бджолиної колонії. За допомогою інтервальних даних, які наведені у праціР[3] отримано таку структуру ІРО:

$$[\hat{v}_k] = g_0 + g_1 \cdot \hat{v}_{k-1} + g_2 \cdot \hat{v}_{k-1} \cdot \hat{v}_{k-3} + g_3 \cdot \hat{v}_{k-1} \cdot u_{1,k}/u_{1,k-1} - g_4 \cdot \hat{v}_{k-2} \cdot u_{1,k-1}/u_{1,k+1} \quad (6)$$

В результаті проведення параметричної ідентифікації моделі із застосуванням вищезгаданих процедур випадкового пошуку, отримано такі оцінки параметрів:

$$[\hat{v}_k] = 0{,}0365 + 0{,}3542 \cdot \hat{v}_{k-1} + 0{,}118 \cdot \hat{v}_{k-1} \cdot \hat{v}_{k-3} + 0{,}5059 \cdot \hat{v}_{k-1} \cdot u_{1,k}/u_{1,k-1} - 0{,}0154 \cdot \hat{v}_{k-2} \cdot u_{1,k-1}/u_{1,k+1} \quad (7)$$

Математична модель дифузії діоксиду азоту у ґрунті та водоймі

У вологому середовищі двоокис азоту взаємодіє із водою згідно із реакцією [17]:

$$2NO_2 + H_2O = HNO_3 + HNO_2, \quad (8)$$

Своєю чергою азотиста кислота, яка утворюється при поглинанні окислу азоту, як малостійка сполука розпадається на окис азоту та азотну кислоту [17] :

$$3HNO_2 = HNO_3 + 2NO + H_2O, \quad (9)$$

В підсумку ми можемо розглядати реакцію

$$6NO_2 + 3H_2O = 4HNO_3 + 2NO + H_2O, \quad (10)$$

Скорочуючи обидві частини рівняння на молекулу води отримуємо основне рівняння формування азотної кислоти

$$3NO_2 + H_2O = 2HNO_3 + NO \tag{11}$$

У водних розчинах азотна кислота розщеплюється на йони, що свідчить про її високу кислотність. Ця кислота взаємодіє з основними та амфотерними оксидами, такими як мідь та цинк, з основами, і витісняє слабкі кислоти з їх солей, наприклад, карбонат кальцію, який міститься у вапняках та крейді. Двоокис азоту та азотна кислота є отруйними речовинами, і національні стандарти обмежують їх допустиму концентрацію. Якщо граничні допустимі дози перевищені, то необхідно здійснювати хімічну меліорацію ґрунтів за допомогою вапнякових добрив або будувати очисні споруди для водойм.

Основним механізмом масопереносу газів у ґрунті а також газообміну між ґрунтом та атмосферою є дифузія – переміщення газів під дією градієнта концентрацій. Конвективний (під дією температурних градієнтів), гравітаційний (під дією сили тяжіння) а також під дією перепадів атмосферного тиску механізми мають допоміжне значення[18].

Проаналізуємо підходи до моделювання концентрації двоокису азоту у ґрунті. Аналізовані ділянки забруднень характеризуються доволі значними розмірами у порівнянні із глибиною проникнення забруднень а концентрації забруднень на поверхні ґрунту не характеризуться значними градієнтами. Це дозволяє розглядати аналіз поля концентрацій забруднень в ґрунті як локальну задачу у кожній точці спостереження на поверхні із єдиним аргументом – віддаллю точки спостереження від поверхні ґрунту. В цьому випадку отримуємо одновимірне рівняння дифузії:

$$\frac{d}{dh}\left[D_S(h)\frac{dC_i^S(h)}{dh}\right]=0, \tag{12}$$

де і – номер точки спостереження,

$D_S(h)$ – коефіцієнт дифузії двоокису азоту у грунті,

$C_i^S(h)$ - концентрація забруднень ґрунту в околі і – ої точки спостереження.

Нелінійне диференціальне рівняння дифузії (12) зведемо до вигляду зручного для застосування чисельних методів:

$$\frac{d^2C_i^S(h)}{dh^2} + \frac{D_S'(h)}{D_S(h)}\frac{dC_i^S(h)}{dh} = 0 \tag{13}$$

Доповнимо його граничними умовами Діріхле на поверхні грунту (h=0), де використаємо результати спостережень P_i за забрудненнями поверхні в і-й точці спостережень, скоригованими на перепад значень коефіцієнтів дифузії у повітрі D_A та на поверхні грунту $D_S(0)$:

$$C_i^S(0) = P_i\frac{D_S(0)}{D_A} \tag{14}$$

На нижній межі найродючішого шару грунту H_y в першому наближенні застосуємо умову непроникнення типу Неймана

$$\frac{dC_i^S(h)}{dh}\Big|_{h=H_y} = 0 \tag{15}$$

Аналогічну задачу можна поставити і для водойми. Вважаючи коефіцієнт дифузії у воді постійним, можемо отримати аналітичне подання її розв'язку, однак саме допущення про постійність коефіцієнта дифузії азотної кислоти у воді є надмірним спрощенням. Зокрема за даними ресурсу [19] такий коефіцієнт дифузії залежить від концентрації самої кислоти. Враховуючи це, одновимірне рівняння дифузії азотної кислоти у воді

$$\frac{d}{dh}\left[D_W(C_i^W(h))\frac{dC_i^W(h)}{dh}\right]=0 \tag{16}$$

подамо наступним чином

$$D_W(C_i^W(h))'_{C_i^W}\left[\frac{dC_i^W(h)}{dh}\right]^2 + D_W\left(C_i^W(h)\right)\frac{d^2C_i^W(h)}{dh^2} = 0 \tag{17}$$

За аналогією із задачею (13)-(15) отримуємо задачу (18)-(20) для побудови розподілу концентрації азотної кислоти у воді

$$\frac{d^2 C_i^W(h)}{dh^2} + \frac{D_W(C_i^W(h))' C_i^W}{D_W(C_i^W(h))}\left[\frac{dC_i^W(h)}{dh}\right]^2 = 0 \quad (18)$$

$$C_i^W(0) = P_i^W \quad (19)$$

$$\frac{dC_i^W(h)}{dh}\Big|_{h=H_b} = 0 \quad (20)$$

де і – номер точки спостереження,

$D_W(C)$ – функція дифузії азотної кислоти у воді в залежності від концентрації,

$C_i^W(h)$ - концентрація забруднень води в околі і – ої точки спостереження,

H_b .- усереднена глибина водойми, над якою ведуться спостереження.

Архітектура програмної системи

Система моніторингу забруднення шкідливими речовинами, ґрунтується на апаратно-програмному забезпеченні. Це дозволяє проводити вимірювання концентрації шкідливих викидів на певній території в автономному режимі та зберігати та обробляти дані. Головною метою цього є ідентифікація та навчання математичних інтервальних моделей поширення концентрацій шкідливих викидів.

На рисунку 1 представлено загальний вигляд ахітектури системи. Дана система складається з чотирьох незалежних модулів які взаємодіють між собою використовуючи різні технології. Базовим елементом для моніторингу концентрацій діоксиду азоту було обрано блок Sniffer4D Hyper-local Air Quality Analyzer, в середину якого інстальовано сенсор для вимірювання діоксиду азоту та підключено модуль телеметрії. Для обміну даними між сенсором та сервісом управління даних, на комп'ютері інстальовано програмне забезпечення Sniffer4D Mapper, яке дає можливість не тільки здійснювати попередню обробку телеметричних даних та запис їх в базу даних, але і візуалізувати результати вимірювань в реальному часі. Дані між модулями передаються по протоколу TCP/IP, який забезпечує достатню швидкість обміну великих об'ємів інформації.

Згідно наведеної архітектури, результати вимірювань в режимі реального часу передаються в підсистему для моделювання, де приводяться до інтервального вигляду та зберігаються в БД. Дані вимірювань концентрації забруднення повітря представлені у вигляді наборів, отриманих у інтервальному вигляді, за рахунок наявності похибок вимірювань.

Звдяки використанню CRUD операції сервіс управління даними взаємодіє з модулем зберігання даних, який знаходится на рівні даних, тим самим забезпечуючи швидкий обмін інформацією між рівнем бізнес-логіки та базою даних. В якості системи управління базою даних було обрано MS SQL Server який підтримує реляційну модель даних, що в свою чергу полегшує роботу з організацією виміряних даних.

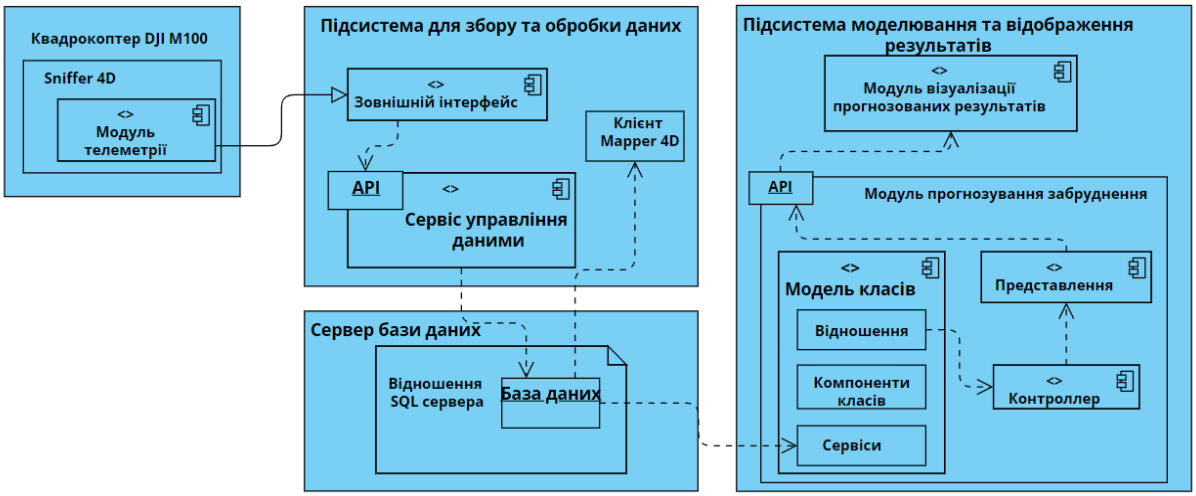


Рис 1. Загальна архітектура системи

Ядром системи моніторингу є підсистема моделювання та відображення результатів. Даний модуль побудований на основі патерну MVC, який дозволяє створювати кілька представлень для моделі класів системи. Крім того, у цьому підході дублювання коду дуже обмежене, оскільки воно відокремлює дані та бізнес-логіку від відображення що є хорошою перевагою при проектуванні та розбці прикладного програмного забезпечення.

Рівень моделі класів в модулі прогнозування забруднення представлено сервісом дизайну математичної моделі прогнозування динаміки концентрацій діоксиду азоту в точці(рисунок 2) та компонентою розрахунку дифузії діоксиду азоту в навколишньому середовищі(рисунок 3).

Як видно з рисунку 2 дизайн моделі починається з побудови інтервально різницевого оператора який в свою чергу взаємодіє з інтелектувальним модулем для формування структури моделі та сховищем формул і умов початкових моделювання. Після того як отриманно ІРО дані переходять до набору модулів які відповідають за побудову структури інтервального різницевого оператора. В основу взаємодії модулів на цьому етапі закладено поведінкову модель бджолинної колонії. Цей метод дозволяє знизити складність обчислень при виконанні структурної ідентифікації складних об'єктів, які представлені у вигляді інтервальних дискретних моделей. Для початку потрібно сформувати початкову кількість множин структурних елементів після чого визначаємо їхню якість. Далі формуються похожі структури та проводится попарна селекція на основі якості початкової множини структур. Для проведення групової селекції селекції потрібно згенерувади новий набір множин після чого перевіряється лічильник вичерпності структур. Якщо ж для поточних структур знайдеться хоча б одна, для якої, немає заміни то звершується процедура структурної ідентифікації інтервальної моделі та проводится параметрицна ідентефікая, яка є останнім етапом дизайну математичної моделі.

Рис. 2. Сервіс дизайну моделі прогнозування динаміки концентрацій діоксиду азоту в точці

Щодо компоненти яка розраховує дифузії діоксиду азоту в навколишньому середовищі то робота починається на етапі обчислення різницевих апроксимацій на основі яких працюють модулі обчислення дифузії у воді і повітрі. Результати роботи цих модулів є базою для побудови концентрації азотної кислоти в груті та грунтових водах.

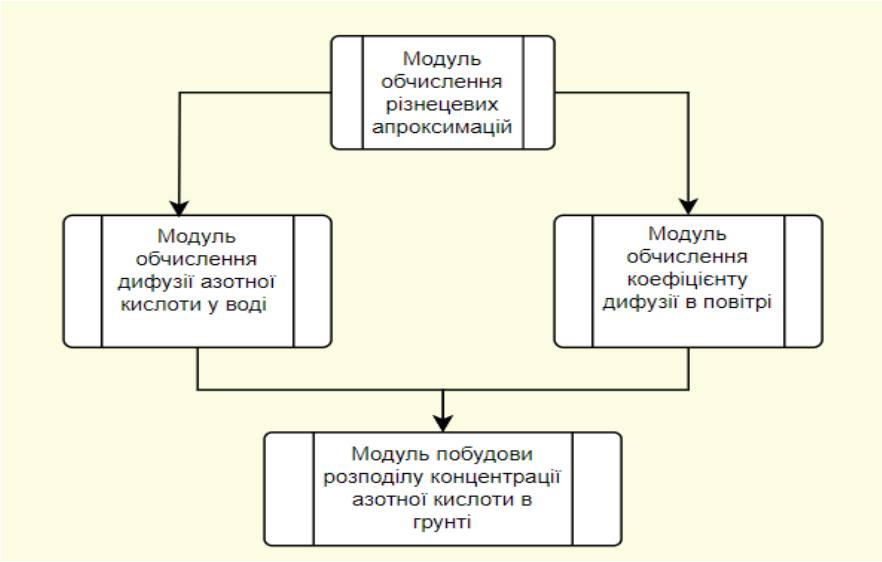


Рис. 3. Компонента розрахунку дифузії діоксиду азоту в навколишньому середовищі

На рисунку 4 зображено діаграму класів системи моделювання забруднення діоксидом азоту навколишнього середовища.

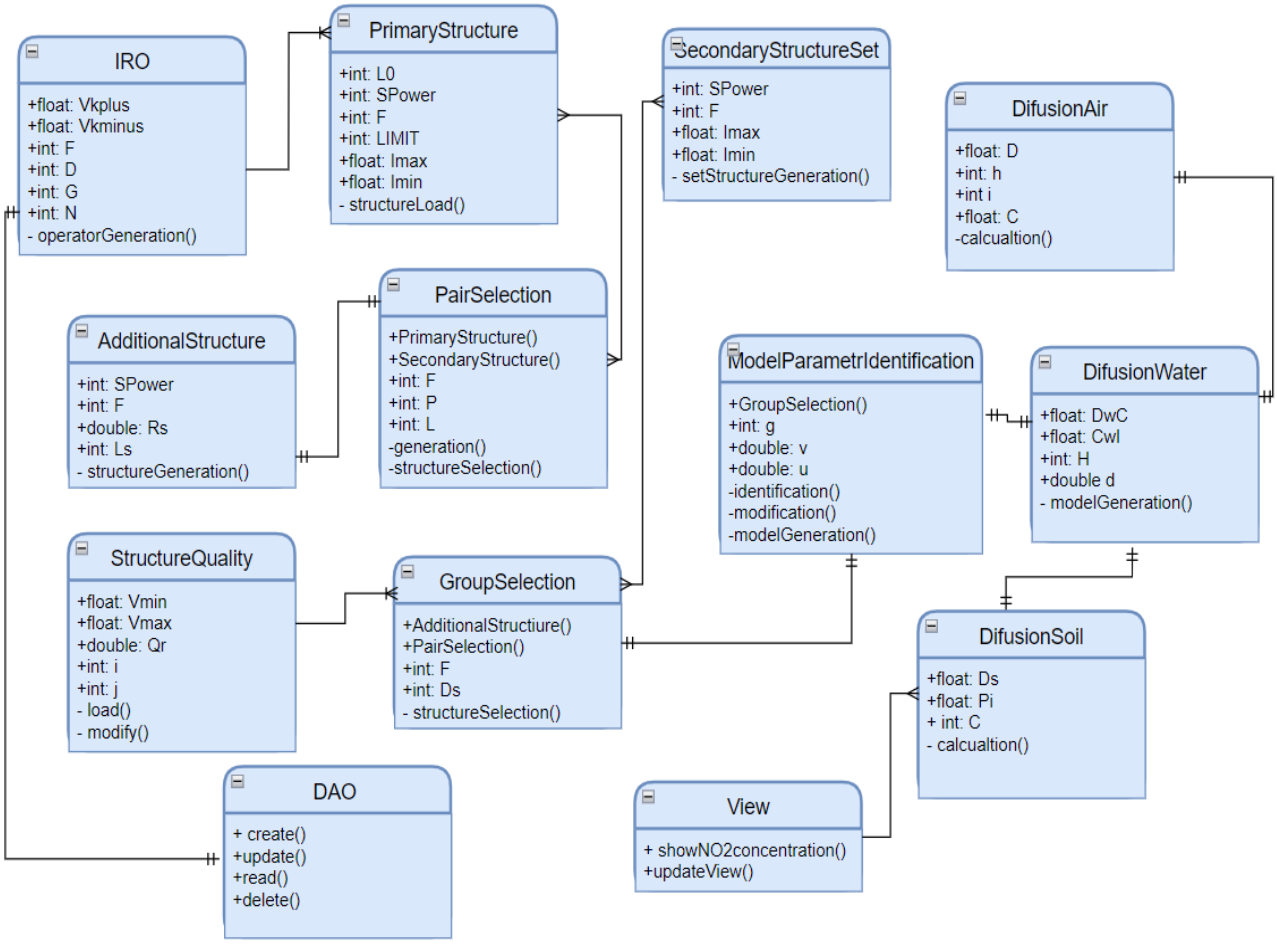


Рис. 4. Діаграма класів системи

Рівень об'єктно-орієнтованої моделі представлений набором класів, які забезпечують виконання основної бізнес логіки системи та включає в себе опис внутрішньої структури та типи взаємозв'язків між окремими об'єктами та підсистемами, що сприяє розвитку концептуальної моделі системи. Клас DAO (Data Access Object) відповідає за доступ до даних та сховищ моделей. Реалізовані методи в цьому класі описують CRUD операції, що забезпечує відокремлення доступу до даних від, що дозволяє забезпечити чистоту архітектури та підтримувати принципи модульності і повторного використання коду. Методи клсаів IRO, PairSelecton, GroupSelection, ModelParametrIdentification базаються на математичному забезпеченні яке описано вище. Слід зазначити що всі атрибути класіє є public оскільки виокристовуються в методах інших класів. Більшість методів навпаки є privat, що забороняє їх виклик та використання в межах іншого класу. Класи в яких генеруются структури, множини структур та визначаєтся їх якість є допоміжними та дозволяють виокремити загальні операції і функціональність, які використовуватися в інших місцях програми. Це дозволяє уникнути повторюваності коду і забезпечити більш підтримуваний код у випадку зміни математичних формул чи інтеграції зовнішніх сервісів.

З урахуванням побудованої моделі прогнозування динаміки концентрацій діоксиду азоту в точці класи, в яких релізовано процедуру обчислення дифузії цієї шкідливої речовини в грунті, водоймі та повітрі спираються на відповідні матичні моделі які описують цей процес. Після чого результати обчислень використовуються методами класу View, яикй забезпечує візуальне відображення концентрацій діоксиду азоту в грунтах та грунтових водах.

На рисунку 5 проілюстровано вигляд програмного інтерфейсу для візуалізації даних. Прогнозовані результати, отримані за допомогою моделей, відображаються на карті місцевості, яка використовується для моніторингу.

Рис. 5. Зовнішній вигляд системи

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В рамках цієї роботи запропоновано архітектуру програмного забезпечення для моделювання процесів забруднення грунтів внаслідок дифузії діоксиду азоту в грунтах та грунтових водах. Система включає необхідні модулі для введення початкових умов, виконання обчислень, візуалізації результатів та можливості внесення коректив в моделі при необхідності.

Для моделювання та прогнозування поширення концентрацій шкідливих викидів застосовано математичні моделі прогнозування динаміки концентрацій діоксиду азоту в точці та математичну модель дифузії діоксиду азоту у ґрунті та водоймі. Розробка має потенціал у сфері оцінки та контролю забруднення грунтів і водойм діоксидом азоту, що дозволить приймати ефективні рішення з питань охорони навколишнього середовища та здоров'я населення.

Література

1. S. Baliuk, V. Medvedev, M. Miroshnichenko, Ye. Skrylnik, D. Timchenko, A. Fatieev, A. Khristenko, Yu. Tsapko. Environmental state of soils in Ukraine. National Scientific Center «Institute for Soil Science and Agrochemistry Research», 2015, Kharkiv, pp.38-42.

2. V.K. Matviychuk, I.O. Khar. Monograph. Atmospheric air pollution. National Academy of Management, Kyiv, 2013. - 272 p.

3. Дивак М.П., Маслияк Ю.Б., Пукас А.В., Порплиця Н.П., Войтюк І.Ф., Тимчишин В.С. Архітектура системи екологічного моніторингу та приклад її застосування для моделювання концентрацій шкідливих викидів автотранс порту // Індуктивне моделювання складних систем: зб. наук. пр. Київ, 2017. Вип. 9. С. 69-84

4. V.A. Yurchenko, L.S. Mikhailova, M.V. Bespalova. Investigation of the influence of the road on the ecosystems of the roadside space. Bulletin of the Kharkiv National Automobile University: a collection of scientific papers. Kharkiv, 2018. - Issue 43. - pp. 29-32.

5. O.G. Melnikova, V.A. Yurchenko. Ecological consequences of technogenic load created by road-infrastructure complexes on soil ecosystems. IX International Scientific and Practical Conference. Ecological, legal and economic aspects of ecological security of the regions October 29-31, 2014 Kharkiv – 2014. pp. 232-236.

6. Dzhigirey V.S. Ecology and protection of the natural environment. - 3 edition. "Znannya", KO - 2014. - 309 p.

7. Dyvak, M.; Rot, A.; Pasichnyk, R.; Tymchyshyn, V.; Huliiev, N.; Maslyiak, Y. Monitoring and Mathematical Modeling of Soil and Groundwater Contamination by Harmful Emissions of Nitrogen Dioxide from Motor Vehicles. Sustainability 2021, 13, 2768.

8. Porplytsya, N.; Dyvak, M. Interval difference operator for the task of identification recurrent laryngeal nerve. In Proceedings of the 2015 16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), Lviv, Ukraine, 2–5 September 2015; pp. 156–158.

9. Amin Al Manmi, D.A.M.; Abdullah, T.O.; Al-Jaf, P.M.; Al-Ansari, N. Soil and Groundwater Pollution Assessment and Delineation of Intensity Risk Map in Sulaymaniyah City, NE of Iraq. Water 2019, 11, 2158

10. La Cecilia, D.; Porta, G.M.; Tang, F.H.; Riva, M.; Maggi, F. Probabilistic indicators for soil and groundwater contamination risk assessment. Ecol. Indic. 2020, 115, 106424

11. Moranda, A.; Cianci, R.; Paladino, O. Analytical Solutions of One-Dimensional Contaminant Transport in Soils with Source Production-Decay. Soil Syst. 2018, 2, 40

12. Rausch, A. CMS Guide on Soil and Groundwater Contamination; CMS.Low.Tax.: Kyiv, Ukraine, 2019; p. 54.

13. M.R. Heal, J.N. Cape, A numerical evaluation of chemical interferences in the measurement of ambient nitrogen dioxide by passive diffusion samplers, Atmospheric Environment, Volume 31, Issue 13, 2017.

14. Дивак, М. П. Ідентифікація дискретних моделей систем з розподіленими параметрами на основі аналізу інтервальних даних [Текст] : монографія / М. П. Дивак, Н. П. Порплиця, Т. М. Дивак. – Тернопіль: Економічна думка ТНЕУ, 2018. – 220 с.

15. Дивак М. П. Задачі математичного моделювання статичних систем з інтервальними даними: монографія / М. П. Дивак. - Т. : Економ. думка ТНЕУ, 2011. - 215 с.

16. Дивак М. П. Прикладні задачі структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей складних об'єктів [Електронний ресурс] : монографія / М. П. Дивак, А. В. Пукас, Н. П. Порплиця, А. М. Мельник. - Тернопіль : Університетська думка, 2021. - 212 с.

17. Захаров І. І., Ліщишина Т. П., Захарова О. І. Екологічно чиста технологія відтворення азотної кислоти. Вісник СХНУ імені Володимира Даля № 9 (216) 2014 р.

18. Позняк С. П. Ґрунтознавство та географія ґрунтів. – Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2010. – Ч. 1. – 270 с .; Частина 2. – 285 с.

19. Hsi-Sheng, Wills G.B. Diffusion coefficient of aqueous Nitric Acid at 25oC as function of concentration. Available online: https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/je60048a004

References

1. S. Baliuk, V. Medvedev, M. Miroshnichenko, Ye. Skrylnik, D. Timchenko, A. Fatieev, A. Khristenko, Yu. Tsapko. Environmental state of soils in Ukraine. National Scientific Center «Institute for Soil Science and Agrochemistry Research», 2015, Kharkiv, pp.38-42.

2. V.K. Matviychuk, I.O. Khar. Monograph. Atmospheric air pollution. National Academy of Management, Kyiv, 2013. - 272 p.

3. M.P. Dyvak, Yu.B. Masliyak, A.V. Pukas, N.P. Porplytsya, I.F. Voitiuk, V.S. Tymchyshyn. Architecture of the ecological monitoring system and an example of its application for modeling concentrations of harmful emissions from motor transport. Inductive modeling of complex systems: Coll. Science. pr. - K .: ISTC ITS NAS and MES of Ukraine, 2017. - Issue. 9. – pp. 69-84.

4. V.A. Yurchenko, L.S. Mikhailova, M.V. Bespalova. Investigation of the influence of the road on the ecosystems of the roadside space. Bulletin of the Kharkiv National Automobile University: a collection of scientific papers. Kharkiv, 2018. - Issue 43. - pp. 29-32.

5. O.G. Melnikova, V.A. Yurchenko. Ecological consequences of technogenic load created by road-infrastructure complexes on soil ecosystems. IX International Scientific and Practical Conference. Ecological, legal and economic aspects of ecological security of the regions October 29-31, 2014 Kharkiv – 2014. pp. 232-236.

6. Dzhigirey V.S. Ecology and protection of the natural environment. - 3 edition. "Znannya", KO - 2014. - 309 p.

7. Dyvak, M.; Rot, A.; Pasichnyk, R.; Tymchyshyn, V.; Huliiev, N.; Maslyiak, Y. Monitoring and Mathematical Modeling of Soil and Groundwater Contamination by Harmful Emissions of Nitrogen Dioxide from Motor Vehicles. Sustainability 2021, 13, 2768.

8. Porplytsya, N.; Dyvak, M. Interval difference operator for the task of identification recurrent laryngeal nerve. In Proceedings of the 2015 16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), Lviv, Ukraine, 2–5 September 2015; pp. 156–158.

9. Amin Al Manmi, D.A.M.; Abdullah, T.O.; Al-Jaf, P.M.; Al-Ansari, N. Soil and Groundwater Pollution Assessment and Delineation of Intensity Risk Map in Sulaymaniyah City, NE of Iraq. Water 2019, 11, 2158

10. La Cecilia, D.; Porta, G.M.; Tang, F.H.; Riva, M.; Maggi, F. Probabilistic indicators for soil and groundwater contamination risk assessment. Ecol. Indic. 2020, 115, 106424

11. Moranda, A.; Cianci, R.; Paladino, O. Analytical Solutions of One-Dimensional Contaminant Transport in Soils with Source Production-Decay. Soil Syst. 2018, 2, 40

12. Rausch, A. CMS Guide on Soil and Groundwater Contamination; CMS.Low.Tax.: Kyiv, Ukraine, 2019; p. 54.

13. M.R. Heal, J.N. Cape, A numerical evaluation of chemical interferences in the measurement of ambient nitrogen dioxide by passive diffusion samplers, Atmospheric Environment, Volume 31, Issue 13, 2017.

14. Dyvak, M. P. Identification of discrete models of systems with distributed parameters based on the analysis of interval data [Text]: monograph / M. Dyvak, N. Porplitsia, T. M. Dyvak. – Ternopil: Economic Opinion of TNEU, 2018. – 220 p.

15. Dyvak M. P. Problems of mathematical modeling of static systems with interval data: monograph /M. Dyvak - T.: Econom. opinion of TNEU, 2011. - 215 p.

16. Dyvak M.P. Applied problems of structural and parametric identification of interval models of complex objects [Electronic resource]: monograph / M.V. Dyvak, A. V. Pukas, N. Porplitsia, A. M. Melnyk. - Ternopil: University Thought, 2021. - 212 p.

17. Zakharov I. I., Lishchyshyna T. P., Zakharova O. I. Ecologically pure technology for the nitric acid reproduction. Visnyk of Eastern Ukrainian National University after Volodymyr Dahl № 9 (216) 2014

18. Pozniak S.P. Soil science and geography of soils. - Lviv: Ivan Franko Lviv National University, 2010. - Part 1. - 270 p .; Part 2. - 285 p.

19. Hsi-Sheng, Wills G.B. Diffusion coefficient of aqueous Nitric Acid at 25oC as function of concentration. Available online: https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/je60048a004

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-360-368
УДК 004.93

ЛИСЕНКО СЕРГІЙ
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0001-7243-8747
АТАМАНЮК ОЛЬГА
https://orcid.org/0009-0003-7937-3677
БОХОНЬКО ОЛЕКСАНДР
Хмельницький національний університет

МЕТОД ПОБУДОВИ АПАРАТНОЇ АРХІТЕКТУРИ ДЛЯ СИСТЕМА КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ НА ОСНОВІ FPGA

У цій роботі розглянуто методологію розробки апаратної архітектури для систем комп'ютерного зору на основі програмованої логіки, зокрема FPGA. У роботі проведено дослідження методів розробки архітектур для комп'ютерного зору та встановлено переваги використання FPGA у порівнянні з традиційними процесорами загального призначення. У роботі також розглянуто основні аспекти проектування апаратури на FPGA, зокрема вибір відповідного засобу розробки, проектування логіки, синтез та валідація розробленої апаратури. Досліджено можливості FPGA у забезпеченні високої продуктивності та ефективності систем комп'ютерного зору, що робить їх привабливими для використання у візуальних системах.

Ключові слова: FPGA, апаратна архітектура, системи комп'ютерного зору, алгоритми обробки зображень програмовані логічні пристрої, платформа для обробки візуальної інформації, низькорівневе програмування, платформа для дослідження алгоритмів зору, високоякісне відео та зображення з використанням FPGA.lexander

LYSENKO SERGII,, ATAMANIUK OLGA, BOKHONKO OLEXANDER
Khmelnytskyi National University

METHOD OF CONSTRUCTING HARDWARE ARCHITECTURE FOR COMPUTER VISION SYSTEM BASED ON FPGA

In this work, the methodology of hardware architecture development for computer vision systems based on programmable logic, in particular FPGA, is considered.

In the work, the methods of developing architectures for computer vision are studied and the advantages of using FPGA compared to traditional general-purpose processors are established. The paper also considers the main aspects of hardware design on FPGA, in particular, the selection of a suitable development tool, logic design, synthesis, and validation of the developed hardware. The capabilities of FPGAs in providing high performance and efficiency of computer vision systems have been investigated, which makes them attractive and popular for use in visual systems. We discover that FPGA technology offers a high degree of flexibility and configurability, allowing for the creation of custom hardware architectures that can be tailored to specific computer vision applications.

In addition, to studying the benefits of using FPGA technology for computer vision, we also consider the main aspects of hardware design on FPGA, including the selection of a suitable development tool, logic design, synthesis, and validation of the developed hardware. By carefully considering these aspects, we can ensure that the hardware architecture we develop is both efficient and effective. Our research shows that the capabilities of FPGAs in providing high performance and efficiency of computer vision systems are truly remarkable. This makes them an attractive choice for use in visual systems, particularly in scenarios where high speed and accuracy are critical. Overall, our work serves to shed light on the many benefits of FPGA technology for computer vision and lays the foundation for further research and development in this exciting field.

Keywords: FPGA, hardware architecture, computer vision systems, image processing algorithms, programmable logic devices, visual information processing platform, low-level programming, vision algorithm research platform, high-quality video and imaging using FPGA.

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

Програмовані вентильні матриці (FPGA) — це нове доповнення до світу прискорення центрів обробки даних. Хоча базова технологія існує десятиліттями, її застосування в центрах обробки даних поступово починає набирати обертів. Однак існує безліч проблем, які перешкоджають широкому застосуванню FPGA в центрах обробки даних. Ланцюжки інструментів із закритим вихідним кодом призводять до блокування постачальника та нестабільних потоків інструментів. Мови, що використовуються для програмування FPGA, вимагають різних процесів проектування, які нелегко освоїти розробникам програмного забезпечення. Порівняно з стандартними рішеннями, що використовують центральні та графічні процесори, FPGA є дорожчими та потребують більше часу для розробки. Усе це та багато іншого робить FPGA важко продати людям, які потребують прискорення завдань.

Тим не менш, FPGA також пропонують можливість розробки швидших прискорювачів з меншою енергетичною оболонкою для швидко мінливих програм [1].

FPGA також можна використовувати для підвищення ефективності мережі в центрі обробки даних шляхом заміни компонентів центральної мережі розумними комутаторами. Робота, представлена тут, досягає 7-кратного прискорення порівняно з класичною реалізацією розподіленого програмного забезпечення за сценарієм хеш-з'єднання. Крім того, FPGA можна використовувати для впровадження

нових технологій зберігання в центр обробки даних шляхом надання високоефективних консенсусних послуг безпосередньо в мережі.

Коли справа доходить до продуктивності, вона виглядає незадовільно. У світі програмного забезпечення існує багато добре налаштованих систем трасування, щоб з'ясувати, де саме втрачається продуктивність.

Такі методи, як лічильники продуктивності, пропонують певний спосіб визначити, чи щось не так. Однак зазвичай це лише дуже розпливчасті інструменти, які можуть лише надавати підказки, але не давати певності. Проблеми продуктивності, на які вказують лічильники продуктивності, потребують ще одного тривалого моделювання, потоку бітів, повторного процесу, щоб привести до результатів.

Відповідно, перехід до нового покоління часто є дуже повільним і схильним до помилок процесом. Усі зміни необхідно перевірити ще раз за допомогою описаного вище процесу. Зрештою, перехід від одного покоління FPGA до іншого часто є дуже дорогим [2].

Окрім проблем, пов'язаних із налаштуванням, також можуть виникнути нові функції, які потрібно використовувати для оптимальної продуктивності. У світі програмного забезпечення ці функції зазвичай автоматично використовуються компілятором. З іншого боку, для FPGA нові технології можуть вимагати глибоких змін будь-якої частини конструкції, що знову запускає вищезгаданий цикл повторного синтезу.

Останні роки показали, що існує багато програм, які не так легко відображаються на ЦП або ГП. Навіть такі проблеми, які добре підходять для графічних процесорів, як нейронна мережа, FPGA пропонують значну економію електроенергії та підвищену пропускну здатність. Такі методи, як відтворення з точністю до одного біта, легко виконати на FPGA, але неможливо на традиційних обчислювальних пристроях.

Відомі методи побудови апаратної архітектури для систем комп'ютерного зору

Відомі методи побудови апаратної архітектури для систем комп'ютерного зору є однією з ключових галузей розвитку комп'ютерних технологій. Ці методи дозволяють підвищити точність розпізнавання об'єктів, зменшити час обробки даних та забезпечити надійність роботи системи комп'ютерного зору.

Одним з відомих методів побудови апаратної архітектури для систем комп'ютерного зору є використання програмованих логічних пристроїв (FPGA). FPGA можуть бути сконфігуровані та програмовані, щоб створювати апаратні архітектури, спеціально призначені для обробки зображень. Ця методика забезпечує швидке виконання завдань, пов'язаних з обробкою зображень, та зменшення завантаження на центральний процесор.

Іншим відомим методом побудови апаратної архітектури є використання графічних процесорів (GPU). Ці процесори розроблені для обробки графіки, але також можуть бути використані для обробки зображень. Графічні процесори мають велику кількість ядер, які можуть працювати паралельно, що забезпечує швидку обробку зображень та велику продуктивність.

Крім того, існують методи побудови апаратної архітектури на основі ASIC (застосуванням спеціалізованих інтегральних схем). Ці інтегральні схеми можуть бути розроблені спеціально для конкретного завдання з обробки зображень, що забезпечує найвищу продуктивність та швидкість роботи системи [3].

Усі ці методи побудови апаратної архітектури для систем комп'ютерного зору мають свої переваги та недоліки, і ви вибираєте той метод, який найбільше відповідає вашим потребам та вимогам.

Наприклад, FPGA є відмінним вибором для систем комп'ютерного зору, які потребують високої продуктивності та надійності роботи. FPGA можуть бути програмовані для виконання специфічних завдань, що забезпечує ефективну обробку зображень та високу швидкість роботи системи.

Графічні процесори також є відмінним вибором для систем комп'ютерного зору, особливо для завдань, які вимагають паралельної обробки зображень. GPU мають велику кількість ядер та високу продуктивність, що дозволяє їм швидко виконувати складні завдання з обробки зображень.

ASIC, з іншого боку, забезпечують найвищу продуктивність та швидкість роботи системи, оскільки вони спеціально розроблені для конкретного завдання. Однак, розробка та виготовлення ASIC можуть бути дорогими та часовими затратами [4].

Таким чином, вибір методу побудови апаратної архітектури для систем комп'ютерного зору залежить від конкретних потреб та вимог системи.

Метод побудови апаратної архітектури для систем комп'ютерного зору на основі FPGA

Дозволити комп'ютерам сприймати навколишнє середовище все ще залишається одним із найскладніших завдань комп'ютерного зору. Особливо стереозір, сприйняття глибини за допомогою двох камер, важливий для багатьох сфер, таких як робототехніка та автономне водіння. Стереозйомка використовує дві камери, розташовані на деякій відстані одна від одної по горизонталі, але на одному рівні по вертикалі. Таким чином, пікселі на зображеннях, знятих двома камерами, зміщуються лише в горизонтальному напрямку, причому максимальне зміщення пікселя (традиційно називається невідповідністю) обмежується відстанню між двома камерами.

Потім обчислену невідповідність для пікселя можна використовувати для отримання інформації про глибину зі стереозображень за допомогою тріангуляції (пікселі, розташовані ближче до камер, мають більшу невідповідність) [5].

Алгоритм у центрі цієї роботи називається Semi-Global Block Matching (SGBM), який є одним із найшвидших алгоритмів, який також показує високу точність у тестах стереозору. Основою запропонованого методу є синтез нової апаратну архітектуру програмно-технічного засобу для комп'ютерного зору, що застосовує FPGA, а також використовує алгоритм SGBM.

Метод забезпечує синтез побудови параметризованої архітектури для систем комп'ютерного зору на основі FPGA архітектура, яка має високу масштабованість, що дозволяє легко впроваджувати її на малих малопотужних пристроях (наприклад, в автономних роботах), а також на великих високопродуктивних чіпах (наприклад, у стаціонарних випадках використання для обробки кількох відеопотоків високої роздільної здатності). Як показано на рисунку 1, основна увага приділяється обчисленню невідповідності.

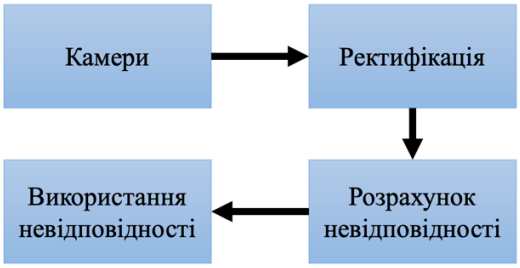


Рис. 1. Узагальнена схема програмно-апаратного засобу побудови апаратної архітектури для систем комп'ютерного зору на основі FPGA. Типова система стереозору

Метод побудови апаратної архітектури для систем комп'ютерного зору на основі FPGA використовує алгоритм SGBM. Він забезпечує хорошу точність при керованих обчислювальних зусиллях і надійний щодо вибору параметрів конфігурації.

Ключовою відмінністю від простих підходів на основі блоків, які зазвичай обчислюють збіги, прагнучи до мінімальних сум різниць між інтенсивністю пікселів у базовому та відповідних зображеннях, є використання більш складної функції вартості. Ця функція вартості не тільки має розширений діапазон (враховуючи не лише окремі пікселі чи локальні околиці, але й пікселі вздовж шляхів по всьому зображенню), але також розглядає характеристики вищого рівня (наприклад, взаємну інформацію та перепис), а не інтенсивність пікселів [6].

Перевага використання цієї характеристики, яку ввели Віола та Уеллс, полягає в її якості навіть у випадку невиправлених даних зображення. Однак він погано масштабується для зображень з більшою глибиною (більші координати S, особливо за глибинами, представленими як 8-бітні значення).

Використовується різновид цієї ідеї, яка розглядає різницю між прямими кількостями пікселів, що задовольняють відношення, а не відстань Хеммінга як вартість. Цей підхід, який називається непараметричним ранговим перетворенням, має якість відповідності, подібну до Census, але його легше реалізувати для високої продуктивності обчислень.

Функція $\mathrm{C}(\boldsymbol{p},\mathrm{d}) \in N_0$ використовується для позначення вартості відповідності пікселя $\boldsymbol{p} = (x,y)$ у координатах (x,y) у базовому зображенні за припущеної невідповідності (зміщення) d у координатах $(x - d, y)$ на відповідному зображенні.

Відмінності в кількості пікселів, темніших за центральний піксель (параметричне рангове перетворення), можна використовувати для реалізації C.

Щоб визначити фактичну найкращу відповідність, ці витрати розраховуються для всіх потенційних розбіжностей $d < D_{max}$, де D_{max} є верхньою межею потенційної невідповідності (через фізичну відстань встановлення двох камер) [7].

У першому наближенні передбачається, що відповідність із найнижчою вартістю вказує на справжню невідповідність $arg\ min_{d<D_{max}}\ C(\boldsymbol{p},d)$ між базовим і відповідним зображеннями для окремого пікселя $\boldsymbol{p}$.

Щоб досягти кращої точності відповідності, (напів)глобальні підходи, такі як SGBM, обчислюють ці витрати на потенційні відповідності не лише між окремими (або околицями) пікселів, але й уздовж багатопіксельних шляхів, що простягаються через усе зображення.

Вартість узгодження вздовж усього шляху, описана відносним зсувом елементів шляху $r = (\Delta x, \Delta y)$, для припущеної невідповідності d позначається як $L_r(\boldsymbol{p},d)$.

Ці шляхи рівномірно розподіляються для загального перегляду збігів:

$$L\boldsymbol{r}'(\boldsymbol{p},d) = C(\boldsymbol{p},d) + min \begin{cases} L\boldsymbol{r}'(\boldsymbol{p} - \boldsymbol{r},d) \\ L\boldsymbol{r}'(\boldsymbol{p} - \boldsymbol{r},d-1) + P_1 \\ L\boldsymbol{r}'(\boldsymbol{p} - \boldsymbol{r},d+1) + P_1 \\ min_{\,i}\ L\boldsymbol{r}'(\boldsymbol{p} - \boldsymbol{r},i) + P_2 \end{cases} \quad (1)$$

Кількість і розташування шляхів має прямий вплив не тільки на точність узгодження, але також на обчислювальні зусилля і, в цьому випадку, на фактичну архітектуру апаратного прискорювача SGBM.

Метою є компроміс між продуктивністю та точністю. Скорочення від восьми до чотирьох шляхів $0°\left(r = (1,0)\right)$, $45°\left(r = (1,1)\right)$, $90°\left(r = (0,1)\right)$ і $135°\left(r = (-1,1)\right)$ призводить до втрати точності лише на 1,7% (збільшення кількості неправильно позначених розбіжностей) у тесті Middlebury, але дозволяє високоефективну апаратну архітектуру обчислень L_r для всіх цих шляхів паралельно [8].

Якщо навіть обмежена втрата точності є неприйнятною, запропоновану апаратну архітектуру можна використати для виконання другого проходу по зображенню, обчислюючи решту шляхів $180°\left(r = (-1,0)\right)$, $225°\left(r = (-1,-1)\right)$, $270°\left(r = (0,-1)\right)$ і $315°\left(r = (1,-1)\right)$, починаючи з протилежного кута. Це зменшить частоту кадрів для відповідності вдвічі. Оскільки шляхи у вибраному розташуванні більше не розподіляються рівномірно по зображенню, у деяких тестах можна виміряти деякі незначні (неізотропні) ефекти згладжування, але вони не повинні впливати на зручність використання в сценаріях реального світу.

Необроблена вартість $\boldsymbol{Lr'}(\boldsymbol{p},d)$ для узгодження пікселів $\boldsymbol{p}$ уздовж шляху r для припущеної невідповідності d обчислюється за формулою. Ці необроблені витрати на шлях розраховуються для всіх вибраних шляхів, для всіх потенційних розбіжностей d до обмеження D_{max}. Для кожного пікселя оцінюється як локальна вартість C, так і напівглобальний компонент. Остання враховує чотири характеристики, які спостерігаються в реальних зображеннях, мінімальна з яких додається до локальної вартості: перша характеристика – це вартість попереднього пікселя на шляху, другий і третій компоненти штрафують за невелику розбіжність. Зміни $|\Delta d| = 1$ за P_1, тоді як останній член штрафує більші зміни невідповідності (так звані розриви) за P_2. P_1 зазвичай визначається в автономному режимі експериментально шляхом аналізу вхідних зображень, типових для реального випадку використання стереозору. P_2, з іншого боку, динамічно коригується під час виконання: оскільки невідповідність часто також представляє розриви, коли інтенсивність пікселя змінюється, обчислення $P_2 = \frac{P_2'}{|\mathrm{I}_p - \mathrm{I}_{p-r}|}$' компенсує різні інтенсивності пікселів I_p та I_{p-r} уздовж шляху r. Що стосується P_1, P_2' є константою, визначеною експериментально на основі репрезентативних зразків зображень офлайн. Для подальшого обговорення розрахунку вартості шляху зверніться до оригінальної роботи Гіршмюллера. Щоб визначити (напів) глобальну вартість узгодження, вартість шляху підсумовується по всіх шляхах. Однак для апаратної реалізації варто розглянути дещо змінене формулювання [9].

В апаратному забезпеченні ключовою характеристикою є ширина слова (у бітах) арифметичних операторів і типів даних. Оскільки шляхи проходитимуть по всьому зображенню, вони можуть бути досить довгими (залежно від роздільної здатності камери), і підсумовування їх вартості може призвести до великих значень, які потребують широких слів для обчислення та зберігання. Цьому можна протистояти, віднімаючи від необроблених витрат шляху для пікселя $\boldsymbol{Lr'}(\boldsymbol{p},d)$ мінімальну вартість шляху для всіх припущених розбіжностей d для попереднього пікселя $p - r$ уздовж шляху $\boldsymbol{r}$.

Ефект кодування лише відмінностей між попередніми та поточними пікселями призводить до зменшення величини значень, які вимагають відповідно вужчих слів даних для зберігання та обчислення.

Невідповідність d з мінімальною відповідністю $cost\ arg\ min_d\ S(\boldsymbol{p},d)$ вважається виграшною диспропорцією для пікселя $\boldsymbol{p}$. Ці виграшні відмінності виводяться прискорювачем для кожного пікселя як вхідні дані для подальшого обчислення фактичної глибини (положення осі Z, тут не обговорюється).

На практиці необхідні додаткові обмеження накладені для очищення викидів і позначення недійсних розбіжностей: результат аргументу $S(\boldsymbol{p},d)$ може бути багатоелементним набором, що означає, що мінімальна вартість відповідності для пікселя $\boldsymbol{p}$ виникає для різних потенційних розбіжностей d. З такою неунікальною вартістю алгоритм не може визначити одну виграшну невідповідність, а натомість реєструє невідповідність для цього пікселя як «недійсний» [8].

Крім того, виконується так звана перевірка ліворуч/праворуч, яка порівнює результати алгоритму під час його виконання з поміняними ролями базового та відповідного зображень. Цю перевірку також можна ефективно здійснити (уникаючи перерахунку всіх розбіжностей для попереднього зображення збігу, яке зараз використовується як основа), повторно використовуючи попередньо обчислене $S(\boldsymbol{p},d)$ уздовж епіполярної лінії як аргумент $S((x(\boldsymbol{p}) + d, y(\boldsymbol{p})), d)$, щоб вибрати виграшну невідповідність d для другого зображення. Перевірка ліворуч/праворуч встановлює для невідповідності значення «недійсне», якщо відповідні невідповідності вихідного проходу та пропуску зі зміненими ролями відрізняються більш ніж на одиницю. Цей крок усуває фантомні диспропорції, що є результатом закритих поверхонь, які видно на одному зображенні, але приховані на іншому.

Запропонований метод побудови апаратної архітектури для систем комп'ютерного зору на основі FPGA уможливлює здійснити синтез архітектуру програмно-технічного засобу, яка підвищує швидкодію систем комп'ютерного зору за рахунок покращення не лише введення додаткового рівня детального паралелізму (наприклад, паралельне обчислення диспропорції та сортування), а й також завдяки реалізації з використанням найсучаснішого стилю розробки, нечутливого до затримок, у наступному – генерація мови опису обладнання. Як результат, він є значно більш масштабованим, легшим для розширення, але також

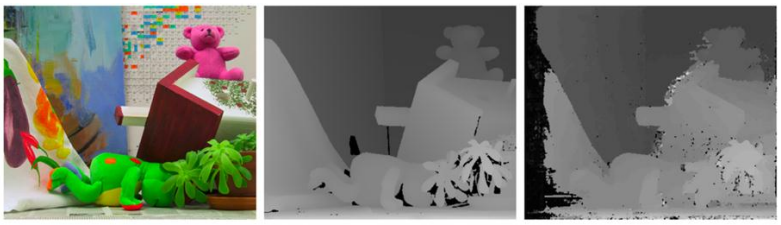
набагато швидшим, ніж оригінальна робота (навіть якщо компенсувати відмінності в цільових технологіях FPGA) [10].

У конструкції з декількома рядковими процесорами обчислені диспропорції буферизуються в FIFO, доки їх не витягне модуль виводу. Потім модуль виводу об'єднує виходи процесорів рядків, використовуючи ту саму циклічну схему, що й модуль введення. Потім медіанний фільтр 3 × 3 застосовується до об'єднаного потоку для видалення викидів у обчислених диспропорціях.

Максимальне значення будь-якого L завжди менше $C_{max} + P_2$. Це обмежує ширину слова, необхідну для зберігання даних і арифметичних операторів в апаратній реалізації [11].

Цей підхід оцінюється на трьох рівнях: першим критерієм є точність, потім модельована незалежна від цілі продуктивність апаратної архітектури в термінах тактових циклів і, нарешті, продуктивність настінного годинника на трьох фактичних платформах FPGA, що охоплюють вбудовану систему та центр обробки даних.

Використовуючи тест Middlebury, алгоритм створює в середньому 8,4 % розбіжностей, що перевищує поріг помилки в один піксель. Різниця між результатами запропонованої архітектури та основною правдою в незакритих областях становить 9,5 % для Конусів, 13,3 % для Тедді, 6,8 % для Цукуби та 4,1 % для Венери. Зразок результату для тестового набору Тедді показано на рисунку 2.



а) б) в)

Рис. 2. Порівняння невідповідності для набору зображень Тедді:
а) Набір зображень Тедді, б) Набір зображень Тедді, в) Невідповідність, спричинена зображенням

За потреби більшої точності можна досягти, виконавши повну перевірку ліворуч/праворуч або виконавши два проходи по зображенню для використання восьми шляхів. Обидва ці підходи приблизно вдвічі зменшують продуктивність прискорювача, але навіть тоді він буде корисним для обробки в реальному часі.

Моделювання архітектури з точністю до циклу використовувалося для визначення характеристик часу виконання прикладів реалізацій. Порівняння з фактичними реалізаціями апаратного забезпечення показує, що ці симуляції насправді є репрезентативними для кінцевої продуктивності.

Ядро оцінюється за трьома роздільними здатностями зображення: 640 × 480 пікселів (VGA), 1280 × 720 пікселів (720p) і 1920 × 1080 пікселів (1080p). Зображення з роздільною здатністю VGA оцінюються за Dmax = 64, для вищої роздільної здатності Dmax = 128. Для всіх роздільних здатностей кількість тактів, необхідних для завершення одного кадру, визначається шляхом моделювання [12].

Експертиза містить різні композиції крупно- та дрібнозернистого паралелізму. Реалізація описується парою (#p, #d), яка вказує на використання рядкових процесорів #p, причому кожне обчислення #d передбачає невідповідності паралельно. Для кожної з роздільних здатностей використовується автоматичне дослідження простору розробки для генерації 250 альтернатив реалізації, відображених на осі X у порядку збільшення площі або продуктивності. Через обмеження простору лише підмножину альтернатив можна позначити тут за допомогою (#p, #d). Як показано на рисунку 3 для зображень VGA, архітектура добре масштабується зі збільшенням кількості процесорів рядків, аж до нижньої межі 654644 циклів, після чого один піксель обчислюється за 2,11 циклу, а одна диспропорція вимагає 0,033 циклу. Ця конструкція обмежена швидкістю заповнення вхідних буферів, яку можна збільшити ще більше, застосовуючи також методи дрібного розпаралелювання [13]. При передбачуваній тактовій частоті 200 МГц архітектура досягне до 306 кадрів в секунду, як показано на рисунку 4. Такі великі та швидкі системи можна використовувати для розрахунку розбіжностей між кількома камерами для створення об'ємного огляду сцени. Для додатків з низьким енергоспоживанням більш цікавим є мінімальна частота, необхідна для досягнення 30 кадрів на секунду (типова вимога для обробки в реальному часі) [14]. Як показано на рисунку 5, архітектура здатна задовольнити цю вимогу на частоті до 30 МГц для зображень VGA.

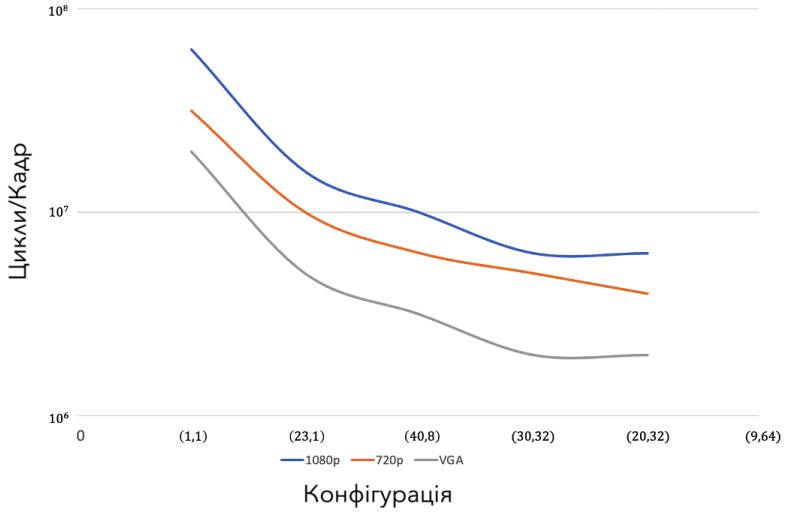


Рис. 3. Цикли, необхідні для обробки однієї карти невідповідності для різних ступенів паралельності

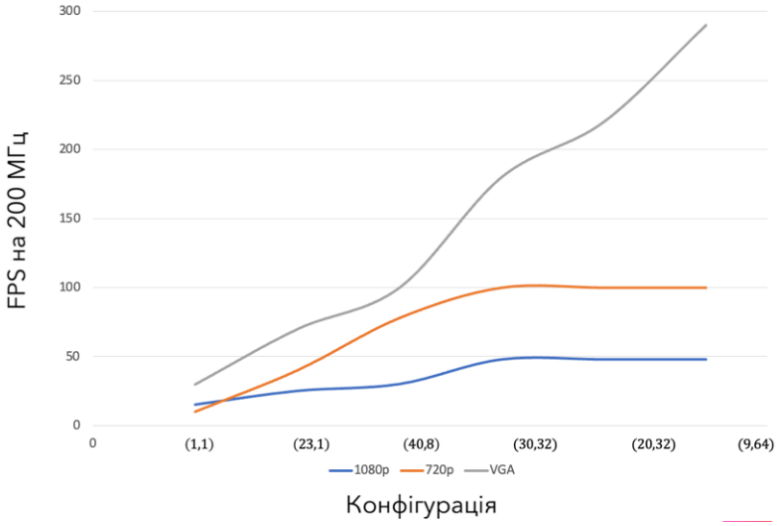


Рис. 4. Кількість кадрів в секунду досягається запропонованою архітектурою на тактовій частоті 200 МГц

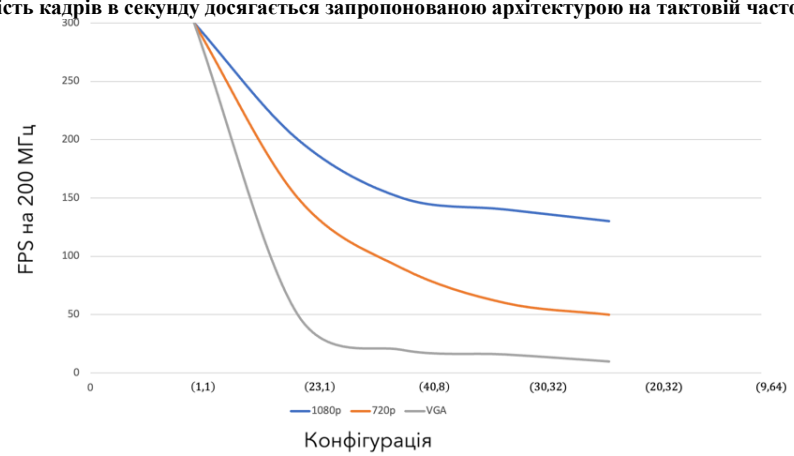


Рис. 5. Частота, необхідна для досягнення 30 кадрів на секунду на запропонованій архітектурі для різного ступеня паралелізму

Експериментальні дослідження методу та програмно-апаратна реалізація

Проектування апаратного забезпечення чимось схоже на програмування програмного забезпечення на мові асемблера, у якому простий розрахунок складається з безлічі інструкцій машинного коду, а з іншого боку, багато логічних блоків утворюють єдиний апаратний модуль. Рисунок 6 показує основну концепцію того, як працюють блоки FPGA. Нижче будуть розглянуті всі логічні блоки, які вводяться для реконфігурації часткового алгоритму [15].

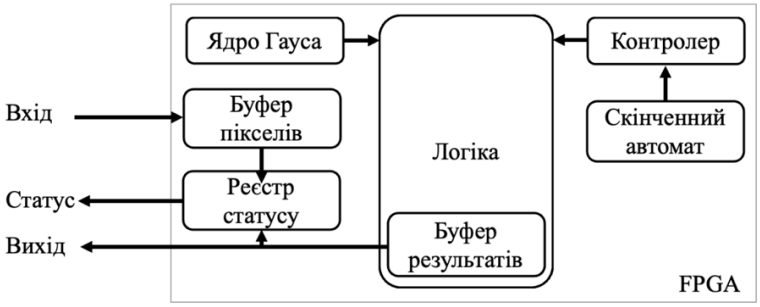


Рис. 6. Блок-схема реалізації FPGA

На рисунку 7 показано ядро Гауса, яке використовується для отримання матриці Гарріса A. Цей блок є найпростішим, він не вимагає введення та виведення постійних змінних ядра.

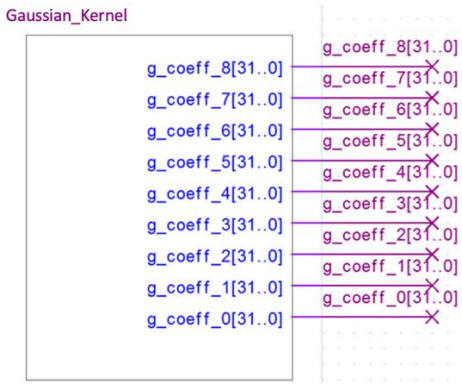


Рис. 7. Ядро Гауса

Кожен результат відповідає одному елементу матриці, коефіцієнт 8 представляє перший елемент 0,0001, коефіцієнт 5 є центральним елементом 0,3989 і так далі. Варто зауважити, що кожен параметр є числом з плаваючою точкою, і він отримує 32 біти пам'яті для збереження, тому всі виходи мають 32 біти.

Щоб максимізувати швидкість, було реалізоване апаратне забезпечення якомога паралельнішим. Всі IP-адреси FIFO, надані Altera, є механізмом «один вхід і один вихід», що не зовсім те, чого потрібно досягти, тому FIFO «один вхід і дев'ять виходів» реалізовано, щоб задовольнити потребу, щоб можна було запускати за один прохід цілу згортку з матрицею Гауса 3*3 [16]. Сигнали вхідного FIFO подано в таблиці 1.

Таблиця 1.

Сигнали вхідного FIFO

Назва сигналу	Опис
clk	Сигнал годинника
data flag	Перевертається, коли вводяться нові дані
sw	Перемикач, який керує функцією скидання
source[31..0]	Вхідні пікселі, які є 32-розрядним числом типу float
FIFO x[31..0]	Вихідний піксель No.x у парі з відповідним елементом матриці Харріса
done	Встановлюється на високий рівень, коли FIFO заповнений, інакше залишається низьким

Спочатку всі 9 виходів встановлювались на нуль, а дані надсилались через один до дев'яти. Коли надсилаються 10-ті дані, усі вихідні дані отримують змінні в певному порядку, найстаріша розташована внизу, а найновіша – зверху. Для цього FIFO № 8 є верхнім, а № 0 – нижнім.

Коли 1-е дані (1010) отримані після трьох тактів, то в наступному такті найстаріші дані (0001) відкидались, а 10-ті дані додавались до FIFO та зберігались в регістрі № 8, і так далі.

Варто зауважити, що кожного разу, коли надходили нові дані, сигнал прапора даних перевертався, цей механізм гарантував, що система не переплутає два послідовних даних, які мають абсолютно однакове значення [17]. Згортка включає як FIFO, так і ядро Гауса, кожен вихід цих двох блоків було об'єднано в дев'ять різних груп. Оскільки алгоритм методу побудови апаратної архітектури для систем комп'ютерного зору на основі FPGA використовує 32-розрядне число типу float для представлення пікселів, звичайні блоки обчислення не могли бути застосовані тут через складність значення float. Altera надає мегафункцію, яка повністю підтримує обчислення плаваючого значення, що робить її ідеальним вибором під час вибору методу побудови апаратної архітектури для систем комп'ютерного зору на основі FPGA [18] (рис.8).

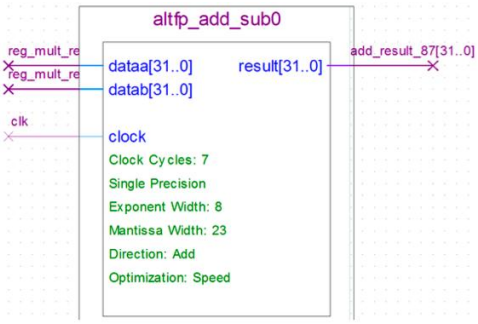


Рис. 8. Суматор

На рисунку 8 показано блок додавання після налаштування майстра мегафункцій. Оптимізацію швидкості вибрано, тому що, що є головним золотом дисертації, будь-які функції та можливості, крім чистого додавання, вимкнено з метою економії ресурсів. Такий блок потрібно дублювати багато разів, щоб сформувати функціональний алгоритм. 32-розрядне число з плаваючою точкою означає одинарну точність і має 8-розрядний експонент і також 23-розрядну мантису. Призначення портів досить зрозуміле, і глобальний сигнал clk буде підключений до суматора [19].

Для однієї згортки двох матриць 3*3 реалізовано дев'ять множень і вісім суматорів. Кожен із блоків має період виконання, і останній обчислення може виконуватися лише тоді, коли перший виконає свою роботу. Для надійності всього цього процесу введено кінцевий контейнер.

На рисунку 9 представлена схема кінцевого скінченного автомату. Якщо отриманий сигнал є «високим», тоді спрацьовує арбітр, він починає рахувати всередині та виводить значення на роздільник, розділювач використовує це значення, щоб визначити, яким є поточний стан, і встановити відповідний вихід на «високий» під час налаштування інші на «низький» [20].

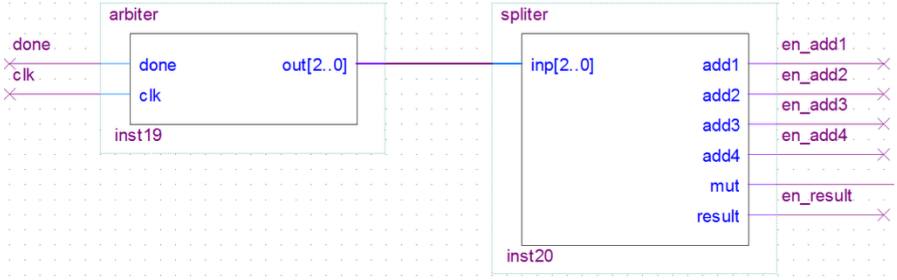


Рис. 9. Скінченний автомат

Є чотири регістри додавання та регістр результату. Взявши, регістр add1, входи підключені до попереднього етапу обчислення, незалежно від того, які значення є, регістр завжди зберігатиме те, що він отримує, коли отримано сигнал дозволу «позитивний фронт», вихід порти негайно виведуть дані, які наразі зберігаються, і залишатимуться виводом до наступного «позитивного фронту». Останній етап обчислення, яким буде add2, використовує ці виходи як джерела вхідних даних і передає результат у регістр add2, а процес продовжує виконувати роботу для add3 і add4 [21].

Регістр результату взаємодіє з центральним процесором, який, в свою чергу, є повністю відокремленою системою. Центральний процесор міг запитувати результат кілька разів, навіть якщо було обчислено лише один результат. Через різницю в частоті між процесорами та FPGA, процесори завжди на рівні ГГц, а FPGA – у МГц, що досить повільно порівняно з процесорами [22].

Отже, має бути спосіб захисту кожного запиту, що стосується нових даних. Сигнал прапора повідомляє центральному процесору про те, чи є поточні дані придатними та безпечними для отримання, і це завжди перший сигнал, який буде взаємодіяти в процесі зв’язку між центральним процесором і FPGA, коли процесор отримав «високий» сигнал [23]. Сигнал прапора почне отримувати дані, тим часом результат отримання буде надіслано до FPGA, що вказує на початок процесу. Після отримання результату ЦП знову встановлює «низький» сигнал отримання результату, повідомляє FPGA, що процес завершено. Потім FPGA також встановлює сигнал прапора результату на «низький», щоб, дозволивши ЦП отримати сигнал прапора першим, він міг змусити ЦП чекати, поки не буде отримано новий результат. Такий механізм може значно підвищити надійність системи [24].

Таким чином, цей процес може значно сповільнити швидкість обробки зображень, і поки що це неможливо покращити або уникнути.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В роботі представлені результати дослідження, зокрема, розроблено метод побудови апаратної архітектури для систем комп’ютерного зору на основі FPGA.

В результаті досліджень було встановлено, що метод побудови апаратної архітектури є ефективним підходом до розроблення апаратних прискорювачів для обробки відеоданих.

Даний метод дозволяє значно збільшити швидкість обробки відеоданих, знизити витрати енергії та ресурсів, що забезпечує ефективну інтеграцію з системами розпізнавання образів, навігації, контролю якості та безпеки. Основні положення, що використовуються для розв'язання задач по даній темі, полягають у вивченні особливостей комп'ютерного зору, засобів обробки відеоданих, а також принципів роботи та можливостей FPGA.

Також в роботі подано аспекти практичногго застосування розробленої апаратної архітектури та програмного забезпечення для комп'ютерного зору. Для реалізації систем комп'ютерного зору на основі FPGA використовувались відповідні програмні засоби, що дозволяють створювати програмне забезпечення для FPGA-пристроїв. В роботі представлено програмно-апаратний засіб для систем комп'ютерного зору на основі FPGA, що включає в себе відповідні програмні засоби та апаратну архітектуру. Застосування такого програмно-апаратного засобу дозволяє реалізувати різноманітні завдання обробки зображень та комп'ютерного зору з високою швидкодією та точністю.

Література

1. Donald G. Bailey. Boca Raton. FPGA-Based Implementation of Signal and Image Processing Systems. FL: CRC Press, 2017. 352 p.
2. Dirk Koch. Designing Embedded Systems with FPGAs. Berlin: Springer, 2018. 284 p.
3. Doug Amos, Austin Lesea, and René Richter. FPGA-based Prototyping Methodology Manual: Best Practices in Design-for-Prototyping. New York, NY: Springer, 2018. 340 p.
4. Zhao Zhang and Xiaojun Liu. Hardware Architecture Design for Real-Time Image Processing on FPGA. URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5439629/ (дата звернення: 10.04.2023).
5. Georgios Karakonstantis. FPGA-Based Accelerators for Financial Applications. New York, NY: Springer, 2018. 256 p.
6. Tsung-Hsien Lee and Shuvra S. Bhattacharyya. High-Level Synthesis for Real-Time Digital Signal Processing. New York, NY: Springer, 2018. 276 p.
7. Amirhossein Rezaei and Mohamed Zahran. FPGA-Based Acceleration of Deep Convolutional Neural Networks for Computer Vision: A Survey. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8393873 (дата звернення: 10.03.2023).
8. Yibin Liang, Yiqiang Chen, and Ming Liu. Design and Implementation of a High-Performance FPGA-Based Embedded Computer Vision System. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/7273657 (дата звернення: 10.03.2023).
9. A. Sudhakar, P. Ravinder Reddy, and P. Rajesh Kumar. FPGA Implementation of Image Processing Algorithms: A Review. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212671620303608 (дата звернення: 11.03.2023).
10. Ahmad Ibrahim and Asim El-Sheikh. FPGA-Based Implementation of Neural Networks. New York, NY: Springer, 2018. 220 p.
11. L. M. Bergasa, O. Yebes, and R. Arroyo. An Efficient FPGA Implementation of a Real-Time Object Tracking System. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/6867583 (дата звернення: 11.03.2023).
12. Hamed Habibi Aghdam, Fatemeh Saberian, and Seyed Saeid Moosavi. FPGA-Based Embedded System for Real-Time Object Recognition. URL: https://www.mdpi.com/2079-9292/9/6/917 (дата звернення: 12.03.2023).
13. FPGA-based Embedded Vision System Design. URL: https://www.xilinx.com/products/design-tools/vitis/embedded-vision.html (дата звернення: 12.03.2023).
14. Mark Zwolinski. Designing Digital Systems with SystemVerilog. New York, NY: Springer, 2018. 368 p.
15. Pong P. Chu. Hoboken. FPGA Prototyping by VHDL Examples: Xilinx MicroBlaze MCS SoC". NJ: Wiley-IEEE Press, 2019. 392 p.
16. Mohammad G. Rastegari and Mohammad H. Kahani. FPGA-Based Computer Vision: A Survey. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8563013 (дата звернення: 10.03.2023).
17. Marek Gorgon and Radim Burget. Designing FPGA-based Computer Vision Systems. URL: https://www.mdpi.com/2079-9292/8/7/724 (дата звернення: 11.03.2023).
18. George A. Constantinides, Peter Y. K. Cheung, and Wayne Luk. Boca Raton. High-Level Synthesis for FPGA Design: From Prototyping to Deployment. FL: CRC Press, 2018. 436 p.
19. Joseph J. Lee and Ayesha Fatima. Deep Learning with FPGA: From Device to Algorithm. Cham, Switzerland: Springer, 2021. 188 p.
20. F. D. B. Pereira and R. M. A. Pereira. FPGA-based Hardware Accelerator for Object Detection in Computer Vision. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8607876 (дата звернення: 11.03.2023).
21. J. M. Rodriguez-Ramos, J. M. Rodriguez-Delgado, and J. M. Santana. An FPGA-based real-time vision system for detecting and tracking vehicles. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8525406 (дата звернення: 12.03.2023).
22. Wayne Wolf. FPGA-based System Design. Boca Raton, FL: CRC Press, 2019. 350 p.
23. Pong P. Chu. FPGA Prototyping Using Verilog Examples: Xilinx Spartan-6 Version. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2018. 352 p.
24. N. C. Kumar, V. Anand, and M. C. Padma. An FPGA-Based Smart Vision System for Object Detection and Tracking. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8880966 (дата звернення: 14.03.2023).

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-369-373
УДК 621.311.4

БОЙКО СЕРГІЙ
Криворізький національний університет
https://orcid.org/0000-0001-9778-2202
e-mail: bsn1987@i.ua
ЩОКІН ВАДИМ
Криворізький національний університет
https://orcid.org/0000-0001-9709-1831
ВИШНЕВСЬКИЙ СВЯТОСЛАВ
Вінницький національний технічний університет
https://orcid.org/0000-0002-2159-603X
svyato.vish.ua@gmail.com
ДАНІЛІН ОЛЕКСАНДР
Національний технічний уіверситет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
http://orcid.org/0000-0003-3207-1156
e-mail: avdan@ukr.net
ГУСАРОВА ОКСАНА
Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ
https://orcid.org/0000-0002-9823-0044
e-mail: o_v_gusarova@ukr.net
ГРИБАНОВА СВІТЛАНА
Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ
https://orcid.org/0000-0001-5831-2363

АСПЕКТИ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В УМОВАХ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Вагомий вплив промислових підприємств провокує різкі кліматичні зміни, які особливо відчутні локально. Такі навантаження на екологію довкілля, спричинені діяльністю промислових підприємств, ставлять під загрозу безпечне існування окремих біологічних індивідів та сталий розвиток суспільного господарства в майбутньому. Однією з вагомих причин таких змін є збільшення викидів парникових газів, шкідливих газів та пилу. Між тим, ряд питань, які стосуються проблеми зменшення екологічного навантаження на довкілля шляхом декарбонізації електроенергетики України, залишаються невирішеними. На даному етапі впровадження, концепція Smart Grid розглядається з точки зору електричних мереж, хоча в майбутньому це буде об'єднання електричної, паливної і теплової мереж. Міжнародне енергетичне агентство розглядає водень як сполучна ланка між цими мережами. Аналіз можливості та особливостей впровадження концепції декарбонізації систем електропостачання промислових підприємств в аспекті сталого розвитку показав актуальність впровадження джерел розосередженої генерації з використання буферних накопичувачів електричної енергії з метою стабілізації рівня генерованої електричної енергії. Запропоновано використовувати твердополімерні електролізери як буферні накопичувачі генерованої електричної енергії джерелами розосередженої генерації на базі відновлювальних джерел.

Ключові слова: розосереджена генерація, електропостачання, промислові підприємства, декарбонізація, воднева енергетика.

BOIKO SERGEY, SHCHOKIN VADYM
Kryvyi Rih National University
VISHNEVSKYI SVIATOSLAV
Vinnytsia National Technical University
DANILIN OLEKSANDR
National Technical University of Ukraine Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
HUSAROVA OKSANA, HRYBANOVA SVITLANA
Kremenchug Flight College of Kharkiv National University of Internal Affairs

ASPECTS OF DECARBONIZATION OF THE ELECTRICAL SUPPLY SYSTEM IN THE CONDITIONS OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

The significant influence of industrial enterprises provokes sharp climatic changes, which are especially felt locally. Such loads on the ecology of the environment, caused by the activities of industrial enterprises, endanger the safe existence of individual biological individuals and the sustainable development of the social economy in the future. One of the important reasons for such changes is the increase in emissions of greenhouse gases, harmful gases and dust. Meanwhile, a number of issues related to the problem of reducing the ecological burden on the environment through decarbonization of Ukraine's electricity industry remain unresolved. At this stage of implementation, the Smart Grid concept is considered from the point of view of electrical networks, although in the future it will be a combination of electrical, fuel and heat networks. The International Energy Agency sees hydrogen as a link between these networks. The analysis of the possibility and features of the implementation of the concept of decarbonization of power supply systems of industrial enterprises in the aspect of sustainable development showed the relevance of the implementation of distributed generation sources using buffer storage of electric energy in order to stabilize the level of generated electric energy. It is proposed to use solid polymer electrolyzers as buffer accumulators of electric energy generated by sources of distributed generation based on renewable sources.

Keywords: distributed generation, power supply, industrial enterprises, decarbonization, hydrogen energy.

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

Вагомий вплив промислових підприємств провокує різкі кліматичні зміни, які особливо відчутні локально. Такі навантаження на екологію довкілля, спричинені діяльністю промислових підприємств, ставлять під загрозу безпечне існування окремих біологічних видів та сталий розвиток суспільного господарства в майбутньому. До таких змін спонукає збільшення викидів парникових газів, шкідливих газів та пилу [1].

Між тим, ряд питань, які стосуються проблеми зменшення екологічного навантаження на довкілля шляхом декарбонізації електроенергетики України, залишаються невирішеними.

Слід зазначити, що Україна взяла на себе перед громадскістю та перед світовою спільнотою високі зобов'язання зі значного зниження викидів парникових газів, маючи технологічно неготовий паливно-енергетичний комплекс до таких кардинальних перетворень. А у зв'язку з занепадом промислового сектору ці зобов'язання породжують питання щодо подальшої декарбонізації національного господарства в аспекті сталого розвитку країни.

Слід зауважити той факт, що Україна розташована в геокліматичній зоні, яка має значний потенціал відновлюваних енергетичних ресурсів, в першу чергу вітро- і геліоенергетичних джерел енергії. Однак, розширення масштабів їх використання вимагає вирішення питань, пов'язаних з безперервним забезпеченням енергопостачання споживачів. Вирішення цієї проблеми може бути знайдено шляхом використання електрохімічної технології отримання водню і кисню при використанні енергії сонця та вітру як первинних джерел [2].

Аналіз досліджень та публікацій

Аналіз публікацій за останні роки показує, що в список найбільш цитованих публікацій входять оглядові статті з розвитку технологій твердополімерним електролізу води, пілотним проектам технології P2G і виробництва водню за рахунок «зеленої генерації», створення паливних елементів різних типів, в тому числі пошуку дешевих каталізаторів для твердополімерних паливних елементів [3].

Як відзначають дослідники [4] на даному етапі впровадження, концепція Smart Grid розглядається з точки зору електричних мереж, хоча в майбутньому це буде об'єднання електричної, паливної і теплової мереж. Міжнародне енергетичне агентство розглядає водень як сполучна ланка між цими мережами [5-8].

Огляд сучасного стану та найближчих перспектив розвитку водневих енергетичних технологій показує, що в даний час світова енергетика переживає період важливих структурних змін, пов'язаних зі збільшенням частки відновлювальних джерел електричної енергії і розподіленої генерації в загальному енергетичному балансі. Підвищення стійкості мережі, створення схемних рішень щодо адаптації сонячних і вітрових електростанцій до вимог мережі, забезпечення доступності електростанцій. Між тим, ряд зарубіжних і вітчизняних публікацій вказують на те, що залишається до кінця не вирішеним питання забезпечення якості електропостачання при широкому впровадженні відновлювальних джерел електричної енергії, що може бути вирішено розвитком систем ефективного зберігання генерованої електричної енергії [9-12].

Формулювання цілей статті

Метою цієї роботи є аналіз можливості та особливостей впровадження концепції декарбонізації систем електропостачання промислових підприємств в аспекті сталого розвитку.

Виклад основного матеріалу

На сьогоднішній день у світовій спільноті енергоозброєність вважається одним з основних показників, які визначають рівень соціально-економічного розвитку суспільства, оскільки від забезпеченості енергією залежать і обсяги виробництва, і його технічний рівень, а також рівень життя населення. Між тим існує світова тенденція щодо зростання високими темпами споживання енергії [6].

Такий стан справ спонукає до кардинальної зміни енергетичної політики з метою скорочення споживання традиційних енергоносіїв. Такий підхід зумовлює необхідність розробки ефективних методів енергозбереження та втілення більш досконалих технологій використання енергетичних ресурсів, пошуку нових джерел енергії та подальше отримання на їх основі ефективних енергоносіїв, насамперед, зручного для споживання штучного палива, що має високу екологічну сумісність із навколишнім середовищем.

Слід зауважити, що дефіцит природних органічних палив у поєднанні із посиленням глобальних екологічних проблем зумовили підвищення інтересу до використання водню як універсального синтетичного енергоносія у стаціонарних і мобільних установках. Між тим, саме завдяки необмеженим енергоресурсам для його отримання, високій енергонасиченості, технологічній гнучкості й екологічній чистоті процесів перетворення енергії за його участю, водень розглядається як найбільш перспективний енергоносій, що сприятиме вирішенню вищевказаних проблем найближчим часом [7].

Слід зазначити якісні зміни що відбулися за останній час та стали поштовхом для розвитку водневої енергетики. Таким чином, акцент у цьому питанні змістився з технологічних і енергетичних аспектів на екологічні й економічні складові проблеми створення міжгалузевої інфраструктури, що забезпечує широкомасштабне використання водню. Ці процеси, на сьогоднішній день, притаманні і Україні, де роботи з

водневої енергетики віднесено до рангу пріоритетних цільових комплексних програм наукових досліджень, які охоплюють широке коло питань, вирішення яких у комплексі забезпечує перехід на якісно новий рівень технологій виробництва, розподілу і споживання водню в енергетиці, промисловості та інших сферах економіки.

Сучасні аспекти зберігання електричної енергії за допомогою водню розглядається як частина наступних концепцій:

- Power-to-Power із зберіганням водню як в газоподібному стані, в тому числі в підземних газосховищах, так і в зв'язаному стані, в тому числі в гидридах металів;
- Power-to-Gas, що включає додавання водню в існуючу інфраструктуру для природного газу, а також створення синтетичного метану з водню.

На сьогоднішній день концепція Power-to-Gas розглядається як найпростіший і швидкий спосіб створення глобального ринку водню. Найдешевшим способом транспортування водню є транспортування по трубопроводу в суміші з природним газом, що зменшить значні обсяги капітальних витрат.

Перевагами цього рішення є відносна дешевизна технології, використанні існуючої інфраструктури природного газу, при цьому безпеку транспортування водню знаходиться на тому ж рівні, що і природного газу.

У той же час, такий підхід не позбавлений ряду недоліків, з посеред інших, в першу чергу слід вказати на необхідність поділу газів, що призводить до витрат 20 ... 30% водню на поділ (+ 25..50% до вартості), необхідність додаткового очищення на фоні існуючих обмежень на теплотворну здатність газу.

Між тим, на сьогоднішній день на теренах провідних країн світу та Європейського союзу йде робота по створенню пілотних проектів в рамках цієї концепції.

Зважаючи на високий коефіцієнт корисної дії енергоустановок на базі паливних елементів, вони розглядаються в якості перспективних джерел енергії в кіловатному класі потужності. Такі енергоустановки потребують використання чистого водню вище 99.9%. Комплекс електролізер - паливний елемент характеризується потужним коефіцієнтом рекуперації електроенергії, який може становити більше 40%, що цілком прийнятно для енергоустановок на основі відновлюваних джерел електричної енергії. При розробці таких систем акумулювання електроенергії основними невирішеними питаннями залишаються аспекти пов'язані зі створенням енергоефективних систем очищення і зберігання водню, інтегрованих з паливними елементами [8].

Між тим, слід зауважити, що серед розроблюваних нових технологій і пристроїв очищення і зберігання водню для автономної енергетики економічно прийнятними і безпечними можуть стати пристрої та системи, засновані на використанні оборотних металогідридів - інтерметалічних сполук, здатних вибірково і оборотно поглинати водень. При цьому основна маса водню в системі знаходиться в зв'язаному твердофазном стані, що забезпечує підвищену безпеку при експлуатації. Вибірковість поглинання водню, можливість гнучко контролювати термодинамічні властивості інтерметалічних сплавів за допомогою варіації їх складу дозволяє використовувати їх не тільки для зберігання, але і для високоефективної очистки водню, створення термохімічних теплових насосів і водневих компресорів [9].

Таким чином, підвищення ефективності роботи водневих систем акумулювання енергії пов'язано зі зниженням енергетичних витрат при отриманні, очищенні та зберіганні водню. Сучасні системи зрідження водню вимагають витрат до 30-40% загальної хімічної енергії зберігається водню (по нижчій теплоті згоряння), і системи компримування водню до 350- 750 бар вимагають до 20%, при цьому експлуатація таких систем в енергоустановках автономної і розподіленої енергетики ускладнена. До основних перепон можна віднести високі витрати на кріогенне устаткування або трубопровідну арматуру високого тиску, забезпечення безпеки витрат на навчання і підготовку обслуговуючого персоналу.

Між тим, на сьогоднішній день світова потужність систем акумулювання енергії оцінюється в 3% від загальної генерації електроенергії, причому на 95% ці потужності забезпечуються за рахунок єдиної технології гідроакумулюючих станцій, що залишає актуальним на сьогодні питання буферних систем акумулювання електричної енергії в умовах впровадження джерел розосередженої генерації електричної енергії [8].

Слід зазначити, що авторами пропонуються до подальшої практичної реалізації в умовах промислових підприємств енерготехнологічні комплекси. При побудові систем з розосередженою генерацією вони повинні мати у своєму складі первинні приймачі енергії на базі відновлюваних джерел електричної енергії, дистилятора з геліоколектором, електролізер, системи зберігання стиснених газів, паливного елемента. Також такі енерготехнологічні комплекси мають у своєму складі систему управління і відповідні вимірювальні датчики для збору й обробки даних щодо параметрів технологічних процесів, що реалізуються під час функціонування комплексу.

В основу енерготехнологічного комплексу покладено здатність споживання і переробки поновлюваної енергії. Нерегулярний потік первинної енергії, одержуваної від відновлюваних джерел електричної енергії, використовується в електролізері. Важливою характеристикою електролізера високого тиску є те, що в якості електроживлення може бути використана некондиційна електрична енергія. Очевидно, що такий підхід є найкращим для створення автономних електростанцій невеликої та середньої потужності. Розроблений енерготехнологічного комплексу може розглядатися як автономна станція

отримання водню. У той же час отриманий водень може використовуватися для підтримання інших технологічних процесів чи пікових генерацій електричної енергії.

Дистилятор для опріснення технічної води і води з високим вмістом солі та інших домішок з підземних джерел та грунтових вод є одним із споживачів енергії та складовим елементом енерготехнологічного комплексу. Дистилюючий модуль застосовується як складовий елемент енерготехнологічного комплексу, а також як окремий об'єкт із можливим енергопостачанням від традиційних джерел енергії. Під час теплової перегонки відбувається повна демінралізація і стерилізація води. Отримана таким чином вода може бути використана для технічного водопостачання, дистильована вода частково подається в електролізер [8].

На підставі викладеної інформації можна зазначити, що буферна воднева система, яка складається з електролізера і системи зберігання водню, органічно вписується в енерготехнологічну схему системи розосередженої генерації на базі відновлюваних джерел електричної енергії, забезпечуючи вирішення проблеми подачі енергії споживачеві у період відсутності генерації електричної енергії. Перспективними вважаються енерготехнологічні схеми автономних водневих станцій на базі використання відновлюваних джерел енергії [8].

Водневе акумулювання енергії у вигляді ланцюжка, що зв'язує первинний джерело енергії, виробництво водню, систему зберігання водню і водневу енергоустановку дозволяє здійснювати довгострокове акумулювання енергії без втрат, доповнюючи в мегаватного класу потужності гідроакумулюючі системи і конкуруючи в області малих потужностей з акумуляторними системами [9].

Потенційна перевага електролізу полягає в тому, що його досить легко організувати в умовах маломасштабного виробництва, наблизивши його до споживачів. Це дозволяє відмовитися від споруди дорогих систем розподілу водню. Електролізери забезпечують виробництво особливо чистого водню. До недоліків електролізу відносяться низька сумарна енергетична ефективність процесу і відносно високі капітальні витрати. В даний час застосовується і розробляються нові типи електролізерів, що дозволяють збільшити ефективність і комерційну привабливість процесу електролізу (твердополімерним електролізери, високотемпературні і інші) [7].

Найбільш широко використовувана технологія електролізу заснована на застосуванні лужних електролітів. Вдосконалені лужні електролізери можуть бути використані для великомасштабного виробництва водню з води з відносно високою сумарною ефективністю перетворення первинної енергії, рівній 28-36% з урахуванням коефіцієнту корисної дії електростанції на рівні 35-40% [7].

Тим часом, перспективи електролізу пов'язані із застосуванням твердо-полімерних електролізерів з платиновими каталізаторами, які забезпечують більш високий вихід водню. Останнім часом ведуться розробки електролізерів з твердо-полімерних електролізерів, що не містять дорогоцінних металів, хоча, незважаючи на деякі успіхи в рішенні цієї задачі для спеціальних електролізерів з малим ресурсом роботи, прийнятного рішення для промислових електролізерів поки не знайдено. Твердо-полімерних електролізери характеризуються значно більшими питомими капітальними витратами, ніж лужні, але ці витрати зменшаться при переході до великих обсягів виробництва [7].

Як джерело електроенергії для електролізу доцільно розглядати енергопостачання від вироблення електроенергії на місці на базі поновлюваних джерел енергії (рис.).

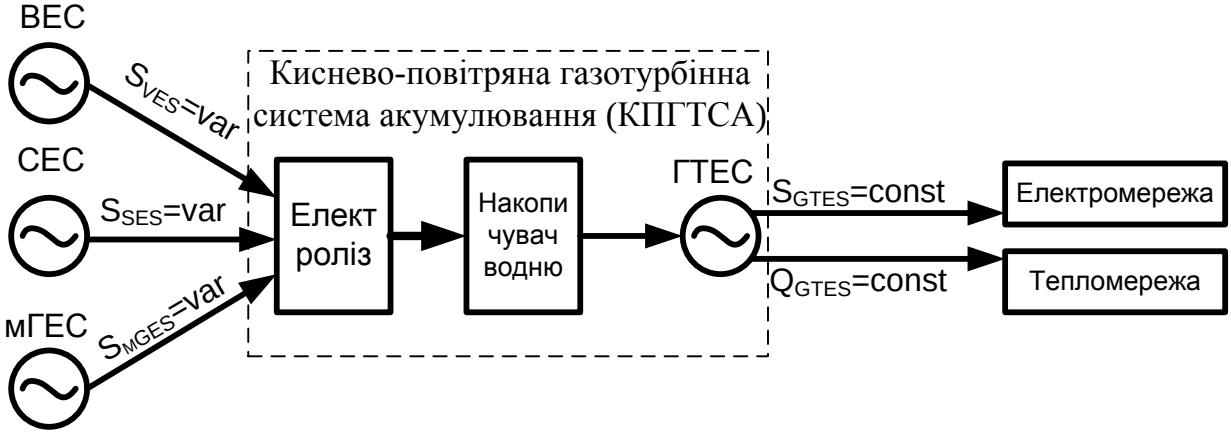


Рис. 1. Схема застосування твердополімерного електролізеру у схемі киснево-повітряної газотурбіни як буферного накопичувача електричної енергії

У даному випадку реалізації, при використанні енергії вітру мають місце ті ж витратні характеристики, що й при отриманні водню на базі сонячної енергії. Обидві технології застосовні для продуктивності за воднем.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Аналіз можливості та особливостей впровадження концепції декарбонізації систем електропостачання промислових підприємств в аспекті сталого розвитку показав актуальність впровадження

джерел розосередженої генерації з використання буферних накопичувачів електричної енергії з метою стабілізації рівня генерованої електричної енергії.

Запропоновано використовувати твердополімерні електролізери як буферні накопичувачі генерованої електричної енергії джерелами розосередженої генерації на базі відновлювальних джерел.

Література

1. World Energy Outlook –2021, OECD/IEA, Paris.
2. Smart Power Grids – Talking about a Revolution // IEEE Emerging Technology portal, 2009.
3. Енергетичні ресурси та потоки / під заг. ред. А.К. Шидловського. – Київ: Українські енциклопедичні знання, 2003. – 472 с.
4. НЕК «Укренерго»: Офіційний сайт [Електронний ресурс]: http://www.ukrenergo.energy.gov.ua.
5. Sinchuk, O.M. Aspects of the problem of applying distributed energy in iron ore enterprises' electricity supply systems. Multi-authored monograph / O.M. Sinchuk, S.M. Boiko, I.O. Sinchuk, F.I. Karamanyts, I.A. Kozakevych, M.L. Baranovska, O.M. Yalova; Edited by DSc., Prof. O.M. Sinchuk. – Warsaw: iScience Sp. z o. o. – 2018. – 77 p.
6. Бойко С.М. Теоретичні засади формування електроенергетичних систем з джерелами розосередженої генерації в умовах гірничорудних підприємств. / С. М. Бойко // Монографія, під редакцією доктора техн. наук, професора О.М. Сінчука. – Кременчук, 2020. – 263с.
7. Русанов А.В., Соловей В.В., Зіпунніков М.М., Шевченко А.А. Термогазодинаміка фізико-енергетичних процесів в альтернативних технологіях в 3-х т.: т. 1. Термогазодинаміка фізико-енергетичних процесів в водневих технологіях / під загальною редакцією чл.-кор. НАНУ А.В. Русанова; НАН України, Інститут проблем машинобудування. – Харків: Видавництво та друкарня «Технологічний Центр», 2018. – 336 с.
8. Malyshenko S.P., Borzenko V.I., Dunikov D.O., Nazarova O.V. Metal hydride technologies of hydrogen energy storage for independent power supply systems constructed on the basis of renewable sources of energy // Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika). 2012. Т. 59. № 6. — С. 468-478.
9. Emonts B., Schiebahn S., Görner K., Lindenberger D., Markewitz P., Merten F., Stolten D. Reenergizing energy supply: Electrolytically-produced hydrogen as a flexible energy storage medium and fuel for road transport // Journal of Power Sources. 2017. Т. 342. — С. 320-326.
10. Felgenhauer M., Hamacher T. State-of-the-art of commercial electrolyzers and on-site hydrogen generation for logistic vehicles in South Carolina // International Journal of Hydrogen Energy. 2015. Т. 40. № 5. — С. 2084-2090.
11. Solovey V. Autonomous energy technological complex with hydrogen as the secondary energy carrier / V. Solovey, M. Muminov, A. Basteev // International Scientific Journal «Alternative Energy and Ecology». – 2004. – № 1(9). – P. 60-64.
12. Соловей В.В. Термодинамічні та теплофізичні основи перетворювання енергії в метало гідридних установках / В.В. Соловей, Н.А. Чорна // Водень в альтернативній енергетиці та новітніх технологіях, за ред. В.В. Скорохода, Ю.М. Солоніна. – Київ: «КІМ», 2015. – С. 273-278.

References

1. World Energy Outlook –2021, OECD/IEA, Paris.
2. Smart Power Grids – Talking about a Revolution // IEEE Emerging Technology portal, 2009.
3. Enerhetychni resursy ta potoky / pid zah. red. A.K. Shydlovskoho. – Kyiv: Ukrainski entsyklopedychni znannia, 2003. – 472 s.
4. NEK «Ukrenerho»: Ofitsiinyi sait [Elektronnyi resurs]: http://www.ukrenergo.energy.gov.ua.
5. Sinchuk, O.M. Aspects of the problem of applying distributed energy in iron ore enterprises electricity supply systems. Multi-authored monograph / O.M. Sinchuk, S.M. Boiko, I.O. Sinchuk, F.I. Karamanyts, I.A. Kozakevych, M.L. Baranovska, O.M. Yalova; Edited by DSc., Prof. O.M. Sinchuk. – Warsaw: iScience Sp. z o. o. – 2018. – 77 p.
6. Boiko S.M. Teoretychni zasady formuvannia elektroenerhetychnykh system z dzherelamy rozoseredzhenoi heneratsii v umovakh hirnychorudnykh pidpryiemstv. / S. M. Boiko // Monohrafiia, pid redaktsiieiu doktora tekhn. nauk, profesora O.M. Sinchuka. – Kremenchuk, 2020. – 263s.
7. Rusanov A.V., Solovei V.V., Zipunnikov M.M., Shevchenko A.A. Termohazodynamika fizyko-enerhetychnykh protsesiv v alternatyvnykh tekhnolohiiakh v 3-kh t.: t. 1. Termohazodynamika fizyko-enerhetychnykh protsesiv v vodnevykh tekhnolohiiakh / pid zahalnoiu redaktsiieiu chl.-kor. NANU A.V. Rusanova; NAN Ukrainy, Instytut problem mashynobuduvannia. – Kharkiv: Vydavnytstvo ta drukarnia «Tekhnolohichnyi Tsentr», 2018. – 336 s.
8. Malyshenko S.P., Borzenko V.I., Dunikov D.O., Nazarova O.V. Metal hydride technologies of hydrogen energy storage for independent power supply systems constructed on the basis of renewable sources of energy // Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika). 2012. Т. 59. № 6. — С. 468-478.
9. Emonts B., Schiebahn S., Görner K., Lindenberger D., Markewitz P., Merten F., Stolten D. Reenergizing energy supply: Electrolytically-produced hydrogen as a flexible energy storage medium and fuel for road transport // Journal of Power Sources. 2017. Т. 342. — С. 320-326.
10. Felgenhauer M., Hamacher T. State-of-the-art of commercial electrolyzers and on-site hydrogen generation for logistic vehicles in South Carolina // International Journal of Hydrogen Energy. 2015. Т. 40. № 5. — С. 2084-2090.
11. Solovey V. Autonomous energy technological complex with hydrogen as the secondary energy carrier / V. Solovey, M. Muminov, A. Basteev // International Scientific Journal «Alternative Energy and Ecology». – 2004. – № 1(9). – R. 60-64.
12. Solovei V.V. Termodynamichni ta teplofizychni osnovy peretvoriuvannia enerhii v metalo hidrydnykh ustanovkakh / V.V. Solovei, N.A. Chorna // Voden v alternatyvnii enerhetytsi ta novitnikh tekhnolohiiakh, za red. V.V. Skorokhoda, Yu.M. Solonina. – Kyiv: «KIM», 2015. – S. 273-278.

DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-374-381
УДК 678.023.5:678.07.029

КУЛЕШОВА СВІТЛАНА
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0003-2361-2950
e-mail: kuleshovas@khmnu.edu.ua
МАТВІЙЧУК СВІТЛАНА
Мукачівський державний університет
https://orcid.org/0009-0007-2621-3951
e-mail: matviichukssmsu@gmail.com
КОРОЛЬ СВІТЛАНА
Хмельницький національний університет
e-mail: korol_svitlana_m@ukr.net
ЛЕБЕДИНСЬКА ОКСАНА
Хмельницький національний університет
e-mail: amihanamori@gmail.com

ІННОВАЦІЇ В ДИЗАЙН-ПРОЄКТУВАННІ СПЕЦІАЛЬНОГО ОДЯГУ

В роботі запропоновано підхід до популяризації інноваційних технологій комплексної переробки полімермістких відходів у композиційні полімерні матеріали та приклади їх використання для захисних елементів спеціального одягу.

Ключові слова: інноваційні технології, спеціальний захисний одяг, композиційні полімерні матеріали, підсилюючі накладки.

KULESHOVA SVITLANA
Khmelnytskyi National University
MATVIICHUK SVETLANA
Mukachevo State University
KOROL SVITLANA, LEBEDYNSKA OKSANA
Khmelnytskyi National University

INNOVATIONS IN THE DESIGN OF SPECIAL CLOTHING

The article offers an approach to the popularization of innovative technologies of complex processing of polymer-containing waste into composite polymer materials and examples of their use for protective elements of special clothing. The scientific novelty of the study consists in the analysis and systematization of innovative technologies for designing special clothing with increased protective properties due to the use of composite polymer materials at all stages of creation and promotion of products to the fashion market. The practical significance lies in increasing the innovative potential of the components of design projects of modern special clothing on the example of improving the design processes of special purpose products in the conditions of ULINE LLC in Vynohradiv.

The innovations of artistic and aesthetic factors include creative sketches of project images of models-ideas of men's work overalls for ULINE LLP in Vynohradiv, which were developed and proposed as a number of color solutions in the artistic system "Family" on the basis of digitalization. In order to improve the strategy of promoting the fashion brand "ULINE" of Vynogradiv and selling the models of manufactured men's work overalls on the fashion market, a database of visual transformations of images was developed for the presentation of special purpose products on the website of this company with the aim of their further integration into fashion clothing design.

The innovations of the utilitarian factors of special clothing include the methods of providing workwear products of ULINE LLC, Vynohradiv, with increased wear resistance due to additional structural elements by processing them with polymer compositions. The study proposed rational methods of processing overlays with a polymer coating. Sewing equipment is selected for sealing the seams of special clothing. According to the results of research, experimental samples of men's work overalls with removable protective elements in the knee area were made in the conditions of ULINE LLC in Vynohradiv to improve the operational characteristics of the clothing.

Keywords: innovative technologies, special protective clothing, composite polymer materials, overlays.

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

Технічний прогрес завдяки використанню високотехнологічних розробок і зростаючим суспільним вимогам ставить перед розробниками одягу все складніші завдання. У практику проєктування нових форм спеціального одягу активно впроваджуються сучасні методи художнього конструювання, стайлінгу, сучасних комп'ютерних технологій, діджітал методи побудови і візуалізації форми, що вимагає розробки нових підходів до процесу формоутворення перспективних моделей спеціального одягу [1, 2].

Інновації в сфері технологій комплексної переробки полімермістких відходів у композиційні полімерні матеріали надали нові можливості у проєктуванні, виготовленні та реалізації сучасних моделей одягу різного асортименту і призначення. Одним із напрямів вирішення цієї проблеми є використання полімерних композицій в спеціальному захисному одязі за функціональною ознакою [3, 4].

Актуальність теми досліджень має важливе значення для вдосконалення експлуатаційних характеристик спеціального одягу за рахунок застосування інновацій на кожному етапі процесу дизайн-проєктування, а також для підвищення захисних властивостей та естетичної якості за рахунок вдосконалення колориту та адаптивності виробів спеціального призначення.

Аналіз останніх джерел

Підґрунтям для виконання дослідження стали загальнотеоретичні праці Колосніченко М.В., Остапенко Н.В. [5], Рубанки А.І., Третякової Л.Д. [6], Струмінської Т.В. [7], Колосніченко О.В. [8] та інших фахівців. Проведений аналіз досліджень [5–8] дозволив визначити, що провідну роль у розробці спеціального одягу, який буде відповідати вимогам експлуатації, відіграє правильний вибір пакету матеріалів, який базується на об'єктивній та всебічній оцінці його захисних властивостей, а також конструкторсько-технологічні особливості одягу. Питанням узагальнення науково-практичних розробок в естетико-гармонійному проєктуванні одягу спеціального призначення, а саме особливостям формоутворення та засобам композиційної виразності, присвячені дослідження Колосніченко О.В., Пашкевич К.Л., Остапенко Н.В. [5, 8]. Але в перерахованих дослідженнях відсутні теоретичні узагальнення або практичні рекомендації щодо розробки критеріїв і параметрів різновидів елементів спеціального одягу на основі використання полімерних матеріалів.

Формування цілей статті

Метою дослідження є інновації в дизайн-проєктуванні спеціального одягу.

Об'єктом дослідження є процес інноваційного дизайн-проєктування на всіх стадіях створення й просування на ринок моделей сучасного спеціального одягу з підвищеними захисними властивостями.

Предметом дослідження є інноваційні технології на етапах дизайн-проєктування спеціального одягу з підвищеними захисними властивостями за рахунок використання композиційних полімерних матеріалів.

Для досягнення поставленої мети застосовано системно-структурний, морфологічний аналіз, композиційно-конструктивний метод дослідження та синтез інформації. Для створення візуальних зображень застосовано графічні редактори PaintTool SAI та Xara Designer Pro X 19 Free Trial.

Виклад основного матеріалу

Завдяки трансформації суспільства і переходу на новий рівень ведення бізнесу, а саме виробництву товарів і наданню он-лайн послуг, а також боротьбі за збереження екосистеми в цілому [1, 2, 9], завдяки стрімкому розвитку нових технологій у XXI столітті все більше з'являється інноваційних дизайнерських рішень [1, 5, 6], не типових матеріалів та технологій [3, 5–7] для створення і виготовлення виробів індустрії моди різного асортименту. Загальними характеристиками інновацій для спектра виробництва спеціального одягу є можливості в досягненні конкурентних переваг за рахунок розширення асортименту, надання нових функцій і властивостей матеріалам, підвищення ефективності технологій і якості створення продукції й послуг. Такі види інновацій обгрунтовуються необхідністю забезпечення ефективного захисту працівникам, їх оптимального фізіологічного та психологічного стану з метою збереження здоров'я та працездатності [3–8].

В процесі дослідження для досягнення мети роботи необхідно розв'язувати наступні задачі:

1) охарактеризувати фактори впливу на ефективність інноваційного дизайн-проєктування спеціального одягу;

2) проаналізувати інноваційні проєкти fashion-брендів сегменту сучасного спеціального одягу;

3) охарактеризувати інноваційні потенціали складових дизайн-проєктів сучасного спеціального одягу на прикладі удосконалення процесів проєктування спеціального одягу в умовах ТзОВ УЛІНЕ м. Виноградів.

Фактори впливу на ефективність інноваційного дизайн-проєктування спеціального одягу діляться на три групи стосовно своєї природі: *утилітарні, соціальні та художньо-естетичні* [9].

Потенціал інноваційності утилітарних факторів реалізується за подобою технологічних напрямків за рахунок розширення асортименту, надання нових функцій і властивостей, підвищення технологічності і якості пошиття спеціального одягу.

Потенціал інноваційності соціальних факторів виражається в матеріалізації у спеціальному одязі нових знакових засобів приналежності особистості до бажаного соціального рівня та появи нових символів ідентифікації членів певних соціальних груп.

Інноваційній потенціал художньо-естетичних факторів виробів ставиться до основних характеристик фешн-проєкту та проявляється у досягненні оригінальності композиційних та колористичних рішень спеціальних виробів, діджиталізації і персоналізації сприйняття моделей одягу, екологізації, прискоренні споживання та тиражуванні потреб та послуг [2, 8, 9].

Аналіз інноваційних проєктів fashion-брендів сегменту сучасного спеціального одягу

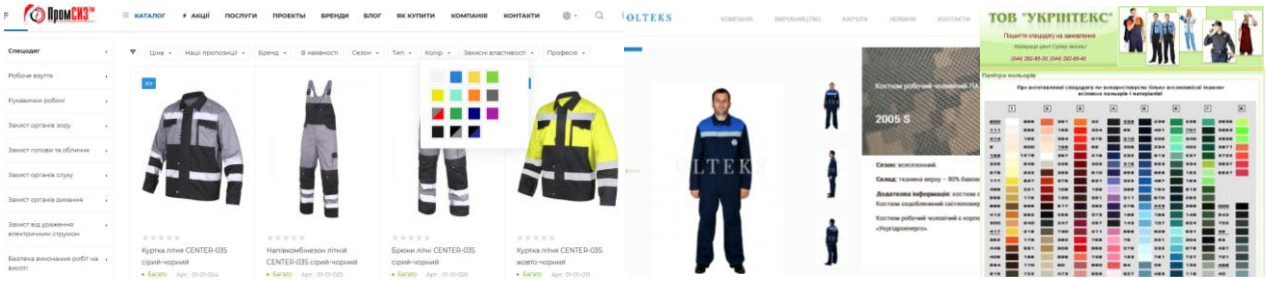
В умовах кризового ринку стратегії просування fashion-брендів з виготовлення спеціального одягу трансформуються під впливом факторів зовнішнього і внутрішнього маркетингового середовища (зростання цін, падіння попиту, скорочення бюджетів на просування). Перехід на менш витратні канали просування (інтернет-маркетинг, CRM-маркетинг, реферальний маркетинг, крос-маркетинг) дозволяє таким fashion-брендам при менших витратах більш ефективно взаємодіяти з цільовою аудиторією.

Для досягнення поставленої мети на основі аналітичних досліджень наведено аналіз сайтів і представлення продукції кількох провідних fashion-брендів, що займаються виготовленням спеціального одягу: ПромСИЗ [10], OLTEKS [11], ТОВ «УКРІНТЕКС» [12].

Проаналізовано, узагальнено і систематизовано основні принципи та етапи створення графічної експлікації модних інновацій даного актуального сектору моди. Проведений аналіз свідчить, що з'явилися нові типи підприємств з виготовлення спеціального одягу: гнучкі, ефективні, незалежні від інерційності великих серій. Візуалізація моди на сайтах цих підприємств представлена в чітко організованому процесі,

що враховує всі три групи перерахованих вище факторів впливу на ефективність інноваційного дизайн-проєктування спеціального одягу [10–12].

Кожен з проаналізованих сайтів складається з декількох розділів, посилання на які можна знайти на головній сторінці: About (Про бренд); Lookbooks (лукбука); Product Shots (Фотографії товарів); Stocklist (Список магазинів); Contacts (Контакти). Презентація виробів спеціального призначення здійснюється у вигляді аватарів 3D манекенів (рис. 1, а), технічних ескізів (рис. 2), брендового спецодягу з логотипом (рис. 1, б) і відбувається за допомогою комп'ютерних технологій, що надають широкі колористичні можливості (рис. 1, в).

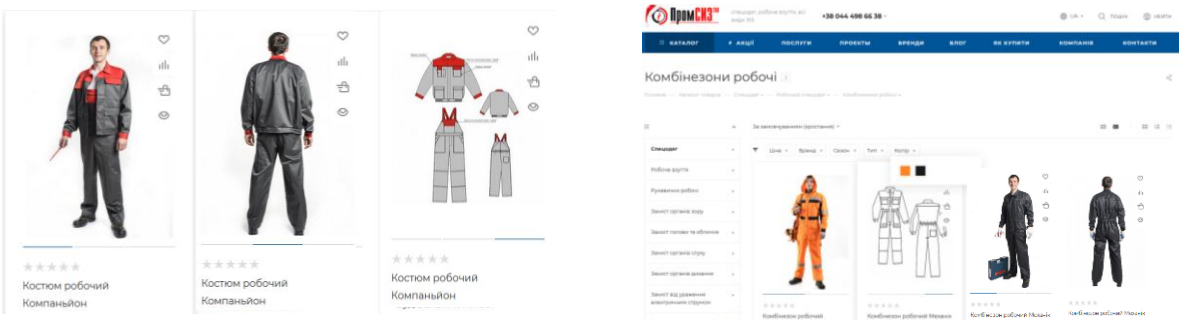


а) б) в)

Рис. 1. Приклади сучасних варіантів візуального представлення виробів спеціального призначення: а) на 3D манекені [10]; б) на фігурі [11]**; в) палітра кольорів для замовлення спецодягу** [12]

Дане дослідження орієнтоване на вироби спеціального призначення для захисту від загальновиробничих забруднень та механічних впливів, для яких велике значення має дотримання експлуатаційних вимог, що забезпечують відповідність одягу умовам праці [13]. В результаті аналізу за каталогами обраних сайтів існуючих варіантів моделей спецодягу встановлено типові конструктивні особливості моделей спецодягу, що призначений для захисту від загальновиробничих забруднень та механічних пошкоджень [10–12]. Встановлено основні види одягу та їх конструктивні особливості, що визначені формою та силуетом одягу, кроєм рукава, коміру. Встановлено, що переважає такий вид одягу, як костюм, що складається з куртки та штанів (55 %). Комплекти спецодягу з куртки та штанів можуть бути з різними горизонтальними та вертикальними членуваннями. На другому місці комбінезони спеціального призначення.

Згідно з результатами аналізу конструкції, найчастіше проєктують спецодяг прямого силуету (72 %), з вшивним сорочковим рукавом (64 %), з стояче відкладним коміром (73 %), з горизонтальними членуваннями (74 % вигляд спереду, 62 % вигляд ззаду, 64 % в цілому по костюму), рис. 2.



а) б)

Рис. 2. Переважні види виробів спеціального призначення для захисту від загальновиробничих забруднень: а) костюми робочі; б) комбінезони робочі

Аналіз інноваційних проєктів fashion-брендів сегменту сучасного спеціального одягу виконано не тільки в системі «Спеціальний одяг – людина – середовище», а також в системі «Колір – форма – середовище». При цьому проаналізовано частоту зустрічності кольорів матеріалів виробів спеціального призначення, що представлено на рис. 3.

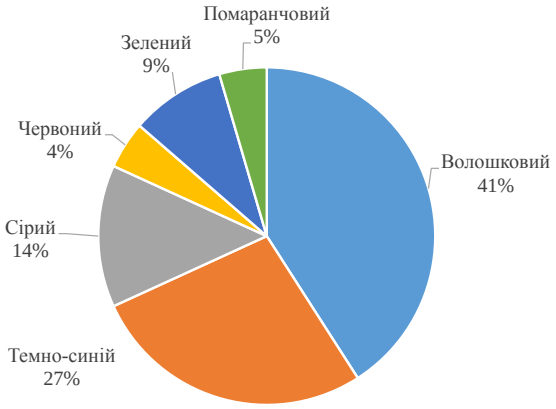


Рис. 3. Кольори матеріалів, що застосовуються для виготовлення спеціального одягу для захисту від загальновиробничих забруднень

Колірна гама в спеціальному одязі несе в собі не тільки стиль та імідж компанії, але також дуже потрібний і важливий психологічний аспект сприйняття, до якого в наш час все більше приділяють увагу як великі компанії, так і невеликі організації [10–12, 14].

Найбільшим зустрічними є наступні кольори спецодягу: волошковий (41%) темно-синій (27 %), сірий (14%), зелений (9 %), помаранчевий (5 %), червоний (4%). [10–12, 14].

Волошковий. Цей насичений колір звертає на себе увагу, але не дратує. Спецодяг такого кольору використовують майже у всіх галузях: співробітники автосервісу, ремонтники, монтажники, будівельники, сантехніки і т.п. Волошковий часто комбінують з темно-синім, щоб виглядало естетично і не помітно.

Темно-синій – холодний і спокійний колір. Так одягаються робочі на виробництві, щоб розмірено робити свою роботу. Головна перевага цього кольору – він нейтральний і не приваблює зайвої уваги. Темно-синій колір налаштовує на робочий лад. На відміну від чорного він не такий офіційний і добре комбінується з яскравими кольорами: білим, жовтим, помаранчевим. На синьому тлі вони здаються яскравіше.

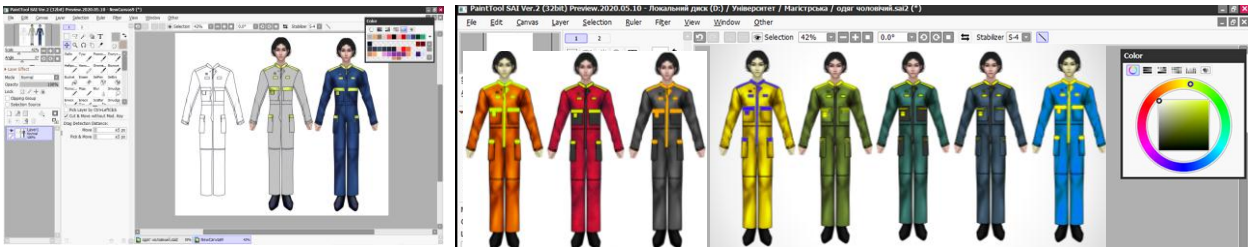
Таким чином, систематизація методів і прийомів гармонізації систем «Спеціальний одяг – людина – середовище», «Колір – форма – середовищ» є основою інноваційного потенціалу художньо-естетичних факторів виробів спеціального призначення.

Інноваційний потенціал художньо-естетичних факторів виробів спеціального призначення

Останніми роками естетична складова вітчизняних спеціальних виробів не повністю задовольняє вимогам споживачів [8, 9], що й визначає актуальність створення естетичних рядів у дизайн-ергономічному проєктуванні одягу спеціального призначення.

В цьому дослідженні до інновацій художньо-естетичних факторів відносяться творчі ескізи проєктних образів моделей-ідей виробів спеціального призначення у відповідності до конкретного технічного завдання: удосконалення процесів проєктування чоловічого робочого комбінезону в умовах ТзОВ УЛІНЕ м. Виноградів [15].

На основі попереднього аналізу кольорів (рис. 3) та з урахуванням рекомендацій [10–12, 14] запропоновано ряд колористичних рішень чоловічого комбінезону спеціального призначення в художній системі «Сім'я» на засадах діджиталізації [1]. Практична реалізація описаного підходу представлена авторами дослідження у вигляді візуальних перетворень зображень ескізних форм проєктних образів цифрових виробів з використанням програми комп'ютерної графіки PaintTool SAI [16].



а) б)

Рис. 4. Візуалізація композиційного рішення кольорів і фактур матеріалів цифрових моделей чоловічих робочих комбінезонів у графічному редакторі Paint Tool SAI

Чоловічий робочий комбінезон являє собою з'єднання в єдиний виріб робочої куртки і штанів. Завдяки цілісного крою, така модель спецодягу практична і зручна у використанні. Поєднуючи деталі одягу, отримано комбінезони робочі прямого силуету, приталені за допомогою куліси на текстильній еластичній стрічці.

З основних переваг модельного поєднання можна відзначити наступні:

1. Ергономічний крій не обмежує рухів, дозволяючи виконувати фізично активні рухи і роботи з піднятими руками.
2. Забезпечення повного захисту тіла працівника.
3. Професійні тканини, які використовуються для пошиття робочого комбінезона, мають унікальні захисні властивості.
4. Практичність використання виражається у зручних конструктивних деталях – наявність функціональних кишень і тримачів.

При виготовленні робочого комбінезона застосовуються суперміцні сумішеві тканини різні за своєю структурою, які оптимально поєднують в собі поліефірні і бавовняні волокна. На верхній шар полотен

наносяться спеціальні обробки з полімерних композицій, що надають матеріалам специфічні властивості – водотривкість. При виробництві використовуються якісні тканини нового покоління різної щільності, що забезпечують збереження захисних властивостей на весь період служби виробу. Легкі по вазі (з меншою щільністю, до 250 г/м^2) мають більш високий індекс повітропроникності. Більш щільні матеріали (від 250 г/м^2 до 280 г/м^2) мають підвищені індекси зносостійкості, міцності і довговічності.

Запропонована модель комбінезону з глибокими функціональними кишенями та підсиленими наколінниками. Всі накладні деталі прострочені двома декоративними строчками.

Конструктивні особливості: Комбінезон із центральною потайною застібкою на блискавку. Комір стійка. Нагрудні накладні кишені з клапанами, бічні кишені з підсилювальними накладками для перенесення гострих деталей. По лінії талії на спинці еластична стрічка. Рукави на манжетах. Манжети застібаються на амінопластові ґудзики. Додаткові підсилювальні накладки розташовані в області колін.

Застосування: комбінезон робочий використовується для зручної та безпечної роботи механіків, слюсарів, працівників складських господарств, автослюсарів, техніків.

Таким чином, досліджено можливість отримання великої кількості різноманітних фактурно-колористичних рішень чоловічих робочих комбінезонів за допомогою методів комбінаторики за композиційно гармонізованим ознакам форм, кольору, малюнка, фактури матеріалів за допомогою комп'ютерних технологій.

За результатами досліджень в умовах ТзОВ УЛІНЕ м. Виноградів виготовлено експериментальні зразки чоловічого робочого комбінезону зі знімними захисними елементами в ділянці колін для підвищення експлуатаційних характеристик одягу [15].

Для удосконалення стратегії просування fashion-бренду «УЛІНЕ» м. Виноградів та реалізації на ринку моделей виготовленого чоловічого робочого комбінезону розроблено базу даних візуальних перетворень зображень.

Генерацію модних інновацій здійснено як візуалізацію художнього образного рішення майбутнього модного об'єкта в графічному, пластичному і колористичному рішенні, за допомогою розробленої на попередньому етапі дослідження інформаційною моделлю [4]. Візуальний ряд сформовано за аналогією з презентацією представлення продукції fashion-бренду «Karcher» [10], рис. 5.

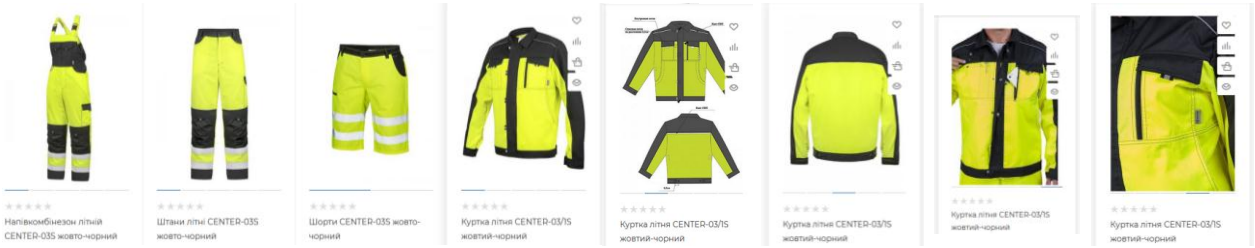


Рис. 5. Варіанти візуального представлення виробів спеціального призначення fashion-бренду «Karcher»

Практична реалізація запропонованого підходу представлена у вигляді бази даних візуальних перетворень зображень робочого комбінезону спеціального призначення fashion-бренду «УЛІНЕ» в табл. 1.

Таблиця 1

База даних візуальної презентації проєктного образу робочого комбінезону спеціального призначення з підвищеними захисними властивостями

Фото виробу	Технічні ескізи виробу			Фото конструктивно-технологічних рішень ементів			
	ахроматичний		кольоровий				

Візуальний ряд супроводжується коротким описом запропонованого виробу: робочий комбінезон чоловічий для захисту від механічних ушкоджень та загальних виробничих забруднень, прямого силуету з застібкою на тасьму-блискавку, основного темно-синього кольору з яскраво жовтими деталями та тримачами, фурнітура чорного кольору. Матеріал: бавовна. [15].

Потенціал інноваційності утилітарних факторів спеціального одягу

До інновацій утилітарних факторів спеціального одягу відносяться методи надання виробам спецодягу ТзОВ УЛІНЕ м. Виноградів підвищеної зносостійкості за рахунок додаткових конструктивних елементів шляхом їх обробки полімерними композиціями.

Авторами на попередніх етапах дослідження вдосконалено способи обробки основних компонентів спеціального одягу на основі використання полімерних матеріалів [3, 4]. Узагальнено і структуровано різновиди накладок захисного одягу за призначенням, асортиментом, зоною розміщення, способом з'єднання, пакетом матеріалів, формою, розміром, конфігурацією на підставі аналізу асортименту існуючого захисного одягу. Виявлено їх конструктивні особливості, наведено приклади їх різновидів [4].

Найбільш розповсюдженими серед усіх видів накладок є наколінники. Відомо [4–6], що наколінник – це підсилювальна чи захисна накладка на зовнішній стороні передніх половинок штанів, напівкомбінезону, комбінезону в ділянці коліна. Наколінники-кишені із знімними прокладками можуть мати вхід згори, знизу і збоку (рис. 6).

В даному дослідженні запропоновано різновиди колінних накладок з полімерним покриттям для костюму спеціального призначення, конструктивно-технологічне рішення яких і раціональні методи технологічної обробки представлено на рис. 6.

Місця з'єднання деталей виробу з накладками запропоновано герметизувати використовуючи плівку з полімерним покриттям (рис. 6) [3, 4, 17–19].

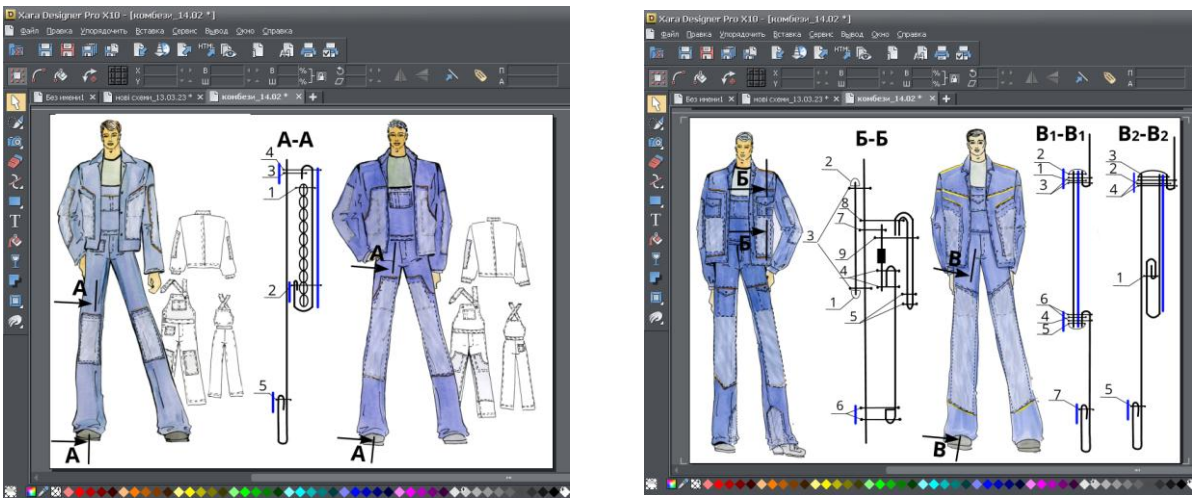


Рис. 6. Дизайн-розробка спецкостюмів (куртка та напівкомбенізон) підвищеної зносостійкості в графічному редакторі Xara PRO X 19

Як представлено на рис. 6 переріз А-А, накладки можуть об`ємними. Як правило, об`ємні накладки є більш ергономічними і ефективними при динамічних навантаженнях, тому що мають більший ступінь відповідності рухам працівника, здійснюють менший тиск на суглоби та не призводять до швидкої втомлюваності працівника.

Вибір матеріалів для захисного одягу відповідного призначення обумовлює способи з`єднання деталей накладок і виробу, до яких належать нитковий, зварний, клейовий, комбінований, а місця їх з`єднань рекомендовано герметизувати. Детальна технологічна характеристика рекомендованого швейного обладнання для герметизації швів представлена в табл. 2.

Таблиця 2

Характеристика обладнання для герметизації швів

Фото	Тип, марка обладнання, фірма-виробник	Макс. температура, ºС	Тиск стисненого повітря, Бар	Ширина сопла, мм	Параметри ролика	Додаткові дані
	AI-001	800	4	22	Ширина верхнього ролика 25,4 мм Ширина нижнього ролика 31 мм	Габарити машини 1200×750×1800 мм Вага нетто 150 кг Електроспоживання 3600 Вт Додатковий ролик 10-31 мм
	JACK JK - 6100	700	3,5-5	22	Висота підйому верхнього ролика: 18-30 мм; Ширина притискного ролика: 25,4 мм; Діаметр притискного ролика: 65 мм	Потужність нагрівальної трубки: 4 кВт; Тиск верхнього ролика: 0,15 Мра; Загальна потужність: 5 кВт, 220 V, 50 Hz.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Наукова новизна дослідження полягає у аналізі та систематизації інноваційних технологій дизайн-проєктування спеціального одягу з підвищеними захисними властивостями за рахунок використання композиційних полімерних матеріалів на всіх стадіях створення й просування виробів на fashion-ринок.

Практичне значення полягає у підвищенні інноваційного потенціалу складових дизайн-проєктів сучасного спеціального одягу на прикладі удосконалення процесів проєктування виробів спеціального призначення в умовах ТзОВ УЛІНЕ м. Виноградів.

До інновацій художньо-естетичних факторів відносяться творчі ескізи проєктних образів моделей-ідей чоловічого робочого комбінезону для ТзОВ УЛІНЕ м. Виноградів, які розроблено і запропоновано як ряд колористичних рішень в художній системі «Сім'я» на засадах діджиталізації.

Для удосконалення стратегії просування fashion-бренду «УЛІНЕ» м. Виноградів та реалізації на fashion-ринку моделей виготовленого чоловічого робочого комбінезону розроблено базу даних візуальних перетворень зображень для презентації виробів спеціального призначення на сайті даної компанії з метою їх подальшої інтеграції у fashion-дизайн одягу.

До інновацій утилітарних факторів спеціального одягу відносяться методи надання виробам спецодягу ТзОВ УЛІНЕ м. Виноградів підвищеної зносостійкості за рахунок додаткових конструктивних елементів шляхом їх обробки полімерними композиціями. У дослідженні запропоновано раціональні методи обробки накладок з полімерним покриттям. Для герметизації швів спеціального одягу обрано швейне обладнання. За результатами досліджень в умовах ТзОВ УЛІНЕ м. Виноградів виготовлено експериментальні зразки чоловічого робочого комбінезону зі знімними захисними елементами на ділянці колін для підвищення експлуатаційних характеристик одягу.

Література

1. Digital Fashion. URL: https://uxplanet.org/why-digital-clothing-is-2021s-most-exciting-tech-trend-64717db6856b
2. Гардабхадзе І.А. Гомеостатичний потенціал фешн-дизайну у трансформаційних процесах сучасної культури / І.А. Гардабхадзе // Вісник КНУКіМ. Серія «Мистецтвознавство». – 2021. – № 44. – С. 195–201. – URL: https://doi.org/10.31866/2410-1176.44.2021.235429
3. Захаркевич О.В. Аналіз перспектив застосування полімерних матеріалів для виготовлення одягу спеціального призначення / О.В. Захаркевич, С.Г. Кулешова, С.В. Ткачук, С.В. Лук'янчук // Вісник Хмельницького національного університету Серія: «Технічні науки». – 2022. – № 3. – С. 240–248.
4. Kuleshova S., Juliya Koshevko, Olesia Ditkovska, Svitlana Korol. Prospects for the use of polymer materials for the design of special purpose clothing. ARTTE Vol. 10, No. 3, 2022 ISSN 1314-8788 (print), ISSN 1314-8796 (online), doi: 10.15547/artte.2022.03.007, P. 181–188. URL: https://sites.google.com/a/trakia-uni.bg/artte/articles/artte-vol-10-no-3
5. Остапенко Н.В. Принципи трансформації в дизайн-проектуванні одягу / Н.В. Остапенко, Т.В. Луцкер, М.В. 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
6. Рубанка А.І. Технологія як фактор розвитку одягу спеціального призначення / А.І. Рубанка, Л.Д. Третякова, М.М. Рубанка // Дизайн одягу в полікультурному просторі : монографія / М.В. Колосніченко, К.Л. Пашкевич, Т.Ф. Кротова та ін. – Київ : КНУТД, 2020. – С. 175–202. URL: https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/16298/1/DOvPP_2020_P175-202.pdf
7. Struminska T.V., Prasol S.I., Kolosnichenko E.V., Chuprina N.V. and Ostapenko N.V. Designing of special clothing based on experimental researches of material properties. Vlákna a textil. Fibres and Textiles. № 4. 2019. P. 84–95. URL: http://vat.ft.tul.cz/2019/4/VaT_2019_4_10.pdf
8. Колосніченко О.В. Художньо-образні особливості спецодягу в дизайні XX століття / О.В. Колосніченко, К.Л. Пашкевич, Ю.Я. Лозко // Art and Design Мистецтвознавство. Технічні науки. – 2019. – № 1. – С. 87–104. URL: https://doi.org/10.30857/2617-0272.2019.1.8.
9. Гардабхадзе І.А. Особливості інноваційної діяльності у сегменті сучасного одягу індустрії моди / І.А. Гардабхадзе // Теорія та практика дизайну. – 2013. – Вип. 3. – С. 3–14. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/tprd_2013_3_3.
10. ПромСИЗ. URL: https://promsiz-tm.ua/ua/projects/poshiv-spetsodezhdy/kollektsiya-spetsodezhdy-karcher/
11. OLTEKS. URL: https://olteks.com/products
12. ТОВ «УКРІНТЕКС». URL: http://ukrintex.com.ua/ua/palitra_koloriv.html
13. ДСТУ EN ISO 13688:2016. Одяг захисний. Загальні вимоги (EN ISO 13688:2013, IDT; ISO 13688:2013, IDT). – [Чинний від 2017-01-10]. – К. : Держпоживстандарт України, 2017. – 18 с. – (Національний стандарт України). http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=67538
14. Колір у виробничому середовищі. URL: http://marjasja.multiply.com/journal
15. Король С.М. Удосконалення процесів проектування чоловічого комбінезону спеціального призначення в художній системі «Сім'я» в умовах ТзОВ «УЛІНЕ» м. Виноградів : дипломна робота магістра

: 182 Технології легкої промисловості / С.М. Король ; Хмельниц. нац. ун-т. – Хмельницький, 2022. – 77 с. – URL: http://elar.khmnu.edu.ua/jspui/handle/123456789/13040

16. PaintTool SAI - SYSTEMAX Software Development. URL: https://www.systemax.jp/en/sai/
17. Sewingcenter. URL: https://sewingcenter.com.ua/uk/besshovnye-tehnologii/
18. Компанія «Softorg». URL: https://softorg.com.ua/product/jack_jk_6100
19. Shvejnik. URL: https://shvejnik.com.ua/ru/mashina-proklejki-shvov-vetron-5374-3025.html

References

1. Digital Fashion. URL: https://uxplanet.org/why-digital-clothing-is-2021s-most-exciting-tech-trend-64717db6856b
2. Hardabkhadze I.A. Homeostatychnyi potentsial feshn-dyzainu u transformatsiinykh protsesakh suchasnoi kultury / I.A. Hardabkhadze // Visnyk KNUKiM. Seriia «Mystetstvoznavstvo». – 2021. – № 44. – S. 195–201. – URL: https://doi.org/10.31866/2410-1176.44.2021.235429
3. Zakharkevych O.V. Analiz perspektyv zastosuvannia polimernykh materialiv dlia vyhotovlennia odiahu spetsialnoho pryznachennia / O.V. Zakharkevych, S.H. Kuleshova, S.V. Tkachuk, S.V. Lukianchuk // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu Seriia: «Tekhnichni nauky». – 2022. – № 3. – S. 240–248.
4. Kuleshova S., Juliya Koshevko, Olesia Ditkovska, Svitlana Korol. Prospects for the use of polymer materials for the design of special purpose clothing. ARTTE Vol. 10, No. 3, 2022 ISSN 1314-8788 (print), ISSN 1314-8796 (online), doi: 10.15547/artte.2022.03.007, P. 181–188. URL: https://sites.google.com/a/trakia-uni.bg/artte/articles/artte-vol-10-no-3
5. Ostapenko N.V. Pryntsypy transformatsii v dyzain-proektuvanni odiahu / N.V. Ostapenko, T.V. Lutsker, M.V. 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
6. Rubanka A.I. Tekhnolohiia yak faktor rozvytku odiahu spetsialnoho pryznachennia / A.I. Rubanka, L.D. Tretiakova, M.M. Rubanka // Dyzain odiahu v polikulturnomu prostori : monohrafiia / M.V. Kolosnichenko, K.L. Pashkevych, T.F. Krotova ta in. – Kyiv : KNUTD, 2020. – S. 175–202. URL: https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/16298/1/DOvPP_2020_P175-202.pdf
7. Struminska T.V., Prasol S.I., Kolosnichenko E.V., Chuprina N.V. and Ostapenko N.V. Designing of special clothing based on experimental researches of material properties. Vlákna a textil. Fibres and Textiles. № 4. 2019. R. 84–95. URL: http://vat.ft.tul.cz/2019/4/VaT_2019_4_10.pdf
8. Kolosnichenko O.V. Khudozhno-obrazni osoblyvosti spetsodiahu v dyzaini KhKh stolittia / O.V. Kolosnichenko, K.L. Pashkevych, Yu.Ia. Lozko // Art and Design Mystetstvoznavstvo. Tekhnichni nauky. – 2019. – № 1. – S. 87–104. URL: https://doi.org/10.30857/2617-0272.2019.1.8.
9. Hardabkhadze I.A. Osoblyvosti innovatsiinoi diialnosti u sehmenti suchasnoho odiahu industrii mody / I.A. Hardabkhadze // Teoriia ta praktyka dyzainu. – 2013. – Vyp. 3. – S. 3–14. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/tprd_2013_3_3.
10. PromSYZ. URL: https://promsiz-tm.ua/ua/projects/poshiv-spetsodezhdy/kollektsiya-spetsodezhdy-karcher/
11. OLTEKS. URL: https://olteks.com/products
12. TOV «UKRINTEKS». URL: http://ukrintex.com.ua/ua/palitra_koloriv.html
13. DSTU EN ISO 13688:2016. Odiah zakhysnyi. Zahalni vymohy (EN ISO 13688:2013, IDT; ISO 13688:2013, IDT). – [Chynnyi vid 2017-01-10]. – K. : Derzhpozhyvstandart Ukrainy, 2017. – 18 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy). http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=67538
14. Kolir u vyrobnychomu seredovyshchi. URL: http://marjasja.multiply.com/journal
15. Korol S.M. Udoskonalennia protsesiv proektuvannia cholovichoho kombinezonu spetsialnoho pryznachennia v khudozhnii systemi «Simia» v umovakh TzOV «ULINE» m. Vynohradiv : dyplomna robota mahistra : 182 Tekhnolohii lehkoi promyslovosti / S.M. Korol ; Khmelnyts. nats. un-t. – Khmelnytskyi, 2022. – 77 s. – URL: http://elar.khmnu.edu.ua/jspui/handle/123456789/13040
16. PaintTool SAI - SYSTEMAX Software Development. URL: https://www.systemax.jp/en/sai/
17. Sewingcenter. URL: https://sewingcenter.com.ua/uk/besshovnye-tehnologii/
18. Kompaniia «Softorg». URL: https://softorg.com.ua/product/jack_jk_6100
19. Shvejnik. URL: https://shvejnik.com.ua/ru/mashina-proklejki-shvov-vetron-5374-3025.html

За зміст повідомлень редакція відповідальності не несе

Повні вимоги до оформлення рукопису
http://journals.khnu.km.ua/vestnik/?page_id=37

Підп. до друку 27.04.2023 р. Ум.друк.арк. 54,31 Обл.-вид.арк. 51,67
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