

ISSN 2307-5732

DOI 10.31891/2307-5732

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

1.2023

---

# ВІСНИК

**Хмельницького  
національного  
університету**

**Технічні науки**

---

**Technical sciences**

SCIENTIFIC JOURNAL

HERALD OF KHMELNYTSKYI NATIONAL UNIVERSITY

2023, Issue 1, Volume 317

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, № 1(317)**

**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](http://nbuv.gov.ua/j-tit/Vchnu_tekh)

Включено до науково-метричних баз:

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

<b>Головний редактор</b>	<b>Скиба М. Є.</b> , 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
<b>Заступник головного редактора</b>	<b>Синюк О. М.</b> , д.т.н., професор кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету
<b>Відповідальний секретар</b>	<b>Горященко С. Л.</b> , к.т.н., доцент кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету

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

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

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

**Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету,  
протокол № 08 від 23.02.2023 р.**

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

<b>т</b>	(038-2) 67-51-08	<b>web:</b>	<a href="http://journals.khnu.km.ua/vestnik">http://journals.khnu.km.ua/vestnik</a>
<b>e-mail:</b>	<a href="mailto:visnyk.khnu@khmnu.edu.ua">visnyk.khnu@khmnu.edu.ua</a> <a href="mailto:visnyk.khnu@gmail.com">visnyk.khnu@gmail.com</a>		<a href="http://lib.khnu.km.ua/visnyk_tup.htm">http://lib.khnu.km.ua/visnyk_tup.htm</a>

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

<b>ДУБАС ЮРІЙ, КУНАНЕЦЬ НАТАЛІЯ</b> ВИКОРИСТАННЯ ОНТОЛОГІЇ В ІНФОРМАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ ДЛЯ ДОПОМОГИ У ФОРМУВАННІ ІНДИВІДУАЛЬНОЇ ОСВІТНЬОЇ ТРАЄКТОРІЇ СТУДЕНТІВ .....	9
<b>БАБЕНКО ОЛЕКСІЙ, КУТІНА МАРИНА, ПРОЦЕНКО ЛЮДМИЛА</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК НА ПІДПРИЄМСТВАХ АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ .....	18
<b>БОРТНИК ГЕННАДІЙ, БОРТНИК ОЛЕКСАНДР, КИРИЛЮК СЕРГІЙ</b> СПЕКТРАЛЬНО-КОВАРІАЦІЙНИЙ МЕТОД КЛАСИФІКАЦІЇ РАДІОСИГНАЛІВ .....	21
<b>ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ МИКОЛА, ВАРГАТЮК ГАННА, БОЛДИРЕВА ОЛЬГА</b> ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ РАДІОІНТЕРФЕЙС З ПІДТРИМКОЮ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ 26	
<b>ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ МИКОЛА, ПРИКМЕТА АНДРІЙ, ОЛІЙНИК АНДРІЙ, НІКІТОВИЧ ДІАНА</b> ОПТИМІЗАЦІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ .....	33
<b>ВЕСЕЛОВСЬКА НАТАЛІЯ, БУРЛАКА СЕРГІЙ</b> МЕТОДИ ТА ПРИЙОМУ КОМБІНУВАННЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ КОМПЛЕКСНИХ ҐРУНТОБРОБНИХ МАШИН .....	42
<b>ВЛАСЮК ВАЛЕНТИН</b> ПОБУДОВА ПРОГНОЗОВАНИХ МОДЕЛЕЙ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ ТРАДИЦІЙНИХ ТА СКЛАДЕНИХ ЗГІДНО З КОНЦЕПЦІЄЮ SMART GRID СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ДЛЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ .....	48
<b>ГОРБІЙЧУК МИХАЙЛО, КРОПИВНИЦЬКИЙ ДМИТРО</b> ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОГЛИБЛЕННЯ СВЕРДЛОВИНИ З ВРАХУВАННЯМ СТАНУ ОЗБРОСННЯ ДОЛОТА .....	58
<b>ГУРМАН ІВАН, БОБРОВНИКОВА КІРА, БЕДРАТЮК ЛЕОНІД, БЕДРАТЮК ГАННА</b> МЕТОД АНАЛІЗУ ПРОГРАМНОГО КОДУ ДЛЯ ОЦІНКИ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ЯДРА CUDA .....	67
<b>ДАНИЛКОВИЧ АНАТОЛІЙ, САНГІНОВА ОЛЬГА</b> ЗАСТОСУВАННЯ ТАНИДІВ АКАЦІЇ В ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕЛАСТИЧНИХ ШКІР .....	74
<b>ДАНИЛКОВИЧ АНАТОЛІЙ, ЛІЩУК ВІКТОР</b> ФОРМУВАННЯ ВЗУТТЄВОЇ ШКІРИ ЗІ СПИЛКУ ШКУР СВИНЕЙ .....	82
<b>ЗАЛЮБОВСЬКИЙ МАРК, ПАНАСЮК ІГОР, ЛИЧОВ ДМИТРО, КОШЕЛЬ ГАННА</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ РЕЖИМІВ РУХУ РОБОЧОГО МАСИВУ В ГАЛТУВАЛЬНІЙ МАШИНІ З ДОДАТКОВОЮ РУХОМОЮ ЛАНКОЮ ПОВЗУНОМ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ЗМІНИ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ .....	87
<b>ЗЕЛІНСЬКА ОКСАНА, ПОТАПОВА НАДІЯ, МЕЛЬЯНОВА АНАСТАСІЯ</b> ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ВЕДЕННЯ РЕЄСТРУ КЛІЄНТІВ БАНКУ .....	94
<b>КОВАЛЬОВ ЮРІЙ, ПЛЕШКО СЕРГІЙ, СУВОРОВ ІВАН</b> РОЗРОБКА УДОСКОНАЛЕНОЇ РОБОТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЗАВАНТАЖЕННЯ ЕКСТРУДЕРА .....	100
<b>КРАВЦОВ АНДРІЙ, ЛЕВКІН ДМИТРО, БЕРЕЖНА НАТАЛІЯ, ЛЕВКІН АРТУР</b> МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО ПОБУДОВИ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ БІООБ'ЄКТОВИХ ЗАДАЧ .....	105
<b>КРАВЧЕНКО СВІТЛАНА, МАРЧУК ГАЛИНА, ЛОКТИКОВА ТАМАРА, ГРИШКУН ЄВГЕНІЙ</b> МЕТОДИ ЮЗАБЛІПІ-ТЕСТУВАННЯ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ МОБІЛЬНОГО ДОДАТКУ .....	111
<b>КУЧЕРЕНКО ЮЛІЯ</b> ОБґРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МАТЕРІАЛУ ПОКРИТТІВ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ .....	119

<b>ЛЕМЕСЬКО АНДРІЙ, АНТОНЕНКО АРТЕМ, ЦВИК ОЛЕКСАНДР</b> АНАЛІЗ І ОСОБЛИВОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТРАФІКУ .....	123
<b>МАМУТА МАРИНА, КРАВЧЕНКО ІГОР, МАМУТА ОЛЕКСАНДР</b> ХОСТИНГ СТАТИЧНОГО ВЕБ-САЙТУ ЗАСОБАМИ AWS S3 .....	128
<b>МАРТИНЮК ТЕТЯНА, КОЖЕМ'ЯКО АНДРІЙ, БОРТНИК ГЕНАДІЙ, ВОЙНАЛОВИЧ ОЛЕКСАНДР</b> АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ «ТРИВАЛІСТЬ-КОД» .....	135
<b>МИХАЙЛОВА НІНА, ПРИВАЛА ВАЛЕРІЙ, ЛУЩЕВСЬКА ОЛЕНА</b> ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР НА МАТЕРІАЛИ ІЗ ПОЛІМЕРНИМ ПОКРИТТЯМ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ В СТАТИЧНИХ УМОВАХ .....	139
<b>ОЛІЙНИК ГАЛИНА, ДАНЧЕНКО ЮЛІЯ, КОРНИЦЬКА ЛАРИСА, РАСТОРГУЄВА МАРІЯ</b> ДОСЛІДЖЕННЯ АСОРТИМЕНТУ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРОДУКЦІЇ СЕРІЇ DEKODER DERUFA ДЛЯ ОЗДОБЛЕННЯ СТІНИ В СУЧАСНОМУ ІНТЕР'ЄРІ .....	145
<b>ОНИЩУК ОКСАНА</b> ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ФЛОКУЛЯЦІЇ ТА КОАГУЛЯЦІЇ ПРИ ОЧИЩЕННІ ВОДИ ДЛЯ ПРОМИСЛОВОГО ЗАСТОСУВАННЯ .....	151
<b>ПАЗДРІЙ ІГОР</b> ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА ОСНОВІ ФРЕЙМВОРКІВ .....	155
<b>ПЕДЯШ ВОЛОДИМИР</b> МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАВАННЯ ОТН З МОДУЛЯЦІЄЮ ПО ІНТЕНСИВНОСТІ .....	162
<b>ПЕДЯШ ВОЛОДИМИР</b> ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОПТИЧНОГО ВОЛОКНА .....	167
<b>ПОТАПОВА НАДІЯ, ВОЛОНТИР ЛЮДМИЛА</b> МЕТОД МОДЕЛЮВАННЯ В УПРАВЛІННІ ЗАПАСАМИ ІЄРАРХІЧНИХ ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМ .....	174
<b>РИМАР ТЕТЯНА</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО РЕЖИМУ ПРОЦЕСУ ПОРИЗАЦІЇ РІДИННОСКЛЯНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ В УМОВАХ НВЧ ВИПРОМІНЮВАННЯ .....	181
<b>СИНЮК ОЛЕГ, КРАВЧУК ОЛЬГА, КРАВЧУК АНДРІЙ, МАГДІН ВІКТОР, ЗОЛОТЕНКО ІВАН</b> МОДЕЛЬ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ПОЛІМЕРНОГО МАТЕРІАЛУ .....	186
<b>СЛАВІНСЬКА АЛЛА, СИРОТЕНКО ОКСАНА</b> АНАЛІЗ СУЧАСНОГО НАСТИЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ, ЩО ЗАСТОСОВУЄТЬСЯ У ШВЕЙНІЙ ГАЛУЗІ .....	196
<b>СОКІЛ МАРІЯ, ЗВОРСЬКИЙ АНДРІЙ</b> СУЧАСНІ ЕЛЕКТРОННІ ПОСЛУГИ БІБЛОТЕКИ ДЛЯ ПІДТРИМКИ НАВЧАЛЬНОГО ТА НАУКОВОГО ПРОЦЕСІВ ЗВО В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ .....	205
<b>СТРЕЛЬБЬЦЬКИЙ ВІКТОР</b> ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ МЕХАНІЗМІВ ПОРТАЛЬНИХ КРАНІВ «ГАНЦ» .....	209
<b>ЧИГІНЬ ВАСИЛЬ, ПАЗІНІЮК МИХАЙЛО, ТЕРЕНДІЙ ОЛЬГА, МЕНЬШИКОВ ОЛЕКСІЙ</b> КЕРУВАННЯ РОБОТОЮ ВІДДАЛЕНОГО ПРИСТРОЮ З ВИКОРИСТАННЯМ PYTHON-СЕРВЕРА FLASK .....	214
<b>ЩЕРБАНЬ ВОЛОДИМИР, КОЛЬВА МИКИТА, ЄГОРОВ ДМИТРО, КОЛИСКО ОКСАНА, ЩЕРБАНЬ ЮРІЙ</b> РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ КІНЕМАТИЧНОГО ТА ДИНАМІЧНОГО АНАЛІЗУ ВАЖЛИВИХ МЕХАНІЗМІВ МАШИН ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ ПРОГРАМИ ДЛЯ ОЦІНКИ НАПРУЖЕНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ .....	220
<b>КОЗУБ ЮРІЙ, КОЗУБ ГАЛИНА</b> ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБКИ МУЛЬТИПЛАТФОРМНИХ ЗАСТОСУНКІВ НА KOTLIN .....	224

---

<b>РУТКЕВИЧ ВОЛОДИМИР, ДІДИК АНДРІЙ</b> ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ДЛЯ СУШННЯ ВОЛОСЬКОГО ГОРІХА В ШКАРАЛУПІ .....	230
<b>ОСАДЧУК ЯРОСЛАВ</b> МІКРОЕЛЕКТРОННІ АВТОГЕНЕРАТОРНІ СЕНСОРИ ТЕМПЕРАТУРИ .....	237
<b>СИНЬКО АННА</b> АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ ФОРМУВАННЯ ДОКУМЕНТАЦІЇ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ВІРТУАЛЬНИХ СПІЛЬНОТ .....	248
<b>ДАВИДЕНКО ЛЮДМИЛА, ДАВИДЕНКО ВОЛОДИМИР</b> АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В НИЗЬКОВОЛЬТНІЙ РОЗПОДІЛЬЧІЙ МЕРЕЖІ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА .....	253
<b>ПРАВОРСЬКА НАТАЛІЯ</b> ЗРУЧНЕ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ БІЗНЕСУ З МОЖЛИВІСТЮ АДАПТАЦІЇ ДО РИНКОВИХ ВИМОГ .....	257
<b>ГОЛЕНКО КОСТЯНТИН, МАКОВКІН ОЛЕГ, ПОСОНСЬКИЙ СЕРГІЙ</b> ФОРМУВАННЯ КРАЙОВИХ УМОВ АНАЛІЗУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КУЗОВІВ МІСЬКИХ АВТОБУСІВ .....	263
<b>КРИВЕНЧУК ЮРІЙ, ОЛЕСКЕВИЧ СОФІЯ</b> ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ДЛЯ СТОМАТОЛОГІЧНОЇ КЛІНІКИ З МОЖЛИВІСТЮ ВИЯВЛЕННЯ КАРІЕСУ НА ПАНОРАМНИХ ЗНІМКАХ ЗУБІВ .....	271
<b>КРИВЕНЧУК ЮРІЙ, ГОРІШНА НАДІЯ</b> АНАЛІЗ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАРПЛАТ ЗА ДОПОМОГОЮ МАШИННОГО НАВЧАННЯ .....	276
<b>ЗАСОРНОВА ІРИНА, ЗАСОРНОВ ОЛЕКСАНДР, МАЗНЄВ ЄВГЕН, САРАНА ОЛЕКСАНДР</b> АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ ТЕСТУВАННЯ ВІДКРИТОЇ ПАРАМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЄКТУВАННЯ «ВАЛЕНТИНА» .....	280
<b>МИХАЙЛОВА НІНА, ПРИВАЛА ВАЛЕРІЙ, ЛУЩЕВСЬКА ОЛЕНА</b> ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР НА МАТЕРІАЛИ ІЗ ПОЛІМЕРНИМ ПОКРИТТЯМ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ В СТАТИЧНИХ УМОВАХ .....	289
<b>МОКІЄНКО АНДРІЙ, СПАСЬОНОВА ЛАРИСА, БОНДАРЧУК ОЛЕКСАНДР</b> АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ У ПИТНІЙ ВОДІ ДІОКСИДУ ХЛОРУ, ХЛОРИТ - І ХЛОРАТ-АНІОНІВ .....	294
<b>ЛИСЕНКО СЕРГІЙ, АТАМАНЮК ОЛЬГА, БОХОНЬКО ОЛЕКСАНДР, ВОРОБІЙОВ ВОЛОДИМИР</b> ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ КІБЕРЗАГРОЗ ТИПУ RANSOMWARE НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ HONEYPOT .....	300

# CONTENT

<b>DUBAS YURI, KUNANETS NATALIYA</b> USE OF ONTOLOGY IN INFORMATION SYSTEM TO ASSIST IN THE FORMATION OF AN INDIVIDUAL EDUCATIONAL TRAJECTORY OF STUDENTS .....	9
<b>BABENKO OLEKSIY, KUTINA MARYNA, PROTSENKO LYUDMILA</b> STUDY OF THE EFFICIENCY OF THE APPLICATION OF BIOGAS INSTALLATIONS AT ENTERPRISES OF THE AGRICULTURAL COMPLEX .....	18
<b>BORTNYK GENNADIY, BORTNYK OLEXAND, KYRYLYUK SERGIY</b> SPECTRAL-COVARIATION METHOD OF CLASSIFICATION OF RADIO SIGNALS .....	21
<b>VASYLKIVSKYI MIKOLA, VARGATYUK GANNA, BOLDYREVA OLGA</b> INTELLIGENT RADIO INTERFACE WITH THE SUPPORT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE .....	26
<b>VASYLKIVSKYI MIKOLA, PRYKMETA ANDRII, OLIYNYK ANDRII, NIKITOVYCH DIANA</b> OPTIMIZATION OF INTELLIGENT TELECOMMUNICATION NETWORKS .....	33
<b>VESELOVSKA NATALIYA, BURLAKA SERHIY</b> METHODS AND TECHNIQUES COMBINATION WORKING BODIES OF COMPLEX SOIL PROCESSING MACHINES .....	42
<b>VLASYUK VALENTYN</b> BUILDING PREDICTIVE ELECTRICITY CONSUMPTION MODELS FOR TRADITIONAL AND SMART GRID POWER SUPPLY SCHEMES FOR IRON ORE MINES .....	48
<b>GORBIYCHUK MYKHAIL, KROPYVNYTSKYI DMYTRO</b> OPTIMAL CONTROL OF THE WELL DEEPENING PROCESS CONSIDERING THE CONDITION OF THE BITTING EQUIPMENT .....	58
<b>HURMAN IVAN, BOBROVNIKOVA KIRA, BEDRATYUK LEONID, BEDRATYUK HANNA</b> APPROACH FOR CODE ANALYSIS TO ESTIMATE POWER CONSUMPTION OF CUDA CORE .....	67
<b>DANYLKOYVYCH ANATOLIY, SANGINOVA OLGA</b> APPLICATION OF ACACIA TANNINS IN ELASTIC LEATHER MATERIALS PRODUCTION TECHNOLOGY .....	74
<b>DANYLKOYVYCH ANATOLII, LISHCHUK VIKTOR</b> FORMATION OF SHOE LEATHER FROM SPLIT PIG HIDES .....	82
<b>ZALYUBOVSKYI MARK, PANASYUK IGOR, LYCHOV DMITRO, KOSHEL GANNA</b> RESEARCH OF THE CHANGE OF THE MOTION MODES OF THE WORKING ARRAY IN A TURNING MACHINE WITH AN ADDITIONAL MOVEABLE SLIDING LINK DEPENDING ON THE CHANGE OF DESIGN FEATURES .....	87
<b>ZELINSKA OKSANA, POTAPOVA NADIYA, YEMELIANOVA ANASTASIIA</b> INFORMATION SYSTEM FOR MAINTAINING THE REGISTER OF CLIENTS OF THE BANK .....	94
<b>KOVALYOV YURI, PLESHKO SERGEY, SUVOROV IVAN</b> DEVELOPMENT OF IMPROVED ROBOTICS EXTRUDER LOADING SYSTEM .....	100
<b>KRAVTSOV ANDRII, LEVKIN DMYTRO, BEREZHNA NATALIYA, LEVKIN ARTUR</b> METHODOLOGICAL APPROACH TO THE MATHEMATICAL MODELS CONSTRUCTION OF BIOOBJECT PROBLEMS .....	105
<b>KRAVCHENKO SVITLANA, MARCHUK GALINA, LOKTIKOVA TAMARA, GRISHKUN YEVGENII</b> USABILITY TESTING METHODS FOR ASSESSING A MOBILE APPLICATION .....	111
<b>KUCHERENKO JYLIA</b> SUBSTANTIATION OF THE CHOICE OF COATING MATERIAL WHEN RESTORING PARTS OF AGRICULTURAL MACHINERY BY COLD GAS-DYNAMIC SPRAYING .....	119

<b>ANTONENKO ANDRII, LEMESHKO ARTEM, TSVIK OLEKSANDR</b> ANALYSIS AND FEATURES OF TRAFFIC MONITORING SOFTWARE .....	123
<b>MAMUTA MARYNA, KRAVCHENKO IGOR, MAMUTA OLEKSANDR</b> AMAZON S3 STATIC WEBSITE HOSTING .....	128
<b>MARTYNIUK TATIANA, KOZHEMIAKO ANDRYI, BORTNYK GENNADIY, VOINALOVYCH OLEKSANDR</b> ANALYSIS OF FEATURES OF ANALOG-TO-DIGITAL CONVERSION "DURATION-CODE" .....	135
<b>MIHAILOVA NINA, PRIVALA VALERII, LUSHCHEVSKA OLENA</b> STUDY OF THE INFLUENCE OF LOW TEMPERATURES ON MATERIALS WITH A SPECIAL PURPOSE POLYMER COATING UNDER STATIC CONDITIONS .....	139
<b>OLIJNYK HALINA, DANCHENKO YULIYA, KORNYTSKA LARYSA, RASTORHUIEVA MARIIA</b> STUDY OF THE RANGE AND TECHNOLOGICAL FEATURES OF THE DERUFA DECODER SERIES FOR WALL DECORATION IN A MODERN INTERIOR .....	145
<b>ONYSHCHUK OKSANA</b> TO THE STUDY OF THE FLOCCULATION AND COAGULATION PROCESS IN THE PURIFICATION OF WATER FOR INDUSTRIAL APPLICATION .....	151
<b>PAZDRIY IHOR</b> COMPARATIVE ANALYSIS OF SOFTWARE DEVELOPMENT SYSTEMS BASED ON FRAMEWORKS .....	155
<b>PEDYASH VOLODYMYR</b> MATHEMATICAL MODELING OF FIBER-OPTIC TRANSMISSION SYSTEM WITH INTENSITY MODULATION	162
<b>PEDYASH VOLODYMYR</b> INVESTIGATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF OPTICAL FIBER .....	167
<b>POTAPOVA NADIIA, VOLONTYR LUDMILA</b> MODELING METHOD IN STOCK MANAGEMENT HIERARCHICAL LOGISTICS SYSTEMS .....	174
<b>RYMAR TATYANA</b> RESEARCH OF THE TECHNOLOGICAL MODE OF THE PROCESS OF PORIZATION OF LIQUID GLASS COMPOSITE MATERIALS FOR THERMAL INSULATION IN THE CONDITIONS OF UHF RADIATION .....	181
<b>SYNYUK OLEG, KRAVCHUK OLGA, KRAVCHUK ANDRII, MAGDIN VICTOR, ZOLOTENKO IVAN</b> MODEL OF PLASTIC DEFORMATION OF POLYMER MATERIAL .....	186
<b>SLAVINSKA ALLA, SYROTENKO OKSANA</b> ANALYSIS OF MODERN SPREADING EQUIPMENT APPLIED IN THE SEWING INDUSTRY .....	196
<b>SOKIL MARIIA, ZVORSKYI ANDRII</b> MODERN ELECTRONIC SERVICES OF THE LIBRARY TO SUPPORT EDUCATIONAL AND SCIENTIFIC .....	205
<b>STRELBITSKIY VICTOR</b> EVALUATION OF THE RELIABILITY OF «GANZ» PORTAL CRANE MECHANISMS .....	209
<b>CHYHIN VASYL, PAZYNIUK MYKHAILO, TEREHDII OLHA, MENSNIKOV OLEKSII</b> CONTROLLING THE OPERATION OF THE REMOTE DEVICE USING FLASK PYTHON SERVER .....	214
<b>SHCHERBAN VOLODYMYR, KOLVA NIKITA, EGOROV DMITRIJ, KOLISKO OKSANA, SHCHERBAN YURYJ</b> DEVELOPMENT OF A COMPUTER MODULE FOR KINEMATIC AND DYNAMIC ANALYSIS OF IMPORTANT MECHANISMS OF LIGHT INDUSTRIAL MACHINES, PROGRAMS FOR ASSESSING THE TENSION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES .....	220
<b>KOZUB YURII, KOZUB HALYNA</b> FEATURES OF MULTIPLATFORM APPLICATION DEVELOPMENT ON KOTLIN .....	224

---

<b>RUTKEVYCH VOLODYMYR, DIDYK ANDRII</b> OVERVIEW OF METHODS AND TOOLS FOR DRYING WALNUTS IN THE SHELL .....	230
<b>OSADCHUK IAROSLAV</b> MICROELECTRONIC AUTOGENERATOR TEMPERATURE SENSORS .....	237
<b>SYNKO ANNA</b> RESEARCH OF STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF MEAT AS AN OBJECT OF PROCESSING IN MEAT COMMINUTOR .....	248
<b>DAVYDENKO LIUDMYLA, DAVYDENKO VOLODYMYR</b> ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS IN THE LOW-VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORK OF AN INDUSTRIAL ENTERPRISE .....	253
<b>PRAVORSKA NATALYA</b> CONVENIENT SOFTWARE FOR BUSINESS WITH THE POSSIBILITY OF ADAPTATION TO MARKET REQUIREMENTS .....	257
<b>HOLENKO KOSTYANTYN, MAKOVKIN OLEG, POSONSKYI SERGII</b> BOUNDARY CONDITIONS FORMATION OF THE STRESS-STRAIN STATE ANALYSIS OF CITY BUS BODIES .....	263
<b>KRYVENCHUK YURI, OLESKEVYCH SOFIIA</b> CREATION OF CARIES DETECTION SYSTEM .....	271
<b>KRYVENCHUK YURI, HORISHNA NADIIA</b> CREATION OF SALARY PREDICTION SYSTEM .....	276
<b>ZASORNOVA IRYNA, ZASORNOV ALEXANDER, MAZNEV IEVGEN, SARANA OLEKSANDR</b> ANALYTICAL REVIEW OF INFORMATION FOR TESTING THE OPEN PARAMETRIC SYSTEM OF AUTOMATED PROJECTION «VALENTINA» .....	280
<b>MIHAILOVA NINA, PRIVALA VALERII, LUSHCHEVSKA OLENA</b> STUDY OF THE INFLUENCE OF LOW TEMPERATURES ON MATERIALS WITH A SPECIAL PURPOSE POLYMER COATING UNDER STATIC CONDITIONS .....	289
<b>MOKIIENKO ANDRII, SPASONOVA LARYSA, BONDARCHUK OLEKSANDR</b> ANALYSIS OF METHODS FOR DETERMINATION OF CHLORINE DIOXIDE, CHLORITE AND CHLORATE ANIONS IN DRINKING WATER .....	294
<b>LYSENKO SERGII, ATAMANIUK OLGA, BOKHONKO OLEKSANDR, VOROBIIYOV VOLODYMYR</b> METHOD FOR DETECTION OF RANSOMWARE CYBER THREATS BASED ON HONEYPOT: STATE-OF-ART .....	300



<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-9-17>

UDC 637.5.02

DUBAS Yurii

Lviv Polytechnic National University

<https://orcid.org/0000-0002-9847-7661>e-mail: [blabla304@gmail.com](mailto:blabla304@gmail.com)

KUNANETS Nataliia

Lviv Polytechnic National University

<https://orcid.org/0000-0003-3007-2462>e-mail: [nek.lviv@gmail.com](mailto: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. Levenshtein'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

Національний університет «Львівська політехніка»

КУНАНЕЦЬ Наталія

Національний університет «Львівська політехніка»

## ВИКОРИСТАННЯ ОНТОЛОГІЇ В ІНФОРМАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ ДЛЯ ДОПОМОГИ У ФОРМУВАННІ ІНДИВІДУАЛЬНОЇ ОСВІТНЬОЇ ТРАЄКТОРІЇ СТУДЕНТІВ

*У цій роботі розглядається проблема індивідуальної освітньої траєкторії в Україні. Під час дослідження було виявлено, що це питання розглядається переважно з теоретичного аспекту, що призводить до відсутності ефективних та зручних інструментів для практичної реалізації вирішення проблеми. Проведено аналіз існуючих методів і засобів вирішення проблеми. Результати аналізу свідчать про те, що впроваджені інформаційні системи частково задовольняють потреби студентів у формуванні індивідуальної траєкторії.*

*Мета. Розробити модель інформаційної системи для формування індивідуальної освітньої траєкторії студентів вищих навчальних закладів з урахуванням потреб провідних ІТ-компаній та нахилів студентів. Допомога студентам у формуванні ІЕТ базується на наборі рекомендацій, сформованих на основі вподобань студентів.*

*метод. Для вирішення поставленої задачі розроблено модель інформаційної системи, яка використовує для роботи два основних модулі. Перший модуль дозволяє користувачеві пройти профорієнтаційний тест, а другий модуль забезпечує семантичний алгоритм визначення дисциплін, які найкраще підходять користувачеві з урахуванням його професійних нахилів. В якості семантичного алгоритму обрано алгоритм Левенштейна з використанням онтології.*

*Результати. У ході дослідження розроблено інформаційну систему, яка дозволяє студентам отримувати рекомендації щодо формування індивідуальної освітньої траєкторії. Проведені експерименти з випадковими вхідними даними показали, що система повністю працездатна і виконує поставлене завдання. Усі робочі аспекти системи представлені в цій роботі за допомогою діаграм UML.*

*Висновки. Формування рекомендацій щодо індивідуальної освітньої траєкторії – складний процес, що потребує значних ресурсів. Використання інформаційних технологій дозволяє спростити цей процес, а розробка інформаційної системи – автоматизувати його та зробити доступним. Впровадження моделі інформаційної системи дозволило зрозуміти всі тонкощі процесу формування рекомендацій та забезпечити їх точність. Функціонування інформаційної системи забезпечувалося використанням двох модулів визначення професійної спрямованості користувача та пошуку відповідної дисципліни. Процес пошуку дисципліни, яка відповідатиме професійним ухилам користувача, базується на роботі із семантикою, для чого*

використовувалася онтологія. Використання онтології в процесі визначення семантичної близькості за допомогою алгоритму Левенштейна дозволило отримати семантичні одиниці, які максимально наближені до професійних нахилів студента та забезпечують максимально точний результат при формулюванні рекомендацій.

*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

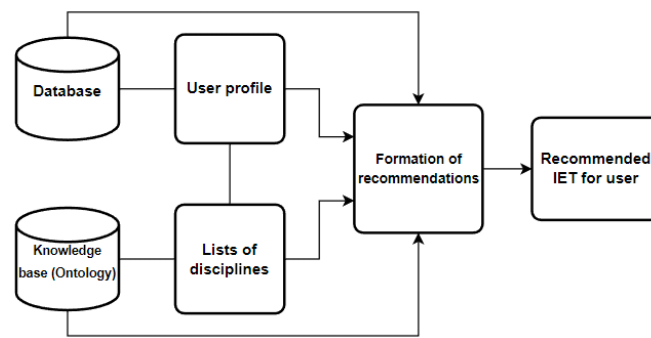


Fig. 1. General scheme of information system architecture

The corresponding model of the IS can be presented in the form of a three-element tuple:

$$S = \{A, V, R\}, \tag{1}$$

where  $A = a_1, a_2, \dots, a_n$  – 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;  $V = v_1, v_2, \dots, v_n$  – set of properties of agents,  $R = r_1, r_2, \dots, r_n$  – 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.

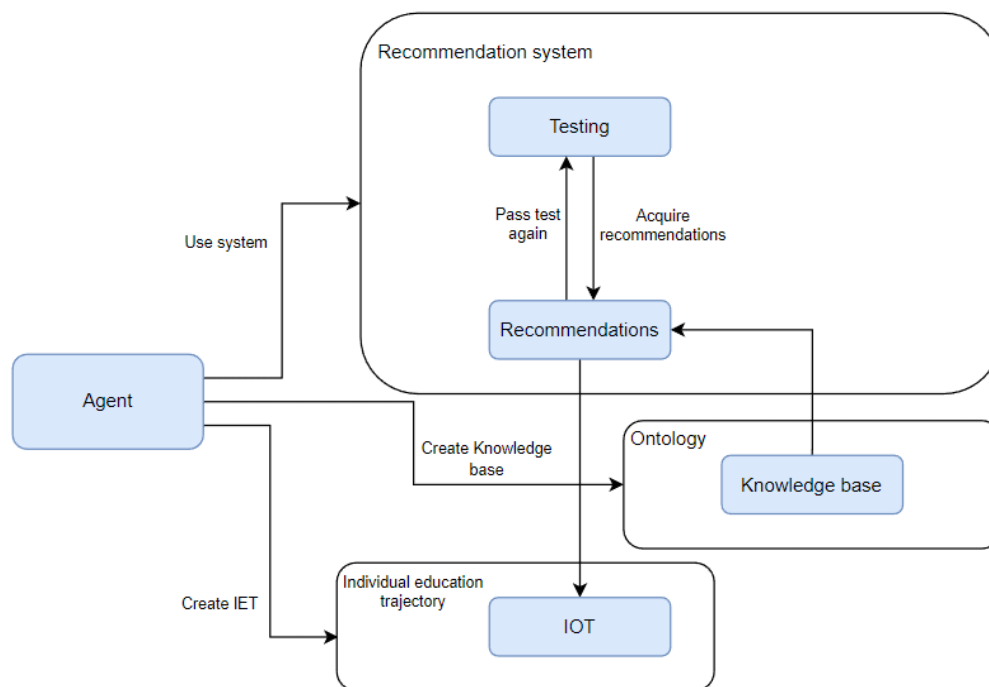


Fig. 2. State transition graph of IS agents

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.

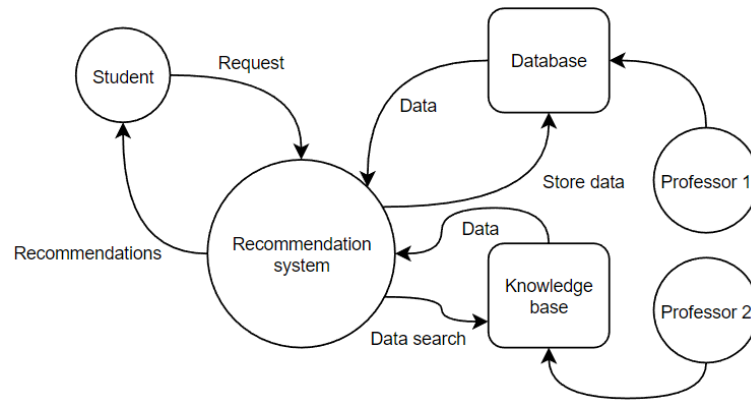


Fig. 3. Interaction of agents in the IS

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

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].

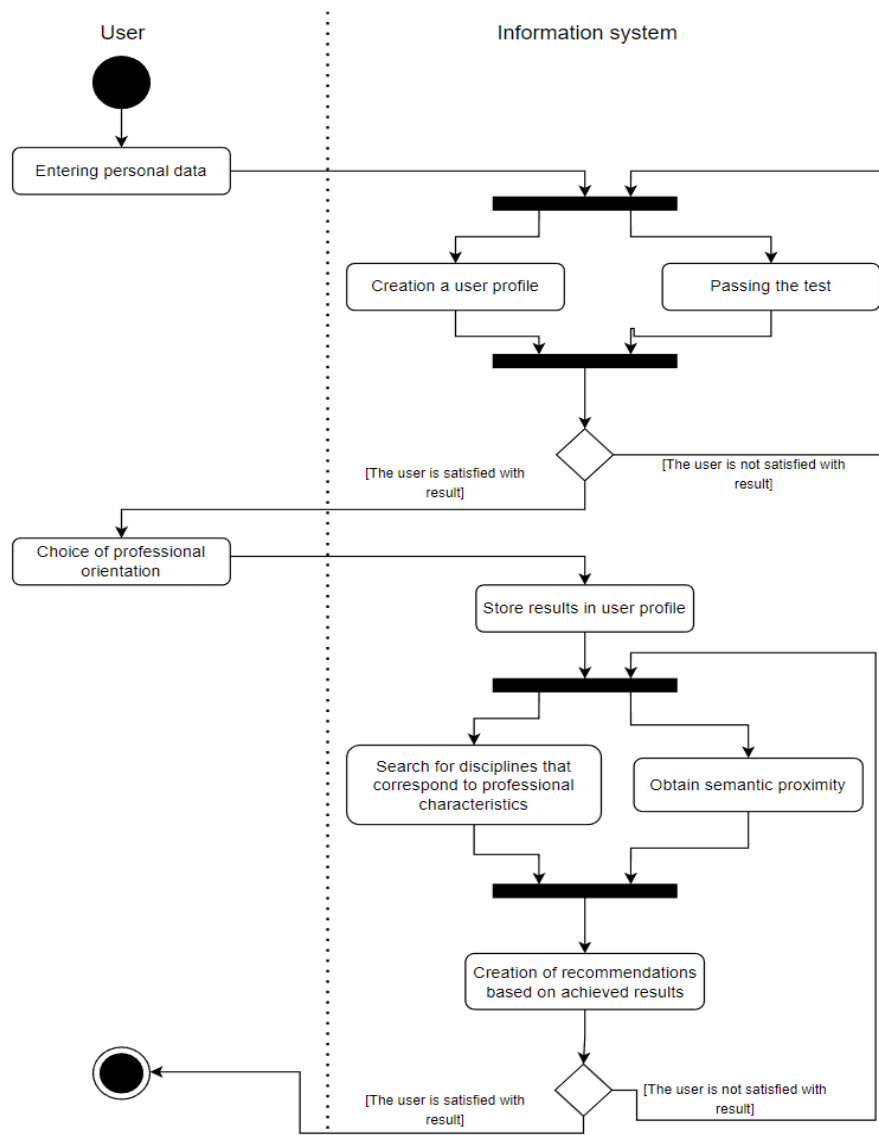


Fig. 4. Activity diagram of IS

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.

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 [9].

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:

$$O = \{B, C, X\}, \quad (2)$$

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 [10] 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  $P = p_1, p_2, \dots, p_n$ , 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  $p = c_1, c_2, \dots, c_n$ , where  $C$  is a concept that describe profession.

We conduct similar preparation with the ontology: the set  $OP = op_1, op_2, \dots, op_n$ , 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  $D = d_1, d_2, \dots, d_n$ , 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  $P$  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.

#### References

1. Law of Ukraine "On Education" dated 05.09.2017 No 2145-VIII. URL: [http:// zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2145-19](http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2145-19).
2. Lyubovych A.A., Yesina O.G. Modern information technologies in education. Informatics and information technologies: stud. Sc. Conf., April 20, 2015: mater. Conf. – Odesa, ONEU. – P. 118-120.
3. (PDF) Information system for forming individual educational trajectory of students. URL: [https://www.researchgate.net/publication/354577447\\_Information\\_System\\_for\\_the\\_Formation\\_of\\_Students'\\_Individual\\_Educational\\_Trajectory](https://www.researchgate.net/publication/354577447_Information_System_for_the_Formation_of_Students'_Individual_Educational_Trajectory).
4. (PDF) The information support system of the process of forming the individual educational trajectory of students. URL: <https://journal.iitta.gov.ua/index.php/itlt/article/view/1390/1062>.
5. (PDF) System of recommendation of educational materials for personalization of educational path. 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. Questionnaire of professional inclinations of L. Yovaisha. URL: <http://prevolio.com/tests/>.
9. Gruber T. A translation approach to portable ontologies. Knowledge Acquisition. 1993. № 5 (2). P. 199–220.
10. Wikipedia. Levenstein distance. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Відстань\\_Левенштейна](https://uk.wikipedia.org/wiki/Відстань_Левенштейна)

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-18-20>

УДК 621.311

**БАБЕНКО Олексій**

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0003-2773-6571>

e-mail: [oleksij\\_babenko@ukr.net](mailto:oleksij_babenko@ukr.net)

**КУТІНА Марина**

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7185-6795>

e-mail: [mkytina@gmail.com](mailto:mkytina@gmail.com)

**ПРОЦЕНКО Людмила**

Вінницький національний технічний університет

e-mail: [milaarnaut99@gmail.com](mailto:milaarnaut99@gmail.com)

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК НА ПІДПРИЄМСТВАХ АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

*Питання енергозбереження постає дедалі актуальнішим, враховуючи руйнування генеруючих об'єктів електроенергетики. Оскільки Україна має потужний промисловий сільськогосподарський комплекс, його частка у ВВП становить близько 10% та щорічно зростає, актуальною задачею є аналіз доцільності застосування біогазових установок на підприємствах тваринництва, агропереробки та міських відходів.*

*В статті проведено дослідження обсягів відходів підприємств агропромислового комплексу та їх енергоємності, які можуть бути використані в якості сировини для виготовлення біогазу. Результати дослідження показали, що Україна має перспективи для розвитку біогазової енергетики, виходячи з потужного аграрного сектору. Застосування біогазових установок дозволить забезпечувати електричною енергією, теплом та гарячою водою підприємства аграрного комплексу, знизить навантаження на традиційні джерела енергії.*

*Ключові слова: енергозбереження, біогазові установки, біомаса, енергоефективність підприємств агропромислового комплексу.*

BABENKO Oleksiy, KUTINA Maryna, PROTSENKO Lyudmila  
Vinnytsia National Technical University

## STUDY OF THE EFFICIENCY OF THE APPLICATION OF BIOGAS INSTALLATIONS AT ENTERPRISES OF THE AGRICULTURAL COMPLEX

*The issue of energy saving is becoming more and more urgent, taking into account the destruction of power generating facilities. One of the energy saving options is the use of alternative energy sources. This is not only an economic benefit for consumers, but also a reduction in the load on electrical networks and maintenance of the reliability of the power system due to the decentralization of electricity generation in wartime conditions. Alternative sources of electricity include energy from the sun, wind, seas, rivers, biomass, and Earth's heat. At the same time, their effectiveness depends on many factors. Since Ukraine has a powerful industrial agricultural complex, its share in GDP is about 10% and its share is growing annually, therefore, an urgent task is to analyze the feasibility of using biogas plants at livestock, agro-processing and municipal waste enterprises. We should not forget about the environmental friendliness of electricity production using biogas plants, which will ensure the preservation of the environment, and therefore the health of descendants. Enterprises of the agro-industrial complex for the production of products require significant amounts of electrical energy, along with this, the waste of the activities of such enterprises is sewage and organic waste in landfills, from which biomass can be obtained. Biomass, in turn, is the raw material for the production of biogas, which is needed by biogas plants to generate electrical energy. Analysis of the amount of waste from agro-industrial complex enterprises, which can be used as raw materials for the production of biogas, showed that Ukraine has prospects for the development of biogas energy, based on a powerful agricultural sector. The use of biogas plants will provide electricity, heat and hot water to enterprises of the agrarian complex, and will reduce the load on traditional energy sources.*

*Key words: energy saving, biogas plants, biomass, energy efficiency of enterprises of the agro-industrial complex.*

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

На даний час, питання енергозбереження постає дедалі актуальнішим, враховуючи руйнування генеруючих об'єктів електроенергетики. До одного із варіантів енергозбереження можна віднести використання альтернативних джерел енергії. Це не лише економічна вигода для споживачів, а й зменшення навантаження на електричні мережі та підтримка надійності роботи енергосистеми за рахунок розосередження генерації електроенергії в умовах війни. Не варто забувати про екологічність такого способу виробництва електроенергії, що забезпечить збереження довкілля, а отже і здоров'я нащадків. До альтернативних джерел електроенергії відносять енергію сонця, вітру, морів, річок, біомаси, теплоти Землі. В той же час їх ефективність використання залежить від багатьох чинників.

Підприємства агропромислового комплексу для виготовлення продукції потребують значних обсягів електричної енергії [1], разом з цими відходами діяльності таких підприємств є стічні води та органічні відходи на сміттєвих полігонах, з яких можна отримувати біомасу. Біомаса, в свою чергу, складає сировину для виготовлення біогазу, який потребують біогазові установки для вироблення електричних енергії.

Оскільки Україна має потужний промисловий сільськогосподарський комплекс (частка у ВВП майже 10%) [2] та щорічна його частка зростає, актуальною задачею є аналіз обсягів відходів підприємств

агропромислового комплексу, які можуть бути використані в якості сировини для виготовлення біогазу та їх енергоефективність.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

В роботі проаналізовані роботи присвячені ефективності застосування різних типів первинної сировини. Розглянуті сучасні технології виробництва електричної енергії з відходів [4, 5]. Взято до уваги розрахунки, присвячені потенціалу забезпечення первинною сировиною [2].

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є дослідження доцільності застосування біогазових установок на підприємствах тваринництва, агропереробки та міських відходів України.

### Виклад основного матеріалу

Для розв'язання задачі визначимо, що таке біогаз. Біогаз є сумішшю метану (60–70%), CO<sub>2</sub> та невеликих кількостей інших газів [3–5]. Біогаз можна використовувати для отримання електроенергії та для задоволення потреб в опаленні чи приготуванні їжі.

У спеціальній біогазовій установці, піддавши процесу ферментації органічну речовину, можна отримати біогаз. Завдяки процесу бродіння утворюється газоподібний метан, горючий газ. Його спочатку очищують від сторонніх газів, а далі перетворюють на енергетичні джерела відповідно до потреб. Вироблення газу спочатку є достатньо інтенсивним, але в міру зростання тривалості бродіння інтенсивність зменшується. У результаті настає такий момент, коли подальше перебування біомаси в ферментаторі буде недоцільно з економічної точки зору. У когенераціях відбувається спалювання біогазу, що дозволяє вивільнити енергію, яка була збережена у біомасі. Вироблена енергія підходить для виробництва теплової та електричної енергії.

Біогаз має великий потенціал, оскільки є гнучким та універсальним. Це проявляється у тому, що його можна подавати у мережу природного газу і застосовувати для опалення та подачі електричної енергії промисловим підприємствам. Сировина для біогазу практично безкоштовна та майже невичерпна. В середньому від однієї корови можна отримати близько 6 тонн навозу в рік, від свині – близько 1 тонни в рік [5]. При переробці 25 тонн навозу за добу можна отримати 2500 м<sup>3</sup> метановмісного газу (70%). Теплова енергія біогазу коливається в межах від 11 до 15000 кДж/м<sup>3</sup> залежно від вмісту метану. Результатом такої переробки є не лише біогаз, а і біогумус – чудове добриво. Технологія виробництва біогазу зображена на рисунку 1.

Первинне бродіння відбувається в первинному біогазовому реакторі, температура в ньому становить 35-40 °С [3–5]. Суміш для бродіння переміщується електричними перемішувачами до однорідності. Подальше бродіння відбувається у вторинному реакторі, який під'єднаний до газової мережі установки. В результаті наддуву невеликої кількості повітря в реакторі відбувається очищення біогазу від сернистих з'єднань. Таким чином мікроорганізми окислюють газоподібний сірководень (H<sub>2</sub>S) в сірку [4, 5].

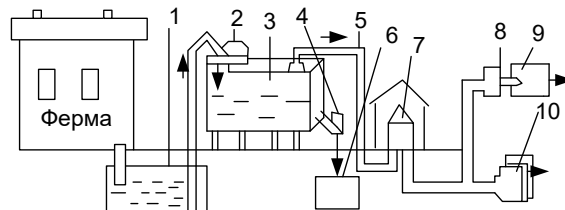


Рис. 1. Схема отримання біогазу з відходів тваринництва. 1 - сміття для відходів життєдіяльності тварин; 2 - насос; 3 - біогазовий реактор; 4 - зневоднені відходи; 5 - біогаз; 6 - накопичувач; 7 - сховище біогазу; 8 - газова грілка; 9 - котел; 10 - газодизель з електрогенератором

Застосування біогазової установки (БГУ) є ефективним, коли величина коефіцієнта відтворення енергії установки є більше ніж одиниця. Коефіцієнт відтворення знаходимо за формулою:

$$\pi^{be} = q^{be1} / q^{ze1} \quad (1)$$

де  $q^{be1}$  – питома теплота, отримана від біогазу, Дж/рік;

$q^{ze1}$  – реальні витрати первинної теплоти для виробництва біогазу, Дж/рік.

Вихід метану залежно від урожайності та виду сировини при використанні зеленої маси, показано на рисунку 2.

Тобто при середній урожайності 10 т/га та об'ємі метану в 300 м<sup>3</sup>/т буде вироблено 3000 м<sup>3</sup> метану. При урожайності 15 т/га, вихід метану складає 450 м<sup>3</sup>/т. При середній енергетичній

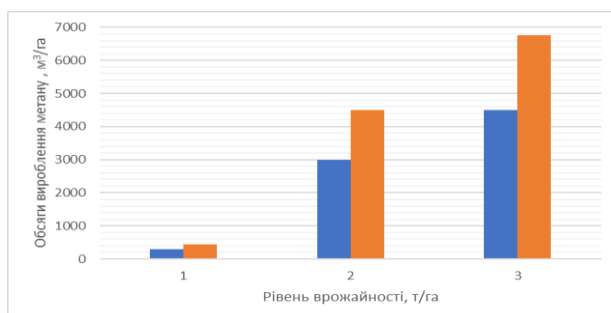


Рис. 2. Обсяги вироблення метану м<sup>3</sup>/га залежно від врожайності та виходу метану. 1 – Вихід метану CH<sub>4</sub> на тонну сировини (синім кольором показано низький рівень виходу метану, помаранчевим – високий); 2 - ті ж показники, що й 1 для урожайності 10 т/га; 3 - ті ж показники, що й 1 для урожайності 15 т/га

цінності метану 10 кВт\*год/м<sup>3</sup> з такого газу можна отримати 30 000–67 500 кВт\*год/га. При ККД 30% (електричному) та ККД в 55% (тепловому) для установки з газовим двигуном можна отримати 10 000–25 250 кВт\*год теплової енергії.

В тваринництві та птахівництві України біовідходи складають біля 120\*106 т/рік, з яких отримують 12 млрд м<sup>3</sup> біогазу і 20 млн тонн біодобрив.

Енергетичний потенціал зеленої маси в Україні 2021 році складав для зернових культур 3,6; кукурудза 1,4; соняшник 2,5 мільйони тонн умовного палива/рік. Таким чином біогазові резерви України становлять близько 14 мільярди м<sup>3</sup>/рік, тобто 23% річних потреб України в газі.

Ще одна з переваг біогазу те, що його можна зберігати та накопичувати і це надає великий плюс цьому джерелу енергії порівняно з сонячною чи вітровою.

Отже, біогазові установки являють собою підприємства з переробки сільськогосподарських, промислових та муніципальних відходів. Їх розвиток робить великий вклад в екологічну безпеку країни.

До речі, в Україні є досвід створення біогазових комплексів. Прикладом цього є створений біогазовий комплекс агроіндустріального холдингу МХП.

### **Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі**

Проаналізувавши обсяги відходів підприємств агропромислового комплексу, які можуть бути використані в якості сировини для виготовлення біогазу та їх енергоефективність можна зробити висновок, що Україна має перспективи для розвитку біогазової енергетики, виходячи з потужного аграрного сектору. Застосування біогазових установок дозволить забезпечувати електричною енергією, теплом та гарячою водою підприємства аграрного комплексу, знизить навантаження на традиційні джерела енергії.

### **Література**

1. Попов В. А., Ткаченко В. В., Яромлюк О. С. Проектування систем забезпечення споживачів електричною енергією : навч. посіб. для студ. Спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітніх програм «Системи забезпечення споживачів електричною енергією» та «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові дані (1 файл: 14,5 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 222 с. <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/44192/1/Projektuvannia.pdf>
2. Павлова Г. Є. Особливості аграрного сектора в національній економіці. Ефективна економіка, № 2, 2014. <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=2729>
3. Klark D. L. Biomass for Renewable Energy – Academic Press, NY (1989). 651 p.
4. Renewable energy sources in figures. National and International Development, 2019, 85 p.
5. Krasnyansky M. Energy for Sustainable Development – International Review of Chemical Engineering, 2, N. 4 (2010). p. 539–549.

### **References**

1. Popov V. A., Tkachenko V. V., Yarmoliuk O. S. Projektuvannia system zabezpechennia spozhyvachiv elektrychnoiu enerhiieiu : navch. posib. dlia stud. Spetsialnosti 141 «Elektroenerhetyka, elektrotehnika ta elektromekhanika», osvitynih prohram «Systemy zabezpechennia spozhyvachiv elektrychnoiu enerhiieiu» ta «Enerhetychnyi menedzhment ta enerhoeffektyvni tekhnolohii» / KPI im. Ihoria Sikorskoho. Elektronni tekstovi dani (1 fail: 14,5 Mбайт). Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2021. 222 s. <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/44192/1/Projektuvannia.pdf>
2. Pavlova H. Ye. Osoblyvosti ahromoho sektora v natsionalnii ekonomitsi. Efektyvna ekonomika, № 2, 2014. <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=2729>
3. Klark D. L. Biomass for Renewable Energy – Academic Press, NY (1989). 651 p.
4. Renewable energy sources in figures. National and International Development, 2019, 85 r.
5. Krasnyansky M. Energy for Sustainable Development – International Review of Chemical Engineering, 2, N. 4 (2010). p. 539–549.

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-21-25>

УДК 621.391

**БОРТНИК Геннадій**

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7083-2775>e-mail: [bgen88@gmail.com](mailto:bgen88@gmail.com)**БОРТНИК Олександр**

Вінницький національний технічний університет

e-mail: [alex.bortnik.it@gmail.com](mailto:alex.bortnik.it@gmail.com)**КИРИЛЮК Сергій**

Вінницький національний технічний університет

e-mail: [kso1996.08@gmail.com](mailto:kso1996.08@gmail.com)

## СПЕКТРАЛЬНО-КОВАРІАЦІЙНИЙ МЕТОД КЛАСИФІКАЦІЇ РАДІОСИГНАЛІВ

У роботі запропоновано високоефективний метод класифікації радіосигналів на базі спектрально-коваріаційного оцінювання сигналів. При цьому здійснюється багаторічне оброблення перекривних підпоследовностей відліків досліджуваного радіосигналу у часовій і частотній області. Пропонується здійснювати оцінку параметрів радіосигналу на базі знайденої спектральної густини потужності досліджуваного сигналу.

Аналіз ефективності запропонованого методу підтвердив, що завдяки розробленому методу вдається підвищити продуктивність спектрально-коваріаційного оцінювання радіосигналів у 2,0÷8,9 разів залежно від обсягу аналізованої реалізації радіосигналу та числа перекривних підпоследовностей. Максимальний коефіцієнт продуктивності досягається за умови, коли початкова реалізація радіосигналу розбивається на 64 перекривні підпоследовності.

Ключові слова: спектральна густина потужності, швидке перетворення Фур'є, радіосигнали, продуктивність.

BORTNYK Gennadiy, BORTNYK Olexand, KYRYLYUK Sergiy

Vinnytsia National Technical University

## SPECTRAL-COVARIATION METHOD OF CLASSIFICATION OF RADIO SIGNALS

The paper proposes a high-performance method of radiosignal classification based on spectral-covariance evaluation of signals. At the same time, multi-stage processing of overlapping subsequences of readings of the investigated radiosignal in the time and frequency domain is carried out. At the first stage, it is proposed to evaluate the parameters of the radiosignal based on the found power spectral density of the investigated signal.

To determine the spectral density of the radiosignal, subsequences of readings obtained from the array of input readings of the investigated signal are formed. The maximum shift between two adjacent subsequences is chosen, that is, the initial realization of the signal is presented in the form of overlapping subsequences. Taking into account that two adjacent subsequences have part of common processed readings, the paper proposes an expression that for each new subsequence of input readings would take into account the coefficients of the discrete Fourier transform, which were determined for the previous subsequence of the input signal. During the following stages, the shape of the spectrum of the analyzed radiosignal is compared with the spectrum samples specified by the operator of the radiocontrol system. Comparison of the spectrum of the investigated radiosignal and the spectral mask is based on the determined correlation coefficient.

The approximation of the value of the correlation coefficient to unity characterizes the degree of linear relationship between the spectrum of the signal and the mask. This makes it possible to determine the type and positions of radiochannels based on the obtained sequence of correlation coefficient values for different shifts of the spectral mask.

The analysis of the effectiveness of the proposed method confirmed that thanks to the developed method, it is possible to increase the productivity of the spectral-covariance evaluation of radio signals by 2.0÷8.9 times, depending on the volume of the analyzed implementation of the radiosignal and the number of overlapping subsequences. The maximum performance factor is achieved when the initial implementation of the radiosignal is divided into 64 overlapping subsequences. The proposed method can be used in automated radiotechnical control systems to monitor the radiosituation in real time.

Keywords: power spectral density, fast Fourier transform, radiosignals, productivity.

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

Особливістю теперішнього періоду є різке збільшення використання технологій радіозв'язку. Слід відмітити ряд чинників, що пов'язані з ускладненням радіоелектронної обстановки, а саме: застосування великого числа радіозасобів в обмеженому просторі, значне підвищення швидкості передачі інформації, використання цифрових пакетних радіосигналів, нерівномірний часовий розподіл роботи радіозасобів.

За таких умов зростає важливість виявлення випадків несанкційованого використання радіочастотного спектра та контролю відповідності параметрів реєструємих радіосигналів базі даних частотно-територіального плану. Такі задачі розв'язуються за допомогою автоматизованих систем радіоконтролю. При цьому однією з найбільш складних задач є класифікація радіосигналів та визначення їх приналежності до певного стандарту зв'язку. Сучасні засоби радіоконтролю функціонують на базі методів цифрового оброблення сигналів (ЦОС). На практиці виникає необхідність використання методів ЦОС у реальному масштабі часу. Проблематика ЦОС у реальному часі зумовлена обмеженою швидкодією програмно-апаратних засобів радіоконтролю [1].

Традиційний метод вирішення такої проблеми вимагає наявності потужних обчислювальних засобів, які здатні реалізовувати алгоритми ЦОС з високою швидкістю. Але реалізація такого підходу

обмежує частотний діапазон аналізованих радіосигналів [2]. Тому, незважаючи на певні результати, досягнуті при застосуванні методів ЦОС, питання підвищення продуктивності засобів радіоконтролю для класифікації радіосигналів у реальному масштабі часу, як і раніше, залишається актуальним.

### Аналіз досліджень та публікацій

Реальні показники засобів радіоконтролю не досягають своїх потенційно теоретичних можливостей внаслідок низької продуктивності методів ЦОС і це відображено у відповідних публікаціях [2, 3]. Для класифікації радіосигналів у спектральній області використовують процедури дискретного перетворення Фур'є (ДПФ). Запропоновано ряд способів швидкого визначення ДПФ, що дозволяють знизити обсяг обчислень порівняно з безпосереднім використанням ДПФ. Такі способи базуються на реалізації алгоритмів швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Але, як показали дослідження, резерв підвищення продуктивності методів ЦОС в засобах радіоконтролю існує [4].

Судячи з останніх публікацій [2–6], не дивлячись на багату передісторію використання методів ЦОС у системах радіоконтролю, розробка певних аспектів цифрового оброблення радіосигналів продовжується зараз і не може вважатись цілком завершеною.

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є підвищення продуктивності процесу класифікації радіосигналів за рахунок зменшення числа операцій при реалізації алгоритмів спектрально-коваріаційного оцінювання радіосигналів.

### Виклад основного матеріалу

Процес класифікації радіосигналів при виконанні радіоконтролю виконується за декілька етапів. На першому етапі пропонується здійснювати оцінку параметрів радіосигналу на базі знайденої спектральної густини потужності досліджуваного сигналу. Протягом наступних етапів виконується зіставлення форми спектра радіосигналу, що аналізується, зі зразками спектрів, що задаються оператором системи радіоконтролю.

Вираз для обчислення ДПФ заданої вибірки радіосигналу у часовій області  $x(n)$  довжиною  $N$ , де  $n = 0, 1, \dots, N-1$ , має такий вигляд [7]

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk}, \quad (1)$$

де  $W_N = e^{-j(2\pi/N)}$  – повертальні множники ДПФ.

Для визначення спектральної густини радіосигналу необхідно відповідним чином сформувати підпоследовності відліків, що отримані з масиву вхідних відліків досліджуваного сигналу. Обирається максимальний зсув між двома сусідніми підпоследовностями, тобто початкова реалізація сигналу представляється у вигляді перекривних підпоследовностей. При цьому зсув між двома сусідніми підпоследовностями менший довжини всієї реалізації. Потім в існуючих методах спектрального оцінювання виконується визначення коефіцієнтів ДПФ згідно з виразом (1) шляхом повторення ШПФ для кожної підпоследовності вхідної реалізації.

Враховуючи те, що дві сусідні підпоследовності мають частину спільних оброблюваних відліків, в роботі пропонується знайти вираз, який для кожної нової підпоследовності вхідних відліків враховував би коефіцієнти ДПФ, що були визначені для попередньої підпоследовності вхідного сигналу.

ДПФ першої підпоследовності  $X_1(k)$  довжиною  $N$  вхідних відліків знаходиться за виразом (1). На базі відомого ДПФ (1) необхідно знайти ДПФ нової підпоследовності, що отримана шляхом подовження початкової підпоследовності на  $m$  відліків справа та вилученням її перших відліків. ДПФ сформованої таким чином підпоследовності можна знайти за виразом

$$X_2(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n+m) \cdot W_N^{nk}. \quad (2)$$

У виразі (2) потрібно домножити кожен доданок на повертальний множник  $W_N^{mk}$ , а всю суму для того, щоб вона залишилась незмінною, необхідно домножити на  $W_N^{-mk}$ :

$$X_2(k) = \left[ \sum_{n=0}^{N-1} x(n+m) \cdot W_N^{k(n+m)} \right] \cdot W_N^{-mk}. \quad (3)$$

Аналізуючи вираз (3) можна стверджувати, що у квадратних дужках виразу знаходиться та ж сума, що й у правій частині виразу (1). Враховуючи це, а також взявши до уваги властивість періодичності повертальних множників ДПФ, вираз для знаходження  $X_2(k)$  можна представити у наступному вигляді

$$X_2(k) = \left\{ X_1(k) + \sum_{n=0}^{m-1} [x(N+m) - x(n)] \cdot W_N^{nk} \right\} \cdot W_N^{-mk}. \quad (4)$$

В результаті отримано рекурентний вираз для визначення ДПФ підпоследовності, в якій обновляється  $m$  відліків. Цей вираз у загальному випадку для знаходження ДПФ  $r$ -підпоследовності можна записати таким чином

$$X_r(k) = \left\{ X_{r-1}(k) + \sum_{n=0}^{m-1} [x_r(n) - x_{r-1}(n)] \cdot W_N^{nk} \right\} \cdot W_N^{-mk}. \quad (5)$$

Наступним етапом оброблення є знаходження оцінки взаємної спектральної густини потужності:

$$\hat{S}_{XY}(k) = \frac{1}{K} \sum_{r=0}^{K-1} X_r(k) \cdot Y_r^*(k), \quad (6)$$

де  $Y_r^*(k)$  – комплексно-спряжене значення ДПФ спектральної маски;

$K$  – кількість оброблювальних підпоследовностей.

Слід зазначити, що статистична стійкість спектрального оцінювання радіосигналів згідно (6) буде покращуватись зі збільшенням кількості оброблювальних підпоследовностей  $K$ .

На завершальному етапі потрібно здійснити оцінювання взаємної коваріаційної функції шляхом виконання зворотного ДПФ послідовності  $\hat{S}_{XY}(k)$ :

$$\hat{R}_{XY}(m) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \hat{S}_{XY}(k) \cdot e^{j \frac{2\pi km}{N}}. \quad (7)$$

У виразі (7) використовується прямокутне вагове вікно, тобто  $\omega(m) = 1$ . Для зменшення дисперсії оцінки коваріаційної функції необхідно здійснити подальше оброблення за допомогою кореляційного вікна. Тобто, оцінка  $\hat{R}_{XY}(m)$  зважується за допомогою кореляційної віконної функції  $\omega_c(m)$ . У результаті отримуємо зважену коваріаційну оцінку

$$\hat{R}_{(XY)\omega}(m) = \hat{R}_{XY}(m) \cdot \omega_c(m). \quad (8)$$

Кореляційне зважування дозволяє керувати рівнем бічних паразитних пелюсток спектра потужності досліджуваного радіосигналу. Зіставлення спектра досліджуваного радіосигналу та спектральної маски базується на визначенні коефіцієнта кореляції

$$\rho_{xy}(m) = \frac{\hat{R}_{(XY)\omega}(m)}{\sigma_S \cdot \sigma_M}, \quad (9)$$

де  $\sigma_S$ ,  $\sigma_M$  – значення середньоквадратичного відхилення досліджуваного сигналу та маски.

Наближення значення коефіцієнта кореляції до одиниці характеризує ступінь лінійного взаємозв'язку спектра сигналу та маски. Це дозволяє за отриманою послідовністю значень коефіцієнта кореляції для різних зсувів спектральної маски визначити тип та позиції радіоканалів. Водночас існує ймовірність випадкової збіжності вузької спектральної маски з фрагментом спотвореного спектра широкосмугового сигналу. Для усунення таких помилок необхідно виконувати розрахунок коефіцієнта кореляції згідно (9) для набору масок послідовно, починаючи з широкосмугової маски.

Критерієм ефективності запропонованого методу є коефіцієнт продуктивності, який демонструє вигравш у кількості „довгих” операцій множення при застосуванні запропонованого методу на базі спектрально-коваріаційного оцінювання радіосигналів порівняно з методом на базі спектрального оцінювання [6]:

$$G_S = \frac{C_{DSE}}{C_{SCE}}, \quad (10)$$

де  $C_{DSE}$  – кількість операцій множення при спектральному оцінюванні радіосигналів;

$C_{SCE}$  – кількість операцій множення при використанні запропонованого методу.

Класифікація радіосигналів на базі спектрального оцінювання вимагає  $4K \cdot M \cdot \log_2 M$  операцій множення для реалізації алгоритмів стрибкоподібного ШПФ та зворотного ДПФ. Окрім того, для виконання

операції оброблення масиву за допомогою віконної функції необхідно  $4K \cdot M$  множень [7].

Для реалізації запропонованого методу на базі спектрально-коваріаційного оцінювання радіосигналів використовується прямокутне вікно даних, при якому операції множення не виконуються. Алгоритм рекурентного ШПФ та зворотного ДПФ реалізуються за допомогою  $2N \cdot \log_2 N$  операцій множення. Оброблення вихідної послідовності за допомогою кореляційної віконної функції реалізується з використанням  $N$  операцій множення. Тоді коефіцієнт продуктивності запропонованого методу дорівнює

$$G_S = \frac{4K \cdot M \cdot [\log_2 M + 1]}{N \cdot [2 \log_2 N + 1]} \quad (11)$$

Графік залежності коефіцієнта продуктивності від обсягу аналізованої реалізації радіосигналу для різного числа оброблювальних підпослідовностей наведено на рис. 1.

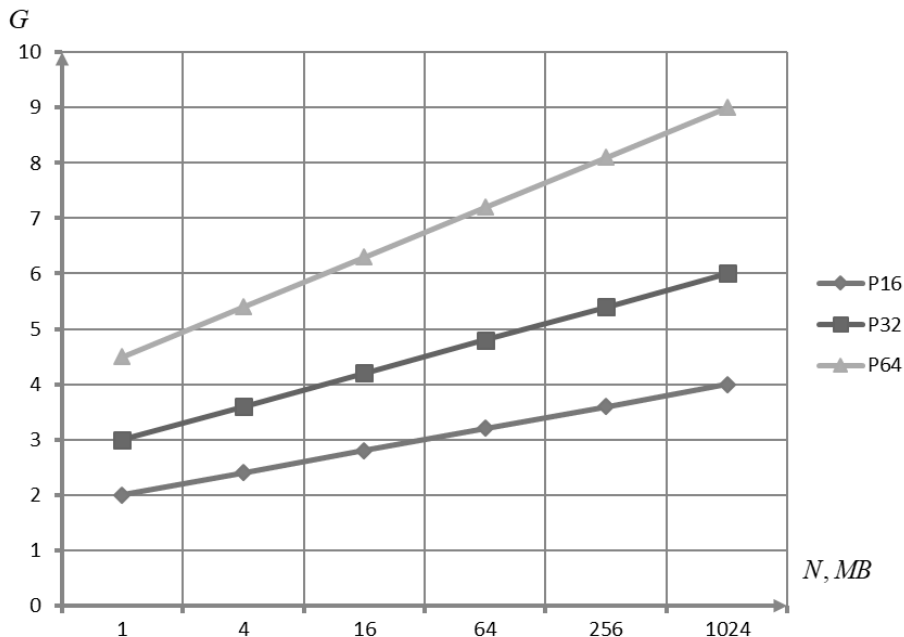


Рис. 1. Залежність коефіцієнта продуктивності від обсягу аналізованої реалізації радіосигналу  $N$  для різного числа оброблювальних підпослідовностей

Як видно з графіків, продуктивність запропонованого методу підвищується зі збільшенням обсягу вибірки. Нижня крива побудована для 16 оброблюваних підпослідовностей, а криві, що розташовані вище, відповідають кількості підпослідовностей 32 та 64. При збільшенні числа оброблюваних підпослідовностей коефіцієнт продуктивності зростає і знаходиться у межах  $4,0 \div 8,9$  для максимального обсягу аналізованої реалізації радіосигналу  $N = 1024$ . Отже, використання у запропонованому методі комбінованого оброблення перекривних підпослідовностей у часовій і частотній області призводить до зменшення числа необхідних арифметичних операцій і як наслідок – до підвищення продуктивності процесу класифікації радіосигналів.

#### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У роботі запропоновано високопродуктивний метод класифікації радіосигналів на базі спектрально-коваріаційного оцінювання сигналів. При цьому здійснюється багатоетапне оброблення перекривних підпослідовностей відліків досліджуваного радіосигналу у часовій і частотній області.

Аналіз ефективності запропонованого методу підтвердив, що завдяки розробленому методу вдається підвищити продуктивність спектрально-коваріаційного оцінювання радіосигналів у  $2,0 \div 8,9$  разів залежно від обсягу аналізованої реалізації радіосигналу та числа перекривних підпослідовностей. Максимальний коефіцієнт продуктивності досягається за умови, коли початкова реалізація радіосигналу розбивається на 64 перекривні підпослідовності.

Запропонований метод можна використовувати в автоматизованих системах радіотехнічного контролю для моніторингу радіообстановки у реальному масштабі часу.

#### Література

1. Бортник Г. Г. Методи та засоби первинного цифрового оброблення радіосигналів: монографія / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, В. М. Кичак. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 168 с.
2. Бортник Г. Г. Методи та засоби цифрового оброблення високочастотних сигналів для систем безпеки та моніторингу : монографія / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, В. М. Кичак. – Вінниця : ВНТУ,



2020. – 126 с.

3. Rohde & Schwarz Radiomonitoring & Radiolocation Catalog, 2016. URL: [https://cdn.rohdeschwarz.com/downloads\\_45/common\\_library\\_45/brochures\\_and\\_datasheets\\_45/Radiomonitoring\\_and\\_Radiolocation\\_Catalog.pdf](https://cdn.rohdeschwarz.com/downloads_45/common_library_45/brochures_and_datasheets_45/Radiomonitoring_and_Radiolocation_Catalog.pdf).

4. Jagannath J., Poloskyz N., Jagannath A., Restucciay F. Machine Learning for Wireless Communications in the Internet of Things: A Comprehensive Survey. Ad Hoc Networks 93, 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1901.7947>.

5. Krizhevsky A., Sutskever I. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. Advances in Neural Information Processing Systems 25, 2012. URL: <http://www.cs.toronto.edu/imagenet.pdf>.

6. Бортник Г. Г. [Метод цифрового спектрального аналізу вузькосмугових сигналів](#) / Г. Г. Бортник, О. Г. Бортник, О. В. Стальченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 4. – С. 97–101.

7. Задирака В. К. Цифровая обработка сигналов / В. К. Задирака, С. С. Мельникова. – Київ : Наукова думка, 1993. – 295 с.

#### References

1. Bortnyk G. G. Metody ta zasoby pervynnoho tsyfrovoho obroblyennia radiosyhnaliv / G.G. Bortnyk, M.V.Vasylykivskiyi, V.M. Kychak. – Vinnytsia : VNTU, 2016. – 168 s.

2. Bortnyk G. G. Metody ta zasoby tsyfrovoho obroblyennia vysokochastotnykh syhnaliv dlia system bezpeky ta monitorynhu: monohrafiia / G. G. Bortnyk, M. V. Vasylykivskiyi, V. M. Kychak. – Vinnytsia : VNTU, 2020. – 126 s.

3. Rohde & Schwarz Radiomonitoring & Radiolocation Catalog, 2016. URL: [https://cdn.rohdeschwarz.com/downloads\\_45/common\\_library\\_45/brochures\\_and\\_datasheets\\_45/Radiomonitoring\\_and\\_Radiolocation\\_Catalog.pdf](https://cdn.rohdeschwarz.com/downloads_45/common_library_45/brochures_and_datasheets_45/Radiomonitoring_and_Radiolocation_Catalog.pdf).

4. Jagannath J., Poloskyz N., Jagannath A., Restucciay F. Machine Learning for Wireless Communications in the Internet of Things: A Comprehensive Survey. Ad Hoc Networks 93, 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1901.7947>.

5. Krizhevsky A., Sutskever I. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. Advances in Neural Information Processing Systems 25, 2012. URL: <http://www.cs.toronto.edu/imagenet.pdf>.

6. Bortnyk G.G. Metod tsyfrovoho spektralnoho analizu vuzkosmuhovykh syhnaliv / G.G. Bortnyk, O.G.Bortnyk, O.V. Stalchenko // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2016. – № 4. – S. 97-101.

7. Zadyraka V. K. Tsyfrovaia obrabotka syhnalov / V. K. Zadyraka, S. S. Melnykova. – Kyiv: Naukova dumka, 1993. – 295 s.

**ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ** Микола

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-6586-2563>e-mail: [mvasylkivskiy@gmail.com](mailto:mvasylkivskiy@gmail.com)**ВАРГАТЮК** Ганна

Вінницький національний технічний університет

e-mail: [annaantonuik@gmail.com](mailto:annaantonuik@gmail.com)**БОЛДИРЕВА** Ольга

Вінницький національний технічний університет

e-mail: [rtt13bpoludenko@gmail.com](mailto:rtt13bpoludenko@gmail.com)

## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ РАДІОІНТЕРФЕЙС З ПІДТРИМКОЮ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Досліджено особливості впровадження інфраструктури інтелектуального радіоінтерфейсу 6G, яка буде використовувати індивідуальну конфігурацію для кожного окремого абонентського застосунку та гнучкі послуги з меншими накладними витратами. Розглянуто персоналізовану інфраструктуру, яка складається з інтелектуального фізичного рівня з підтримкою штучного інтелекту, інтелектуального контролера MAC та інтелектуального протоколу, за яким слідує потенційно новий пристрій наскрізного каналу (E2E) на основі штучного інтелекту.

Визначено вимоги до мережі 6G, які передбачають створення єдиної мережі з функціями сканування та зв'язку, які повинні бути інтегровані в єдину структуру на етапі проектування радіоінтерфейсу. Досліджено особливості ретельного проектування мережі зв'язку та сканування, яка буде пропонувати повні можливості сканування, а також повніше відповідати всім ключовим показникам ефективності в галузі зв'язку.

Ключові слова: інтелектуальний радіоінтерфейс, ключовий показник ефективності, мережа радіодоступу, штучний інтелект, інтелектуальний контролер, канал передавання даних.

VASYLKIVSKYI Mikola, VARGATYUK Ganna, BOLDYREVA Olga  
Vinnytsia National Technical University

### INTELLIGENT RADIO INTERFACE WITH THE SUPPORT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

The peculiarities of the implementation of the 6G intelligent radio interface infrastructure, which will use an individual configuration for each individual subscriber application and flexible services with lower overhead costs, have been studied. A personalized infrastructure consisting of an AI-enabled intelligent physical layer, an intelligent MAC controller, and an intelligent protocol is considered, followed by a potentially novel AI-based end-to-end (E2E) device. The intelligent controller is investigated, in particular the intelligent functions at the MAC level, which may become key components of the intelligent controller in the future. The joint optimization of these components, which will provide better system performance, is considered. It was determined that instead of using a complex mathematical method of optimization, it is possible to use machine learning, which has less complexity and can adapt to network conditions. A 6G radio interface design based on a combination of model-driven and data-driven artificial intelligence is investigated and is expected to provide customized radio interface optimization from pre-configuration to self-learning. The specifics of configuring the network scheme and transmission parameters at the level of subscriber equipment and services using a personalized radio interface to maximize the individual user experience without compromising the throughput of the system as a whole are determined.

Artificial intelligence is considered, which will be a built-in function of the radio interface that creates an intelligent physical layer and is responsible for MAC access control, network management optimization (such as load balancing and power saving), replacing some non-linear or non-convex algorithms in receiver modules or compensation of shortcomings in non-linear models. Built-in intelligence has been studied, which will make the 6G physical layer more advanced and efficient, facilitate the optimization of structural elements of the physical layer and procedural design, including the possible change of the receiver architecture, will help implement new detection and positioning capabilities, which, in turn, will significantly affect the design of radio interface components. The requirements for the 6G network are defined, which provide for the creation of a single network with scanning and communication functions, which must be integrated into a single structure at the stage of radio interface design. The specifics of carefully designing a communication and scanning network that will offer full scanning capabilities and more fully meet all key performance indicators in the communications industry are explored.

Keywords: intelligent radio interface, key performance indicator, radio access network, artificial intelligence, intelligent controller, data transmission channel.

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

При проектуванні мережі радіодоступу 5G розробники орієнтувалися на концепцію ІоЕ, яка знайшла втілення у різних сценаріях використання, таких як eMBB, URLLC та mMTC. При цьому, було враховано три типові вимоги для цих сценаріїв: швидкість передачі даних 20 Гбіт/с при смузї пропускання 100 МГц, надійність 99,999% при затримці радіоінтерфейсу 1 мс та 1 млн пристроїв на квадратний кілометр з ширшим покриттям відповідно [1].

Для реалізації оптимізованого методу підтримки універсальних сценаріїв застосування та широкого спектрального діапазону в 5G застосували новий уніфікований радіоінтерфейс, що має як гнучкість, так і адаптованість. Цей радіоінтерфейс спочатку передбачає сегментування мережі радіодоступу (RAN), що полегшує мультиплексування послуг, підвищення ефективності використання спектру, збільшення можливості підключення та зменшення затримки. Для пом'якшення впливу географічних "стілників", які

створюють для пристроїв небажаний ефект "переходу через границю", радіодоступ 5G розглядає окремо специфічні для користувача обладнання фізичні сигнали та ідентифікатори (ID) "стілники", надаючи мережам більше можливостей для вибору оптимального "променю" або «променів» для обслуговування користувачів, реалізуючи так звану архітектуру без стільників, орієнтовану на користувача (UCNC), щоб поліпшити взаємодію з користувачем на межі стільника за допомогою схем спільної передачі [2].

На додаток до існуючих сценаріїв використання 5G, які матимуть подальший розвиток від технології 6G очікується настання нової ери, в якій до однієї мережі будуть підключені люди, речі та інтелект з новими функціями, такими як виявлення та мережевий штучний інтелект (ШІ) [3]. У цьому контексті радіоінтерфейс 6G повинен відповідати як принципово новим ключовим показникам ефективності (KPI), так і набагато вищим або суворішим версіям колишніх KPI, порівняно з 5G [4]. Для забезпечення надзвичайно високої швидкості передачі даних та сканування з високою роздільною здатністю мережам 6G необхідно підтримувати ще більший діапазон спектру та ширшу смугу пропускання. Для досягнення цих нових складних цілей нам не обійтися без значних змін пристрою радіоінтерфейсу 6G. При цьому, необхідно повністю переосмислити ідеологію радіоінтерфейсу, починаючи з перших кроків розробки 6G. Для цього запропоновано кілька революційних змін парадигми.

### **Аналіз досліджень та публікацій**

Для забезпечення високонадійного бездротового зв'язку потрібна точна інформація про канал. В даний час вибір каналу ґрунтується на результатах зондування (вимірювання) каналу за допомогою опорного сигналу (RS). На практиці через затримку вимірювання та надання результату, а також бажання уникнути непродуктивних витрат при вимірюванні каналу складно отримувати інформацію про канал у реальному часі. Також варто відзначити, що так зване «старіння каналу» погіршує продуктивність, особливо при роботі з високошвидкісним абонентським обладнанням [5].

Розвиток технології тестування каналів за допомогою ШІ на основі даних сканування та позиціонування може призвести до переходу від вибору каналів на основі RS до вибору з урахуванням поточного стану навколишнього середовища в реальному часі. Маючи інформацію, отриману в результаті сканування/локалізації, ми можемо значно спростити процес пошуку променю. Попереднє відстеження та прогнозування каналу можуть надати інформацію про канал у реальному часі та вирішити проблему старіння каналу. Крім того, нова технологія вибору каналів зводить до мінімуму накладні витрати при виборі каналу та енергоспоживання для мережевих та кінцевих пристроїв.

Технологія 5G підтримує агрегацію несучих частот суб-6G та міліметрового діапазону, а також допускає перехресну роботу несучих TDD та FDD. Важливими аспектами проектування мереж 6G є інтелектуальне використання спектру та керування каналними ресурсами. Для підтримки безпрецедентних швидкостей передачі даних, необхідних для 6G, буде досліджено більш високочастотні спектри з ширшою смугою пропускання (наприклад, верхня межа діапазонів частот від міліметрового до ТГц-діапазону). Однак на вищих частотах зумовлені серйозні втрати на трасі через атмосферне поглинання. Тому, при розробці радіоінтерфейсу 6G необхідно передбачити ефективне використання нових спектрів спільно з іншими низькочастотними діапазонами. Більше того, в епоху технології 6G буде доцільний більш просунутий повнодуплексний режим, хоча він уже застосовується в 5G. Тому варто розглянути можливість розробки спрощеного механізму, який забезпечує швидке перемикавання між несучими та гнучке двонаправлене призначення ресурсів спектру мережі 6G. Також очікується, що визначення уніфікованої структури кадру та сигналів для FDD, TDD і повнодуплексного режиму спростять системні операції та підтримають співіснування обладнання користувача з різними можливостями дуплексного зв'язку [6].

Процеси та алгоритми обробки сигналів основної смуги частот зазвичай розробляються без ретельного обліку характеристик аналогових і радіочастотних компонентів через складність моделювання спотворень, що вносяться ними, і нелінійності. Це характерно для низьких частот, особливо з ефектами лінеаризації, такими як попереднє цифрове спотворення характеристик підсилювача потужності. В епоху розвитку систем 6G очікується, що їх конструкція фізично враховуватиме залежні від частоти погіршення або обмеження каналу, особливо в терагерцовій частині спектру [7]. Також можливе спільне проектування та оптимізація використання різних смуг частот завдяки вбудованим функціям штучного інтелекту [8].

### **Формулювання цілей статті**

Метою роботи є підвищення ефективності бездротового зв'язку шляхом оптимізації параметрів передачі для різних діапазонів спектра та різних послуг за рахунок використання інтелектуальних складових радіоінтерфейсу та технологій штучного інтелекту і машинного навчання.

### **Виклад основного матеріалу**

Розробники нового радіо (NR) досягли значного прогресу в розробці нових технологій радіодоступу, затребуваних у різних сценаріях використання. Радіоінтерфейси NR показали значне поліпшення з точки зору продуктивності, гнучкості, масштабованості та ефективності в порівнянні з мережею 4G (LTE), яка поступово еволюціонує.

Нова система програмного радіоінтерфейсу забезпечує єдину структуру для підтримки частотних діапазонів нижче 6 ГГц і вище 6 ГГц, таких як міліметрові хвилі як для ліцензованого, так і для

неліцензійного доступу. Уніфікований радіоінтерфейс також підтримує як канал  $Uu$  між RAN і користувачами, так і прямі канали між пристроями. Гнучка масштабована нумерологія дозволяє оптимізувати параметри передачі для різних діапазонів спектра та різних послуг.

Уніфікований радіоінтерфейс NR також є конструктивно повним (самодостатнім) в частотній області. Самодостатність у частотній області дозволяє підтримувати гнучкіший поділ RAN за рахунок спільного використання ресурсів каналу між різними службами як за частотою, так і за часом. Принцип самодостатності сигналів у цій галузі також забезпечує повну сумісність із майбутніми випусками NR. Більше того, повнота у часовій області забезпечує швидкий зворотний зв'язок для послуг із малою затримкою.

Виходячи з обговорень технологічних тенденцій і сценаріїв використання та ключових показників ефективності, можна припустити, що мережа 6G буде набагато складніша, ніж мережа 5G з точки зору функціональності [1]. Структура майбутнього радіоінтерфейсу може бути надзвичайно складною, оскільки нові застосування, вимоги та ключові показники ефективності супроводжуються спробами мінімізувати витрати [2]. Цим і обумовлена потреба у революційному радіоінтерфейсі 6G. Структура нового радіоінтерфейсу 6G має бути більш інтелектуальною та екологічною е порівнянні з NR. Вона має відповідати всім вимогам технології 6G найбільш продуктивним чином з точки зору ефективності розгортання, вартості, енергоспоживання та складності [3]. Для створення такої конструкції необхідно ретельно вивчити та оптимально використовувати всі відповідні компоненти технології радіоінтерфейсу, включаючи III, новий спектр, неназемний зв'язок та сканування [4].

В даний час існують гнучкі механізми для спільної роботи зі спектром NR, які дозволяють оператору ефективно задіяти кілька доступних ресурсів спектру. Для ефективного застосування ресурсів спектру, в NR використовуються агрегування несучих (CA) та подвійне підключення (DC), що дозволяє збільшити смугу пропускання абонентського обладнання [5].

У випадку CA одного користувача обладнанню призначаються кілька компонентних несучих (CC). У разі DC абонентське обладнання може одночасно передавати і приймати дані по множині CC з двох груп стільників через головну і вторинну базові станції [6].

У технології NR CA підтримується гнучке агрегування спектру, включаючи агрегування частот нижче 6 ГГц та вище 6 ГГц, а також агрегування FDD та TDD. У технології NR DC для забезпечення більш тісної взаємодії між головною та вторинною базовою станціями підтримується кілька мережевих архітектур, включаючи LTE-NR DC та NR-NR DC. У LTE-NR DC пристрій спочатку підключається до радіомережі та базової мережі LTE, а потім підключається до радіомережі NR за допомогою реконфігурації керування радіоресурсами (RRC) [7].

Енергоефективність – це ключовий показник ефективності бездротових мереж як для кінцевих пристроїв, так і для мережі. Гнучка та масштабована структура системи 5G NR дозволяє використовувати різні стандартизовані методи енергозбереження для адаптації до різних навантажень та типів трафіку в мережах. Зокрема, стандарт NR підтримує адаптивний опорний сигнал (уникаючи використання постійного опорного сигналу) і гнучке відключення ресурсів, а також забезпечує пряму сумісність для реалізації енергоефективної мережі, механізму переривного прийому (DRX) і неактивного стану RRC [8].

Пристрій радіоінтерфейсу 6G має забезпечити абсолютно нову основу для ефективної підтримки всіх відомих та майбутніх технологій радіодоступу в мобільній мережі. Наведемо основні характеристики такого радіоінтерфейсу:

- більш інтелектуальний та екологічний, з вбудованим III та можливістю енергозбереження;
- забезпечує більш гнучке використання спектру до ТГц;
- підтримує ефективну інтеграцію зв'язку та сканування;
- сприяє більш тісній інтеграції наземного та неназемного зв'язку;
- забезпечує більш простий протокол та механізм керування з низькими накладними витратами та складністю.

Інтелектуальний протокол та механізми передачі сигналу є невід'ємною частиною персоналізованого радіоінтерфейсу з підтримкою III, який спочатку має підтримувати інтелектуальний фізичний рівень та інтелектуальний доступ до середовища. У цьому і полягає відмінність гнучкого радіоінтерфейсу NR від інтелектуального радіоінтерфейсу 6G.

• Інтелектуальний фізичний рівень: технології III та машинного навчання здатні обробляти масивні вибірки даних, вирішувати проблеми нелінійного відображення і створювати механізми передачі, що саморозвиваються. На основі III передбачається розроблення універсального модулю оптимізації різних функцій фізичного рівня для підвищення його адаптивності та гнучкості. У цьому контексті нам необхідний інтелектуальний механізм реконфігурування фізичних модулів, орієнтований на підтримку сценаріїв швидкої обробки масивних даних, таких як сканування, локалізація та глибоке занурення у віртуальну реальність.

• Інтелектуальний контролер MAC: методи машинного навчання здатні надати прогнози та стратегію. Оскільки із зібраних бездротових даних можна багато чого навчитися. Виходячи з цього можна уявити ситуацію, в якій до складу системи включені інтелектуальні контролери MAC, завдяки чому спрощується оперативне налаштування алгоритмів і параметрів радіоінтерфейсу. Завдяки кумулятивному методу навчання цей інтелектуальний контролер автономно навчиться настільки, щоб запам'ятовувати

досвід та приймати правильні рішення [1]. Завдяки контролерам MAC, що розповсюджуються, узгодженим налаштуванням різних модулів приймача і взаємодії між багатьма мережевими об'єктами можна очікувати величезного приросту продуктивності.

- Інтелектуальний протокол та передача сигналів: для реалізації інтелектуального фізичного рівня та інтелектуального MAC, а також інтеграції цих рівнів необхідні новий протокол та механізми передачі сигналів. Очікується, що 6G запропонує відповідний механізм забезпечення ефективної роботи інтелектуального фізичного рівня і MAC.

Досягнення в галузі штучного інтелекту та машинного навчання спонукали дослідників у галузі бездротового зв'язку використати відповідні методи для розробки модулів фізичного рівня для систем бездротового зв'язку наступного покоління [2]. Деякі засновані на машинному навчанні проекти передбачають адаптацію до нелінійних факторів у модулях фізичного рівня; це має місце, наприклад, при канальному кодуванні, модуляції та проектуванні форми сигналу, які традиційно засновані на математичних моделях. Більш того, очікується, що численні дані про канали та навколишнє середовище, зібрані за допомогою сканування в епоху 6G, можуть бути використані для полегшення проектування фізичного рівня за допомогою машинного навчання, наприклад, дані про стан каналу в системі MIMO [3]. Покажемо, в чому може полягати вигода від застосування машинного навчання та ШІ для основних модулів фізичного рівня:

- кодування та декодування каналу: кодування каналу необхідне для надійної передачі даних по зашумленим каналам. Хороший код каналу може приблизно дорівнювати межі Шенона. Хоча теорія інформації Шенона забезпечує мету чи критерій оцінки коду каналу, але вона не дає прямих вказівок для його розроблення. Реалізація каналного кодування в рамках теорії інформації в основному заснована на припущенні про канал з адитивним гаусовим білим шумом. Однак на практиці більшість каналів є каналами із замиранням. У цьому випадку для розробки кодування каналів відсутні навіть теоретичні критерії, і тут нам може допомогти машинне навчання. Декодування також викликає труднощі, оскільки зазвичай пов'язано з високою обчислювальною складністю. Іноді доводиться робити припущення для спрощення, щоб декодувати коди з доступною складністю, але за це доводиться платити зниженням продуктивності. Отже, моделі, що навчаються, також задіяні в каналних декодерах, де процес декодування може бути змодельований як завдання класифікації;

- модуляція і демодуляція: основне завдання модуля модуляції – відображення декількох бітів у символ, що передається, з урахуванням досягнення високої спектральної ефективності при обмеженій смузі пропускання. У системах бездротового зв'язку широко використовують класичні схеми модуляції, такі як M-QAM [4]. Подібні методи квадратурної модуляції гарантують низьку складність демодуляції приймача. Було виявлено, що існують інші сукупності схем модуляції, що використовують додаткові характеристики сигналу, такі як неевклідова відстань і імовірнісні розподіли. Отже, методи машинного навчання можна застосувати для формування та розробки відповідних комбінацій для конкретних сценаріїв застосування;

- MIMO та приймач: MIMO – дуже приваблива технологія, яка підвищує надійність та пропускну здатність бездротового зв'язку. Зі зростанням кількості антенних елементів системи MIMO збільшуються як переваги, так і складність проектування та керування. Тому доцільно використовувати методи машинного навчання для правильного проектування модулів, пов'язаних з MIMO, наприклад, для таких завдань, як зворотний зв'язок на основі CSI, вибір антени, попереднє кодування, а також оцінка та виявлення каналу [5]. Більшість алгоритмів машинного навчання може бути розгорнуто для автономного навчання / онлайнного висновку, що може вирішити проблему великих накладних витрат за навчання;

- форма хвилі та множинний доступ: генерація хвилі заданої форми відповідає за перетворення інформаційних символів у сигнали, що використовуються для поширення у вигляді електромагнітних хвиль. Звичайний модуль для створення сигналів можна замінити модулем глибокого навчання. Наприклад, методи з урахуванням глибокого навчання дозволяють проектувати сигнали складної форми без використання модуля DFT.

Від системи зі штучним інтелектом ми можемо очікувати на революційні інновації. Серед можливих напрямів майбутніх досліджень можна виділити такі:

- оптимізація та оновлення параметрів елементів фізичного рівня: оптимізовані параметри кожного модуля, такі як кодування, модуляція, параметри MIMO, дуже впливають на продуктивність систем зв'язку. Оптимізовані параметри можуть динамічно змінюватися через характеристики, що швидко змінюються в часі каналу фізичного рівня в реальному середовищі. Застосування нейромереж та методів машинного навчання значно полегшує отримання оптимізованих параметрів порівняно з традиційними схемами [6]. Крім того, традиційна оптимізація параметрів виконується для кожного складового блоку окремо, наприклад, у моделі кодової модуляції з перемежуванням бітів [3], у той час як узгоджена оптимізація кількох блоків може забезпечити додатковий приріст показників. До того ж, щоб адаптуватися до стану каналу, що швидко змінюється в часі, можна використовувати самонавчання оптимізованих параметрів за допомогою ШІ для подальшого підвищення показників;

- вибір каналу: отримання інформації про бездротовий канал та середовище передачі завжди було фундаментальним аспектом проектування системи бездротового зв'язку. Накопичені дані каналу та дані сканування зберігаються у вигляді наборів даних, на основі яких за допомогою нейромережі можна побудувати радіокарту середовища. Маючи радіокарту, інформацію про канал можна отримати не тільки шляхом звичайних вимірювань, а й шляхом зіставлення її з іншою інформацією, такою як розташування;

- формування та супровід променю: оскільки несуча частота досягає міліметрового або навіть ТГц-діапазону, в бездротовому зв'язку широко застосовуються такі операції, як формування, наведення та супровід променю. У цьому контексті важливо мати ефективні алгоритми формування та супроводу променю. Методи машинного навчання можуть застосовуватися для комплексної оптимізації вибору антени, динамічного формування діаграми спрямованості та попереднього кодування [7];

- сканування та позиціонування: дані високої якості мають основне значення для технологій машинного навчання та III. В системах 6G завдяки великій пропускну здатності, новому спектру, щільній мережі та більшій кількості каналів LOS можуть бути отримані і виміряні параметри каналу та дані сканування/позиціонування. На основі цих даних за допомогою навченої нейромережі можна скласти радіокарту навколишнього середовища, де інформація про канал пов'язана з відповідним місцезнаходженням або інформацією про навколишнє середовище; отже, можна поліпшити структуру фізичного рівня [8].

Контролер на рівні MAC відіграє важливу роль для забезпечення безперебійної роботи мережі радіодоступу. Він приймає безліч ключових рішень протягом життєвого циклу системи зв'язку, таких як формування променю, керування променем, використання спектру, виділення ресурсів каналу, адаптація MCS, керування автоматичним гібридним повторним запитом, адаптація режиму Tx/Rx, керування потужністю і зниження взаємних завад. Середовище бездротового зв'язку дуже динамічне через мінливі умови каналу, трафіку, навантаження, завад [4].

У загальному випадку продуктивність системи покращується, якщо параметри передачі можуть адаптуватися до середовища, що швидко змінюється. Проте традиційні методи вирішення вищезгаданих проблем на основі класичної теорії оптимізації зазвичай є NP-важким завданням і надто складними для реалізації. У цьому випадку машинне навчання може стати потужним інструментом для створення інтелектуального контролера для оптимізації бездротової передачі на рівні MAC.

При переході до інтелектуальної системи контролера MAC, що спочатку використовує машинне навчання, необхідно делікатно вирішити дві проблеми: • **одиначний агент або мультиагент:** на відміну від моделей DRL, що використовуються в інших областях, де одного агента може бути достатньо для більшості додатків, для систем бездротового зв'язку потрібна багатоагентна система DRL [5]. Незважаючи на те, що кожен контролер базової станції може приймати індивідуальні рішення, система завжди краще працює у випадку спільно прийнятих рішень кількох базових станцій. На щастя, багато алгоритмів DRL мають багатоагентні аналоги. Однак процедура навчання багатоагентної моделі DRL набагато складніша, ніж одноагентна. Вибір між одним та декількома агентами – це, по суті, компроміс між якістю та складністю навчання; **спільна чи індивідуальна оптимізація:** будучи обмеженими обчислювальною потужністю, традиційні алгоритми зазвичай застосовують у невеликому обсязі щодо всієї системи. Наприклад, багато рішень у стільникових мережах приймаються всередині стільника, що призводить лише до локальних оптимумів [6]. За допомогою кількох агентів спільна оптимізація може бути досягнута у більшому обсязі. Взаємодія між агентами є ефективним способом побудови інтелектуального контролера MAC.

Отже, для підтримки спеціалізованих структур радіоінтерфейсу і, таким чином, для підтримки різних послуг і пристроїв у мережі бажано мати інтелектуальний фізичний рівень і контролер MAC. Але для підтримки цих опцій на фундаментальному рівні мережі 6G потрібні новий протокол та механізм передачі сигналу. Це дозволить персоналізувати відповідний радіоінтерфейс з параметрами для задоволення конкретних вимог, при цьому мінімізуючи накладні витрати на роботу з сигналом і максимізуючи ефективність використання спектру всієї системи за допомогою персоналізованих технологій штучного інтелекту. Наведемо деякі приклади інтелектуального протоколу та механізму передачі сигналу:

- **надгнучка структура кадру і гнучка передача сигналів:** наприклад, надгнучка структура кадру в персоналізованій структурі радіоінтерфейсу може бути спроектована з більш гнучкими параметрами форми сигналу і тривалості передачі. Ці параметри можуть бути пристосовані для різних вимог широкого діапазону сценаріїв, наприклад для надзвичайно низької затримки 0,1 мс. В результаті для кожного параметра в системі є безліч варіантів. Структура керуючих сигналів повинна бути гранично простою і гнучкою, що вимагає лише декількох форматів керуючих сигналів, тоді як інформація, що керує, може мати змінний розмір. Вона також може мати пряму сумісність без необхідності вводити новий формат для майбутніх розробок 6G;

- **інтелектуальне використання спектру:** оскільки потенційний спектр для 6G може складатися зі смуг низько- та середньочастотного діапазону, міліметрових хвиль, ТГц-діапазону та навіть видимого світла. Таким чином, сукупна ширина спектру 6G набагато ширша, ніж у 5G, і розробка високоефективної системи підтримки такого широкого спектрального діапазону є складним завданням [7].

У мережах 4G і 5G для спільного використання кількох частин широкого спектра застосовуються обидві схеми: SA (агрегація несучих частот), і DC (подвійне підключення). В мережах 5G для забезпечення гнучкого використання спектру застосовується кілька схем DC. У зв'язку з великою кількістю комбінацій несучих частот для мережі 6G потрібен новий простий та ефективний інтелектуальний радіоінтерфейс, здатний підтримувати весь спектральний діапазон.

Поточний розподіл спектру та структура кадру зазвичай пов'язані з дуплексним режимом, FDD або TDD, що може накладати обмеження на ефективне використання спектру. Очікується, що повний дуплекс досягне зрілості в епоху 6G і що бездротові мережі, що створюються, будуть містити все більше і більше

вузлів (кінцевих користувачів і точок доступу) з різними смугами частот.

Прикладами структури зв'язку, яка не обмежується напрямками висхідної та низхідної ліній, є зв'язок D2D, зв'язок IAB, неназемний зв'язок [8]. У цьому випадку для підтримки всіх дуплексних режимів та вузлів можна спроектувати однокадрову структуру, а схеми розподілу ресурсів в інтелектуальному радіоінтерфейсі зможуть виконувати ефективні передачі по множинних радіоканалах; вбудоване інтелектуальне енергозбереження: при проектуванні екологічно безпечної мережі на базі 6G енергозбереження є очевидною та важливою вимогою. Для мінімізації енергоспоживання як кінцевих пристроїв, так і мережевих вузлів при розробці нової системи необхідно спершу враховувати енергозбереження.

Радіоінтерфейс 6G передбачає інтелектуальне керування MIMO та променем, інтелектуальне використання спектру та точне позиціонування [4]. Це може значно знизити енергоспоживання як пристроїв, так і мережевих вузлів у порівнянні з традиційними технологіями, особливо під час передачі масивних даних. Таким чином, радіоінтерфейс 6G є основою енергозбереження системи.

Очікується, що за допомогою інтелектуальних технологій у мережі 6G може бути значно скорочено тривалість передачі даних. В результаті кінцевий пристрій може довше залишатися в режимі сну, коли він не має активного доступу до мережі або не взаємодіє з нею. Це один із аспектів вбудованого енергозбереження, що особливо важливо для енергоефективних пристроїв та екологічно безпечних мереж [5].

Для досягнення максимальної економії енергії кінцевими пристроями і мережевими вузлами ефективні канали передачі можуть бути спроектовані з урахуванням мінімізації сигналів керування та кількості переходів між станами або змін режиму потужності. У той же час, оскільки мережа 6G повинна підтримувати сценарії використання із надмалою затримкою, такі як покращений URLLC (або URLLC+), очікується, що ці схеми власного енергозбереження забезпечуватимуть гнучкі функціональні можливості. Вони не заважатимуть надшвидкому доступу до мереж та надвисокій передачі даних; прикладом є інтелектуальне керування режимами харчування та роботою.

Оскільки радіоінтерфейс буде персоналізовано для кожного пристрою, різні типи пристроїв матимуть різні вимоги до споживання енергії. При цьому, можна буде легко персоналізувати рішення щодо енергозбереження для різних типів пристроїв дотримуючись вимог до якості зв'язку.

Більшість недавніх спроб впровадження машинного навчання в радіомережі зводилися до заміни одного або кількох традиційних компонентів фізичного рівня їхньою вдосконаленою версією. Передбачається, що в епоху технології 6G базова мережева структура буде нерозривно пов'язана із технологією штучного інтелекту. Це відрізнятиме її як від 5G, так і від попередніх систем бездротового зв'язку, в яких методи машинного навчання спочатку навіть не розглядаються. У системі 6G технології радіозв'язку та штучного інтелекту з першого кроку розвиватимуться разом у напрямку реалізації надзвичайно ефективної обробки інформації, сканування середовища передачі та інтелектуальних можливостей радіоінтерфейсу.

На рис. 1 показано застосування машинного навчання, тобто пристрій каналу E2E. У цьому випадку ланцюг передачі та модулі можуть бути реорганізовані. Деякі раніше описані функції можуть бути відсутніми. Під час передачі та прийому інформації передавач інтелектуально узгоджуватиме зміни джерела інформації в реальному часі через нейронні мережі. Приймач також витягуватиме корисну інформацію з отриманих даних відповідно до конкретних завдань. Це вже не універсальний підхід до обробки даних, що ґрунтується на унікальному критерії (доставка та відновлення повідомлень без помилок), як описано в роботі Шенона [4].

Є багато теорій, що використовуються для розуміння штучного інтелекту. Серед них теорія інформаційних вузьких місць [5] є найбільш придатною для завдань комунікації фізично, оскільки вона використовує ідею взаємної інформації з теорії інформації як показник оптимізації. Заснована на теорії інформаційних вузьких місць, архітектура автоенкодера (AE) є одним із ключових інструментів для проектування наскрізних каналів зв'язку на основі ШІ. Більш детальну інформацію про теорію інформаційних вузьких місць та архітектури автоенкодерів також можна знайти в [6].

Інтелектуальний канал зв'язку може відкрити нові можливості та потенційно стати базовою структурою зв'язку у майбутньому. Проте методи машинного навчання потребують більших обсягів даних. Щоб задіяти ШІ в бездротовому зв'язку, необхідно буде збирати, зберігати і передавати обсяги даних, що постійно зростають.

На відміну від даних з простими характеристиками, наприклад в області комп'ютерного зору або обробки природної мови, характеристики бездротових даних охоплюють великі діапазони в декількох областях, наприклад, від міліметрових до терагерцових частот, поширення в космосі, у відкритому наземному просторі, в приміщеннях, передачу тексту, голосу та відео. Ці дані настільки відрізняються один від одного, що буде важко поєднати їх збір, обробку та використання в рамках єдиної системи.

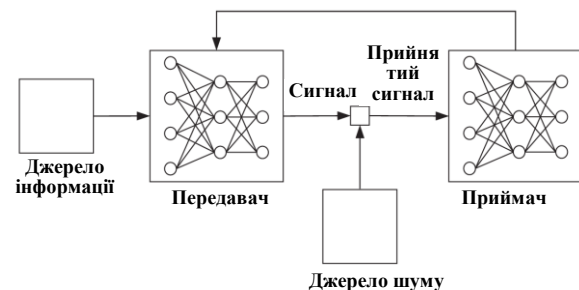


Рис. 1. Інтелектуальний наскрізний канал зв'язку (E2E)

**Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі**

Досліджено конструкцію радіоінтерфейсу 6G, яка заснована на поєднанні штучного інтелекту, керованого моделями та даними, і, як очікується, має забезпечити індивідуальну оптимізацію радіоінтерфейсу від попередньої конфігурації до самонавчання. Визначено особливості налаштування схеми мережі та параметрів передачі на рівні абонентського обладнання та служб за допомогою персоналізованого радіоінтерфейсу для максимізації індивідуального досвіду користувача без шкоди для пропускної спроможності системи в цілому.

Розглянуто штучний інтелект, який буде вбудованою функцією радіоінтерфейсу, що створює інтелектуальний фізичний рівень і відповідає за керування доступом до середовища передачі даних (MAC), оптимізацію мережевого керування (наприклад, балансування навантаження та енергозбереження), заміною деяких нелінійних або невикликаних алгоритмів у модулях приймачів або компенсацію недоліків у нелінійних моделях.

Досліджено вбудований інтелект, який зробить фізичний рівень 6G більш просунутим та ефективним, полегшить оптимізацію структурних елементів фізичного рівня та процедурне проектування, включаючи можливу зміну архітектури приймача, допоможе реалізувати нові можливості виявлення та позиціонування, що, своєю чергою, значно вплине на конструкцію компонентів радіоінтерфейсу.

Визначено вимоги до мережі 6G, які передбачають створення єдиної мережі з функціями сканування та зв'язку, які повинні бути інтегровані в єдину структуру на етапі проектування радіоінтерфейсу. Досліджено особливості ретельного проектування мережі зв'язку та сканування, яка буде пропонувати повні можливості сканування, а також повніше відповідати всім ключовим показникам ефективності в галузі зв'язку.

**Література**

1. Sohrabi F., Cheng H. V. Robust symbol-level precoding via autoencoder-based deep learning, in Proc. 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2020, pp. 8951–8955.
2. Balevi E., Doshi A., Andrews J.G. Massive MIMO channel estimation with an untrained deep neural network, IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 19, no. 3, pp. 2079–2090, 2020.
3. Wang B., Si Q., Jin M. A novel tone reservation scheme based on deep learning for PAPR reduction in OFDM systems, IEEE Communications Letters, vol. 24, no. 6, June 2020.
4. Xu C., Wang J., Yu T., Kong C., Huangfu Y., Li R., Ge Y., Wang J. Buffer-aware wireless scheduling based on deep reinforcement learning, in Proc. 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2020, pp. 1–6.
5. Meng F., Chen P., Wu L., Cheng J. Power allocation in multiuser cellular networks: Deep reinforcement learning approaches, IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020.
6. Васильківський М. В. Оцінювання енергетичних характеристик радіоканалів міліметрового діапазону / М. В. Васильківський, О. І. Мельничук, О. В. Стальченко // Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПІРН-2019)", Вінниця, 14-16 листопада 2019 р. – 2019. – С. 80–81.
7. Васильківський М. В. Оптимізація параметрів інфокомунікаційних мереж п'ятого покоління / М. В. Васильківський, С. О. Болдинюк // Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПІРН-2019)", Вінниця, 14-16 листопада 2019 р. – 2019. – С. 68–69.
8. Кичак В. М. Технології надпровідних приймачів терагерцового діапазону / В. М. Кичак, М. В. Васильківський // Матеріали тринадцятої міжнародної науково-технічної конференції "Перспективи телекомунікацій", 15–19 квітня 2019 р. – Київ : Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського". – С. 222–224.

**References**

1. Sohrabi F., Cheng H. V. Robust symbol-level precoding via autoencoder-based deep learning, in Proc. 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2020, pp. 8951–8955.
2. Balevi E., Doshi A., Andrews J.G. Massive MIMO channel estimation with an untrained deep neural network, IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 19, no. 3, pp. 2079–2090, 2020.
3. Wang B., Si Q., Jin M. A novel tone reservation scheme based on deep learning for PAPR reduction in OFDM systems, IEEE Communications Letters, vol. 24, no. 6, June 2020.
4. Xu C., Wang J., Yu T., Kong C., Huangfu Y., Li R., Ge Y., Wang J. Buffer-aware wireless scheduling based on deep reinforcement learning, in Proc. 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2020, pp. 1–6.
5. Meng F., Chen P., Wu L., Cheng J. Power allocation in multiuser cellular networks: Deep reinforcement learning approaches, IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020.
6. Vasylykivskiy M. V. Otsiniuvannia enerhetychnykh kharakterystyk radiokanaliv milimetrovoho diapazonu / M. V. Vasylykivskiy, O. I. Melnychuk, O. V. Stalchenko // Materialy I Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Suchasni problemy infokomunikatsii, radioelektroniky ta nanosystem (SPIRN-2019)", Vinnytsia, 14-16 lystopada 2019 r. – 2019. – S. 80–81.
7. Vasylykivskiy M. V. Optymizatsiia parametriv infokomunikatsiinykh merezh piatoho pokolinnia / M. V. Vasylykivskiy, S. O. Boldyniuk // Materialy I Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Suchasni problemy infokomunikatsii, radioelektroniky ta nanosystem (SPIRN-2019)", Vinnytsia, 14-16 lystopada 2019 r. – 2019. – S. 68–69.
8. Kychak V. M. Tekhnolohii nadprovodnykh prymachiv terahertsovoho diapazonu / V. M. Kychak, M. V. Vasylykivskiy // Materialy trynadtsiatoi mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Perspektyvy telekomunikatsii", 15–19 kvitnia 2019 r. – Kyiv : Natsionalnyi tekhnichniy universytet Ukrainy "Kyivskiy politekhnichniy instytut imeni Ihoria Sikorskoho". – S. 222–224.



<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-33-41>

УДК 621.391

**ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ Микола**

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-6586-2563>e-mail: [mvasylkivskyi@gmail.com](mailto:mvasylkivskyi@gmail.com)**ПРИКМЕТА Андрій**

Вінницький національний технічний університет

e-mail: [botan.mua@gmail.com](mailto:botan.mua@gmail.com)**ОЛІЙНИК Андрій**

Вінницький національний технічний університет

e-mail: [w0lfend00@gmail.com](mailto:w0lfend00@gmail.com)**НІКІТОВИЧ Діана**

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-8907-1221>e-mail: [diananikitovych@gmail.com](mailto:diananikitovych@gmail.com)

## ОПТИМІЗАЦІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

В роботі наведено результати досліджень особливості використання машинного навчання в телекомунікаційних мережах та здійснено опис основ теорії штучного інтелекту. Визначено характер впливу динамічної байєсівської мережі (DBN) та DNN на розвиток багатьох технологій, включаючи виявлення активності користувача, оцінку каналу та відстеження мобільності. Розглянуто показники ефективності комунікацій на основі теорії інформаційних вузьких місць, яка знаходиться на стику машинного навчання та прогнозування, статистики і теорії інформації. Наведено математичні вирази оптимізації функціональних характеристик радіомереж 5G/6G з використанням нових, достатньо формальних і водночас універсальних математичних інструментів з акцентом на технології глибокого навчання, що дозволяють проводити систематичний, надійний та інтерпретований аналіз великих випадкових мереж та широкий спектр їх мережевих моделей і практичних мереж.

Ключові слова: глибока нейронна мережа, багатоагентне навчання з підкріпленням, динамічна байєсівська мережа, надроздільна здатність, прихована марківська модель, бездротовий канал.

VASYLKIVSKYI Mikola, PRYKMETA Andrii, OLIYNYK Andrii, NIKITOVYCH Diana

Vinnytsia National Technical University

## OPTIMIZATION OF INTELLIGENT TELECOMMUNICATION NETWORKS

The paper presents the results of research on the use of machine learning in telecommunication networks and describes the basics of the theory of artificial intelligence. The impact of dynamic Bayesian network (DBN) and DNN on the development of many technologies, including user activity detection, channel estimation, and mobility tracking, is determined. The indicators of the effectiveness of communications based on the theory of information bottlenecks, which is at the junction of machine learning and forecasting, statistics and information theory, are considered. A neural network model that is pretrained for high-level tasks and divided into transmitter-side and receiver-side uses is investigated. The process of learning the model, which is performed after its adjustment, taking into account the existing transmission channels, is considered.

New ANN learning techniques capable of predicting or adapting to sudden changes in a wireless network, such as federated learning and multiagent reinforcement learning (MARL), are reviewed. The DBN model, which describes a system that dynamically changes or develops over time, is studied. The considered model provides constant monitoring of work and updating of the system and prediction of its behavior.

Distributed forecasting of channel states and user locations as a key component in the development of reliable wireless communication systems is studied. The possibility of increasing the number of degrees of freedom of the generalized wireless channel  $G(E)$  in terms of: the physical propagation channel, the directional diagram of the antenna array and mutual influence, electromagnetic physical characteristics is substantiated. The impact of ultra-high-resolution theory on the development of many technologies, including localization algorithms, compressed sampling, and wireless imaging algorithms, is also identified.

Mathematical expressions for optimizing the functional characteristics of 5G/6G radio networks are presented using new, sufficiently formal and at the same time universal mathematical tools with an emphasis on deep learning technologies, which allow systematic, reliable and interpretable analysis of large random networks and a wide range of their network models and practical networks.

Keywords: deep neural network, multi-agent reinforcement learning, dynamic Bayesian network, super-resolution, hidden Markov model, wireless channel.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У багатьох сучасних інженерних галузях інфокомунікаційні та радіотехнічні системи мають тенденцію організовуватися у великі мережі (такі як надмасивні МІМО і щільні мережі). Крім того, підвищується важливість системної динаміки, оскільки при цьому потрібна швидка обробка даних в середовищах, що швидко змінюються. Виступаючи свого роду спільним знаменником, такі мережі тепер стикаються з проблемою, пов'язаною з необхідністю одночасно справлятися зі зростаючим розміром телекомунікаційної радіосистеми (збільшення вузлів у мережах та збільшення суб'єктів, що взаємодіють з ними), підвищеним рівнем стохастичності (випадкові зміни в топології та випадковий розвиток середовища), а також з потребою в децентралізованій та самоорганізованій обробці даних (мережні вузли повинні бути автономними і здатні динамічно адаптуватися до середовища, що змінюється). Ці три аспекти

є основними компонентами, необхідними при моделюванні, аналізі та оптимізації продуктивності майбутніх мереж. В традиційних методах для вирішення подібних проблем у великих складних інфокомунікаційних радіосистемах використовуються пряме моделювання (метод Монте-Карло) або евристичні інструменти, такі як нейронні мережі або рої частинок [1]. Однак вони мають ряд серйозних недоліків, наприклад вони не є математично стабільними і погано піддаються простій інтерпретації, внаслідок чого спрямовані на покращення та оптимізацію системи або засновані на пробах та помилках, або просто неможливі. У результаті ці методи часто розглядаються як резервні рішення у випадках, коли математичні моделі не мають міцної основи [2]. Отже, потрібна розробка нових теоретичних інструментів, що дозволяють проводити систематичний, надійний та інтерпретований аналіз великих випадкових мереж. Ці інструменти повинні бути достатньо формальними, щоб охоплювати широкий спектр мережевих моделей, але водночас універсальними для забезпечення легкої спеціалізації для практичних мереж.

### Аналіз останніх джерел

Для вирішення частини проблем, властивих великим інфокомунікаційним системам вже було визначено різні сучасні математичні інструменти. Однак більшість цих інструментів все ще знаходяться на ранніх стадіях математичного опрацювання або тільки почали впроваджуватися в інженерні дослідження. З цих нових інструментів найбільш перспективними виявилися: теорія випадкових матриць, зокрема теорія випадкових матриць великої розмірності [3], теорія великомірних ермітових матриць з випадковими елементами. На початку перших досліджень у цій галузі спостерігався сплеск інтересу до бездротового зв'язку під час аналізу нових технологій тієї епохи – множинних антен та методів розширення спектру, математичні моделі яких були засновані на випадкових матричних каналах зв'язку [4]. У той час як науковий прогрес у цій галузі продовжувався (на основі математичних результатів), мало хто з дослідників розвивав математичні основи теорії випадкових матриць далі, ніж це було необхідно для вирішення складних проблем. Проте нещодавно у масивному МІМО і надмасивному МІМО з'явилися нові теоретичні інструменти, пов'язані з аналізом мереж бездротового зв'язку [5].

Одночасно із технологією 6G починають з'являтися різні технології, які тісно пов'язані з теорією великомасштабних комунікацій, у тому числі щільна мережа, федеративне навчання, безсотовий масивний МІМО, орієнтований на користувача зв'язок, граничний зв'язок і розподілений МІМО.

Теорія випадкових матриць спрямована на вивчення спектральних властивостей (власних значень і підпросторів) матриць з випадковими елементами, розміри яких вважаються дуже великими. Подібно до того, як випадкові змінні або випадкові вектори кінцевого розміру демонструють детерміновані межі при досягненні великого набору вибірок цих змінних (в основному на основі закону великих чисел або центральної граничної теореми), спектральні діапазони деяких моделей випадкових матриць демонструють детерміновану поведінку, коли розміри рядка та стовпця ростуть до безкінечності. Довгий час ця теорія залишалася прерогативою математиків, проте на початку 2000-х стало очевидним, що випадкові матриці можуть адекватно моделювати канали бездротового зв'язку, які є стохастичними та швидко змінюються за своєю природою [6]. Після кількох років роботи дослідникам бездротового зв'язку стало зрозуміло, що більшість моделей випадкових матриць, запропонованих математиками, або неадекватні, або занадто прості для ефективного вивчення найбільш реалістичних каналів зв'язку. Друга хвиля досліджень почалася приблизно в 2010 році і мала на меті подальше вивчення математичного інструменту теорії випадкових матриць для конкретних потреб інженерів бездротового зв'язку. Останні досягнення в цій галузі принесли важливі нові результати в моделюванні, аналізі та оптимізації продуктивності численних бездротових каналів, таких як канали МІМО точка-точка з райсівським завмиранням, багато-променеві канали МІМО, канали МІМО множинного доступу, передкодовані ширококомовні канали, канали зв'язку з унітарними прекодерами, багатоланкові канали та мережі з одним/декількома осередками [1–3]. Хоча ці результати іноді ґрунтуються на дуже складних системних моделях, вони представлені у відносно спрощеній формі та добре піддаються оптимізації. Істотним інгредієнтом, який вводиться теорією випадкових матриць, є наближення великої розмірності, що дозволяє ефективно аналізувати великі складні стохастичні системи з детермінованими величинами, відомими як детерміновані еквіваленти [1]. Компоненти великорозмірної системи вимірюються на основі кількості антен у бездротових пристроях, кількості користувачів в одному осередку або кількості осередків у цій мережі. Таким чином, теорія випадкових матриць визнана ефективним інструментом для аналізу багатьох локальних систем бездротового зв'язку, де «локальний» розуміється як «одномасштабний» (велика кількість антен, або кількість користувачів). Очікується, що завдяки додатковим узагальненим інструментам, таким як детерміновані ітераційні еквіваленти [2], теорія випадкових матриць стане адекватним інструментом для моделювання складних телекомунікаційних систем, в яких враховуються багато великорозмірних компонентів, що дозволяє уявити собі спільний аналіз на макроскопічному і мікроскопічному рівнях. Крім того, інструменти теорії випадкових матриць також справили враження на співтовариство обробки сигналів, запропонувавши інноваційні схеми детектування та оцінки (статистичного висновку), такі як технологія радарного МІМО, для обробки великих масивів сигналів [3]. Нарешті, було проведено дослідження з розробки децентралізованих алгоритмів для оптимізації продуктивності багатоосередкових мереж МІМО [4] – децентралізована стохастична оптимізація. Другий цікавий інструмент – це нещодавно запропонована структура, що поєднує стохастичні апроксимації та алгоритми пліток (gossip algorithm) для децентралізованої стохастичної оптимізації.

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є оптимізація функціональних характеристик радіомереж 5G/6G з використанням універсальних математичних інструментів з акцентом на технології глибокого навчання, що дозволяють проводити систематичний, надійний та інтерпретований аналіз великих випадкових мереж та широкий спектр їх мережевих моделей і практичних мереж.

### Виклад основного матеріалу

Для інтерпретації глибокої нейронної мережі (DNN) з акцентом на технології глибокого навчання використовується безліч різних теорій, таких як теорія оптимізації, алгоритми максимізації очікування, теорія топології, теорія графів, семантична теорія, теорія динамічних систем та теорія наближень. Вибір відповідної теорії для інтерпретації DNN залежить від реальної проблеми. Одними з найбільш відповідних теорій у контексті бездротового зв'язку є теорія інформації та теорія інформаційних вузьких місць, зокрема, оскільки вони виходять з тієї ж точки зору на теорію інформації, що й бездротові системи. Далі будемо теж дотримуватимемося цієї точки зору.

Одним із показників ефективності комунікацій є теорія інформаційних вузьких місць, яка знаходиться на стику машинного навчання та прогнозування, статистики і теорії інформації [5].

Шенон визначив інформацію, яка є будівельними блоками для теорії глибокого навчання, як невизначеність з імовірнісної точки зору [6].

По-перше, взаємна інформація  $I(X; Y)$  відображає ступінь ймовірнісної взаємодії між двома випадковими величинами:  $X$  і  $Y$ . Якщо змінюється  $X$ , то певною мірою буде змінюватися  $Y$ , і навпаки:  $I(X; Y) = I(Y; X)$ . Глибoku нейромережу можна змодельовати як потік взаємної інформації від входу до виходу.

По-друге, порівняльні відношення взаємної інформації  $I(X; Y) = I(P_x; P_{y|x})$  включають увігнуту функцію  $I(X; Y)$  від змінного  $P_x$  і фіксованого  $P_{y|x}$  а також опуклу функцію  $I(X; Y)$  змінного  $P_{y|x}$  та фіксованого  $P_x$ . Звідси випливає необхідність кодування  $I(X; Y)$  джерела інформації для мінімізації  $I(X; Y)$ , та кодування каналу для максимізації  $I(X; Y)$ .

Так само DNN поєднує два змагальних кроки. Для пояснення того, що відбувається в DNN з точки зору теорії інформації, [3] пропонується теорія інформаційного вузького місця з використанням потоку взаємної інформації та змагального характеру підвищення та зниження розмірності. Навчаючи DNN очікується, що вихідний шар  $Y$  буде максимально схожий на вхідний шар  $X$ , а прихований шар  $Z$  максимально відрізнятиметься від вхідного шару  $X$ , наскільки це можливо. З погляду теорії інформації це означає максимізацію  $I(X; Y)$  при мінімізації  $I(X; Z)$ . При переході від  $X$  до  $Z$  відбувається стиснення (кодування) інформації, а під час руху від  $Z$  до  $Y$  відбувається декодування.

Припустимо, що у прихованому шарі  $Z$  є вузьке інформаційне місце  $u$ : якщо ентропія  $Z$  менша, ніж  $\gamma$ , то вся інформація  $Z$  може пройти; в іншому випадку може пройти тільки найбільш істотна  $\gamma$ -частина  $Z$ .

Взаємну інформацію між  $X$  і  $Z$  можна визначити наступним чином:

$$I(X; Z) = \sum_X \sum_Z P_{Z,X} \cdot \log \frac{P_{Z,X}}{P_Z \cdot P_X} = \sum_X \sum_Z P_X \cdot P_{Z|X} \cdot \log \frac{P_{Z|X}}{P_Z} \quad (1)$$

Перехресна ентропія  $Y$  дорівнює:

$$H_{cross}(Z, Y) = -\sum_Z P_Z \cdot \log P_{Y|Z} = E_{X \square P_X} \left[ -\sum_Z P_{Z|X} \cdot \log P_{Y|Z} \right] \quad (2)$$

З урахуванням інформаційного вузького місця остаточно функція втрат DNN дорівнює:

$$f_{loss} = E_x \square P_X \left[ -\sum_Z P_{Z|X} \cdot \log P_{Y|Z} \right] + \beta \sum_X \sum_Z P_X \cdot P_{Z|X} \cdot \max \left( \log \frac{P_{Z|X}}{P_Z} - \gamma, 0 \right) \quad (3)$$

Оскільки математично складно мінімізувати компонент

$$\sum_X \sum_Z P_X \cdot P_{z|x} \cdot \max \left( \log \frac{P_{z|x}}{P_z} - \gamma, 0 \right),$$

альтернативою є мінімізація його верхньої межі  $E_{x \square P_X} [D(P_{Z|X} | Q_Z)]$ , де  $D(P_{z|x} | Q_z)$  – дивергенція (розбіжність) Кульбака Лейблера  $P_{z|x}$  по  $Q_z$ . В результаті функція втрат набуває наступного вигляду:

$$f_{loss} = E_x \square P_X \left[ -\sum_Z P_{z|x} \cdot \log P_{y|z} \right] + \beta \cdot E_x \square P_X [D(P_{z|x} | Q_z)] \quad (4)$$

Функція втрат визначає інформаційне вузьке місце та виявляє глибинний взаємозв'язок між метою навчання, архітектурою нейронної мережі та розподілом вхідних даних [1].

Деякі методи навчання можуть використовувати теорію вузьких інформаційних місць для оптимізації своєї архітектури. Наприклад, варіаційний висновок будує нижню межу мети інформаційного вузького місця та навчається на зібраних даних без попереднього знання про їх розподіл [2]. Ця структура може бути розширена на випадки з різними диспропорціями, що виникають у задачах високого рівня, або на випадки з багатозадачними проблемами [3].

З точки зору архітектури нейронної мережі та методу навчання найпростіше розділити модель нейронної мережі, попередньо навчену для завдань високого рівня на дві частини: одну для використання на

боці передавача, а іншу, для використання на стороні приймача. Потім можна вставити нейронні шари між двома частинами. Після навчання моделі виконується її налаштування з урахуванням існуючих каналів [4].

При неявній реалізації стиснення ( $E_x \square P_x [D(P_{z|x} | Q_z)]$ ) у вигляді DNN використовується автоенкодер (AE) [5]. Коефіцієнт стиснення  $|Z|/|X|$  відповідає вибірці даних  $X$ , а мета  $Y$  априорі невідома. Коли  $Y = X$ , автоенкодер стає джерелом на основі навчання для блочного коду фіксованої довжини з найнижчим коефіцієнтом стиснення  $|Z|/|X|$ , який в цілому обмежений знизу  $H(X)$ . Якщо розмір  $X$  недостатньо великий (маленький блок), автоенкодер допоможе знайти вихідний код зі ступенем стиснення  $|Z|/|X|$ , нижче, ніж  $H(X)$ .

Варіаційний автоенкодер (VAE) [1] вводить у прихований шар априорний розподіл ( $Q_z$ ), який є показником сприйняття поверх швидкості та стиснення. Різні априорні розподіли ( $Q_z$ ) призведуть до різних коефіцієнтів DNN. Якщо  $Q_z$  є однорідним багатовимірним розподілом Гауса, проекція по кожному виміру є оцінкою цього виміру. Теоретично  $Q_z$  може бути будь-яким іншим розподілом, і, отже, неоднорідні підканали бездротової системи можуть бути змодельовані як  $Q_z$ , що дозволяє налаштувати VAE для конкретного раніше відомого розподілу.

На відміну від автоенкодерів, які тільки максимізують  $I(X; Y)$ , варіаційні автоенкодери працюють за двома конкуруючими напрямками, одночасно мінімізуючи  $I(X; Y)$  і максимізуючи  $I(X; g_Y(Z; \theta_g))$ . Наприкінці навчання  $I(X; g_Y(Z; \theta_g))$  представляє собою мінімальну взаємну інформацію ( $Z$ ), яка присутня у шарі вузького місця. Необхідно враховувати, що варіаційні автоенкодери допомагають генерувати схему кодування загального джерела.

$$\Omega_y(X; \theta) \quad (5)$$

Генеративно-змагальна мережа (GAN) – це великий крок уперед у порівнянні з VAE [3]. У типовій GAN Васерштейна априорні розподіли ( $QZ$ ) реальні і не є гаусовими образами, а метрика більше не є взаємною інформацією – тепер це відстань Васерштейна. Хоча GAN – одна з кращих генеративних DNN, доступних в даний час, VAE, як і раніше є кращою для систем бездротового зв'язку через наявність прихованого гаусового рівня, оскільки над гаусовими розподілами можна виконувати лінійні операції [6].

На сьогоднішній день глибоке навчання використовується лише у традиційних централізованих архітектурах, тоді як його використання у розподілених архітектурах рідко стає об'єктом досліджень. Це критичне питання з погляду перспектив створення мереж 6G, оскільки розподілені архітектури необхідні для забезпечення масштабованості і гнучкості системи зв'язку. Проте застосування глибокого навчання у розподіленій архітектурі зумовить кілька фундаментальних проблем. Наприклад, у кожного бездротового вузла буде своя власна ANN, яка буде навчена з використанням власного набору даних, отриманого на основі локальних вимірів та досвіду. В результаті різні бездротові вузли повинні навчитися поводитися на основі наборів даних, які можуть відрізнятися як за кількістю (різні вузли можуть мати різні можливості вимірювання та зберігання), так і за якістю (різні вузли можуть відчувати різні спотворення даних через відмінності в датчиках). Це може призвести до нестабільності і, в гіршому випадку, до збою бездротової мережі. Крім того, у розподіленій архітектурі кожен вузол намагатиметься оптимізувати свою власну продуктивність, а не загальносистемну результативність, через врахування інших вузлів як можливих противників. Це може викликати небажані або небезпечні ситуації, в яких бездротовий вузол може навчитися шахраювати, щоб максимізувати свою продуктивність. Отже, дуже важливо отримати тверді знання про всі ці проблеми, щоб гарантувати правильну поведінку вузлів у бездротових мережах на основі ANN. Нарешті, більшість результатів глибокого навчання не передбачають отримання розподілених масштабованих рішень, що враховують великі розміри та непередбачувану еволюцію з часом у сценаріях бездротового зв'язку 6G. В результаті створення відповідних навчальних наборів стає дуже складним завданням, оскільки загальні підходи до навчання з учителем припускають, що ANN працюватимуть в умовах, аналогічних тим, які були представлені на етапі навчання. Насправді раптові зміни трафіку та/або топології можуть зробити доступні навчальні набори марними. Отже, терміново потрібні нові методики навчання ANN, здатні передбачати або принаймні пристосовуватися до раптових змін у бездротовій мережі.

Розглянемо дві такі методики: федеративне навчання (federated learning) та багатоагентне навчання з підкріпленням (MARL). Федеративне навчання – це підхід до машинного навчання, при якому центральна модель навчається децентралізовано [1, 3] з використанням даних на вузлах. Суть процесу полягає в наступному: у кожному раунді кожен вузол незалежно обчислює оновлення для центральної моделі, використовуючи свої збережені дані, а потім передає це оновлення (але не дані) на центральний сервер, який об'єднує оновлення, надіслані з різних вузлів, а потім обчислює покращену глобальну модель.

Сучасні мобільні пристрої зберігають у своїй пам'яті безліч даних, які можна використовувати для навчання моделей. Хоча такі дані можуть значно покращити моделі, вони часто складаються з конфіденційної інформації і тому перебувають у приватній власності. Тому власники зазвичай не хочуть ділитися такими даними із центральним сервером з метою навчання. Щоб обійти цю проблему, сервер може надіслати центральну модель вузлам для навчання на місцях з використанням локальних даних. Після створення оновленої моделі вузли надсилають її на центральний сервер. Таким чином, центральний сервер отримуватиме велику кількість оновлень моделі від багатьох вузлів, які потім об'єднуються в покращену глобальну модель. Після цього починається ще один раунд процесу навчання: центральний сервер

відправляє покращену модель новим вузлам, а нові вузли навчають її далі, використовуючи свої особисті дані. Після багатьох раундів параметри моделі можуть сходитися, у результаті виходить добре навчена модель.

Основна мета федеративного навчання – відокремити навчання моделі від прямого доступу до необроблених навчальних даних, що дозволяє використовувати величезні обсяги даних, які зберігаються на вузлах. Наведемо загальний опис процесу федеративного навчання. Припустимо, що модель, яка навчається, є нейронною мережею, а  $f_i(w)$  є функцією втрат прогнозу в прикладі  $(x_i, y_i)$  з параметром  $w$ . Також припустимо, що існує  $K$  користувачів, якими розділені дані,  $P_k$  – це множина індексів точок даних клієнта  $k$ , а  $n_k = |P_k|$ . Тоді мінімізована цільова функція може бути виражена як

$$f(w) = \sum_{k=1}^K \frac{n_k}{n} F_k(w), \quad (6)$$

де

$$F_k(w) = \frac{1}{n_k} \sum_{i \in P_k} f_i(w). \quad (7)$$

Нехай  $C$  буде часткою вузлів, які вибираються у кожному раунді для обчислення оновлень та градієнтів функції втрат. Якщо  $C = 1$ , дані у всіх вузлах використовуються для обчислення повного (нестохастичного) градієнтного спуску. Звичайна реалізація федеративного навчання вибирає  $t$  випадкових пристроїв у кожному раунді. Центральний сервер надсилає кожному вузлу параметр мережі  $W_t$ ; потім кожен користувач обчислює  $g_k = \nabla F_k(w_t)$ , який є середнім градієнтом його локальних даних у поточній моделі  $W_t$ , а потім оновлює параметр  $w_t^k \leftarrow (w_t^k - a g_k)$  (де  $a$  – швидкість навчання). Цей крок повторюється  $E$  разів на пристрої користувачів, щоб гарантувати відправлення найбільш надійного  $w_t^k$  назад на центральний сервер.

Потім центральний сервер об'єднує ці  $w_t^k$  та застосовує оновлення  $w_{t+1} \leftarrow \sum_{k=1}^K \frac{n_k}{n} w_t^k$ . Обсяг обчислень визначається трьома ключовими параметрами:  $C$  – частка вузлів, що беруть участь у обчисленнях у кожному раунді;  $E$  – кількість проходів, що навчаються, кожен клієнт виконує над своїм локальним набором даних у кожному раунді, і  $B$  – розмір локального міні-пакета, що використовується для оновлень клієнта. Якщо  $B = \infty$  повний локальний набір даних розглядається як міні-пакет. Для користувача з  $n_k$  локальними прикладами на кожен раунд буде виконуватися  $u_k = E \frac{n_k}{B}$  локальних оновлень.

Федеративне навчання дає низку переваг, включаючи такі: для навчання моделі можна використовувати великий обсяг реальних даних, оскільки вузлів багато і кожен вузол містить певний обсяг даних, агрегування всіх даних збільшує можливість оптимального навчання моделі; навчання виконується на вузлах децентралізовано, що знижує обчислювальне навантаження на центральний сервер; дотримуються вимоги до конфіденційності [4], оскільки користувачі завантажують на сервер лише оновлення параметрів моделі, а не власні дані.

З іншого боку, є й недоліки: центральний сервер все ж таки потребує певної довіри, оскільки процес перевірки оновлень моделі, надісланих користувачем, іноді може призводити до отримання деякої інформації про користувача; вартість зв'язку є суттєвою проблемою, оскільки ресурси зв'язку споживаються двічі на користувача: один раз для надсилання параметрів користувачу та вдруге при поверненні оновлень на сервер. Випадковий характер бездротового зв'язку робить такі оновлення досить складними; додаткові труднощі пов'язані з тим, що навчальні дані не беруться з незалежних і однаково розподілених джерел, оскільки кожен має свій власний набір даних, який може представляти розподіл популяції. Окремі користувачі також мають різні обсяги локальних навчальних даних, і ці відмінності можуть вплинути на збіжність алгоритму навчання; децентралізоване навчання складніше централізованого з точки зору тривалості та налаштування. Тому необхідно заздалегідь ретельно вибирати значення гіперпараметрів та архітектуру нейронної мережі; ефективність федеративного навчання нижча, ніж у централізованого методу.

При навчанні з підкріпленням [2] агент прагне досягти оптимальної поведінки у присутності невизначеності шляхом взаємодії з навколишнім середовищем, що зазвичай моделюється як марківський процес прийняття рішень. З розвитком глибокого навчання було показано, що навчання з підкріпленням забезпечує максимальну продуктивність у таких галузях, як настільні ігри, автономне водіння та робототехніка [1–3]. Огляд останніх досягнень у галузі глибокого навчання з підкріпленням показав, що у більшості програм агент вчиться реагувати на невизначене середовище або на одного суперника, який реагує у відповідь. Однак у багатьох важливих додатках один з одним взаємодіють багато агентів; деякі з них можуть бути пристроями, що реалізують однакові або різні стратегії для прийняття рішень щодо своїх дій. MARL має потенціал для систематичного аналізу середовища за допомогою стратегічно взаємодіючих агентів. Вивчення MARL поєднує у собі навчання з підкріпленням та методи MDP з теорією ігор, особливо з розділом теорії ігор, відомим як ігри середнього поля [1]. Він прагне надати алгоритми, що сприяють вивченню стабільних політик найкращого реагування в багатоагентній системі з достатньою кількістю

агентів, що залишається серйозною проблемою в більшості випадків, оскільки зі збільшенням кількості агентів зростає складність [2].

Складність поширення класичних алгоритмів навчання (таких як Q-навчання з підкріпленням, адаптивний евристичний критик або багаторукий бандит з мінімізацією жалю) для сценаріїв з багатьма користувачами залежить від балансу, який необхідно підтримувати між використанням інформації, отриманої під час навчання, і адекватним визначенням області пошуку. Наприклад, MARL середнього поля може бути дуже ефективним при великій кількості пристроїв, що взаємодіють.

Своєчасна та економічна обробка сигналів та інформації у мережах радіодоступу потребує використання просторово-часових залежностей між мережевими змінними, які виникають у декількох просторово-часових областях, наприклад: області активації користувачів, які включають пристрої МТС/ІоТ, які повідомляють/реагують на корельовані події; області каналів, коли певні користувачі мають схожі характеристики розповсюдження; області контенту даних, коли користувачі у соціальній структурі поділяють чи запитують однаковий контент. Ці залежності відкривають можливості використання приросту продуктивності в бездротових мережах. Тому вивчення залежностей між мережевими змінними має важливе значення для надання розширеної інформації та алгоритмів обробки сигналів для покращеного радіодоступу.

Для отримання масштабованих рішень використовують наближені методи виведення (такі як передача повідомлень) та їх розподілені (багатопроцесорні) версії. Передача повідомлень і наближена передача повідомлень нещодавно продемонстрували масштабовану продуктивність в узагальнених зворотних лінійних задачах і будуть відправною точкою для методів, що застосовуються тут. Існуючі рішення для статичних сценаріїв, які не залежать від часу, будуть розширені для врахування мінливості за часом. Для цього розглянемо типові теоретичні інструменти. Байєсівські мережі можна визначити як окремих випадок у більш загальному класі, відомому як графова модель, в якій вузли представляють випадкові величини, а відсутність дуг – припущення про умовну незалежність між змінними. Якщо розглядати граф загалом, умовні ймовірності, структуру BN і спільний розподіл ймовірностей можна використовувати визначення граничної ймовірності чи правдоподібності кожного вузла. Ця процедура відома як маргіналізація. Розрахунок ступеня довіри у BN виконується щоразу, коли змінюється одна з цих граничних ймовірностей. Ефект спостереження поширюється по мережі, і на кожному кроці поширення оновлюються ймовірності різних вузлів. Відповідно до [3], у простих мережах гранична ймовірність, або правдоподібність кожного стану, може бути обчислена на основі знання спільних розподілів згідно з теоремою Байєса.

Більшість подій у нашому повсякденному житті не виявляються в конкретний момент часу і можуть бути описані за допомогою кількох станів спостережень, які дозволяють говорити про одну завершену кінцеву подію. Модель динамічної байєсівської мережі (DBN) описує систему, яка динамічно змінюється чи розвивається з часом. Ця модель дозволяє користувачам постійно відстежувати та оновлювати систему і навіть прогнозувати її поведінку. DBN зазвичай визначається як окремих випадок однозв'язної BN, спеціально призначений для моделювання часових рядів, як зазначено в [4].

Прихована марківська модель (HMM) – це стохастичний кінцевий автомат, у якому кожен стан генерує (випромінює) спостереження. Будемо використовувати  $X_t$  для позначення прихованого стану та  $Y_t$  для позначення спостереження. Якщо є  $K$  можливих станів, тоді  $X_t \in \{1, K\}$ . Параметри моделі включають у собі розподіл вихідного стану, модель переходу та модель спостереження. Модель переходу зазвичай характеризується умовним за поліноміальним розподілом  $A(i, j) = P(X_t = j | X_{t-1} = i)$ , де  $A$  – стохастична матриця, яка часто розріджена і її структура зазвичай зображується у вигляді графа, де вузли представляють стани, а стрілки-допустимі переходи (тобто переходи з ненульовою ймовірністю).

Технічні характеристики DBN можна розділити на три категорії: виведення, декодування послідовності, навчання. Навіть експертні знання не можуть запропонувати рішення для деяких умовних відношень у певних галузях. У таких обставинах необхідно вивчити ці конкретні розподіли ймовірностей. Цей процес навчання складний і ґрунтується на алгоритмі максимізації очікування або загальної максимізації очікування (GEM).

У мережах 6G існує безліч потенційних програм для DBN. Наприклад, вивчені залежності між мережевими змінними можуть бути використані для потенційного збільшення продуктивності в різних бездротових послугах. Зокрема, вивчена структура, що змінюється в часі, може використовуватися для динамічної кластеризації користувачів або мережі (зазвичай масивна MIMO без стільників) в різних областях (канал, активність і контент) з прямим впливом на додатки радіодоступу. Яскравим прикладом є кореляційна структура бездротового каналу, що змінюється в часі, яка, якщо її вивчити, може бути використана для підвищення продуктивності RAN.

Очікується величезний приріст продуктивності щодо масового MIMO, оскільки знання структури каналу (зокрема, каналу MIMO) надасть можливість динамічно кластеризувати користувачів RAN на основі умов їх каналу. Структура каналу та кластеризація користувачів полегшують надання схем оцінки каналу з меншими витратами за рахунок зменшення кількості ресурсів каналу для навчання, так і кількості зворотного зв'язку, пов'язаної з оцінками каналу. Байєсівська структура буде надзвичайно ефективною у цьому сценарії, оскільки вона дає переконання щодо якості задіяних оцінок. Ці переконання можна оцінити

як локально на стороні користувача та на границі мережі, так і глобально на центральному сервері та макробазовій станції, щоб полегшити прийняття рішень щодо оцінки каналу та декодування даних. У контексті масових MIMO, розподілених MIMO або безсотових мереж цей підхід призведе до нових схем оцінки каналу та зворотного зв'язку. Зокрема, динамічна кластеризація користувачів впливатиме на структуру та довжину пілотних послідовностей, що використовуються для навчання (як у висхідній, так і в низхідній лінії зв'язку) стільникової системи, в якій базові станції оснащені великою кількістю антен. Це ефективно знизить накладні витрати на навчання, вивільнивши ресурси каналу передачі даних. Зокрема, структура зворотного зв'язку CSI може бути оптимізована на основі кластеризації користувачів та м'якої інформації (переконань), що виводиться процедурою байєсівського виведення.

Крім того, байєсівська структура поєднує виявлення активності користувачів, включаючи модель статистики активації користувачів (яку також можна вивчити). Вона поширюється на неадаптивні та адаптивні методи ймовірнісного групового тестування, щоб використати залежності між користувачами та розподілу ймовірностей, яким вони відповідають. Це особливо актуально у масових сценаріях МТС/ІоТ, де питання оцінки каналу та виявлення активності користувача мають вирішуватися спільно, щоб зменшити як службові дані, так і час очікування, що пов'язані з процедурою довільного доступу. Зокрема, у додатках з масовим підключенням з двофазною передачею (початковий доступ з подальшою передачею даних) байєсівська структура оцінює оптимальну кількість ресурсів, виділених для початкового доступу (перша фаза), порівняно з ресурсами, виділеними для передачі даних (друга фаза), з негайним перерозподілом ресурсів на етапі передачі. Загалом, очікується, що в переважених системах, де кількість активних користувачів набагато перевищує кількість антен на базовій станції, планування користувачів за допомогою байєсівського додатку може значно покращити загальну ефективність використання спектру. Це вплине на структури як планових, так і безгрантових (GF) схем, які орієнтовані на додатки МТС/ІоТ з передачею малих пакетів та об'єднують початковий доступ та передачу даних.

Байєсівський підхід також може застосовуватися для локалізації та прогнозування траєкторії. Крім того, розподілене прогнозування станів каналів та розташування користувачів розглядається як ключовий компонент при розробці надійних систем бездротового зв'язку. Наприклад, прогнозуючи (короткострокове) розташування користувачів або еволюцію їх кутового спектру потужності (тобто функцію, що показує середню енергію на кутову одиницю в антенній решітці), проєктувальники отримують корисну інформацію про попереднє кодування навчальних символів, щоб, спираючись на один і той же пілотний сигнал можна було отримати інформацію про стан каналу для кількох користувачів.

Робота в цій галузі, що поєднує хвильову фізику з теорією інформації, має довгу історію, що сягає витоків теорії інформації [5] і, зокрема, до новаторських робіт по оптичним сигналам та інформації [6]. Для позначення кількості ефективних вимірів комунікації було запроваджено поняття ступенів свободи (DoF). Методики визначення числа ступенів свободи з використанням хвильової теорії були розроблені ще в 1960-х роках, і з того часу подальший прогрес у цій галузі був дуже нерівномірним.

Пропускна здатність каналу визначається як максимальна взаємна інформація:

$$C = \max_{p(x)} \{I(x, y)\}, \quad (8)$$

де  $x$  і  $y$  – вектори  $T_x$  та  $R_x$  відповідно. Щоб врахувати вплив законів електромагнетизму на пропускну здатність каналу, [4] визначається просторова пропускна здатність  $S$  як максимальна взаємна інформація між векторами  $T_x$  та  $R_x$ , а також інформація про канал (за умови, що ідеальна інформація про стан каналу відома у  $R_x$ ):

$$S = \max_{p(x), E} \{I(x, \{y, G(E)\})\}. \quad (9)$$

Обмеження:

$$\langle x + x \rangle \leq P_T, \nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial E}{\partial t^2} = 0, E = E_0, \forall \{r, t\} \in B \quad (10)$$

де  $E$  – електричне поле, задіяне при передачі даних,  $B$  – гранична умова (залежно від середовища розсіювання),  $G$  – матриця каналу. Кількість ступенів свободи електромагнітного поля необхідно для розуміння фізичних обмежень бездротових (випромінюючих) систем зв'язку.

Як показано на рис. 1 узагальнений бездротовий канал складається з масиву  $T_x$ , каналу поширення (середовища) і масиву  $R_x$ . Ґратки  $T_x$  і  $R_x$  впливають, принаймні, на діаграму спрямованості і взаємний вплив каналів. Складний узагальнений бездротовий канал  $G(E)$  зазвичай характеризується як згортка векторів керування решіткою та багатопробових фізичних каналів поширення:

$$G(E) = H = f(\{\varphi_n, \theta_n\}) = \sum_n h_n a_{\theta_n} a_{\varphi_n}^H \quad (11)$$

де  $n$  – кількість багатопробових поширень,  $\varphi_n$  і  $\theta_n$  – кут приходу (AoA) і кут виходу (AoD) хвилі фізичних каналів поширення відповідно,  $a_{\theta}$  і  $a_{\varphi}$  – керуючі вектори передавальної та приймальної решіток, а  $h_n$  – реакція на вплив  $i$ -го фізичного каналу з багатопробовим поширенням.



Рис. 1. Схема узагальненого радіоканалу передавання даних

Потенційні технічні дослідження, спрямовані на збільшення кількості ступенів свободи узагальненого бездротового каналу  $G(E)$ , можна розділити на три категорії: (1) фізичний канал поширення, (2) діаграма спрямованості антенної решітки та взаємний вплив, (3) електромагнітні фізичні характеристики. В епоху 6G нові тенденції в галузі антенних решіток і каналних середовищ спонукають нас знаходити потужніші інструменти аналізу електромагнітних явищ, щоб впоратися зі складністю електромагнітного середовища, що породжується надспрямованими антенними ґратками, ELAA та інтелектуальними метаповерхнями.

З розвитком 6G починають з'являтися різні бездротові технології, які можуть вплинути на розвиток теорії електромагнітної інформації. До них відносяться: LIS, RIS, цифровий керований розсіювач, орбітальний кутовий момент, голографічні MIMO, обертання часу, зв'язок поверхневих хвиль, надмасивні MIMO та ELAA.

У бездротовому зв'язку сигнали, що передаються зазвичай досягають приймача декількома шляхами через відображення від об'єктів (наприклад, будівель). Припустимо, що  $h(t)$  – сигнал, що передається,  $z(t)$  – характеристика каналу, а  $d_i$  і  $t_i$  – комплексна амплітуда і затримка в  $i$ -му тракті; тоді отриманий сигнал у часовій області можна відобразити наступним чином:

$$x(t) = z(t) * h(t) = \sum_{i=1}^r d_i h(t - t_i), \quad (12)$$

де  $r$  – кількість шляхів, які надалі називатимемо модами (mode). Використовуючи перетворення Фур'є, можна представити сигнал у спектральній області наступним чином:

$$\hat{x}(f) = \hat{z}(f) * \hat{h}(f) = \sum_{i=1}^r d_i \hat{h}(f) e^{j2\pi f t_i}. \quad (13)$$

Оскільки переданий сигнал  $\hat{h}(f)$  відомий априорі, дані можуть бути виражені як

$$\frac{\hat{x}(f)}{\hat{z}(f)} = \sum_{i=1}^r d_i e^{j2\pi f t_i} \quad \forall d : \hat{h}(f) \neq 0 \quad (14)$$

В результаті, можна отримати класичну модель оцінки параметрів теорії надвисокої роздільної здатності, сумою сигналів  $r$  мод:

$$x[t] = \sum_{i=1}^r d_i \psi(t; f_i) \quad t \in Z \quad (15)$$

де  $d_i$  - амплітуда,  $f_i$  - частота,  $\psi$  - (відома) модельна функція (наприклад,  $\psi(t; f_i) = e^{j2\pi f_i t}$ ), а  $r$  - кількість мод або порядок моделі. Наша мета – оцінити  $2r$  невідомих параметрів  $\{d_i\}$  і  $\{f_i\}$ . Першою широко задіяною теорією роздільної здатності була теорема вибірки Шенона-Найквіста [5], яка вимагає, щоб частота дискретизації щонайменше вдвічі перевищувала максимальну частоту вихідної інформації. Цей критерій відомий як частота дискретизації Найквіста та гарантує ідентичність та цілісність відновленої інформації.

У разі ширококутового сигналу рівномірна роздільна здатність дає перевагу одним частинам, але погіршує інші. Щоб вирішити цю проблему, спочатку використовували віконне перетворення Фур'є, а потім і вейвлети для реалізації множинної роздільної здатності. Якщо ми перетворимо вейвлет-сигнал назад у вихідний навколишній простір (за допомогою декодера), цілком імовірно, що роздільна здатність насправді в загальному випадку не буде однорідною. JPEG-2000 використовує вейвлети для стиснення зображень. Деякі дослідники навіть запропонували замінити OFDM вейвлет-перетворенням для ширококутових сигналів.

Теорія надвисокої роздільної здатності поєднує як неоднорідну роздільну здатність, так і неоднорідну вибірку [6] і може використовуватися в багатьох областях технології 6G.

Системи 6G із широкою смугою частот будуть створювати проблеми для динамічного квантування, а дотримання критерію дискретизації Найквіста призведе до величезного енергоспоживання. Якщо вихідна



інформація є розрідженою за своєю природою, то стає можливою нерівномірна вибірка з низьким енергоспоживанням для зниження енергоспоживання. Теорія надвисокої роздільної здатності може вплинути на напрямки розвитку багатьох технологій, включаючи алгоритми локалізації, стислу вибірку та алгоритми бездротової візуалізації.

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Розглянуто особливості використання машинного навчання в телекомунікаційних мережах та здійснено детальний опис основ теорії штучного інтелекту. Зокрема визначено характер впливу DBN на розвитку багатьох технологій, включаючи виявлення активності користувача, оцінку каналу та відстеження мобільності. Досліджено деякі аспекти бездротового зв'язку та будови антен, які впливають на перетині добре відомих областей електромагнітної теорії Максвелла та теорії інформації Шенона. Зокрема обґрунтовано можливість збільшення кількості ступенів свободи узагальненого бездротового каналу  $G(E)$  у розрізі фізичного каналу поширення, діаграми спрямованості антенної решітки та взаємного впливу, електромагнітних фізичних характеристик. Також досліджено особливості виникнення та розвитку багатьох технологій у тандемі з теорією семантичної комунікації, таких як спільне кодування каналу джерела та стиснення джерела у складі мережі 6G. Проаналізовано вплив теорії надвисокої роздільної здатності на напрямки розвитку багатьох технологій, включаючи алгоритми локалізації, стислу вибірку та алгоритми бездротової візуалізації.

### Література

1. Pizzo A., Marzetta T. L., and Sanguinetti L. Degrees of freedom of holographic MIMO channels, in Proc. 2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). IEEE, 2020, pp. 1–5.
2. Basar E., Di Renzo M., De Rosny J., Debbah M., Alouini M.-S., and Zhang R. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces, IEEE Access, vol. 7, pp. 116. 753–116 773, 2019.
3. Wu H., Bai G. D., Liu S., Li L., Wan X., Cheng Q., and Cui T. J. Information theory of metasurfaces, National Science Review, vol. 7, no. 3, pp. 561– 571, 2020.
4. Бортник Г.Г., Васильківський М.В., Челоян В.А. Спектральний метод оцінювання джерела в телекомунікаційних системах. Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2010, № 2, С. 109-114.
5. Бортник Г.Г., Васильківський М.В., Кичак В.М. Методи та засоби підвищення ефективності оцінювання фазового дрижання сигналів у телекомунікаційних системах : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2015. 140 с.
6. Бортник Г.Г., Васильківський М.В., Стальченко О.В. Пристрій аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2013. № 2. С. 82–85.

### References

1. Pizzo A., Marzetta T. L., and Sanguinetti L. Degrees of freedom of holographic MIMO channels, in Proc. 2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). IEEE, 2020, pp. 1–5.
2. Basar E., Di Renzo M., De Rosny J., Debbah M., Alouini M.-S., and Zhang R. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces, IEEE Access, vol. 7, pp. 116. 753–116 773, 2019.
3. Wu H., Bai G. D., Liu S., Li L., Wan X., Cheng Q., Cui T. J. Information theory of metasurfaces, National Science Review, vol. 7, no. 3, pp. 561– 571, 2020.
4. Bortnyk G.G., Vasylykivskyi M.V., Cheloyan V.A. Spektral'nyy metod otsinyuvannya dzyheru v telekomunikatsiynyykh systemakh. Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu, 2010, № 2, S. 109-114.
5. Bortnyk G.G., Vasylykivskyi M.V., Kychak V.M. Metody ta zasoby pidvyshchennya efektyvnosti otsinyuvannya fazovoho dryzhannya syhnaliv u telekomunikatsiynyykh systemakh: Monohrafiya. Vinnytsya: VNTU, 2015. 140 s.
6. Bortnyk G.G., Vasylykivskyi M.V., Stalchenko O.V. Device for analog-digital conversion of high-frequency signals. Measuring and computing equipment in technological processes. 2013, No. 2. P. 82–85.

ВЕСЕЛОВСЬКА Наталія

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0001-9399-6721>e-mail: [vnatalia@ukr.net](mailto:vnatalia@ukr.net)

БУРЛАКА Сергій

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4079-4867>e-mail: [ipserhiy@gmail.com](mailto:ipserhiy@gmail.com)

## МЕТОДИ ТА ПРИЙОМУ КОМБІНУВАННЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ КОМПЛЕКСНИХ ҐРУНТООБРОБНИХ МАШИН

В роботі наведені методи, математичні моделі та алгоритми, за допомогою яких інженери та розробники можуть оптимізувати роботу ґрунтообробних машин і підвищити їх ефективність і продуктивність. Поєднання робочих органів у ґрунтообробних машинах можна оптимізувати за допомогою математичних залежностей, що призводить до підвищення якості виконання польових робіт.

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

VESELOVSKA Nataliya, BURLAKA Serhiy  
Vinnytsia National Agrarian University

## METHODS AND TECHNIQUES COMBINATION WORKING BODIES OF COMPLEX SOIL PROCESSING MACHINES

The article establishes that the combination of working bodies in tillage machines can be optimized with the help of mathematical models and algorithms. These expressions provide valuable information about the performance of tillage machines and can be used to improve their efficiency and productivity. Using mathematical models and algorithms, engineers and inventors can optimize the design of tillage machines and improve their performance, leading to improved quality in field operations. In addition, the combination of working organs in tillage machines can also be analyzed using numerical simulation methods. These methods use mathematical models and algorithms to simulate the behavior of tillage machines in a virtual environment.

Numerical modeling techniques provide valuable information about the behavior of tillage machines and their components, allowing engineers and designers to optimize their design and increase productivity. Using numerical simulation techniques, engineers and designers can verify the mathematical models and algorithms used in the analysis of tillage machines and improve their accuracy and reliability.

Thus, the combination of working bodies in tillage machines can be analyzed and optimized with the help of mathematical models, algorithms and numerical modeling methods. These methods provide valuable information about the performance of tillage machines and can be used to improve their efficiency and productivity. Using these methods, engineers and designers can optimize the design of tillage machines and improve their performance, leading to increased efficiency and productivity in field operations. In addition, numerical modeling techniques can also be used to analyze the environmental impact of tillage. For example, modeling can be done to determine the impact of tillage on soil erosion and greenhouse gas emissions. By analyzing the results of this simulation, engineers and designers can improve the sustainability of tillage operations and reduce their environmental impact.

Keywords: soil, aggregate, model, tillage, mathematical model, indicators, soil tillage aggregate roller, cultivator, working bodies.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Комбінування робочих органів складних ґрунтообробних машин передбачає поєднання кількох ґрунтообробних знарядь в одній машині для підвищення ефективності та продуктивності польових робіт. Нижче наведено деякі способи і прийоми з'єднання робочих органів ґрунтообробних машин.

Механічна інтеграція: цей метод передбачає фізичне кріплення інструментів для обробки ґрунту до рами машини. Цей метод зазвичай використовується для знарядь обробки ґрунту, таких як плуги, культиватори та борони. Механічна інтеграція забезпечує точне розташування знарядь для обробки ґрунту та синхронізацію їх руху з рухом машини.

Гідравлічна інтеграція: у цьому методі використовуються гідравлічні циліндри для керування положенням і рухами знарядь для обробки ґрунту. Гідравлічна система підключена до системи керування машиною, що дозволяє оператору регулювати глибину обробітку ґрунту та робочий кут знарядь.

Пневматична інтеграція: цей метод використовує стиснене повітря для керування положенням і рухами знарядь для обробки ґрунту. Пневматичні системи зазвичай використовуються для інструментів для обробки ґрунту, таких як сівалки, які потребують точного контролю глибини та відстані розміщення насіння.

Електромеханічна інтеграція: цей метод поєднує в собі механічні та електричні системи для керування положенням і рухами знарядь для обробки ґрунту. Електромеханічні системи використовують датчики, приводи та схеми керування для керування інструментами для обробки ґрунту, забезпечуючи високий рівень точності та контролю.

Системи автоматичного керування: системи автоматичного керування використовуються для керування рухами та роботою знарядь для обробки ґрунту. Ці системи використовують датчики та

алгоритми керування для регулювання глибини обробітку ґрунту та робочого кута знарядь у режимі реального часу залежно від умов поля.

Таким чином, комбінування робочих органів складних ґрунтообробних машин дозволяє підвищити ефективність і продуктивність польових робіт.

### Аналіз останніх джерел

Вибір методу або техніки залежить від конкретних вимог до ґрунтообробних знарядь і типу польових операцій, які необхідно виконати. Незалежно від використовуваного методу, інтеграція ґрунтообробних знарядь в одну машину зменшує кількість необхідних проходів у полі, економить час і зменшує загальні витрати на операції з обробки ґрунту.

Підсумовуючи, за допомогою математичних моделей і рівнянь можна проаналізувати та оптимізувати поєднання робочих органів у ґрунтообробних машинах. Ці моделі та рівняння дають цінну інформацію про продуктивність ґрунтообробних машин і можуть бути використані для підвищення їх ефективності та продуктивності. Використовуючи математичні моделі та рівняння, інженери та дизайнери можуть оптимізувати конструкцію ґрунтообробних машин і покращити їх продуктивність, що призведе до підвищення ефективності та продуктивності в польових роботах.

Окрім наведених вище формул, існують інші математичні моделі та алгоритми, які можна використовувати для оптимізації продуктивності ґрунтообробних машин. Деякі з них включають:

Алгоритми оптимального керування: ці алгоритми використовують математичні моделі ґрунтообробних машин для визначення оптимальної глибини та кута знарядь для обробки ґрунту для заданих умов поля. Алгоритми використовують методи оптимізації, такі як лінійне програмування, динамічне програмування та градієнтний спуск, щоб визначити оптимальні налаштування знарядь для обробки ґрунту.

Моделі ерозії ґрунту: ці моделі використовують математичні рівняння для прогнозування рівня ерозії ґрунту, що відбувається під час операцій з обробітку ґрунту. Моделі враховують такі фактори, як тип ґрунту, нахил та інтенсивність обробки ґрунту, щоб передбачити ступінь ерозії ґрунту, яка відбувається під час операцій з обробки ґрунту.

Моделі ущільнення ґрунту: ці моделі використовують математичні рівняння для прогнозування ступеня ущільнення ґрунту, яке відбувається під час операцій з обробітку ґрунту. Моделі враховують такі фактори, як тип ґрунту, інтенсивність обробітку ґрунту та вага ґрунтообробної машини, щоб передбачити ступінь ущільнення ґрунту, яке відбувається під час операцій з обробітку ґрунту.

Моделі продуктивності машин: ці моделі використовують математичні рівняння для прогнозування продуктивності ґрунтообробних машин на основі їх конструкції та умов експлуатації. Моделі можуть бути використані для оптимізації конструкції ґрунтообробних машин та підвищення їх продуктивності.

### Формулювання цілей статті

**Метою роботи** є дослідження методів та прийомів комбінування робочих органів комплексних ґрунтообробних машин

### Виклад основного матеріалу

Комбінація робочих органів складних ґрунтообробних машин може бути математично змодельована та проаналізована для оптимізації їх продуктивності. Нижче наведено деякі математичні формули, які використовуються при проектуванні та аналізі ґрунтообробних машин.

Аналіз сили та крутного моменту: сили та крутні моменти, що діють на ґрунтообробні інструменти під час роботи, можна розрахувати за допомогою наступних рівнянь:

$$F = ma \quad (1)$$

$$T = Fr \quad (2)$$

де  $F$  - сила,  $m$  - маса ґрунтообробного знаряддя,  $a$  - прискорення,  $T$  - крутний момент,  $r$  - відстань від осі обертання.

Аналіз потоку ґрунту: потік ґрунту через інструменти для обробки можна проаналізувати за допомогою наступного рівняння:

$$Q = Av \quad (3)$$

де  $Q$  - швидкість потоку,  $A$  - площа поперечного перерізу ґрунтообробного знаряддя,  $v$  - швидкість руху ґрунту.

Аналіз розміщення часток ґрунту: розміщення часток ґрунту можна проаналізувати за допомогою наступного рівняння:

$$\Delta x = (Vt) + \left(\frac{1}{2}at^2\right) \quad (4)$$

де  $\Delta x$  - переміщення насіння з бажаного положення,  $V$  - початкова швидкість насіння,  $t$  - час,  $a$  - прискорення насіння.

Аналіз енергії: Енергію, необхідну для виконання операцій з обробки ґрунту, можна розрахувати за допомогою наступного рівняння:

$$E = Fd \quad (5)$$

де  $E$  - енергія,  $F$  - сила,  $d$  - відстань, яку переміщує ґрунтообробний інструмент.

Деякі з методів чисельного моделювання, які використовуються в аналізі ґрунтообробних машин, включають:

Аналіз кінцевих елементів (FEA): цей метод використовує математичні рівняння для моделювання поведінки ґрунтообробних машин та їх компонентів за різних навантажень і умов. FEA можна використовувати для прогнозування напружень і деформацій на ґрунтообробних інструментах, а також прогинів і вібрацій компонентів машини.

Метод дискретних елементів (DEM): Цей метод використовує математичні моделі для моделювання поведінки окремих частинок ґрунту під час їх взаємодії з інструментами для обробки ґрунту. DEM можна використовувати для прогнозування розподілу частинок ґрунту після операцій з обробки ґрунту, а також сил і крутних моментів, створених знаряддями для обробки ґрунту.

Обчислювальна гідродинаміка (CFD): цей метод використовує математичні моделі для імітації потоку ґрунту та інших рідин через інструменти для обробки ґрунту. CFD можна використовувати для прогнозування розподілу ґрунту та рідини в машині та для оптимізації конструкції знарядь для обробки ґрунту.

Наприклад, для дослідження комбінованого ґрунтообробного агрегату, що складається з барабана, лап, зубчастого колеса Crosskill, пластинчастого барабана та дошки необхідно виконати ряд дій.

Для моделювання такого поєднання робочих органів у ґрунтообробній машині методами чисельного моделювання можна виконати такі дії:

Моделювання компонентів машини: Першим кроком є створення математичних моделей решітчастого барабана, ніжок столу, зубчастого кільцевого ролика Crosskill і пластинчастого ролика. Це можна зробити за допомогою методів геометричного моделювання та може включати моделювання форми та розміру компонентів, а також їхніх властивостей матеріалів.

Визначення параметрів ґрунту та машини: наступним кроком є визначення параметрів ґрунту та машини, таких як тип ґрунту, вологість ґрунту, швидкість машини та вага машини. Ці параметри впливатимуть на поведінку машини, і їх потрібно буде враховувати під час моделювання.

Налаштування моделювання: налаштування моделювання включатиме визначення граничних умов, таких як початкове положення машини, і встановлення параметрів моделювання, таких як часовий крок і максимальний час моделювання.

Симуляційний запуск: моделювання використовуватиме математичні моделі та алгоритми для моделювання поведінки компонентів машини та ґрунту, коли вони взаємодіють один з одним. Моделювання дозволить передбачити напруги та деформації на компонентах машини, а також розподіл частинок ґрунту після операцій з обробки ґрунту.

Перевірка та оптимізація: результати моделювання можна перевірити на експериментальних даних і використати для оптимізації конструкції компонентів машини. Це може включати оптимізацію форми та розміру компонентів, а також властивостей їх матеріалів для покращення продуктивності ґрунтообробної машини.

За допомогою чисельних методів моделювання можна змодельовати поєднання робочих органів ґрунтообробної машини та оптимізувати її роботу. Результати моделювання можуть дати цінну інформацію про поведінку машини та можуть бути використані для підвищення її ефективності та продуктивності.

Підбір робочих органів комбінованого ґрунтообробного агрегату можна здійснити за допомогою методу кінцево-елементного аналізу (FEA). Для вибору оптимальної комбінації робочих органів за допомогою МКЕ можна використовувати такі математичні формули:

Щільність енергії деформації (SED): Щільність енергії деформації (SED) можна розрахувати за допомогою рівняння:

$$SED = (\sum \sigma_i \varepsilon_i) / 2 \quad (6)$$

де  $\sigma_i$  та  $\varepsilon_i$  – напруги та деформації, відповідно, в елементі  $i$  компонента машини. SED являє собою кількість енергії, збереженої в компоненті через деформацію, і може використовуватися для оцінки продуктивності компонента машини.

Напруга Фон Мізеса ( $\sigma_{vm}$ ): Напруга фон Мізеса ( $\sigma_{vm}$ ) можна розрахувати за допомогою рівняння:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3)} \quad (7)$$

де  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  і  $\sigma_3$  – головні напруження в деталі машини. Напруга Фон Мізеса представляє загальну напругу в компоненті і може бути використана для оцінки ризику відмови.

Нормований коефіцієнт концентрації напруги ( $K_i$ ): Нормований коефіцієнт концентрації напруги ( $K_i$ ) можна розрахувати за допомогою рівняння:

$$K_i = \sigma_{vm} / \sigma_a \quad (8)$$

де  $\sigma_{vm}$  – напруга фон Мізеса, а  $\sigma_a$  – прикладена напруга в компоненті. Нормований коефіцієнт концентрації напруги представляє величину концентрації напруги в компоненті та може використовуватися для оцінки ризику відмови.

Нормована щільність енергії деформації ( $SED_n$ ): нормалізована щільність енергії деформації ( $SED_n$ )

може бути розрахована за допомогою рівняння:

$$SED_n = SED/V_0 \quad (9)$$

де  $SED$  – густина енергії деформації, а  $V_0$  – об'єм компонента. Нормована щільність енергії деформації являє собою кількість енергії, збереженої в компоненті на одиницю об'єму, і може бути використана для оцінки продуктивності компонента машини.

Використовуючи ці математичні формули, можна оцінити продуктивність різних комбінацій робочих органів і підібрати оптимальну комбінацію, виходячи з бажаних критеріїв ефективності, таких як глибина обробітку ґрунту, структура ґрунту та ефективність. Результати моделювання дають цінну інформацію про поведінку машини та можуть бути використані для підвищення її ефективності та продуктивності.

Комбінований ґрунтообробний агрегат можна оптимізувати для конкретних умов ґрунту та вимог до обробки ґрунту за допомогою методів чисельного моделювання та математичних формул. Наприклад, глибину обробітку ґрунту можна оптимізувати за такою формулою:

$$T = (LF_a C_d) / (\rho_s g) \quad (10)$$

де  $T$  – глибина обробітку ґрунту,  $L$  – довжина робочого органу,  $F_a$  – прикладена сила,  $C_d$  – коефіцієнт опору,  $\rho_s$  – щільність ґрунту,  $g$  – прискорення сили тяжіння. Оптимізацію глибини обробітку ґрунту можна здійснити шляхом варіювання таких параметрів, як довжина робочого органу та прикладеного зусилля, та оцінки впливу на глибину обробітку ґрунту методами чисельного моделювання.

Наприклад, підставляючи вибірккові дані можна оптимізувати глибину обробітку агрегату та підібрати найбільш компактний та економічний варіант комплектування. Дані такого підбору наведені у табл. 1.

Таблиця 1

#### Оптимізація глибини обробітку комбінованого ґрунтообробного агрегату

Довжина робочого органу (L)	Прикладена сила ( $F_a$ )	Коефіцієнт опору ( $C_d$ )	Щільність ґрунту ( $\rho_s$ )	Прискорення сили тяжіння (g)	Глибина обробки ґрунту (T)
0.5 м	600 Н	0.35	1500 кг/м <sup>3</sup>	9.8 м/с <sup>2</sup>	0.12 м
0.6 м	650 Н	0.36	1550 кг/м <sup>3</sup>	9.8 м/с <sup>2</sup>	0.14 м
0.7 м	700 Н	0.37	1600 кг/м <sup>3</sup>	9.8 м/с <sup>2</sup>	0.16 м
0.8 м	750 Н	0.38	1650 кг/м <sup>3</sup>	9.8 м/с <sup>2</sup>	0.18 м
0.9 м	800 Н	0.39	1700 кг/м <sup>3</sup>	9.8 м/с <sup>2</sup>	0.19 м
1 м	850 Н	0.4	1750 кг/м <sup>3</sup>	9.8 м/с <sup>2</sup>	0.21 м
1.1 м	900 Н	0.41	1800 кг/м <sup>3</sup>	9.8 м/с <sup>2</sup>	0.22 м
1.2 м	950 Н	0.42	1850 кг/м <sup>3</sup>	9.8 м/с <sup>2</sup>	0.24 м
1.3 м	1000 Н	0.43	1900 кг/м <sup>3</sup>	9.8 м/с <sup>2</sup>	0.25 м
1.4 м	1050 Н	0.44	1950 кг/м <sup>3</sup>	9.8 м/с <sup>2</sup>	0.27 м
1.5 м	1100 Н	0.45	2000 кг/м <sup>3</sup>	9.8 м/с <sup>2</sup>	0.28 м
1.6 м	1150 Н	0.46	2050 кг/м <sup>3</sup>	9.8 м/с <sup>2</sup>	0.30 м
1.7 м	1200 Н	0.47	2100 кг/м <sup>3</sup>	9.8 м/с <sup>2</sup>	0.31 м
1.8 м	1250 Н	0.48	2150 кг/м <sup>3</sup>	9.8 м/с <sup>2</sup>	0.33 м
1.9 м	1300 Н	0.49	2200 кг/м <sup>3</sup>	9.8 м/с <sup>2</sup>	0.34 м
2 м	1350 Н	0.5	2250 кг/м <sup>3</sup>	9.8 м/с <sup>2</sup>	0.36 м

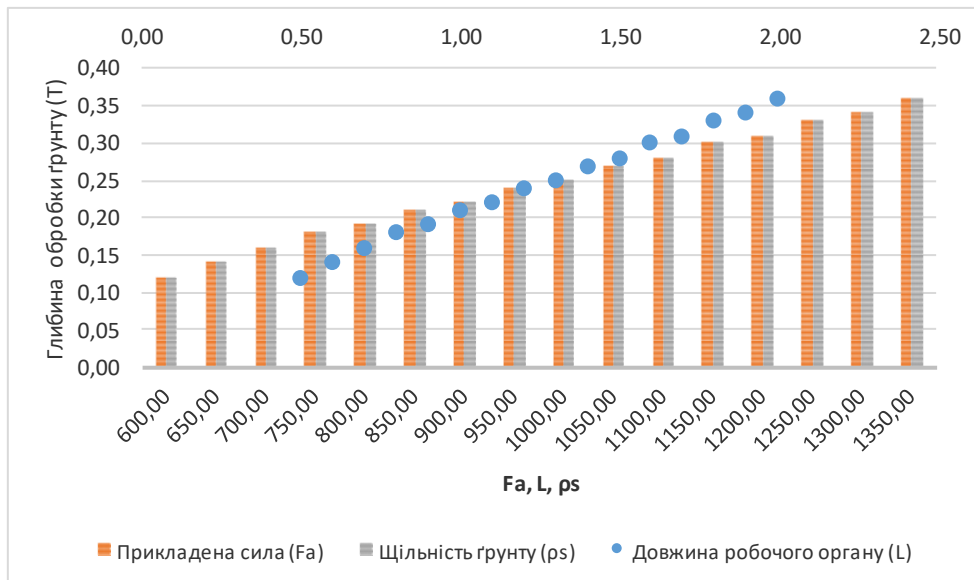


Рис. 1. Графіки оптимізації глибини обробки ґрунту від конструктивних особливостей агрегату

Іншим важливим фактором, який слід враховувати, є структура ґрунту, на яку може вплинути обробіток ґрунту. Структуру ґрунту можна оцінити за формулою середнього вагового діаметра ( $MWD$ ):

$$MWD = \sqrt{(\sum (d_i^3) / n) / (\sum (d_i) / n)^{3/2}} \quad (11)$$

де  $d_i$  – діаметр ґрунтового агрегату  $i$ , а  $n$  – загальна кількість ґрунтових агрегатів.  $MWD$  представляє середній розмір ґрунтових агрегатів і може бути використаний для оцінки впливу обробки ґрунту на структуру ґрунту. Оптимізацію структури ґрунту можна здійснити підбором оптимальної комбінації робочих органів з урахуванням бажаної ММР.

Зрештою, ефективність комбінованого ґрунтообробного агрегату можна оцінити за формулою питомої енергії:

$$E = (F_a L) / (Vt) \quad (12)$$

де  $E$  – питома енергія,  $F_a$  – прикладена сила,  $L$  – довжина робочого органу,  $V$  – об'єм обробітку,  $t$  – час обробітку. Питома енергія являє собою енергію, необхідну для обробки одиниці об'єму ґрунту, і може бути використана для оцінки ефективності машини. Оптимізацію ККД можна здійснити підбором оптимальної комбінації робочих органів з урахуванням бажаної питомої енергії.

Використовуючи ці методи, можна розробити та оптимізувати комбінований ґрунтообробний агрегат для покращення продуктивності та продуктивності.

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Підводячи підсумки, можна стверджувати, що методи чисельного моделювання є потужним інструментом для аналізу та оптимізації комбінації робочих органів у ґрунтообробних машинах. Вони дозволяють інженерам моделювати поведінку машини та ґрунту та оптимізувати конструкцію компонентів. Крім того, методи чисельного моделювання можна використовувати для аналізу впливу операцій з обробітку ґрунту на структуру ґрунту, родючість і навколишнє середовище, надаючи цінну інформацію про стійкість операцій з обробітку ґрунту.

Також при підборі оптимальної комбінації важливо враховувати міцність і довговічність робочих органів. Довговічність можна оцінити, враховуючи такі фактори, як кількість циклів, величина навантажень і наявність будь-яких гострих країв або кутів, які можуть збільшити ризик поломки. Життєвий цикл компонентів машини можна оцінити за допомогою аналізу втоми, який передбачає кількість циклів до відмови на основі прикладених навантажень і властивостей матеріалів компонентів.

### Література

1. Булгаков В.М., Адамчук В.В. Стан та перспективи створення в Україні сучасних сільськогосподарських машин. Наук. вісник Луганського нац. аграр. ун-ту. 2011. 29. С. 252–260.
2. Rutkevych V., Kupchuk I., Yaropud V., Hraniak V., Burlaka S. Numerical simulation of the liquid distribution problem by an adaptive flow distributor. Przeglad Elektrotechniczny. 2022. Vol. 98 (2). P. 64-69.
3. Войтюк Д.Г., Барановський М.В., Булгаков В.М. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку. К. : Вища освіта, 2005. 464 с.
4. Honcharuk I., Kupchuk I., Yaropud V., Kravets R., Burlaka S., Hraniak V., Poberezhets Ju., Rutkevych V. Mathematical modeling and creation of algorithms for analyzing the ranges of the amplitude-frequency response

of a vibrating rotary crusher in the software Mathcad. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2022. Vol. 98 (9). P. 14-20.

5. Гунько І.В., Бурлака С.А. Оцінка енергетичних показників ґрунтообробного агрегата. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 2 (117). С. 47-52.

6. Веселовська Н.Р., Руткевич В.С., Шаргородський С.А. Технологічні основи сільськогосподарського машинобудування : навч. посіб. Вінниця : 2019. 234 с.

7. Бурлака С.А. Алгоритм функціонування машинно-тракторного агрегату з використанням системи живлення зі змішувачем палив. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2022. № 1 (305). С. 140-144.

8. Калетник Г.М., Зарішняк А.С., Адамчук В.В., Булгаков В.М. Землеробська механіка – теоретична база сучасної землеробської техніки. *Механізація та електрифікація сільського господарства : міжвід. темат. наук. зб.* 2013. Т. 1. Вип. 98. С. 31–44.

9. Серeda Л.П., Швець Л.В. Розробка культиватора для нових технологій обробітку ґрунту. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2020. 3(110). С. 117–125.

### References

1. Bulhakov V.M., Adamchuk V.V. Stan ta perspektyvy stvorennia v Ukraini suchasnykh silskohospodarskykh mashyn. *Nauk. visnyk Luhanskoho nats. ahrar. un-tu*. 2011. 29. S. 252–260.

2. Rutkevych V., Kupchuk I., Yaropud V., Hraniak V., Burlaka S. Numerical simulation of the liquid distribution problem by an adaptive flow distributor. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2022. Vol. 98 (2). P. 64-69.

3. Voitiuk D.H., Baranovskyi M.V., Bulhakov V.M. *Silskohospodarski mashyny. Osnovy teorii ta rozrakhunku*. K. : Vyscha osvita, 2005. 464 s.

4. Honcharuk I., Kupchuk I., Yaropud V., Kravets R., Burlaka S., Hraniak V., Poberezhets Ju., Rutkevych V. Mathematical modeling and creation of algorithms for analyzing the ranges of the amplitude-frequency response of a vibrating rotary crusher in the software Mathcad. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2022. Vol. 98 (9). R. 14-20.

5. Hunko I.V., Burlaka S.A. Otsinka enerhetychnykh pokaznykiv ґрунтообробного ahrehata. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. 2022. № 2 (117). S. 47-52.

6. Veselovska N.R., Rutkevych V.S., Sharhorodskyi S.A. *Tekhnolohichni osnovy silskohospodarskoho mashynobuduvannia : navch. posib*. Vinnytsia : 2019. 234 s.

7. Burlaka S.A. Alhorytm funktsionuvannia mashynno-traktornoho ahrehatu z vykorystanniam systemy zhyvlennia zi zmishuvachem palyv. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky*. 2022. № 1 (305). S. 140-144.

8. Kaletnik H.M., Zaryshniak A.S., Adamchuk V.V., Bulhakov V.M. Zemlerobska mekhanika – teoretychna baza suchasnoi zemlerobskoï tekhniki. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva : mizhvid. temat. nauk. zb.* 2013. Т. 1. Vyp. 98. S. 31–44.

9. Sereda L.P., Shvets L.V. Rozrobka kultyvatora dlia novykh tekhnolohii obrobittku ґрунту. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. 2020. 3(110). С. 117–125.

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-48-57>

УДК 621.316.11.3:621.311.1

ВЛАСЮК Валентин

Криворізький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3202-8967>

Email: [Valentin@ua.fm](mailto:Valentin@ua.fm)

## ПОБУДОВА ПРОГНОЗОВАНИХ МОДЕЛЕЙ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ ТРАДИЦІЙНИХ ТА СКЛАДЕНИХ ЗГІДНО З КОНЦЕПЦІЄЮ SMART GRID СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ДЛЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ

У роботі досліджено особливості побудови прогнозованих моделей споживання електроенергії згідно з традиційними та розглянуто схеми, побудовані за концепцією Smart Grid, а також швидкоплинність зміни режиму споживання електроенергії, що є хаотично лавиноподібною та формує відповідний ряд проблемних питань. Потребує у сьогоднішні вирішення, в першу чергу, систематизація об'ємів споживання електроенергії на залізорудній шахті. Розглянута дана проблема є актуальною не тільки з точки зору зниження нерівномірності у об'ємах споживаної електроенергії залізорудною шахтою, а й дозволить підвищити ефективність використання спожитої енергії, що, у свою чергу, дозволить збільшити об'єми виробленої продукції (залізорудної сировини).

Прогнозованість моделей споживання електроенергії здійснюється за допомогою виділення даних зв'язків між даними змінними за статистично-математичним методом множинної кореляції, оскільки на прогнозовану модель споживання електроенергії чинить вплив велика кількість факторів.

Основоположенням для побудови прогнозованих моделей споживання для традиційних схем електропостачання та подальшої їх трансформації стають «інтелектуальні технології» розвитку електроенергетики. Впровадження «інтелектуальних технологій», у тому числі й Smart Grid, дозволить стабілізувати та спрогнозувати графіки для об'ємів спожитої електроенергії залізорудної шахти, на відміну від традиційних схем її електропостачання.

Ціль даної роботи полягає у дослідженні питань особливостей побудови математичних прогнозованих моделей споживання електроенергії, котрі розробляються для традиційних та побудованих згідно з концепцією Smart Grid схем електропостачання та сприяють збільшенню об'ємів виробленої продукції (залізорудної сировини) та зниження собівартості їх видобутку для конкурування по якості та ціні з іноземними виробниками сировини українських залізорудних шахт.

Ключові слова: модель споживання електроенергії, схеми електропостачання, концепція Smart Grid, математична модель, залізорудна шахта.

VLASYUK Valentyn  
Kryvyi Roh National University

## BUILDING PREDICTIVE ELECTRICITY CONSUMPTION MODELS FOR TRADITIONAL AND SMART GRID POWER SUPPLY SCHEMES FOR IRON ORE MINES

The paper studies the peculiarities of building predictive models of electricity consumption according to the traditional and considered schemes built on the concept of Smart Grid, as well as the rapidity of changes in the mode of electricity consumption, chaotic - avalanche-like and forms a corresponding series of problematic issues. Need to be solved today: first of all - systematization of electricity consumption volumes at the iron ore mine. This problem is relevant not only in terms of reducing the irregularity in the amount of electricity consumed by the iron ore mine, but also will increase the efficiency of energy consumption, which in turn will increase the volume of products (iron ore raw materials).

Predictability of electricity consumption models is carried out by isolating these relationships between these variables by statistical - mathematical method of multiple correlation, as the predicted model of electricity consumption is influenced by a large number of factors. The basis for the construction of predictive consumption models for traditional power supply schemes and their subsequent transformation are "smart technologies" of power industry development. The introduction of "smart technologies" including Smart Grid will allow to stabilize and predict the schedules for the volume of consumed electricity of iron ore mine, in contrast to the traditional schemes of its power supply. The purpose of this work is to investigate the issues of construction of mathematical predictive models of electricity consumption developed for traditional and built according to the concept of Smart Grid power supply schemes and contributing to increase the volume of production (iron ore raw materials) and reduce the cost of their production to compete in quality and price. with foreign producers of raw materials of Ukrainian iron ore mines

Keywords: power consumption model, power supply schemes, Smart Grid concept, mathematical model, iron ore mine.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Одним із пріоритетних напрямків розвитку електроенергетики як галузі є забезпечення та мінімізація нерівномірного об'єму споживання електроенергії для типових схем електропостачання залізорудної шахти. Забезпечення реалізації даного пріоритетного напрямку є важливим аспектом для усієї енергетичної сфери та дозволить розширити класичні мережеві структури на основі введення у експлуатацію нових «інтелектуальних технологій»: Smart Grid.

Побудова прогнозованих моделей споживання електроенергії є першочерговим перспективним напрямком у галузі «Електроенергетика». Причиною для побудови прогнозованих моделей споживання традиційних схем електропостачання та подальшої їх трансформації з втіленням концепції Smart Grid обумовлено: швидкоплинністю зміни режимів споживання електроенергії за хаотично лавиноподібним графіком. Аналіз схемотехнічних рішень раніше створених та практично реалізованих систем



електропостачання у даному випадку фізично не можливо реалізувати систематизацію об'ємів спожитої електроенергії залізрудною шахтою. Тому, реалізацію даного завдання слід покласти на «інтелектуальні технології» розвитку електроенергетики. Впровадження «інтелектуальних технологій» у тому числі й Smart Grid дозволить стабілізувати графіки об'ємів спожитої електроенергії залізрудної шахти, на відміну від традиційних схем її електропостачання [1–7].

### Аналіз досліджень та публікацій

Побудові прогнозованих моделей споживання електроенергії на залізрудній шахті у сьогоденні присвячена ціла низка публікацій. Однак дані публікації не наводять досить детальних положень у методологію побудови даних прогнозованих моделей споживання електроенергії. Слід відмітити, що вони не дозволяють досить повно відобразити графічну характеристику прогнозованої моделі споживання залізрудною шахтою. У роботах [9–12] було показано наступне: розв'язані задачі та розглянуті аспекти з використанням різноманітних способів штучних нейронних мереж, прогнозування у системах електроживлення локальних об'єктів на основі методу короткострокового прогнозування діапазону зміни оптових та ринкових цін на електроенергію, а також прогнозування рівнів та об'ємів електроспоживання локальних об'єктів на основі математичного методу вейвлет перетворення; проведено аналіз особливостей прогнозування рівнів електроспоживання для умов залізрудних підприємств та впровадження розподільчих електромереж з відновлювальними джерелами електроенергії та процесів електроспоживання для електроприймачів підприємств даної галузі; обґрунтована необхідність врахувати причинно-наслідкові зв'язки для процесу моделювання електроспоживання для складних виробничих систем.

Запропонована двоетапна процедура для побудови математичної моделі електроспоживання згідно з методологією латентних змінних, що не забезпечують наявні причинно-наслідкові зв'язки. Для першого етапу передбачається формування математичного відображення залежностей між латентними факторами та інформативними показниками енергоефективності інформаційного поля, а також перевірку їх відповідності вихідним даним. На другому етапі будується математична модель електроспоживання, як рівняння регресії на головних компонентах, що відображають латентні фактори та перевірка її адекватності функціонування. На основі запропонованої процедури проведено моделювання електроспоживання системи комунального водопостачання з урахуванням побудови математичних залежностей для попередньо виявлених латентних факторів і виконано перевірку її адекватності та точності прогнозування електроспоживання; розв'язана актуальна науково прикладна задача планування по впровадженню у функціонування енергоефективних режимів роботи електротехнічних комплексів вугільних шахт, розвитку та удосконалення їх математичних моделей та методів багатфакторного прогнозування рівнів електроспоживання з урахуванням певних технологічних характеристик; запропоновано методику використання багатфакторної регресійної моделі прогнозування обсягів споживаної електроенергії для світлосигнального обладнання аеропорту для ефективного використання енергетичних ресурсів авіапідприємств. Практичне використання даної моделі дозволяє розробити комплекс енергозберігальних заходів, з точним врахуванням планів проведення реконструювання наявної інфраструктури та керувати споживанням електроенергії для світлосигнального обладнання враховуючи особливості його експлуатації.

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є дослідження та аналіз з питань по особливостям побудови математичних прогнозованих моделей споживання електроенергії, котрі були розроблені для традиційних та побудованих згідно концепції Smart Grid схем електропостачання та сприяють не тільки вирішенню проблеми хаотично лавиноподібного режиму її споживання, але й підвищення ефективності використання, що полягає у збільшенні об'ємів виробленої продукції (залізрудної сировини).

Впровадження даної технології дозволить виконати стабілізування графіків та об'ємів спожитої електроенергії для залізрудної шахти, на відміну від підходу характерного для традиційних схем її електропостачання, що дозволить перенаправити залишок її обсягів на інші схеми електропостачання де є недостатнім для нормального функціонування енергосистеми залізрудної шахти.

### Виклад основного матеріалу

В сьогоденні побудова прогнозованих математичних моделей споживання електроенергії є не достатньо чітко структурованою, а є скоріше недопрацьованою. Для удосконалення їх побудови необхідно володіти певними обсягами: первинної інформації від операторів енергодиспетчерського відділу, або структурного підрозділу підприємств гірничо-металургійного циклу виробництва. В даному аспекті вирішення цієї проблеми є досить складною задачею, оскільки подекуди просто відсутній деякий обсяг інформації про спожитий об'єм електроенергії. В такому разі, доводиться послуговуватися певними математичними методами.

Візьмемо за приклад основу дані від об'єднання підприємств ПАТ «КЗРК» (Криворізького залізрудного комбінату). У табл. 1 наведені показники споживання електроенергії для даного об'єднання підприємств:

Табл. 1

**Питомі показники споживання електроенергії на одиницю виготовленої продукції ПАТ «КЗРК» за період 2010–2014 років**

Рік	Продукція	Одиниці виміру	ш. Родіна	ш. Козацька	ш. Тернівська	ш. Покровська
2010	Електроенергія	тис. кВт·год	42578	62841	38278	39753
		кВа	5245	9136	7001	7381
2011	Електроенергія	тис. кВт·год	43808	66385	41034	4225
		кВа	4616	9713	8228	8375
2012	Електроенергія	тис. кВт·год	46546	70502	44219	42102
		кВа	6552	7440	4357	7743
2013	Електроенергія	тис. кВт·год	42977	68458	41181	41229
		кВа	6619	6692	10891	7637
2014	Електроенергія	тис. кВт·год	41829	68037	43545	42161
		кВа	6180	7190	7844	9874

На основі наведеної вище табл. 1, де показано зведені рівні споживання ЕЕ (за період 2010–2014 року) вітчизняних залізрудних підприємств, котрі характеризуються підземним видобутком залізрудної сировини.

Значення коефіцієнту  $m_n$ , що знаходяться у табл. 2 визначаються за емпіричною залежністю (з табл. 1):

$$m_n = 0,035 \frac{Q_n}{P_n} \quad (1)$$

де  $P_n$  та  $Q_n$  – відповідно активна та реактивна потужності річна.

Для виконання подальшого кроку побудови прогнозованої моделі застосуємо з табл. 2 річні коефіцієнти споживання електроенергії для кожної з залізрудних шахт.

Таблиця 2

**Річні коефіцієнти споживання електроенергії для залізрудних шахт**

Місяць	ш. Родіна	ш. Козацька	ш. Тернівська	ш. Покровська
Січень	1,034	0,966	1,015	1,006
Лютий	1,024	1,03	0,997	0,973
Березень	1,004	1,032	1,017	1,023
Квітень	0,934	0,971	0,996	0,922
Травень	0,98	1,034	0,946	0,96
Червень	0,941	1,006	1,022	1,063
Липер	1,015	0,956	1	0,948
Серпень	0,972	1,002	0,984	0,935
Вересень	1,026	0,977	0,97	1,016
Жовтень	0,964	0,986	1,018	1,025
Листопад	1,016	0,962	1,008	1,034
Грудень	1,091	1,078	1,028	1,096

Значення рівнів споживання активної та реактивної потужності для прогнозованої моделі споживання ЕЕ на 2015–2024 роки, що у табл. 4 було отримано за співвідношеннями для кожного з років:

$$P = \left(0,035 \frac{Q_n}{P_n}\right) \cdot P_n \quad (2)$$

$$Q = \left(0,035 \frac{Q_n}{P_n}\right) \cdot P_n \quad (3)$$

Отримані значення рівнів споживання для активної та реактивної потужності для прогнозованої моделі споживання ЕЕ на 2015–2024 роки для традиційних схем електропостачання залізрудних шахт занесемо у Табл. 4:

Таблиця 3

Значення розрахункового коефіцієнту  $m_n$  на прогнозовану модель споживання ЕЕ на 2015–2024 роки для традиційних схем електропостачання залізрудних шахт

Рік	$m_n$	ш. Родіна	ш. Козацька	ш. Тернівська	ш. Покровська
2015		1,034	0,966	1,015	1,006
2016		1,007	1,032	0,995	1,023
2017		0,938	0,971	0,946	1,096
2018		0,934	1,034	1,022	1,063
2019		0,98	1,006	1	0,924
2020		0,972	0,956	0,97	0,96
2021		1,026	1,002	1,018	0,935
2022		0,964	0,986	1,009	0,948
2023		1,016	0,961	1,028	1,021
2024		1,091	1,085	0,984	0,917

Таблиця 4

Значення рівнів споживання активної та реактивної потужності для прогнозованої моделі споживання ЕЕ на 2015–2024 роки для традиційних схем електропостачання для залізрудних шахт

Рік	Продукція	Одиниці виміру	ш. Родіна	ш. Козацька	ш. Тернівська	ш. Покровська
2015	Електроенергія	тис. кВт·год	38780,652	61252,566	37241,94	38884,368
		кВа	4777,221094	8905,069031	6811,505876	7219,719775
2016	Електроенергія	тис. кВт·год	39498,656	67644,863	41857,33	41965,5
		кВа	4161,929239	9309,384174	8393,091369	8318,60503
2017	Електроенергія	тис. кВт·год	50212,148	75897,442	37474,174	44982,342
		кВа	7068,061567	8009,375173	3692,416747	8272,725146
2018	Електроенергія	тис. кВт·год	46759,518	64093,572	41542,432	42680,877
		кВа	7201,555475	6265,362468	10986,5867	7905,936541
2019	Електроенергія	тис. кВт·год	34812,42	63052,722	42929,246	40437,864
		кВа	5143,339683	6663,272501	7733,08085	9470,445889
2020	Електроенергія	тис. кВт·год	47236,13031	67371,02266	41238,83953	39391,80693
		кВа	5818,814962	9794,58734	7542,533976	7313,936732
2021	Електроенергія	тис. кВт·год	37626,52984	73617,88219	36565,70216	40809,86935
		кВа	3964,665398	10771,26594	3602,902922	8089,530315
2022	Електроенергія	тис. кВт·год	52376,12176	77240,15278	39894,59886	41051,87896
		кВа	7372,671117	8151,069994	10550,78983	7549,871712
2023	Електроенергія	тис. кВт·год	40334,6428	75458,88261	40087,51774	41771,0664
		кВа	6212,043668	7376,359847	7221,184733	9782,678534
2024	Електроенергія	тис. кВт·год	43169,33269	64090,65447	39212,33943	39768,35
		кВа	6378,026633	6772,958914	7862,726734	7883,075296

На основі наведеної вище складеної прогнозованої моделі споживання електроенергії для традиційних схем електропостачання залізрудних шахт (Табл. 1–4, Формули 1–3) побудуємо графічну залежність від коефіцієнту  $m_n$ :

## Прогнозована модель споживання електроенергії на залізорудних шахтах на 2015 - 2024 рік

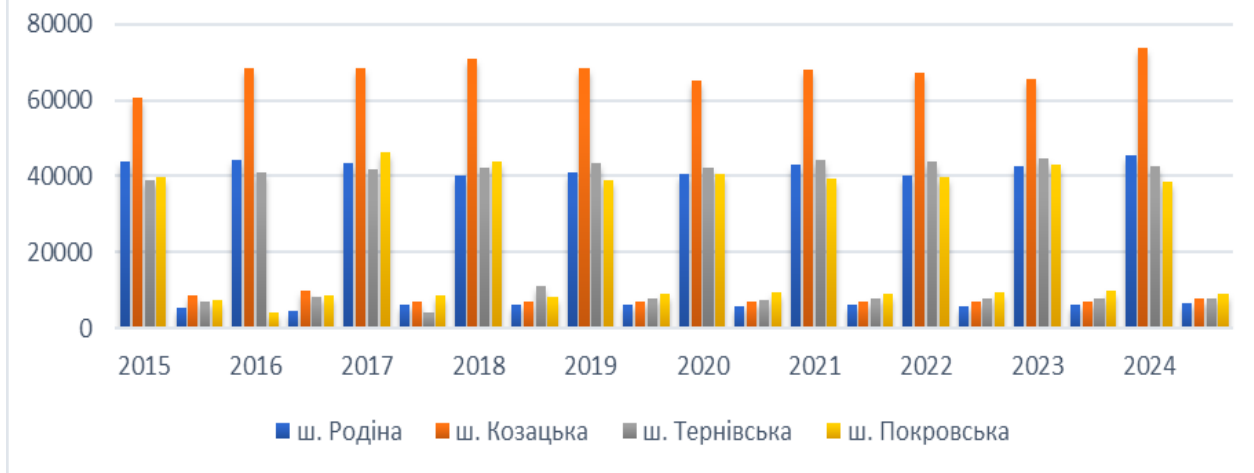


Рис. 1. Прогнозована модель споживання електроенергії для традиційних схем електропостачання для залізорудних шахт на 2015–2024 рік

Згідно з отриманою прогнозованою моделлю (рис. 1), слід відмітити максимальне відхилення споживання ЕЕ за період десяти років (з 2015–2024 рік) носить коливальний характер у межах 25–45%, а максимальні рівні споживання ЕЕ ставляться у відповідність найбільшим за об’ємом видобутку залізорудної сировини, але дане логічне заключення може не відповідати дійсності для умов мінімального об’єму видобутку ЗРС (залізорудної сировини).

Згідно концепції SG (Smart Grid), враховуємо вдосконалені розрахункові дані електричних параметрів та наведених графіків, котрі були отримані у раніш наведеному рис. 1 для топології схем вітчизняних залізорудних підприємств – створення відповідної математичної моделі.

Тобто, використовуємо наступні скориговані та удосконалені розрахункові формули основних параметрів у математичній моделі:

$$P_k = m_n \cdot (m_n - \Delta m_y) \cdot P_n \tag{4}$$

$$Q_k = m_n \cdot (m_n - \Delta m_x) \cdot Q_n \tag{5}$$

де  $m_n$  – певний розрахунковий коефіцієнт;  $\Delta m_y$  та  $\Delta m_x$  – зміни у розрахункових коефіцієнтах з урахуванням змін схемної топології згідно з концепцією Smart Grid;  $P_k$  та  $Q_k$  – відповідно активна та реактивна потужності річна для схемної топології згідно з концепцією Smart Grid.

Таблиця 5

**Розрахункові коефіцієнти  $\Delta m_y$  для залізорудних шахт для ПАТ «КЗРК» за період 2015–2024 років прогнозна модель Smart Grid**

Роки	Коефіцієнт ш. Родіна	Коефіцієнт ш. Козацька	Коефіцієнт ш. Тернівська	Коефіцієнт ш. Покровська
2015	0,123185683	0,145382791	0,182898793	0,185671522
2016	0,105368882	0,146313173	0,200516645	0,198224852
2017	0,140763975	0,105528921	0,098532305	0,183910503
2018	0,154012611	0,097753367	0,264466623	0,185233695
2019	0,147744388	0,105677793	0,180135492	0,234197481
2020	0,137402281	0,116087056	0,107350946	0,222487607
2021	0,167103683	0,106953562	0,22479663	0,206093783
2022	0,161255054	0,109573924	0,160950938	0,180384615
2023	0,154966107	0,141265369	0,107400213	0,201657867
2024	0,168448159	0,143002933	0,113575725	0,202189349

Для виконання подальшого кроку побудови прогнозованої моделі застосуємо у табл. 5 розрахункові коефіцієнти на прогнозовану модель споживання електроенергії:

Проведемо перерахунок розрахункових коефіцієнтів  $m_n$  на прогнозовану модель споживання ЕЕ

на 2015–2024 роки для схем електропостачання складених згідно концепції Smart Grid для залізрудних шахт, враховуючи скориговані та удосконалені розрахункові формули (4, 5) для основних параметрів у математичній моделі:

Занесемо отримані розрахункові коефіцієнти за формулами 4 та 5  $m_n$  у табл. 6.

Таблиця 6

**Розрахунковий коефіцієнт  $m_n$  на прогнозовану модель споживання ЕЕ на 2015–2024 роки для схем електропостачання складених згідно з концепцією Smart Grid для залізрудних шахт**

Рік	$m_n$	ш. Родіна	ш. Козацька	ш. Тернівська	ш. Покровська
2015		0,911	0,975	0,973	0,978
2016		0,902	1,019	1,020	0,993
2017		1,079	1,076	0,847	1,068
2018		1,088	0,936	1,009	1,035
2019		0,832	0,927	0,986	0,959
2020		1,109	1,072	1,077	0,991
2021		0,859	1,109	0,827	0,966
2022		1,125	1,095	0,969	0,975
2023		0,938	1,102	0,920	0,991
2024		1,032	0,942	0,956	0,941

Результати отримані за математичними формулами 4 та 5 заносимо у табл. 7:

Таблиця 7

**Значення рівнів споживання активної та реактивної потужності для прогнозованої моделі споживання ЕЕ на 2015–2024 роки та схем електропостачання складених згідно концепції Smart Grid для залізрудних шахт**

Рік	Продукція	Одиниці виміру	ш. Октябрська	ш. Батьківщина	ш. Гвардійська	ш. Леніна
2015	Електроенергія	тис. кВт·год	38780,652	61252,566	37241,94	38884,368
		кВа	4777,221094	8905,069031	6811,505876	7219,719775
2016	Електроенергія	тис. кВт·год	39498,656	67644,863	41857,33	41965,5
		кВа	4161,929239	9309,384174	8393,091369	8318,60503
2017	Електроенергія	тис. кВт·год	50212,148	75897,442	37474,174	44982,342
		кВа	7068,061567	8009,375173	3692,416747	8272,725146
2018	Електроенергія	тис. кВт·год	46759,518	64093,572	41542,432	42680,877
		кВа	7201,555475	6265,362468	10986,5867	7905,936541
2019	Електроенергія	тис. кВт·год	34812,42	63052,722	42929,246	40437,864
		кВа	5143,339683	6663,272501	7733,08085	9470,445889
2020	Електроенергія	тис. кВт·год	47236,13031	67371,02266	41238,83953	39391,80693
		кВа	5818,814962	9794,58734	7542,533976	7313,936732
2021	Електроенергія	тис. кВт·год	37626,52984	73617,88219	36565,70216	40809,86935
		кВа	3964,665398	10771,26594	3602,902922	8089,530315
2022	Електроенергія	тис. кВт·год	52376,12176	77240,15278	39894,59886	41051,87896
		кВа	7372,671117	8151,069994	10550,78983	7549,871712
2023	Електроенергія	тис. кВт·год	40334,6428	75458,88261	40087,51774	41771,0664
		кВа	6212,043668	7376,359847	7221,184733	9782,678534
2024	Електроенергія	тис. кВт·год	43169,33269	64090,65447	39212,33943	39768,35
		кВа	6378,026633	6772,958914	7862,726734	7883,075296

На основі скоригованої, прогнозованої моделі споживання електроенергії для схем електропостачання складених, згідно концепції Smart Grid у залізрудних шахт (табл. 4–7, Формули 4 та 5) будуюмо дану графічну залежність від коефіцієнту  $m_n$  :

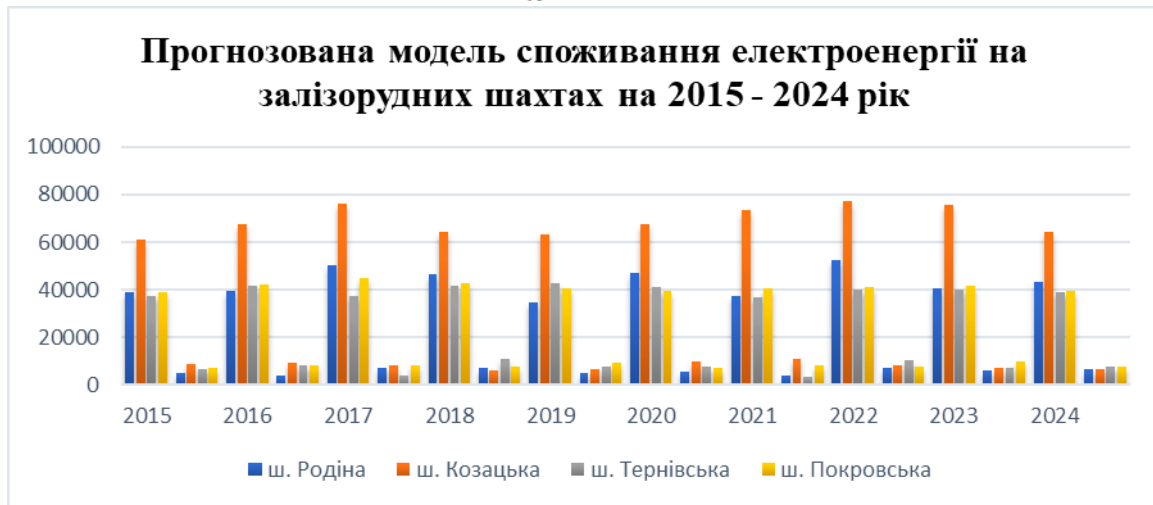


Рис. 2. Прогнозована модель споживання електроенергії для схем електропостачання складених згідно концепції Smart Grid для залізрудних шахт на 2015–2024 рік

Провівши вимірювання тісноти кореляційного зв'язку між рівнями споживання активної та реактивної потужності для традиційних та складених згідно концепції Smart Grid схем електропостачання на залізрудних шахтах. Виділення даних зв'язків між даними змінними виконаємо методом множинної кореляції, оскільки на прогнозовану модель споживання електроенергії чинить вплив велика кількість факторів (мінімум 5).

Для кожного з рівнянь наведених вище параметри та змінні позначаються наступним чином:  $x$  – незалежна змінна,  $y$  – залежна від величини  $x$  змінна та ставиться у відповідність кожній з потужностей: активної ( $P$ , кВт), реактивної ( $Q$ , кВар).

Проведемо аналіз отриманих рівнянь регресії для традиційних та складених згідно концепції Smart Grid схем електропостачання та дослідимо їх окремо один від одного:

Рівняння  $y=0,0781x^2+0,1607x-154,75$  та  $R^2=0,307$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню активної потужності  $P$ , кВт для ш. Родіна.

Рівняння  $y=0,03x^2-0,9243x-58,554$  та  $R^2=0,2319$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню повної потужності  $P$ , кВт для ш. Козацька.

Рівняння  $y=-0,0044x^2-0,3843x-58,554$  та  $R^2=0,01$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню повної потужності  $P$ , кВт для ш. Тернівська.

Рівняння  $y=-0,03x^2+0,159x+23,522$  та  $R^2=0,0577$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню повної потужності  $P$ , кВт для ш. Покровська.

Рівняння  $y=7,6285x^2+0,1607x-12904$  та  $R^2=0,0508$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню активної потужності  $Q$ , кВар для ш. Родіна

Рівняння  $y=-22,582x^2-0,3843x-43046$  та  $R^2=0,1652$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню реактивної потужності  $Q$ , кВар для ш. Козацька

Рівняння  $y=-5,9744x^2+0,159x-9520$  та  $R^2=0,0793$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню повної потужності  $Q$ , кВар для ш. Тернівська

Рівняння  $y=-29,875x^2-0,1607x+6203$  та  $R^2=0,3205$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню активної потужності  $Q$ , кВар для ш. Покровська.

Таким чином для даних рівнянь для активної потужності  $P$  для кожної з вищенаведених шахт маємо наступні кореляційні зв'язки:  $0,3 < R^2 \leq 0,7$  – даний зв'язок середньої сили;  $0 < R^2 \leq 0,3$  – зв'язок слабкої сили;  $0 < R^2 \leq 0,3$  – зв'язок слабкої сили;  $0 < R^2 \leq 0,3$  – зв'язок слабкої сили.

Реактивна потужність показує кореляційний зв'язок наступним чином:  $0 < R^2 \leq 0,3$  – зв'язок слабкої сили;  $0 < R^2 \leq 0,3$  – зв'язок є слабкої сили;  $0 < R^2 \leq 0,3$  – зв'язок слабкої сили;  $0,3 < R^2 \leq 0,7$  – даний зв'язок середньої сили.

Рівняння:  $y=0,0781x^2+0,1607x-154,75$ ,  $y=0,03x^2-0,9243x-58,554$ ,  $y=-0,0044x^2-0,3843x-58,554$ ,  $0,03x^2+0,159x+23,522$ ,  $y=7,6285x^2+0,1607x-12904$ ,  $y=-22,582x^2-0,3843x-43046$ ,  $y=-5,9744x^2+0,159x-9520$ ,  $y=-29,875x^2-0,1607x+6203$  є зведеними рівняннями регресії для динамічних змін потужностей активної, реактивної для традиційних схем електропостачання для ДПП залізрудних шахт на 2015–2024 рік, а значення:  $R^2=0,307$ ,  $R^2=0,2319$ ,  $R^2=0,01$ ,  $R^2=0,0577$ ,  $R^2=0,0508$ ,  $R^2=0,1652$ ,  $R^2=0,0793$ ,  $R^2=0,3205$  є зведеними коефіцієнтами кореляції для послідовності шахтних назв наведених вище.

Рівняння  $y=-0,035x^2+0,1607x-154,75$  та  $R^2=0,5945$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню активної потужності  $P$ , кВт для ш. Родіна.

Рівняння  $y=-0,9243x^2-0,9243x-58,554$  та  $R^2=0,579$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню повної потужності  $P$ , кВт для ш. Козацька.

Рівняння  $y=-0,0026x^2-0,3843x-58,554$  та  $R^2=0,4917$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню повної потужності  $P$ , кВт для ш. Тернівська.

Рівняння  $y=-0,0903x^2+0,159x+23,522$  та  $R^2=0,3137$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню повної потужності  $P$ , кВт для ш. Покровська.

Рівняння  $y=-15,479x^2+0,1607+33860x$  та  $R^2=0,2376$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню активної потужності  $Q$ , кВар для ш. Родіна

Рівняння  $y=-0,9243x^2+0,3843x-32173$  та  $R^2=0,0359$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню реактивної потужності  $Q$ , кВар для ш. Козацька.

Рівняння  $y=-0,0026x^2-0,159x-43046$  та  $R^2=0,1652$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню повної потужності  $Q$ , кВар для ш. Тернівська.

Рівняння  $y=-0,0352x^2-0,1607x+24172$  та  $R^2=0,028$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню активної потужності  $Q$ , кВар для ш. Покровська.

Дані рівняння для схем електропостачання складених згідно концепції Smart Grid для даних залізрудних шахт для активної та реактивної  $P$  та  $Q$  показують наступні результати по силам кореляційних зв'язків:  $0,3 < R^2 \leq 0,7$  – зв'язок середньої сили;  $0,3 < R^2 \leq 0,7$  – зв'язок середньої сили;  $0,3 < R^2 \leq 0,7$  – зв'язок середньої сили;  $0,3 < R^2 \leq 0,7$  – зв'язок середньої сили;  $0 < R^2 \leq 0,3$  – зв'язок слабкої сили.

Рівняння:  $y=-0,035x^2+0,1607x-154,75$ ,  $y=-0,9243x^2-0,9243x-58,554$ ,  $y=-0,0026x^2-0,3843x-58,554$ ,  $y=-0,0903x^2+0,159x+23,522$ ,  $y=-15,479x^2+0,1607+33860x$ ,  $y=-0,9243x^2+0,3843x-32173$ ,  $y=-0,0026x^2-0,159x-43046$ ,  $y=-0,0352x^2-0,1607x+24172$ , а значення:  $R^2=0,5945$ ,  $R^2=0,579$ ,  $R^2=0,4917$ ,  $R^2=0,3137$ ,  $R^2=0,2376$ ,  $R^2=0,0359$ ,  $R^2=0,1652$ ,  $R^2=0,028$  є зведеними коефіцієнтами кореляції для послідовності шахтних назв наведених вище.

Дані рівняння для прогнозованих моделей для традиційних та побудованих згідно концепції Smart Grid схем електропостачання показують адекватність їх функціонування, оскільки:

Зв'язок слабкої сили на даних 3 залізрудних шахтах та 1 середньої сили з традиційними схемами електропостачання – пояснюється досить великою кількістю факторів впливу на прогнозовану модель споживання, де серед основних факторів впливу: зовнішнє середовище, запиленість, загазованість, механічне зношення видобувного обладнання і т. п.

Зв'язок середньої сили на даних 3 залізрудних шахтах та 1 слабкої сили з схемами електропостачання складених згідно з концепцією Smart Grid – пояснюється досить великою кількістю факторів впливу на прогнозовану модель споживання електроенергії.

Порівнюючи між собою значення розрахунку електричних параметрів розрахованих за прогнозованими моделями споживання для традиційних схем електропостачання та складених згідно концепції Smart Grid (табл. 7), приходимо до висновку: впровадження даної технології дозволяє зменшити обсяги споживання електроенергії в середньому на 5–19% у порівнянні з дещо меншим збільшенням обсягів споживання для традиційних схем електропостачання на 2–6%, що, у свою чергу, може знизити показник ефективності видобутку ЗРС т/кВт·год [13–23].

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У роботі досліджено питання особливостей побудови прогнозованих моделей споживання електроенергії згідно з традиційними, а також схемами побудованими згідно концепції Smart Grid. У результаті проведеної побудови прогнозованих моделей споживання ЕЕ для традиційних та складених згідно концепції Smart Grid схем електропостачання дозволив, виявити наступні закономірності:

- 1) максимальні рівні споживання ЕЕ ставляться у відповідність найбільшим об'ємам видобутку ЗРС;
- 2) чим більшими є втрати енергетичної складової, тим меншими є об'єми видобутку ЗРС або між ними відсутній взаємозв'язок;
- 3) зміни видобутку об'ємів ЗРС для кожної з шахт носить коливальний характер та змінюється у межах 15–35% та залежить від зведених розрахункових коефіцієнтів прогнозних моделей;
- 4) впровадження концепції Smart Grid зменшить обсяги споживання ЕЕ у середньому на 5–19%, порівняно із збільшення даних обсягів на 2–6% для традиційних схем електропостачання залізрудних шахт;
- 5) зменшення обсягів споживання ЕЕ для концепції Smart Grid дасть підвищення об'ємів видобутку ЗРС для кожної з шахт у межах 10–20% від зведеного коефіцієнту прогнозованих моделей;
- 6) втілення у життя концепції Smart Grid дозволить здійснити зниження рівнів мінімальної вартості сировини на 10–15%, а максимальних рівнів теж знизити але усього на 2–5%.

Впровадження інтелектуальної технології Smart Grid дозволить збільшити видобуток ЗРС, а також знизити час на його перероблення та вартості готового електрообладнання на проектування нових навантажень на енергосистему, а також втілення у гірничо-металургійну галузь інтелектуальну електричну мережу з керованими автоматизованими пристроями у режимі реального часу застосовуючи технології бездротового зв'язку дозволить виключити з даного процесу вплив помилок спричиненими людським фактором.

Перспективність розвитку даного напрямку полягає у розширенні успішного досвіду експлуатації систем електропостачання, згідно з концепцією Smart Grid на залізрудних шахтах, а також удосконалення традиційних схем електропостачання вугільних шахт, що дозволить значно знизити час та вартість готового електрообладнання при проектуванні нових навантажень на енергосистему, а також втілити у життя інтелектуальну електричну мережу з керованими автоматизованими пристроями у режимі реального часу на території України та інших зарубіжних країн.

### Література

1. World Energy Issues Monitor 2017, Exposing the new energy realities, World Energy Council. URL: <https://www.worldenergy.org/publications/2017/world-energy-issues-monitor-2017/>.
2. Форсайт економіки України: середньостроковий (2015–2020 роки) і довгостроковий (2020–2030 роки) часові горизонти (версія для обговорення). Київ : НТУУ "КПІ", 2015. 36 с.
3. Recommendations for smart grid standardization in Europe/CEN/CENELEC/ETSI Joint Presidents Group (JPG). 2011. URL: <https://www.etsi.org/e-brochure/smartgrids/data/catalogue.pdf> (18.11.2022).
4. Олійник Д. «Розумна енергетика»: світові тенденції й вітчизняні реалії. Віче. 2015. № 21. С. 46–48.
5. Оцінка стану та реалізації концепцій розвитку «інтелектуальних» електромереж у світовій практиці. 2018. URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/3.-Smart-Grid.pdf> (18.11.2022).
6. План розвитку системи передачі на 2020–2029 роки : проект. ДП «НЕК «Укренерго». 2018. URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/03/ПРОЕКТ-Planu-rozvytku-systemy-peredachi-na-2019-2028-roky.pdf> (10.11.2022).
7. Стогній Б. С. Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні. Технічна електродинаміка. 2012. № 5. С. 52–67.
8. Петергеря Ю.С., Хижняк Т.А., Блінов І.В., Чопик В.В. Розв'язання задач прогнозування в системах електроживлення локальних об'єктів з використанням штучних нейронних мереж, 2010, с. 29–36.
9. Бойко С.М., Сінчук І.О., Сіноліцій А.П., Несмашний Є.О., Дозоренко О.В. Особливості прогнозування рівнів енергоспоживання в умовах розподілених електричних мереж залізрудних підприємств. Гірничий вісник «КНУ», 2019, Вип. 105, с. 24–29.
10. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Моделювання електроспоживання у складних виробничих системах з урахуванням латентних взаємозв'язків у сукупності показників енергоефективності. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського, 2014, Випуск 2 (85), с. 40–46.
11. Добровольська Л.Н., Волинець В.І., Бандура І.О. Багатофакторне прогнозування споживання електротехнічних комплексів вугільних шахт для планування їхніх енергоефективних режимів. Наукові праці ВНТУ, 2014, Вип. 2, с. 1–9.
12. Лещинський О.Л., Коновалюк В.С., Соколова Н.П. Модель прогнозування обсягу споживання електричної енергії світлосигнального аеропорту. TECHNOLOGY AUDIT AND PRODUCTION RESERVES, 2014, Вип. 2/1 (16), с. 27–31.
13. Липовик В.В., Максимов О.В. Математичний аналіз : навчальний посібник. Кривий Ріг: 2010. 196 с. ISBN 978–966–2915–97-6.
14. Качан Ю.Г., Дьяченко В.В. Методические основы повышения энергоэффективности системы электроснабжения промышленных предприятий. Гірнична електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. Дніпропетровськ : НГУ, 2006. Вип.76. С. 12–17. ISSN 0201 – 7814.
15. Сінчук О.М., Сінчук І.О., Віннік М.А., Ялова А.М. Система чинників формування факторного простору і процес споживання електричної енергії залізрудними підприємствами. Електромеханічні і енергозберігаючі системи : щоквартальний науково-виробничий журнал. Кременчук : КрНУ, 2015. Вип. 1/2015 (29). С. 110–117. ISSN 2072 – 2052, ISSN 2074 – 9937.
16. Соловей О.І., Ситник О.О., Розен В.П. Техніко-економічні розрахунки систем електропостачання промислових підприємств. Черкаси : ЧДТУ, 2012. 251 с.
17. Праховник А.В., Тесик Ю.Ф., Новський В.О., Гриб О.Г., ... Светелік О.Д. Автоматизована система обліку електричної енергії з контролем показників якості / Інститут електродинаміки; Національна академія наук України. Київ. 2012. URL: <https://refdb.ru/look/2805705.html>
18. Шулле Ю.А. Оперативне прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання з врахуванням їх фронтальних властивостей : автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата техн. наук. Вінниця, 2013. 21 с.
19. Жуковская В.М., Мучник И.Б. Факторный анализ в социально-экономических исследованиях. М. : Статистика, 1976. 152 с. ISBN 5-279-02933-5.
20. Smolenski R. Conducted electromagnetic interference (EMI) in Smart Grids. London, Springer, 2017, 198 p.
21. Власюк В.П. (2022). Керування режимами споживання електроенергії дільничними підземними підстанціями залізрудних шахт [неопублікована дисертація на здобуття ступеня доктора філософії]. Криворізький національний університет.



22. Липовик В.В., Максимов О.В. Математичний аналіз : навчальний посібник. Кривий Ріг : 2010. 197 с. ISBN 978 – 966 – 2915 – 97 – 6.
23. Липовик В.В. Вища математика : навчальний посібник. Кривий Ріг, 2010, 283 с. ISBN 966 – 7388 – 58 – 1.

## References

1. World Energy Issues Monitor 2017, Exposing the new energy realities, World Energy Council. URL: <https://www.worldenergy.org/publications/2017/world-energy-issues-monitor-2017/>.
2. Forsait ekonomiky Ukrainy: serednostrokovyi (2015–2020 roky) i dovhostrokovyi (2020–2030 roky) chasovi horizonty (versiiia dlia obhovorennia). Kyiv : NTUU "KPI", 2015. 36 s.
3. Recommendations for smart grid standardization in Europe/CEN/CENELEC/ETSI Joint Presidents Group (JPG). 2011. URL: <https://www.etsi.org/e-brochure/smartgrids/data/catalogue.pdf> (18.11.2022).
4. Oliinyk D. «Rozumna enerhetyka»: svitovi tendentsii y vitchyzniani realii. Viche. 2015. № 21. S. 46-48.
5. Otsinka stanu ta realizatsii kontseptsii rozvytku «intelektualnykh» elektromerezh u svitovii praktytsi. 2018. URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/3.-Smart-Grid.pdf> (18.11.2022).
6. Plan rozvytku systemy peredachi na 2020–2029 roky : proekt. DP «NEK «Ukrenerho». 2018. URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/03/PROEKT-Planu-rozvytku-systemy-peredachi-na-2019-2028-roky.pdf> (10.11.2022).
7. Stohniy B. S. Evoliutsiia intelektualnykh elektrychnykh merezh ta yikhni perspektyvy v Ukraini. Tekhnichna elektrodynamika. 2012. № 5. S. 52–67.
8. Peterheria Yu.S., Khyzhniak T.A., Blinov I.V., Chopyk V.V. Rozviazannia zadach prohnozuvannia v systemakh elektrozhyvlennia lokalnykh ob'ektiv z vykorystanniam shchuchnykh neironnykh merezh, 2010, s. 29–36.
9. Boiko S.M., Sinchuk I.O., Sinolitsyi A.P., Nesmashnyi Ye.O., Dozorenko O.V. Osoblyvosti prohnozuvannia rivniv enerhospozhyvannia v umovakh rozpodilchykh elektrychnykh merezh zalizorudnykh pidpriemstv. Himychni visnyk «KNU», 2019, Vyp. 105, s. 24–29.
10. Davydenko L.V., Davydenko V.A. Modeliuvannia elektrospozhyvannia u skladnykh vyrobnychkh systemakh z urakhuvanniam latentnykh vzaiemozviakiv u sukupnosti pokaznykiv enerhoefektyvnosti. Visnyk KrNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho, 2014, Vypusk 2 (85), s. 40–46.
11. Dobrovol'ska L.N., Volynets V.I., Bandura I.O. Bahatofaktorne prohnozuvannia spozhyvannia elektrotekhnichnykh kompleksiv vuhilnykh shakht dlia planuvannia yikhnykh enerhoefektyvnykh rezhymiv. Naukovi pratsi VNTU, 2014, Vyp. 2, s. 1–9.
12. Leshchynskiy O.L., Konovaliuk V.S., Sokolova N.P. Model prohnozuvannia obsiahu spozhyvannia elektrychnoi enerhii svitlosyhnalnoho aeroportu. TECHNOLOGY AUDIT AND PRODUCTION RESERVES, 2014, Vyp. 2/1 (16), s. 27–31.
13. Lypovyk V.V., Maksymov O.V. Matematychni analiz : navchalnyi posibnyk. Kryvyi Rih: 2010. 196 s. ISBN 978–966–2915–97–6.
14. Kachan Yu.H., Diachenko V.V. Metodicheskiye osnovy povysheniya enrhoefektyvnosti systemy elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy. Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka : nauk.-tekhn. zb. Dnipropetrovsk : NHU, 2006. Vyp.76. S. 12–17. ISSN 0201 – 7814.
15. Sinchuk O.M., Sinchuk I.O., Vinnik M.A., Yalova A.M. Systema chynnykiv formuvannia faktornoho prostoru i protses spozhyvannia elektrychnoi enerhii zalizorudnymy pidpriemstvamy. Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy : shchokvartalnyi naukovo-vyrobnychiy zhurnal. Kremenchuk : KrNU, 2015. Vyp. 1/2015 (29). S. 110–117. ISSN 2072 – 2052, ISSN 2074 – 9937.
16. Solovei O.I., Sytnyk O.O., Rozen V.P. Tekhniko-ekonomichni rozrakhunky system elektropostachannia promyslovykh pidpriemstv. Cherkasy : ChDTU, 2012. 251 s.
17. Prakhovnyk A.V., Tesyk Yu.F., Novskiy V.O., Hryb O.H. ... Svetelik O.D. Avtomatyzovana systema obliku elektrychnoi enerhii z kontrolem pokaznykiv yakosti / Instytut elektrodynamiky; Natsionalna akademiia nauk Ukrainy. Kyiv. 2012. URL: <https://refdb.ru/look/2805705.html>
18. Shullie Yu.A. Operativne prohnozuvannia elektrychnykh navantazhen system elektrospozhyvannia z vrakhuvanniam yikh frontalnykh vlastyvopei : avtoreferat dysertatsii na zdobuttia naukovoho stupenia kandydata tekhn. nauk. Vinnytsia, 2013. 21 s.
19. Zhukovskaia V.M., Muchnyk Y.B. Faktornyi analiz v sotsyalno-ekonomicheskyykh yssledovaniyakh. M. : Statystyka, 1976. 152 s. ISBN 5-279-02933-5.
20. Smolenski R. Conducted electromagnetic interference (EMI) in Smart Grids. London, Springer, 2017, 198 r.
21. Vlasiuk V.P. (2022). Keruvannia rezhymamy spozhyvannia elektroenerhii dilnychnymy pidzemnymy pidstantsiiamy zalizorudnykh shakht [neopublikovana dysertatsiia na zdobuttia stupenia doktora filosofii]. Kryvorizkyi natsionalnyi universytet.
22. Lypovyk V.V., Maksymov O.V. Matematychni analiz : navchalnyi posibnyk. Kryvyi Rih : 2010. 197 s. ISBN 978 – 966 – 2915 – 97 – 6.
23. Lypovyk V.V. Vyshcha matematika : navchalnyi posibnyk. Kryvyi Rih, 2010, 283 s. ISBN 966 – 7388 – 58 – 1.

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-58-66>

УДК 681.5.015:622.24

ГОРБІЙЧУК Михайло

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

<https://orcid.org/0000-0002-8586-1883>

[gorb@nung.edu.ua](mailto:gorb@nung.edu.ua)

КРОПИВНИЦЬКИЙ Дмитро

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

<https://orcid.org/0000-0003-1896-9322>

[vitalia.krop@gmail.com](mailto:vitalia.krop@gmail.com)

## ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОГЛИБЛЕННЯ СВЕРДЛОВИНИ З ВРАХУВАННЯМ СТАНУ ОЗБРОЄННЯ ДОЛОТА

*В роботі запропоновано метод оптимального керування процесом поглиблення свердловини, який дозволяє знайти оптимальні значення керуючих впливів за критерієм відпрацювання долота та мінімізації вартості метра проходки.*

*Ключові слова: оптимальне керування, ітераційний метод, керуючі впливи, стан озброєння долота.*

GORBIYCHUK Mykhail, KROPYVNYTSKYI Dmytro

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

### OPTIMAL CONTROL OF THE WELL DEEPENING PROCESS CONSIDERING THE CONDITION OF THE BITTING EQUIPMENT

*Since the process of mechanical deepening of the well is non-stationary, stochastic, evolving in time and largely unreproducible, there are no analytical dependencies for determining the initial speed and the change rate of the estimation of the state of the bit equipment, therefore, empirical models of the polynomial form were applied, which were obtained according to the conducted experimental research plan, the matrix of which is appropriate for a full two-factor experiment, since two parameters were chosen as controlling influences: the axial load on the bit and the rotor speed. The software has been developed, using MatLab environment to calculate the values of the initial speed of penetration and the rate of change of the assessment of the bit arming state. To determine the parameters of the mathematical model, the method of least squares was used, in accordance with which the square of the residual function was minimized. The values of the parameters of the found dependencies were used as the source material for the software implementation of the solution to the problem of finding the optimal mode of the well deepening process, considering the anticipatory wear of the bit armature. Since the objective function describing the criterion of optimality of the minimum cost of one meter of penetration is non-linear in relation to the control influences, and the restrictions on the magnitude of the axial load and the frequency of rotation of the rotor are two-sided, the method of sequential quadratic was implemented to solve the optimization problem with the MatLab environment programming. During the process of implementing this task, the optimal control actions and the final value of the assessment of the state of the drill equipment were determined according to the criterion of effective completion of the drills. As a result of the research, simulation modeling of the solution of the optimization problem was carried out, which showed a decrease in the cost of a meter of penetration by 2.8 times.*

*Keywords optimal control, iterative method, control influences, bit equipment state*

#### Постановка проблеми у загальному вигляді

##### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У міру вичерпання природних вуглеводнів приходиться проникати на все більші глибини у пошуках нових джерел нафти і газу. Для цього необхідно бурити глибокі свердловини, що тягне за собою значні матеріальні і фінансові ресурси. У цих умовах особливе значення мають як нові технологічні рішення – буріння нахилено-скерованих свердловин, впровадження безопорних алмазних доліт, так і методи, які дають змогу оптимального керування процесом механічного буріння за вартісним критерієм.

Впровадження методів оптимального керування, яке опирається на сучасні інформаційно-вимірвальні системи, обчислювальну і мікропроцесорну техніку та відповідне програмне забезпечення, може дати до 25 % економії на провідку свердловин [1].

Процес механічного буріння протікає у середовищі з важко прогнозними характеристиками, які змінюють своє значення як з глибиною свердловини, так і при переході від одної свердловини до іншої, які бурять на одній площі. Тому процес буріння є нестационарним, стохастичним, таким, що розвивається у часі і в значній мірі не відтворюваним [2].

У таких умовах важливою науковою задачею є розроблення і удосконалення методів оптимального керування процесом механічного буріння за вартісним критерієм і на їх основі розроблення алгоритмічного і програмного забезпечення системи.

#### Огляд літературних джерел

Роботи з питань оптимального керування процесом механічного буріння охоплюють два напрямки. Перший з них відомий як задача раціонального відпрацювання бурових доліт. Розв'язок цієї задачі знайшов своє відображення у цілому ряду робіт [3–6]. Застосовувати такі критерії можна лише в тому випадку, коли відбувається зношення озброєння долота і цей фактор є вирішальним при бурінні свердловин шарошковими долотами. Навіть для безопорних доліт (алмазних), які мають значний ресурс роботи долота, в заключній стадії роботи на вибої свердловини постає задача їх раціонального відпрацювання.

За допомогою критеріїв відпрацювання доліт визначають такий час перебування долота на вибої свердловини, який забезпечує екстремум певного критерію [2]. При цьому допускають, що осьове навантаження на долото і частота його обертання попередньо визначені.

Другий напрямок бере свій початок в роботах американських вчених Galle E.M. і Woods H.B. [7, 8]. У цих роботах на основі емпіричної моделі, яка узагальнювала результати промислових досліджень по багатьох свердловинах, розв'язана задача оптимального керування процесом буріння за умови, що керуючі дії осьове навантаження на долото і частота його обертання є функціями часу при наявності певних обмежень. Як критерій оптимальності було вибрано вартість метра проходки свердловини. Задача розв'язана із застосування принципу максимуму. Пізніше подібна задача знайшла свій розв'язок в роботах [2, 9]. Недоліком такого підходу є неможливість плавного регулювання частоти обертання долота при роторному бурінні. Тому, у роботі [10] для керування запропонована стратегія, яка названа субоптимальним керуванням, суть якої у тому, що на певному часовому інтервалі керуючі дії підтримуються постійними, а при досягненні певного розрахованого часу відбувається перемикання керуючих впливів з одного рівня на інший. Така стратегія простіша в реалізації, ніж керування процесом, коли керуючі дії є функціями часу.

Найпростішим методом оптимального керування є спосіб, коли керуючі дії – осьове навантаження на долото і частота його обертання підтримуються постійними протягом всього рейсу проходки.

Порівняльний аналіз трьох методів керування, коли керуючі дії є функціями часу, субоптимального керування і керування при постійних керуючих впливах показав [11], що при реалізації змінного в часі керування в порівнянні з режимом, коли керуючі впливи постійні в часі, зменшення вартості проходки склало 2,7 %; реалізація субоптимального керування в порівнянні з режимом, коли керуючі впливи є незмінними протягом одного рейсу проходки, приводить до зменшення вартості проходки на 1,5 %; оптимальне керування в порівнянні з субоптимальним керуванням дає зменшення вартості проходки на 1,2 %.

Таким чином, реалізація керуючих дій як функцій часу дає незначний ефект у порівнянні з керуванням, коли осьове навантаження на долото і частота його обертання є незмінними величинами протягом одного рейсу проходки.

Аналіз літературних джерел показує, що задачі раціонального відпрацювання доліт і оптимального керування процесом поглиблення свердловин розглядалися як дві самостійні задачі. Проте вони тісно пов'язані між собою. Визначення оптимального часу перебування долота на вибої свердловини допускає, що певним чином вибрані керуючі впливи – осьове навантаження на долото і частота його обертання. І навпаки, для визначення оптимальних керуючих дій за вибраним критерієм оптимальності необхідно розв'язати задачу раціонального відпрацювання доліт.

### Формулювання цілей статті

*Метою роботи* є розроблення методу оптимального керування процесом поглиблення свердловин, який поєднує у собі дві задачі: раціонального відпрацювання доліт за озброєнням і вибору оптимальних керуючих дій – осьового навантаження на долото і частоти його обертання за вартісними критерієм за умови, що відомі обмеження на керуючі дії.

### Виклад основного матеріалу

Допускаємо, що основним фактором, який визначає тривалість перебування долота на вибої свердловини, є знос його озброєння.

При такому допущенні процес поглиблення свердловини описується [12] такою системою диференціальних рівнянь:

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{v_0(\bar{U})}{\xi(t)}, \quad (1)$$

$$\frac{d\xi(t)}{dt} = K_\xi(\bar{U}) \quad (2)$$

за таких початкових умов  $h(0) = 0$ ,  $\xi(0) = 1$ .

У рівняннях (1) і (2) прийняті такі позначення:  $h(t)$  - поточне значення проходки на долото;  $v_0(\bar{U})$  - початкова швидкість механічного буріння;  $\xi(t) = \frac{v_0(\bar{U})}{v(t)}$  - оцінка стану озброєння долота;  $K_\xi(\bar{U})$  - швидкість зміни оцінки стану озброєння долота;  $\bar{U} = (F_b, N_b)^T$  - вектор керуючих дій – осьового навантаження на долото  $F_b$  і частоти його обертання  $N_b$ .

Як критерій оптимальності виберемо вартість метра проходки на долото, тобто

$$q_c = \frac{C_d(t_d + T_{lo}) + d_c}{h(t_d)}, \quad (3)$$

де  $C_d$  - вартість роботи бурової установки на протязі одної години;  $t_d$  - час перебування долота на вибої свердловини;  $T_{lo}$  - тривалість спуско-піднімальних операцій;  $d_c$  - вартість долота.

Оскільки ми допустили, що  $\bar{U} = \text{const}$ . Тоді  $v_0 = v_0(\bar{U})$  і  $K_\xi = K_\xi(\bar{U})$  - постійні величини.

Розв'язок рівняння (2) за початкової умови  $\xi(0) = 1$  дасть такий результат:

$$\xi(t) = K_\xi t + 1. \quad (4)$$

У момент закінчення чергового рейсу  $t = t_d$  і  $\xi_f = \xi(t_d)$ . Тоді із рівняння (4) знаходимо, що

$$t_d = \frac{1}{K_\xi} (\xi_f - 1). \quad (5)$$

Якщо врахувати рівняння (4), то співвідношення (1) прийме такий вигляд:

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{v_0}{K_\xi t + 1}. \quad (6)$$

Розв'язок диференціального рівняння (6) з початковою умовою  $h(0) = 0$  буде таким:

$$h(t) = \frac{v_0}{K_\xi} \ln(K_\xi t + 1). \quad (7)$$

У момент закінчення чергового рейсу проходки  $t = t_d$  і, відповідно рівняння (7) набуде такого значення:

$$h(t_d) = \frac{v_0}{K_\xi} \ln(K_\xi t_d + 1).$$

Із рівняння (4) випливає, що  $\xi_f = K_\xi t_d + 1$ . Тому

$$h(t_d) = \frac{v_0}{K_\xi} \ln \xi_f. \quad (8)$$

З врахуванням значень  $t_d$  і  $h(t_d)$ , які обчислені за формулами (5) і (8), критерій оптимальності (3) набуде такого значення:

$$q_c = \frac{C_d \left( (\xi_f - 1) + K_\xi T_{lo} \right) + K_\xi d_c}{v_0 \ln \xi_f}. \quad (9)$$

Знайдемо таке значення  $\xi_f$ , щоб функція (9) набула мінімального значення. Оскільки

$$\frac{dq_c}{d\xi_f} = \frac{C_d - \frac{1}{\xi_f \ln \xi_f} \left( C_d \left( (\xi_f - 1) + K_\xi T_{lo} \right) + K_\xi d_c \right)}{v_0 \ln \xi_f}.$$

Із необхідних умов існування мінімуму функції (9) випливає, що

$$C_d - \frac{v_0}{\xi_f \ln \xi_f} \left( C_d \left( (\xi_f - 1) + K_\xi T_{lo} \right) + K_\xi d_c \right) = 0.$$

Враховуючи формулу (9), можемо записати

$$\xi_f = \frac{v_0}{C_d} q_c. \quad (10)$$

Співвідношення (10) є критерієм відпрацювання доліт[2] за умови, що відомі значення  $v_0$  і  $q_c$ .

Оскільки початкова швидкість проходки  $v_0$  і вартість метра пробуреної свердловини  $q_c$  є функціями керуючих дій – осьового навантаження на долото  $F_b$  і частоти його обертання  $N_b$ , то виникає друга задача: знайти такі значення  $F_b$  і  $N_b$ , щоб критерій оптимальності (9) набув мінімального значення при обмеженнях на керуючі дії  $F_b$  і  $N_b$ .

Задачу вибору оптимальних керуючих дій запишемо у формалізованому вигляді:

$$\min : \frac{C_d \left( (\xi_f - 1) + K_\xi(\bar{U}) T_{lo} \right) + K_\xi(\bar{U}) d_c}{v_0(\bar{U}) \ln \xi_f} \quad (11)$$

при таких обмеженнях:

$$\bar{U}_{min} \leq \bar{U} \leq \bar{U}_{max}. \quad (12)$$

Аналіз співвідношень (11) і (12) показує, що для визначення оптимальних керуючих дій на основі критерію (11) необхідно знати значення  $\xi_f$  (або  $t_d$ ).

Для вирішення поставленої задачі використаємо такий ітераційний алгоритм:

Крок 1. Задамо деяким значенням  $\xi_f > 1$ .

Крок 2. Розв'язуємо оптимізаційну задачу (11) і (12) та обчислюємо нове значення як розв'язок нелінійного рівняння (10) з врахуванням значення  $q_c$ , яке задано формулою (10). Для визначення  $\xi_f$  необхідно розв'язати таке нелінійне алгебраїчне рівняння:

$$\xi_f \left(1 - \ln \xi_f\right) - 1 + K_\xi \left(T_{lo} + \frac{d_c}{C_d}\right) = 0. \quad (13)$$

Крок 3. Покласти  $q_c^{(old)} = q_c$ .

Крок 4. Розв'язати задачу (11) і (12), використовуючи значення  $\xi_f$  знайдене на кроці 2.

Крок 5. Якщо виконується умова  $q_c < q_c^{(old)}$ , то перейти до кроку 2; інакше кінець обчислень.

### Програмна реалізація методу

Для програмної реалізації методу необхідно мати такі залежності:  $v_0 = v_0(F_b, N_b)$  і  $K_\xi = K_\xi(F_b, N_b)$ .

На теперішній час не існує теорії, на основі якої можна було б отримати аналітичні залежності  $v_0 = v_0(F_b, N_b)$  і  $K_\xi = K_\xi(F_b, N_b)$ . Тому використовують емпіричні моделі для опису співвідношень  $v_0 = v_0(F_b, N_b)$  і  $K_\xi = K_\xi(F_b, N_b)$ .

У роботі [2] запропоновані такі емпіричні моделі:

$$\{v_0(F_b, N_b), K_\xi(F_b, N_b)\} = k_i F_b^{\alpha_i} N_b^{\beta_i}, \quad i = 1, 2. \quad (14)$$

Емпіричну модель (14) можна лінеаризувати, прологорифмувавши ліву і праву частини співвідношення (14), тобто

$$Y = K_i + \alpha_i X_1 + \beta_i X_2, \quad i = 1, 2,$$

де  $Y \in \{\log v_0, \log K_\xi\}$ ,  $K_i = \log k_i$ ,  $X_1 = \log F_b$ ,  $X_2 = \log N_b$ .

Доведено [2], що така лінеаризація можлива при виконанні таких умов:

$$\sigma_{\Delta, v_0}^2 = \frac{\sigma_{e, v_0}^2}{v_0^2(F_b, N_b)} \left(1 + \frac{\sigma_{e, v_0}^2}{2v_0^2(F_b, N_b)}\right), \quad (15)$$

$$\sigma_{\Delta, K_\xi}^2 = \frac{\sigma_{e, K_\xi}^2}{K_\xi^2(F_b, N_b)} \left(1 + \frac{\sigma_{e, K_\xi}^2}{2K_\xi^2(F_b, N_b)}\right), \quad (16)$$

де  $\sigma_{e, v_0}^2$  і  $\sigma_{e, K_\xi}^2$  - дисперсії перешкод, які виникають внаслідок того, що величини  $F_b$  і  $N_b$  спостерігаються на фоні адитивних перешкод;  $\sigma_{\Delta, v_0}^2$  і  $\sigma_{\Delta, K_\xi}^2$  - дисперсії, які характеризують відхилення реальної моделі від моделі (14).

У тому випадку, коли  $\sigma_{e, v_0}^2 \rightarrow 0$  і  $\sigma_{e, K_\xi}^2 \rightarrow 0$  така лінеаризація може мати місце. На практиці остання умова практично не виконується. Тому емпіричні моделі  $v_0 = v_0(F_b, N_b)$  і  $K_\xi = K_\xi(F_b, N_b)$  будемо синтезувати у вигляді поліномів.

Для підвищення точності визначення параметрів емпіричних моделей  $v_0 = v_0(F_b, N_b)$  і  $K_\xi = K_\xi(F_b, N_b)$  використаємо процедуру, розроблену у роботі [2], яка складається із двох етапів.

На першому етапі реалізують розроблений план експерименту. Бурять свердловину на задану глибину, змінюючи при цьому фактори  $F_b$  і  $N_b$  у відповідності з планом експерименту. У певні моменти часу  $t_j$  змінюються значення  $F_b$  і  $N_b$ , що тягне за собою зміну початкових умов для диференціальних рівнянь (1) і (2). Оскільки функції  $h(t)$  і  $\xi(t)$  - неперервні функції в часу, то будуть мати місце такі співвідношення:

$$h(t_0) = 0, \quad h_{j-1}(t_{j-1}) = h_j(t_{j-1}), \quad (17)$$

$$\xi(t_0) = 1, \quad \xi_{j-1}(t_{j-1}) = \xi_j(t_{j-1}), \quad j = \overline{2, N_s}, \quad (18)$$

де  $N_s$  - кількість пробурених інтервалів у відповідності з планом експерименту;  $t_0 = 0$ .

Якщо врахувати початкові і граничні умови (17) і (18), то отримаємо такі залежності:

$$h_j(t) = \frac{v_{0,j}}{K_{\xi,j}} \ln \frac{\xi_j(t)}{\xi_j(t_{j-1})} + h_{j-1}(t_{j-1}), \quad \xi_1(t_0) = 1, \quad h_0(t_0) = 0, \quad j = \overline{1, N_s}, \quad (19)$$

$$\xi_j(t) = 1 + K_{\xi,j}(t - t_j) + \sum_{r=1}^{j-1} K_{\xi,r}(t_r - t_{r-1}), \quad t_1 = 0, \quad j = \overline{1, N_s}. \quad (20)$$

У відповідності з планом експерименту глибина свердловини збільшилась на глибину  $H$ . Спостереження за поточним значенням проходки велись в дискретні моменти часу. Тому  $H = H(t_k)$ ,  $k = \overline{1, N_q}$ , де  $N_q$  - кількість відліків.

Для визначення параметрів моделі (19) і (20) скористаємося методом найменших квадратів, у відповідності з яким мінімізується квадрат функції нев'язки, тобто

$$J(\bar{a}_j) = \sum_{k=1}^{N_q} (H_j(t_k) - h_j(t_k, \bar{a}_j))^2, \quad j = \overline{1, N_s}, \quad (21)$$

де  $\bar{a}_j = (v_{0,j}, K_{\xi,j})^T$  - вектор параметрів моделі (19), у якій  $\xi_j(t)$  визначено формулою (20).

Мінімізація функції (21) за змінними  $v_0$  і  $K_{\xi}$  з врахуванням формул (19) і (20) дала такий результат:

$$\sum_{k=1}^{N_q} (H_j(t_k) - h_j(t_k, \bar{a}_j)) \ln \frac{\xi_j(t_k)}{\xi_j(t_{j-1})} = 0, \quad (22)$$

$$\sum_{k=1}^{N_q} \left( H_j(t_k) - \left( \frac{v_{0,j}}{K_{\xi,j}} R_{j,k} + h_{j-1}(t_{j-1}) \right) \right) R_{j,k} = 0, \quad j = \overline{1, N_s}, \quad (23)$$

де  $R_{j,k} = \ln \frac{\xi_j(t_k)}{\xi_j(t_{j-1})}$ .

Із рівняння (23) визначимо величину  $v_0$ . Маємо

$$v_{0,j} = \frac{K_{\xi,j}}{\sum_{k=1}^{N_q} R_{j,k}^2} \sum_{k=1}^{N_q} \Omega_{j,k} R_{j,k}, \quad j = \overline{1, N_s}, \quad (24)$$

де  $\Omega_{j,k} = H_j(t_k) - h_{j-1}(t_{j-1})$ .

У рівняння (22) підставимо значення  $h_j(t)$ , яке визначено формулою (19). Це дало такий результат:

$$\sum_{k=1}^{N_q} \left( R_{j,k} - \frac{\sum_{k=1}^{N_q} R_{j,k} \Omega_{j,k}}{\sum_{k=1}^{N_q} \Omega_{j,k}^2} \Omega_{j,k} \right) \cdot \left( K_{\xi,j} \frac{\xi_j(t_{j-1})(t_k - t_j)}{\xi_j(t_j)} - \Omega_{j,k} \right) = 0, \quad j = \overline{1, N_s}. \quad (25)$$

Рівняння (24) є нелінійним відносно змінної  $K_{\xi,j}$  і для його розв'язування необхідно використати один із числових методів. Аналіз структури рівняння (25) показав, що для знаходження  $K_{\xi,j}$  доцільно використати метод дихотомії [13]. Інші методи, такі як метод Ньютона, для програмної реалізації якого необхідно обчислювати похідні, метод січних і хибного положення не гарантують збіжності алгоритму [14].

Після того як за допомогою числового методу розв'язано рівняння (25) і знайдено значення  $K_{\xi,j}$ , є можливість знайти  $v_{0,j}$  за формулою (24).

На цьому закінчується перший етап ідентифікації параметрів математичної моделі (1) і (2) процесу поглиблення свердловини.

На другому етапі ідентифікації залежності  $v_0(\bar{a}, \bar{U})$  і  $K_{\xi}(\bar{a}, \bar{U})$  будемо синтезувати за результатами першого етапу. Проведені комп'ютерні експерименти показали, що для залежностей  $v_0(\bar{a}, \bar{U})$  і  $K_{\xi}(\bar{a}, \bar{U})$  доцільно вибрати такі емпіричні залежності:

$$v_0(\bar{a}, \bar{U}) = \alpha_{v,0} + \alpha_{v,1} F_b + \alpha_{v,2} N_b + \alpha_{v,3} F_b N_b, \quad (26)$$

$$K_{\xi}(\bar{a}, \bar{U}) = \alpha_{\xi,0} + \alpha_{\xi,1} F_b + \alpha_{\xi,2} N_b + \alpha_{\xi,3} F_b N_b. \quad (27)$$

Для уникнення некоректної задачі [15], яка виникає внаслідок того що величини  $F_b$  і  $N_b$  у точках експерименту за числовими значеннями значно відрізняються між собою, перейдемо до безрозмірних величин:  $f_b = \frac{F_b}{F_{b,max}}$  і  $n_b = \frac{N_b}{N_{b,max}}$ , де  $F_{b,max}$ ,  $N_{b,max}$  - максимальні значення осьового навантаження на долото і частоти його обертання, які спостерігаються в експериментальному дослідженні.

Оскільки  $F_b = F_{b,max} f_b$  і  $N_b = N_{b,max} n_b$ , то формули (26) і (27) будуть такими:

$$v_0(\bar{a}, \bar{U}) = a_{v,0} + a_{v,1}f_b + a_{v,2}n_b + a_{v,3}f_b n_b, \quad (28)$$

$$K_\xi(\bar{a}, \bar{U}) = a_{\xi,0} + a_{\xi,1}f_b + a_{\xi,2}n_b + a_{\xi,3}f_b n_b, \quad (29)$$

де  $a_{v,0} = \alpha_{v,0}$ ,  $a_{v,1} = \alpha_{v,1}F_{b,max}$ ,  $a_{v,2} = \alpha_{v,2}N_{b,max}$ ,  $a_{v,3} = \alpha_{v,3}F_{b,max}N_{b,max}$ ;  $a_{\xi,0} = \alpha_{\xi,0}$ ,  $a_{\xi,1} = \alpha_{\xi,1}F_{b,max}$ ,  $a_{\xi,2} = \alpha_{\xi,2}N_{b,max}$ ,  $a_{\xi,3} = \alpha_{\xi,3}F_{b,max}N_{b,max}$ .

Після завершення етапу ідентифікації є можливість розв'язання задачі (11) і (12) за розробленою процедурою.

#### Імітаційний приклад розв'язання оптимізаційної задачі

Для розв'язання задачі мінімізації вартості метра проходки (11) при виконанні обмежень (12) та з врахуванні стану озброєння долота частково використаємо дані запозичені із роботи [2].

Для реалізації першого етапу ідентифікації пробурили свердловину на певну глибину у відповідності з розробленим планом експерименту (табл. 1).

Таблиця 1

План експериментального дослідження

№ експерименту	Осьове навантаження на долото $F_b$ , кН	Частота обертання ротора $N_b$ , $c^{-1}$	Величина проходки $H_j$ , м
1	71.4293	0.7500	0,50
2	152.7432	0.7500	0,35
3	161.3875	1.0800	0,88
4	61.4213	1.0800	0,39

Для визначення параметрів математичної моделі (1) і (2) у середовищі MatLab створено програмне забезпечення, що дало змогу обчислити параметри  $v_0$  і  $K_\xi$  за формулами (25) і (24).

#### Результат роботи програмного забезпечення задачі ідентифікації параметрів моделі (1) і (2)

ШВИДКІСТЬ ПРОХОДКИ, м/год

V0(1)= 0.8243

V0(2)= 1.9450

V0(3)= 3.4288

V0(4)= 2.9183

ШВИДКІСТЬ ЗМІНИ ОЦІНКИ СТАНУ ОЗБРОЄННЯ ДОЛОТА, 1/год

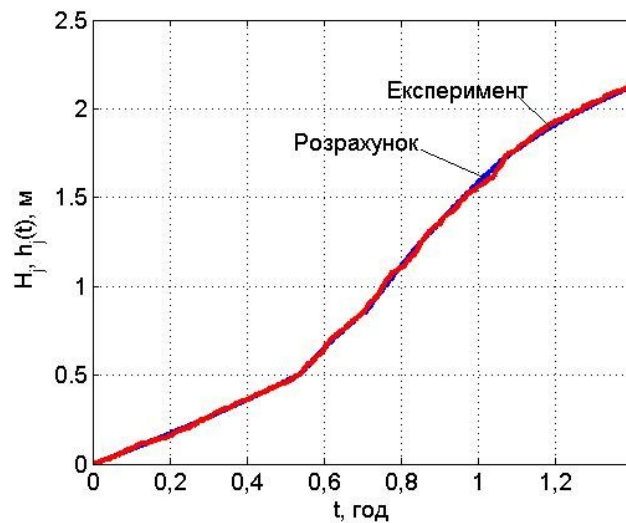
Ke(1)= 0.4712

Ke(2)= 2.2456

Ke(3)= 1.7144

Ke(4)= 4.2522

За результатами експерименту та розрахунку було побудовано залежність зміни проходки на долото від часу (рис. 1).

Рис. 1. Зміна у часі значень проходок  $H(t)$  і  $h(t)$ 

Адекватність моделі оцінювалась за величиною середньоквадратичного відхилення розрахункових даних від експериментальних значень за такою формулою:

$$\sigma_H^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (H_k - h(t_k))^2. \quad (30)$$

Обчислення дали такий результат:  $\sigma_H^2 = 1,4623 \cdot 10^{-4}$ .

Аналіз рис. 1 і отримане значення  $\sigma_H^2$  свідчать про те, що математична модель (1) і (2) адекватно відтворює результати експерименту.

За значеннями  $v_{0,j}$  і  $K_{\xi,j}$ ,  $j = \overline{1, 4}$ , на другому етапі ідентифікації обчислювались параметри емпіричних моделей (28) і (29). Оскільки параметри в моделі (28) і (29) входять лінійно, то для їх обчислення застосований метод найменших квадратів, у відповідності з яким

$$\bar{a} = (F^T F)^{-1} F^T \bar{Z}, \quad (31)$$

де  $F = [\bar{l} \ \bar{f} \ \bar{n} \ \bar{f} \cdot \bar{n}]$ ;  $\bar{l}$  - одинична стовпцева матриця;  $\bar{f}$  і  $\bar{n}$  - стовпцеві матриці, утворені із значень  $f_j$  і  $n_j$ ,  $j = \overline{1, 4}$ ;  $\bar{f} \cdot \bar{n}$  - поелементний добуток двох векторів  $\bar{f}$  і  $\bar{n}$ ;  $\bar{a} \in \{a_{v,i}, a_{\xi,i}\}$ ,  $i = \overline{1, 4}$ ;  $\bar{Z} \in \{v_{0,j}, K_{\xi,j}\}$ ,  $j = \overline{1, 4}$ .

За допомогою програмного забезпечення, розробленого в середовищі MatLab, обчислені параметри емпіричної моделі (28) і (29). Необхідні дані для розрахунків вміщує табл. 1.

### Параметри емпіричних моделей (28) і (29)

ПАРАМЕТРИ МОДЕЛІ  $v_0 = f(f, n)$

av(1)=-6.4441  
av(2)= 5.4068  
av(3)= 9.0488  
av(4)=-4.5827

ПАРАМЕТРИ МОДЕЛІ  $K_{\xi} = f(f, n)$

Ke(1)=-16.7665  
Ke(2)= 20.8366  
Ke(3)= 22.5779  
Ke(4)=-24.9335

Значення параметрів залежностей (28) і (29) послужили вихідним матеріалом для програмної реалізації оптимального режиму процесу поглиблення свердловини з врахуванням випереджаючого зносу озброєння долота. Крім того були вибрані такі значення величин, що входять в критерій оптимальності (11): вартість роботи бурової установки протягом однієї години -  $C_d = 3910$  грн./год.; вартість долота  $d_c = 7500$  грн.; тривалість спуско-піднімальних операцій  $T_{io} = 9,1$  год. Було взято таке початкове значення  $\xi_f = 1,4$ .

Оскільки осьове навантаження на долото і швидкість його обертання приведені до безрозмірних одиниць, то обмеження на керуючі дії були такими:  $0 \leq f \leq 1$  і  $0 \leq n \leq 1$ . Як стартову точку у процесі розв'язуванні оптимізаційної задачі вибрано:  $f^{(0)} = n^{(0)} = 0,3$ .

Аналіз структури задачі (11) і (12) показує, що цільова функція (11) є нелінійною по відношенню до керуючих дій, а обмеження на величини  $f$  і  $n$  є двосторонніми. У такому випадку ефективним методом розв'язання задачі оптимізації є метод послідовного квадратичного програмування [14]. Такий метод послідовного квадратичного програмування реалізований в MatLab-процедурі як файл-функція `fmincon`.

Програмне забезпечення сформованої задачі оптимізації як рекурентної процедури, у процесі якої визначається не тільки оптимальні керуючі дії  $f$  і  $n$ , але й кінцеве значення  $\xi_f$  за критерієм ефективного відпрацювання доліт, створена в середовищі MatLab.

### Результат ітераційної процедури оптимізації процесу поглиблення свердловини

ПОЧАТКОВИЙ РЕЗУЛЬТАТ

Значення оцінки стану озброєння  
epsilon=1.40  
Вартість метра проходки, грн./м q=66005.10  
Осьове навантаження, кН. Fb=170.09  
Частота обертання, 1/с. Nb=0.89

ОПТИМАЛЬНИЙ РЕЖИМ МЕХАНІЧНОГО БУРІННЯ

Значення оцінки стану озброєння  
epsilon= 2.39  
Осьове навантаження, кН. Fb=170.09



Частота обертання, 1/с.  $N_b=1.08$   
 Вартість метра проходки, грн./м  $Q=23520.67$   
 Час буріння, год.  $td=10.31$

На основі аналізу отриманих результатів можна зробити висновок, що розроблена ітераційна процедура дає змогу визначити значення  $\xi_f$  та оптимальні керуючі дії  $F_b$  і  $N_b$ . У порівнянні з початковим значенням  $\xi_f = 1,4$  оптимальне значення склало  $\xi_f^* = 2,39$ , що дало змогу зменшити вартість метра проходки з  $q_c = 66005.10$  грн./м до  $q_c = 23520.67$  грн./м, тобто 2,8 рази.

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Розроблений метод оптимального керування процесом поглиблення свердловини ґрунтується на критерію відпрацювання доліт за озброєнням і на вартості метра проходки свердловини і представляє собою ітераційний процес пошуку як оптимальних керуючих дій, так і часу закінчення чергового рейсу проходки.

Комп'ютерна програмна реалізація методу показала, що відбулося зменшення вартості метра проходки у 2,8 рази у порівнянні з початковим значенням, коли кінцева оцінка стану озброєння долота була вибрана, виходячи із даних літературних джерел.

### Література

1. Dwight Yoder, James Williams. Computers in the drilling process. Petrol Megan. 1987. № 6. P. 29-32.
2. Горбійчук М. І. Семенов Г. Р. Оптимізація процесу буріння глибоких свердловин : монографія. Івано-Франківськ : Нова зоря, 2006. 393 с.
3. Ivasiv V., Yurych A., Zabolotnyi S., Yurych L., Bui V., Ivasiv O. Determining the influence of the condition of rockdestroying tools on the rock cutting force. EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies. 2020. № 1(103). P. 15-20.
4. Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при бурении скважин. М. : Инфра-М. 2015. 336 с.
5. Драганчук О.Т., Пригоровська Т.О. Аналіз відпрацювання доліт PDC на родовищах України і світу. Нафтогазова енергетика. 2008. №4. С. 11-15.
6. Балаба В. И., Бикбулатов И. К., Вышегородцева Г. Н. Буровой породоразрушающий инструмент. М. : Изд-во центр РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. 2013. 251 с.
7. Galle E.M., Woods H.B. Bit weight and rotary speed for lowest-cast drilling. Oil and Gas J. 1960. № 49. P. 167-176.
8. Galle E.M., Woods H.B. Practical ways to find proper bit weight and rotary speed. Oil and Gas J. 1960. № 47. P. 160-166.
9. Габашвили Н.В., Кирия Т.А., Чачашвили Л.Г., Чхаидзе Л.Л. Применение методов математического программирования для оптимизации режима бурения. Тбилиси : Мацниереба, 1971. 94 с.
10. Горбійчук М.І., Кропивницька В.Б. Субоптимальне керування процесом заглиблення свердловин. Нафтова і газова промисловість. 2003. № 1. С. 24-25.
11. Горбійчук М.І., Кропивницька В. Б. Методи оптимального керування процесом буріння. Матеріали 11 міжнародної конференції з автоматичному управлінню "Автоматика –2004", Київ, 2004, т. 2, с. 11.
12. Горбійчук М.І., Кропивницький Д. Р. Математична модель процесу поглиблення свердловини під час буріння гвинтовими вибійними двигунами. Збірник наукових праць національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. Миколаїв : Видавничий дім "Гельветика", 2021. № 1 (484). С. 68-74.
13. Горбійчук М. І., Пістун Є. П. Числові методи і моделювання на ЕОМ. Івано-Франківськ : Факел. 2010. 408 с.
14. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. М. : Мир, 1985. 509 с.
15. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. М. : Мир, 1973. 960 с.

### References

1. Dwight Yoder, James Williams. Computers in the drilling process. Petrol Megan. 1987. № 6. R. 29-32.
2. Horbiichuk M. I. Sementsov H. R. Optymizatsiia protsesu burinnia hlybokyykh sverdllovyh : monohrafiia. Ivano-Frankivsk : Nova zoria, 2006. 393 s.
3. Ivasiv V., Yurych A., Zabolotnyi S., Yurych L., Bui V., Ivasiv O. Determining the influence of the condition of rockdestroying tools on the rock cutting force. EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies. 2020. № 1(103). R. 15-20.
4. Neskoromnyh V.V. Razrushenie gomnyh porod pri burenii skvazhin. M. : Infra-M. 2015. 336 s.
5. Drahanchuk O.T., Pryhorovska T.O. Analiz vidpratsiuvannia dolit PDC na rodovyschakh Ukrainy i svitu. Naftohazova enerhetyka. 2008. №4. S. 11-15.
6. Balaba V. I., Bikbulatov I. K., Vyshegorodceva G. N. Burovoj porodorazrushayushij instrument. M. : Izd-vo centr RGU нефти i gaza im. I. M. Gubkina. 2013. 251 s.
7. Galle E.M., Woods H.B. Bit weight and rotary speed for lowest-cast drilling. Oil and Gas J. 1960. № 49. R. 167-176.
8. Galle E.M., Woods H.B. Practical ways to find proper bit weight and rotary speed. Oil and Gas J. 1960. № 47. R. 160-166.

- 
9. Gabashvili N.V., Kiriya T.A., Chachashvili L.G., Chhaidze L.L. Primenenie metodov matematicheskogo programmirovaniya dlya optimizatsii rezhima bureniya. Tbilisi : Macniereba, 1971. 94 s.
  10. Horbiichuk M.I., Kropyvnytska V.B. Suboptymalne keruvannia protsesom zahlyblennia sverdlovn. Naftova i hazova promyslovist. 2003. № 1. S. 24-25.
  11. Horbiichuk M.I., Kropyvnytska V. B. Metody optymalnoho keruvannia protsesom burinnia. Materialy 11 mizhnarodnoi konferentsii z avtomatychnomu upravlinniu "Avtomatyka –2004", Kyiv, 2004, t. 2, s. 11.
  12. Horbiichuk M.I., Kropyvnytskyi D. R. Matematychna model protsesu pohlyblennia sverdlovnyny pid chas burinnia hvyntovymy vybiinymy dvyhunamy. Zbirnyk naukovykh prats natsionalnoho universytetu korablebuduvannia imeni admirala Makarova. Mykolaiv : Vydavnychiy dim "Helvetyka", 2021. № 1 (484). S. 68-74.
  13. Horbiichuk M. I., Pistun Ye. P. Chyslovi metody i modeliuvannia na EOM. Ivano-Frankivsk : Fakel. 2010. 408 s.
  14. Gill F., Myurrej U., Rajt M. Prakticheskaya optimizaciya. M. : Mir, 1985. 509 s.
  15. Himmelblau D. Analiz processov statisticheskimi metodami. M. : Mir, 1973. 960 s.

ГУРМАН Іван

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-2282-3484>e-mail: [devastator167384@gmail.com](mailto:devastator167384@gmail.com)

БОБРОВНИКОВА Кіра

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-1046-893X>e-mail: [bobrovnikova.kira@gmail.com](mailto:bobrovnikova.kira@gmail.com)

БЕДРАТЮК Леонід

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-6076-5772>e-mail: [leonid.uk@gmail.com](mailto:leonid.uk@gmail.com)

БЕДРАТЮК Ганна

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0224-5549>e-mail: [bedratyuk@ukr.net](mailto:bedratyuk@ukr.net)

## МЕТОД АНАЛІЗУ ПРОГРАМНОГО КОДУ ДЛЯ ОЦІНКИ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ЯДРА CUDA

В роботі запропоновано метод аналізу програмного коду для оцінки енергоспоживання ядра CUDA для підвищення енергоефективності застосунків, які орієнтовані на обчислення на графічних процесорах. Запропонований підхід, заснований на статичному аналізі програми CUDA та методах машинного навчання, дозволяє оцінити енергоспоживання таких застосунків без необхідності виконання на фізичних пристроях.

З метою оцінки ефективності запропонованого підходу було використано три архітектури GPU NVIDIA: PASCAL, TURING та AMPERE. Результати проведених експериментів показали, що для архітектури NVIDIA AMPERE запропонований підхід надає можливість досягти коефіцієнта детермінації на рівні 0.9173. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованого методу аналізу програмного коду для оцінки енергоспоживання ядра CUDA.

HURMAN Ivan, BOBROVNIKOVA Kira, BEDRATYUK Leonid, BEDRATYUK Hanna  
Khmelnitskyi National University

### APPROACH FOR CODE ANALYSIS TO ESTIMATE POWER CONSUMPTION OF CUDA CORE

The graphics processing unit is a popular computing device for achieving exascale performance in high-performance computing programs, which is used not only in graphics tasks, but also in computational tasks such as machine learning, scientific computing, and cryptography. With the help of a graphics processor, you can achieve significant speed and performance compared to the central processing unit. CUDA, Compute Unified Device Architecture, a graphics processing unit software development platform, allows developers to use the high-performance computing capabilities of graphics processing units to solve problems traditionally handled by central processing units.

Even though the graphics processing unit has a relatively high power to performance ratio, it consumes a significant amount of power during computing. The paper proposes an approach for code analysis to estimate power consumption of CUDA core to improve the power efficiency of applications focused on computing on graphics processing units. The proposed approach makes it possible to estimate the power consumption of such applications without the need to run them on physical devices. The proposed approach is based on static analysis of the CUDA program and machine learning methods.

To evaluate the effectiveness of the proposed approach, three graphics processing unit architectures were used: NVIDIA PASCAL, NVIDIA TURING, and NVIDIA AMPERE. The results of the experiments showed that for the NVIDIA AMPERE architecture, the proposed approach using decision trees makes it possible to achieve a determination coefficient of 0.9173. The results obtained confirm the effectiveness of the proposed code analysis method for estimating the power consumption of the CUDA core. This method can be useful for CUDA developers who want to improve the efficiency and power efficiency of their programs.

Keywords: GPU; NVIDIA; CUDA; power consumption; high-performance computing.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сьогодні графічні процесори (graphics processing unit, GPU) використовуються в найшвидших сучасних суперкомп'ютерах, є домінуючою платформою для глибокого навчання та забезпечують інтелект розумних пристроїв, починаючи від безпілотних автомобілів і закінчуючи роботами та розумними камерами; для створення фотореалістичних зображень з високою частотою кадрів у реальному часі та як обчислювальні пристрої для вирішення задач у багатьох областях, включаючи наукові дослідження, машинне навчання, фінансову аналітику [1]. GPU продовжують еволюціонувати, додаючи нові властивості та функції для підтримки нових випадків їх використання.

Протягом останніх десятиліть розвитку GPU продуктивність цих пристроїв зросла в кілька сотень разів. Також, з'явилися нові архітектури GPU, такі як Tensor Cores [2, 3], що спеціалізуються на обчисленнях зі штучним інтелектом та машинним навчанням та надають нові можливості для всіх робочих навантажень: від 6-кратного прискорення під час навчання мережі до 3-кратного підвищення продуктивності всіх програм.

Значно підвищити продуктивність обчислень за рахунок використання потужності графічного процесора NVIDIA дозволяє паралельна обчислювальна платформа та модель програмування CUDA

(Compute Unified Device Architecture) від NVIDIA Corporation [4]. CUDA є стандартною функцією всіх графічних процесорів NVIDIA GeForce, Quadro та Tesla, а також рішень NVIDIA GRID [2, 3]. CUDA забезпечує абстракцію, яка дозволяє програмісту визначити, як саме повинна виконуватися програма. Компілятор генерує код PTX, який не залежить від апаратного забезпечення та компілюється для конкретного цільового графічного процесора під час виконання. Сумісність з новими моделями графічних процесорів забезпечується оновленням драйвера щоразу, коли випускається новий графічний процесор. При цьому зміни в кількості регістрів або розмірі спільної пам'яті можуть (але не обов'язково) відкрити можливість для подальшої оптимізації. CUDA переважно дотримується моделі паралельних обчислень, де кожен потік виконує ту саму операцію над різними елементами даних паралельно. Дані розбиваються на сітку блоків 1D, 2D або 3D. Кожен блок також може мати форму 1D, 2D або 3D і може складатися з понад 512 потоків. Потоки в блоці потоків можуть взаємодіяти через спільну пам'ять. Блоки потоків виконуються як менші групи потоків, відомі як «warps». Програми CUDA можуть також розподіляти роботу між кількома GPU, якщо в програмі передбачено програмування кількох GPU.

Однак, збільшення продуктивності GPU призводить до збільшення енергоспоживання, що може бути проблемою для розробників, які мають обмеження на споживання енергії їх пристроїв. З ростом вимог до продуктивності, особливо в обчислювальних задачах, розробники повинні мати глибоке розуміння ключових особливостей свого коду, які найбільше впливають на споживання енергії. Це необхідно для забезпечення оптимальної продуктивності та енергоефективності пристроїв. Для досягнення цих цілей розробники повинні мати доступ до інструментів аналізу та прогнозування споживання енергії їхнім кодом.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Складність архітектури GPU завжди була перешкодою для моделювання споживання енергії GPU. На відміну від центральних процесорів, графічні процесори мають високопаралельну та гетерогенну архітектуру з великою кількістю процесорів, кеш-пам'яті та з'єднань. Це ускладнює точне моделювання енергоспоживання для різних робочих навантажень і конфігурацій.

На сьогодні відомо багато різних підходів для вимірювання енергоспоживання GPU. З метою поглиблення розуміння мікроархітектури графічних процесорів NVIDIA у [5] проведено дослідження споживання енергії при виконанні 40 різних інструкцій PTX для чотирьох графічних процесорів NVIDIA (Maxwell, Pascal, Volta, and Turing). Крім того, продемонстровано вплив оптимізації компілятора CUDA на споживання енергії кожною інструкцією. З цієї метою було використано три програмні методи зчитування даних потужності графічного процесора, два з яких використовують API NVML (NVIDIA Management Library) [6] від NVIDIA, а третій заснований на використанні компоненту CUDA PAPI (Performance Application Programming Interface) [7].

У статті [8] запропоновано метод прогнозування часу виконання ядра GPU, що дозволяє розробникам виправити неефективний код перед запуском програми, не виконуючи його насправді. Аналітична модель для прогнозування часу виконання ядра графічного процесора створюється на основі аналізу проміжного коду PTX ядра CUDA. Експериментальний аналіз показав, що для 45 додатків оцінка часу виконання має середню абсолютну похибку 26,86% порівняно з фактичним часом виконання.

У роботі [9] досліджується енергоспоживання ядер CUDA з використанням фреймворку SimGrid. Робота базується на моделі виконання CUDA, яка дозволяє розподілити роботу ядра на блоки та розподілити їх між поточковими мультипроцесорами. Модель передбачає енергоспоживання на основі кількості блоків. Результати дослідження були перевірені з використанням шести різних ядер CUDA на двох різних графічних процесорах NVIDIA (Tesla M2075 та Kepler K20Xm). Для оцінки точності було порівняно реальні виміри з результатами моделювання за допомогою середньої відносної помилки. Середні відносні помилки для часу роботи та енергії становили 6,69% та 6,86% для M2075 та 6,54% та 8,33% для K20Xm відповідно.

У дослідженні [10] розглянуто можливість збереження енергії шляхом зміни розміру блоку в конфігурації ядра. Гіпотеза полягає в тому, що оптимальний розмір блоку під час виконання робочого навантаження може досягти більшої економії енергії. Для перевірки гіпотези було обрано два ядра на графічному процесорі NVIDIA Tesla K40, а саме ядра Bitonic Mergesort і Vector Addition. Дослідження включало в себе вимірювання потужності та енергоспоживання GPU з різними розмірами блоків під час виконання робочого навантаження. Отримані результати демонструють вплив зміни розміру блоків на потужність та енергоспоживання GPU. Зокрема, було зроблено висновок, що оптимальний розмір блоку може забезпечити значну економію електроенергії.

Робота [11] присвячена дослідженню проблеми енергетичної пропорційності графічних процесорів. Енергетична пропорційність визначає систему, яка споживає енергію пропорційно кількості роботи, яку вона виконує. Для енергопропорційної системи оптимізація коду з метою підвищення продуктивності також оптимізує споживання енергії. В роботі експериментально досліджені енергопропорційність графічних процесорів NVIDIA K40c та NVIDIA P100 PCIe за допомогою спеціально розробленої програми множення матриці. Було виявлено, що обидва графічні процесори характеризуються слабкою енергопропорційністю, що дає можливість двоцільової оптимізації програми з точки зору динамічної енергії та продуктивності.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття**

Незважаючи на значну кількість досліджень в області оцінки та оптимізації енергоспоживання GPU, проблема підвищення енергоефективності програм залишається невирішеною. Тому актуальною задачею є розроблення методу аналізу програмного коду для оцінки енергоспоживання ядра CUDA.

**Формулювання цілей статті**

Метою роботи є розроблення методу аналізу програмного коду для оцінки енергоспоживання ядра CUDA, який базується на статичному аналізі. Дослідження включає два завдання: (1) створити архітектурно-незалежну модель для передбачення споживання енергії CUDA програм з прийнятною похибкою та точністю; (2) дослідити вплив різних особливостей CUDA програм, що розглядаються у цій роботі, на споживання енергії GPU. Розроблений метод покликаний допомогти розробникам програм CUDA в розумінні профілю споживання енергії ядром.

**Виклад основного матеріалу**

Запропонований метод ґрунтується на аналізі коду з використанням апаратних ознак і коду PTX. З метою пошуку найбільш ефективних ознак, які можуть впливати на енергоспоживання ядра CUDA, було виокремлено 15 ознак (табл. 1). Для зменшення взаємного впливу та мінімізації корелюючих ознак було використано кореляційний аналіз, що дозволило включити в набір ознак лише одну з висококорелюючих ознак. Для цього було використано коефіцієнт кореляції Пірсона. За допомогою отриманої теплової карти коефіцієнта кореляції Пірсона (рис. 1) було виключено ознаки, які сильно корелюють між собою (табл. 1):  $f_2$ ,  $f_{13}$ ,  $f_{15}$  корелюють з  $f_7$ , тому  $f_2$ ,  $f_{13}$ ,  $f_{15}$  були виключені з набору ознак;  $f_4$ ,  $f_6$ ,  $f_{14}$  корелюють між собою, тому в наборі ознак залишено лише  $f_6$ . Для визначення ознак, які найбільш сильно впливають на енергоспоживання, було використано дерево рішень (з цією метою було застосовано бібліотеку Scikit-learn, яка використовує алгоритм, заснований на CART (Classification and Regression Trees)).

Таблиця 1

**Множина ознак, які можуть впливати на енергоспоживання ядра CUDA**

Ознака	Опис ознаки	
	Повний набір ознак	Результуючий набір ознак (джерело)
$f_1$	Кількість потоків на блок	Визначається користувачем
$f_2$	Кількість блоків	Виключено
$f_3$	Кількість обчислювальних інструкцій в ядрі	На основі аналізу PTX
$f_4$	Кількість змодельованих обчислювальних інструкцій	Виключено
$f_5$	Кількість інструкцій глобальної пам'яті в ядрі	На основі аналізу PTX
$f_6$	Кількість змодельованих інструкцій глобальної пам'яті	Алгоритм аналізу коду
$f_7$	Цикли випуску інструкцій	Обчислюється на основі даних користувача
$f_8$	Кількість різних інструкцій у ядрі	На основі аналізу PTX
$f_9$	Загальна кількість змодельованих різних інструкцій	Алгоритм аналізу коду
$f_{10}$	Відношення активних груп потоків (warp) в потоковому мультипроцесорі до максимальної кількості активних груп потоків, підтримуваних поточним мультипроцесором	CUDA Occupancy Calculator
$f_{11}$	Кількість інструкцій поділюваної пам'яті в ядрі	На основі аналізу PTX
$f_{12}$	Кількість змодельованих обчислювальних інструкцій поділюваної пам'яті	Виключено
$f_{13}$	Загальна кількість запущених потоків	Виключено
$f_{14}$	Загальна кількість змодельованих інструкцій	Виключено
$f_{15}$	Кількість груп потоків (wave) блоків, виконаних на потоковому мультипроцесорі	Виключено

З метою проведення експериментальних досліджень розробленого підходу було зібрано тестовий набір даних за допомогою таких інструментів як CUDA Occupancy Calculator та із застосуванням розробленого алгоритму аналізу коду (рис. 2). Розроблений алгоритм використовує статичний аналіз коду CUDA та аналіз апаратних функцій, наданих виробником GPU. В алгоритмі використано наступні позначення: SM – кількість поточних мультипроцесорів;  $T_m$  – максимальна кількість потоків на потоковий мультипроцесор; B – кількість блоків; T – кількість потоків на блок; l – кількість ітерацій циклу;  $T_s$  – загальна кількість потоків, запланованих на потоковий мультипроцесор;  $T_w$  – кількість потоків в поточній групі потоків. Вхідними даними алгоритму є код PTX разом із параметрами запуску, тобто кількістю блоків, кількістю потоків на блок і кількістю ітерацій циклу. Ці вхідні дані не можна витягнути за

допомогою статичного аналізу, і вони є дуже важливими для вилучення ознак. Параметри запуску (кількість потоків на блок, кількість блоків) надаються користувачем, оскільки їх неможливо отримати з аналізу PTX.

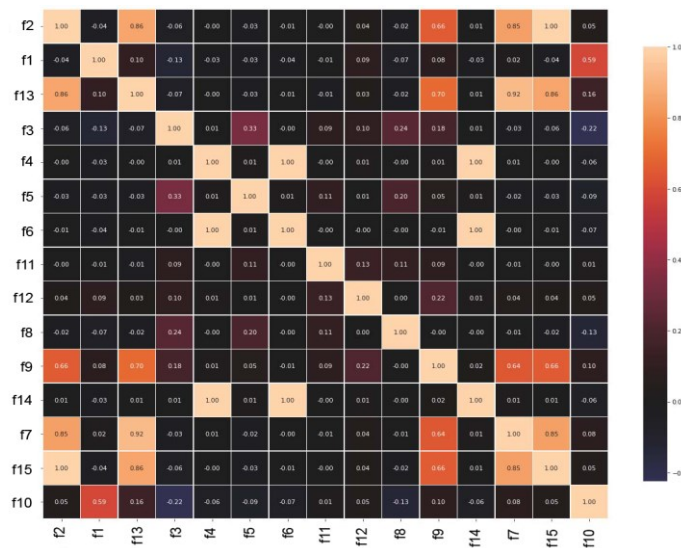


Рис. 1. Використання коефіцієнта кореляції Пірсона для виключення корелюючих ознак

Тестові ядра запускалися з різними параметрами запуску (кількість потоків на блок, кількість блоків). Як відомо, енергоспоживання GPU залежить від робочого навантаження ядра, наприклад, доступ до глобальної пам'яті споживає більше енергії, ніж доступ до поділюваної пам'яті, регістрів на кристалі та виконання арифметичних операцій з плаваючою комою [1]. Значення споживаної потужності були згенеровані за допомогою двох інструментів: Unified Power Profiling Application Programming Interface (UPPAPI) та NVML API. Для мінімізації похибки вимірної потужності в якості результуючого значення було використано середнє значення потужності. Для обчислення теоретичного максимального значення  $f_{10}$ , якого можна досягти під час виконання конкретного ядра, використано CUDA Occupancy Calculator та такі вхідні дані: (1) кількість потоків на блок; (2) кількість регістрів, що використовуються на потік; (3) кількість поділюваної пам'яті, яку використовує блок потоків; (4) обчислювальна здатність CUDA пристрою.

Кількість інструкцій кожного типу в ядрі графічного процесора підраховувалась за допомогою статичного аналізу коду PTX для ядра GPU. Кількість змодельованих обчислювальних інструкцій одержувалась за допомогою алгоритму аналізу коду, оскільки для цієї ознаки потрібно брати до уваги специфікацію GPU.

```

procedure PROGRAMANALYSIS(PTX, B, T, l)
     $T_s = \lfloor B/SM^* T \rfloor$ ;
     $f_{15} = 0$ ;
    while  $T_s > 0$  do
         $T_w = T_s > T_m ? T_m : T_s$ 
        for each Block in PTX do
            for each instruction i in G do
                if i.Type == Computing then  $f_4 += 1$ ;
                end if
                if i.Type == Global Memory then  $f_5 += 1$ ;
                end if
                if i.Type == Shared Memory then  $f_{12} += 1$ ;
                end if
                if i.Type == Miscellaneous then  $f_9 += 1$ ;
                end if
            end for
            if Block has a loop then Multiply each feature by l
            end if
        end for
         $T_s = T_s - T_m$ ;
         $f_{15} = f_{15} + 1$ ;
    end while
    return feature values;
end procedure
    
```

Рис. 2. Алгоритм аналізу коду

Також, енергоспоживання графічного процесора чутливе до доступу до глобальної пам'яті. Глобальні інструкції доступу до пам'яті також підраховувались шляхом аналізу коду PTX. Кількість інструкцій, що виконуються на одному потоковому мультипроцесорі, обчислювалась із використанням алгоритму аналізу коду. Інструкції доступу до поділюваної пам'яті також можуть сприяти енергоспоживанню графічного процесора, особливо якщо вони супроводжуються конфліктами, пов'язаними з банками пам'яті. Кількість інструкцій, що пов'язані з поділюваною пам'яттю, була обчислена із використанням алгоритму аналізу коду.

З метою одержання значень ознак було проведено множину еталонних тестів продуктивності GPU з використанням таких інструментів як CUDA Toolkit Samples, Rodinia Benchmark, Tango GPU [12]. З метою оцінки ефективності запропонованого підходу було використано три архітектури GPU NVIDIA: PASCAL (GeForce GTX 1070), TURING (GeForce RTX 2060) та AMPERE (GeForce RTX 3070). Результати проведених експериментів наведені на рис. 3, 4. В якості показників для оцінки ефективності було використано: коефіцієнт детермінації, R2, кореневе середньоквадратичне відхилення (Root-Mean-Square Deviation, RMSD) та середню абсолютну похибку (Mean Absolute Error, MAE). Результати експериментів наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Результати експериментів: оцінка ефективності розробленого підходу

Архітектура GPU	R2	RMSD	MAE
PASCAL	0.8399	10.2232	5.2135
TURING	0.8833	7.8476	3.7081
AMPERE	0.9173	12.3425	5.6370

Наведені результати демонструють високий показник коефіцієнту детермінації R2 для всіх трьох архітектур GPU, що підтверджує ефективність розробленого підходу. Як видно з рис. 3, для всіх контрольних показників прогнозована потужність є досить точною, порівняно з вимірним значенням.

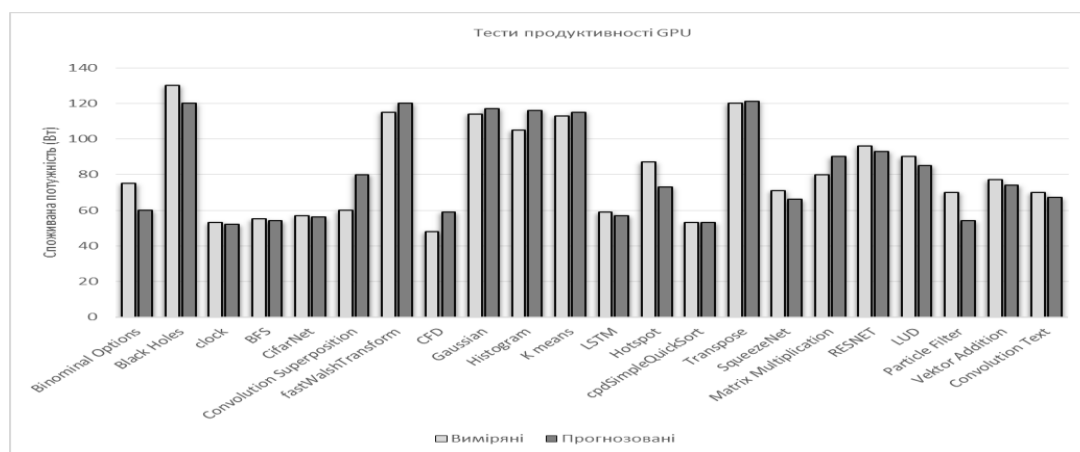


Рис. 3. Значення виміряного та прогнозованого споживання енергії

Як видно з наведених результатів, ефективність підходу не залежить від архітектури, оскільки одержано високу точність для всіх трьох досліджуваних архітектур GPU. Аналіз важливості ознак з використанням дерева рішень для всіх трьох архітектур (рис.4) показав, що ознака  $f_7$  (цикли випуску інструкцій) найбільше впливає на енергоспоживання в трьох архітектурах. Глобальні інструкції доступу до пам'яті мають значний вплив на енергоспоживання, таким чином  $f_5$  та  $f_6$  мають вищі значення для всіх трьох архітектур. Кількість обчислювальних інструкцій  $f_3$  також впливає на прогнозування потужності так само ефективно, як кількість різноманітних інструкцій ( $f_8$ ) і кількість змодельованих різних інструкцій ( $f_9$ ).

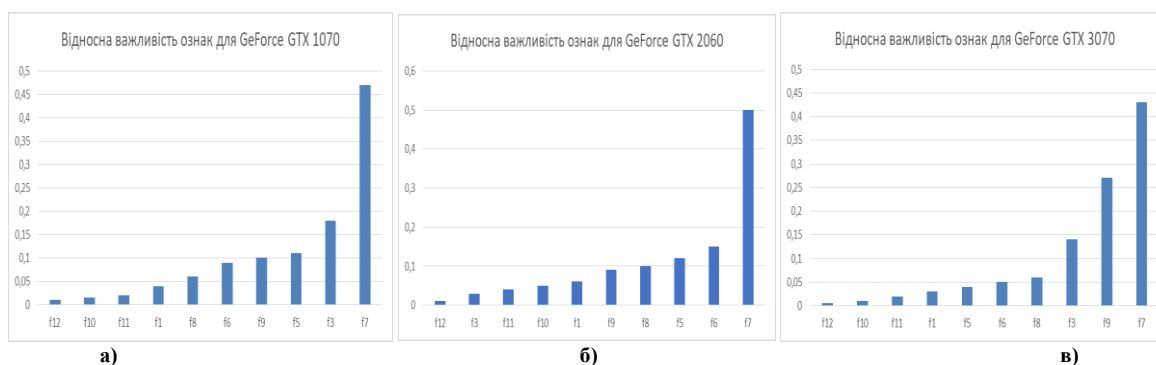


Рис. 4. Відносна важливість ознак для архітектур NVIDIA: а) PASCAL; б) TURING; в) AMPERE

Кількість запущених блоків  $f_2$  може представляти кількість потокових мультипроцесорів, активованих під час виконання коду ядра CUDA, оскільки кожен новий блок співставляється з одним потоковим мультипроцесором. Проте, ця ознака помірно вплинула на енергоспоживання. Відношення активних груп потоків (warp) в потоковому мультипроцесорі до максимальної кількості активних груп потоків, підтримуваних потоковим мультипроцесором,  $f_{10}$ , мала бути однією з найважливіших ознак, які сприяють збільшенню енергоспоживання, оскільки вона описує максимальну кількість потоків, що знаходяться в потоковому мультипроцесорі. Однак значення  $f_{10}$  є нижчим для всіх трьох архітектур. Це може бути спричинене похибкою, викликаною використанням CUDA Occupancy Calculate, який дає приблизне значення ознаки. Серед усіх типів розглянутих ознак інструкції з поділюваною пам'яттю найменше впливають на енергоспоживання ( $f_{11}$ ,  $f_{12}$ ) для всіх трьох архітектур. Це пов'язане з тим, що поділювана пам'ять набагато швидша, порівняно з глобальною.

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

З метою підвищення енергоефективності програм, орієнтованих на обчислення на графічних процесорах, в роботі запропоновано метод аналізу програмного коду для оцінки енергоспоживання ядра CUDA. Запропонований підхід дозволяє оцінити енергоспоживання таких програм без необхідності запускати їх на фізичних пристроях. Запропонований метод заснований на статичному аналізі програми CUDA та методах машинного навчання.

Для оцінки ефективності запропонованого підходу було використано три архітектури графічних процесорів: NVIDIA PASCAL, NVIDIA TURING і NVIDIA AMPERE. Результати експериментів показали, що для архітектури NVIDIA AMPERE запропонований підхід дозволяє досягти найвищого коефіцієнта детермінації на рівні 0,9173. Проте ефективність підходу не залежить від архітектури, оскільки одержано високу точність для всіх трьох досліджуваних архітектур GPU. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованого методу. Метод може бути корисним для розробників CUDA, які мають на меті покращити ефективність та енергоефективність своїх програм.

Майбутнє дослідження буде спрямоване на вивчення впливу затримки кожного типу інструкцій та використання регістрової пам'яті на енергоспоживання GPU.

### Література

1. Bridges R. A., Understanding gpu power: A survey of profiling, modeling, and simulation methods / R. A. Bridges, N. Imam, and T. M. Mintz, // ACM Comput. Surv., vol. 49, no. 3, pp. 41:1-41:27, Sep. 2019.
2. Dally W. J., Evolution of the graphics processing unit (GPU). // Keckler S. W., Kirk D. B. IEEE Micro, 41(6), 2021, P. 42-51.
3. NVIDIA Corporation. (2019) Cuda compiler driver nvcc. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://docs.nvidia.com/cuda/cuda-compiler-driver-nvcc> – (Дата звернення 4.01.2023). – Назва з екрану.
4. NVIDIA, Cuda samples. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://docs.nvidia.com/cuda/cuda-samples/index.html> – (Дата звернення 02.01.2023). – Назва з екрану.
5. Arafa Y., Verified instruction-level energy consumption measurement for nvidia gpus. ElWazir A., ElKanishy A., Aly Y., Elsayed A., Badawy A. H., Santhi N. // 17th ACM International Conference on Computing Frontiers, 2020, P. 60-70.
6. NVIDIA, Nvml api, reference manual, [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://docs.nvidia.com/pdf/NVML\\_API\\_Reference\\_Guide.pdf](https://docs.nvidia.com/pdf/NVML_API_Reference_Guide.pdf) – (Дата звернення 28.12.2022). – Назва з екрану.
7. Performance Application Programming Interface (PAPI). (2019) Version5.7. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://icl.utk.edu/papi/> – (Дата звернення 4.01.2023). – Назва з екрану.
8. Alavani G., Predicting execution time of cuda kernel using static analysis, / K. Varma, and S. Sarkar, // IEEE Intl Conf on Parallel Distributed Processing with Applications, Ubiquitous Computing Communications, Big Data Cloud Computing, Social Computing Networking, Sustainable Computing Communications. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, dec 2018, pp. 948–955.
9. Boughzala D., Predicting the energy consumption of cuda kernels using simgrid. // Lefèvre L., Orgerie A. C., IEEE 32nd International Symposium on Computer Architecture and High Performance Computing (SBACPAD), 2020, P. 191-198.
10. Ikram M. J., Investigating the effect of varying block size on power and energy consumption of GPU kernels. // Saleh M. E., Al-Hashimi M. A., Abulnaja O. A., The Journal of Supercomputing, 78(13), 2022 P. 14919-14939.
11. Manumachu R. R., On Energy Nonproportionality of CPUs and GPUs. Lastovetsky, A., // In 2022 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops (IPDPSW), 2022, P. 34-44.
12. Karki A., Tango: A deep neural network benchmark suite for various accelerators, / C. Palangotu Keshava, S. Mysore Shivakumar, J. Skow, G. Madhukeshwar Hegde, and H. Jeon, // IEEE International Symposium on Performance Analysis of Systems and Software (ISPASS), 2019, P. 137-138.



## References

1. Bridges R. A., Understanding gpu power: A survey of profiling, modeling, and simulation methods / R. A. Bridges, N. Imam, and T. M. Mintz, // *ACM Comput. Surv.*, vol. 49, no. 3, pp. 41:1-41:27, Sep. 2019.
2. Dally W. J., Evolution of the graphics processing unit (GPU). // Keckler S. W., Kirk D. B. *IEEE Micro*, 41(6), 2021, P. 42-51.
3. NVIDIA Corporation. (2019) Cuda compiler driver nvcc. [Online]. – Access Mode: <https://docs.nvidia.com/cuda/cuda-compiler-driver-nvcc> – (Date of application 4.01.2023). – name from the screen.
4. NVIDIA, Cuda samples. [Online]. – Access Mode: <https://docs.nvidia.com/cuda/cuda-samples/index.html> – (Date of application 02.01.2023). – name from the screen.
5. Arafa Y., Verified instruction-level energy consumption measurement for nvidia gpus. ElWazir A., ElKanishy A., Aly Y., Elsayed A., Badawy A. H., Santhi N. // *17th ACM International Conference on Computing Frontiers*, 2020, P. 60-70.
6. NVIDIA, Nvml api, reference manual, [Online]. – Access Mode: [https://docs.nvidia.com/pdf/NVML\\_API\\_Reference\\_Guide.pdf](https://docs.nvidia.com/pdf/NVML_API_Reference_Guide.pdf) – (Date of application 28.12.2022). – name from the screen.
7. Performance Application Programming Interface (PAPI). (2019) Version5.7. [Online]. – Access Mode: [https://icl.utk.edu/papi\\_](https://icl.utk.edu/papi_) – (Date of application 4.01.2023). – name from the screen.
8. Alavani G., Predicting execution time of cuda kernel using static analysis, / K. Varma, and S. Sarkar, // *IEEE Intl Conf on Parallel Distributed Processing with Applications, Ubiquitous Computing Communications, Big Data Cloud Computing, Social Computing Networking, Sustainable Computing Communications*. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, dec 2018, pp. 948–955.
9. Boughzala D., Predicting the energy consumption of cuda kernels using simgrid. // Lefèvre L., Orgerie A. C., *IEEE 32nd International Symposium on Computer Architecture and High Performance Computing (SBAC-PAD)*, 2020, P. 191-198.
10. Ikram M. J., Investigating the effect of varying block size on power and energy consumption of GPU kernels. // Saleh M. E., Al-Hashimi M. A., Abulnaja O. A., *The Journal of Supercomputing*, 78(13), 2022 P. 14919-14939.
11. Manumachu R. R., On Energy Nonproportionality of CPUs and GPUs. Lastovetsky, A., // *In 2022 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops (IPDPSW)*, 2022, P. 34-44.
12. Karki A., Tango: A deep neural network benchmark suite for various accelerators, / C. Palangotu Keshava, S. Mysore Shivakumar, J. Skow, G. Madhukeshwar Hegde, and H. Jeon, // *IEEE International Symposium on Performance Analysis of Systems and Software (ISPASS)*, 2019, P. 137-138.

ДАНИЛКОВИЧ Анатолій

Київський національний університет технологій та дизайну

<https://orcid.org/0000-0002-5707-0419>e-mail: [ag101@ukr.net](mailto:ag101@ukr.net)

САНГІНОВА Ольга

Національний технічний університет України «Київський  
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»<https://orcid.org/0000-0001-6378-7718>e-mail: [sanginova@xtf.kpi.ua](mailto:sanginova@xtf.kpi.ua)

## ЗАСТОСУВАННЯ ТАНІДІВ АКАЦІЇ В ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕЛАСТИЧНИХ ШКІР

Проведено ІЧ-спектроскопічне дослідження взаємодії колагену дерми з танідами чорнодеревної акації та його використання для додублювання-наповнювання шкіряного напівфабрикату. Використання в процесах додублювання-наповнювання напівфабрикату хромового дублення екстракту акації в комплексі із синтаном БНС забезпечує підвищення їх дифузії в структуру та скорочення тривалості процесу. Застосування танідів екстракту акації в технології виготовлення еластичних шкір дає можливість отримувати наповнений-жирований напівфабрикат з підвищеними фізико-хімічними властивостями – пористістю, об'ємним виходом, повітропроникністю відповідно на 21, 37, 86 % порівняно з напівфабрикатом хромового дублення. Одержані результати дають підстави рекомендувати використання танідів екстракту акації в технологіях виготовлення еластичних шкір широкого асортименту.

**Ключові слова:** шкіряний напівфабрикат, екстракт акації, ІЧ-спектроскопія, дифузія, додублювання-наповнювання, фізико-хімічні властивості.

DANYLKOVIYCH Anatoliy

Kyiv National University of Technologies and Design

SANGINOVA Olga

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

## APPLICATION OF ACACIA TANNINS IN ELASTIC LEATHER MATERIALS PRODUCTION TECHNOLOGY

An IR-spectroscopic study of the interaction of collagen with blackwood acacia (*acacia melanoxylon*) tannins and its use for tanning and filling semi-finished leather products in the production of elastic leathers for shoe uppers was conducted. The analysis of IR spectra of the interaction of the chrome tanning collagen products dermis with the acacia extract tannins can indicate the intermolecular ionic bonds formation and a hydrogen bonds dense network building-up with the amino groups of collagen and phenolic and carbonyl groups of the plant extract tannins. The following reagents were used for the semi-finished product tanning: sodium chloride TU 9192-069-00200009527-98, formic and sulfuric acids according to DSTU GOST 1706-78 and DSTU GOST 2184:2018, and sodium carbonate ISO 6353-2-83. Blackwood acacia extract together with the synthesis product of 2-naphtholsulfonic acid with dioxydiphenylsulfone as synthetic tanning agent BNS TU 17-06-165-89 were used to fill the tanned semi-finished product. The application of BNS TU 17-06-165-89 syntan in the process of finishing and filling of chrome tanned semi-finished leather product after catting it into thin slices with a thickness of 1.4 mm together with acacia extract tannins ensures an increase in its diffusion into the structure and provides a process duration reduction. The use of acacia extract tannins in the production technology of elastic hides makes it possible to obtain a filled-greased semi-finished product with increased physical and chemical properties: porosity, volumetric yield, air permeability by 21, 37, 86%, respectively, compared to the chrome tanning semi-finished product. The obtained results give the grounds for recommendation the use of acacia extract tannins in the wide range of elastic leathers production technologies.

**Key words:** semi-finished leather product, acacia extract, IR spectroscopy, diffusion, tanning-filling, physical and chemical properties.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Для формування еластичних шкіряних матеріалів важливе технологічне значення має стадія додублювання-наповнювання. При цьому ущільнення лицьового шару шкіряного напівфабрикату необхідного для ефективного проведення подальших технологічних оброблень, зокрема вакуумного сушіння, може відбуватись завдяки використанню поліфункціональних реагентів. При використанні рослинних танідів як додублювальних реагентів суттєве значення має їх здатність фіксувати мереживку [1] лицьового шару напівфабрикату після його тиснення і розбивання в барабані, що важливо при виготовленні шкір спеціального призначення. У цьому відношенні перспективними можна вважати екологічно безпечні реагенти природного походження, а саме рослинні таніди. Завдяки високому вмісту активної речовини в чорно деревній акації, зокрема в корі до 50 % [2], вона знайшла багатоцільове використання, в тому числі у шкіряному виробництві. Разом з тим її ефективне застосування може бути реалізовано в результаті комплексного дослідження фізико-хімічних властивостей.

### Аналіз попередніх досліджень і публікацій

В дослідженнях науково-прикладного характеру при розробленні нових технологій виробництва шкіряних матеріалів різного призначення використовуються дубителі рослинного походження і їх комбінація із синтетичними реагентами. При цьому використовуються різноманітні умови їх суміщення з колагеном

дерми. Так в роботі [3] відзначається актуальність використання дубильних екстрактів з рослинної сировини. При цьому з'являється можливість суттєво зменшити використання неорганічних реагентів. В роботі [4] наведені результати порівняльного дослідження впливу танідів акації і квебрахо на фізико-механічні властивості напівфабрикату. Показано, що використання білої акації при безхромовому дубленні напівфабрикату забезпечує значне підвищення межі міцності й подовження при розриванні. При комплексному застосуванні танідів сумаху і сполук алюмінію відповідно 10 і 1–2 % (в розрахунку на  $Al_2O_3$ ) [5] отримані шкіри зі стабільнішими експлуатаційними властивостями. Взаємодія екстракту квебрахо з колагеном дерми в умовах ВЧ-плазми наведена в роботах [6, 7]. Встановлено [6], що модифікований дубитель інтенсивно зв'язується поверхневими шарами напівфабрикату і для ефективної наскрізної дифузії необхідна додаткова активація сировини і напівфабрикату або встановлення нових параметрів процесу дублення. Часткова деструкція танідів квебрахо ВЧ-плазмою [7] забезпечує підвищення міцнісних характеристик видубленої шкіри.

Комбіноване використання танідів мімози і оксазолідину при додублюванні напівфабрикату хромового дублення наведено в роботі [8]. Отримана шкіра з сировини великої рогатої худоби характеризується високими фізико-механічними і технологічними властивостями, які відповідають вимогам стандарту. Для додублювання напівфабрикату хромового дублення використано водний екстракт з листя хни [9]. За властивостями отримані шкіри та економічною й технічною доцільністю використання екстракту як реагенту для додублювання відповідає значенням показників шкір додублених екстрактом мімози. Технологію додублювання шкіряного напівфабрикату [10] з використанням танідів з кори квебрахо застосовують для виготовлення шкір для верху взуття. Відзначається, що застосування танідів квебрахо і дисперсій полімерів забезпечує отримання рівної поверхні якісного забарвлення шкіри при зменшеній витраті натурального дубителя на 50 %. В розробленій технології виготовлення шкір [11] реалізовані різні комбінації рослинних дубителів з алюмосилікатами і синтетичним дубителем. Фізико-хімічні показники отриманих шкір за комбінованим методом оброблення відповідають вимогам стандартів для одягових шкір.

Аналіз науково-технічної літератури свідчить, що в процесі наповнювання необхідно враховувати особливості та умови взаємодії сумісного використання рослинних і синтетичних дубителів і, в першу чергу, забезпечення ефективної дифузії танідів в структуру дерми для отримання еластичних шкіряних матеріалів.

#### Формулювання цілей статті

**Метою** роботи є встановлення ефективності використання танідів акації в процесі додублювання-наповнювання при виготовленні еластичних шкір для верху взуття.

Таблиця 1

#### Смуги поглинання характеристичних груп атомів

Групи атомів	Тип коливання	Частота коливання, $cm^{-1}$	Інтенсивність с.п.
ОН спиртова	вал.	3000–3600	с, ш
ОН	деф.	1320–1420	сл, в
COO <sup>-</sup>	вал. асим.	1500–1690	с
	вал. сим.	біля 1400	сл
NH <sub>2</sub> чи NH	вал.	3000–3350	асоційовані
	вал. асим.	біля 3520	ср
	вал. сим.	біля 3400	ср
	деф.	1550–1650	
	вал. Амід II	біля 1550	с
	вал.	1200–1300	с
NH в NH <sub>3</sub> <sup>+</sup>	вал. асим., сим.	2000–3100	с, ш
	деф. асим.	1610–1660	сл
	деф. сим.	1480–1550	ср
C–N–H	NH деф., CN вал.	1250	
C–N	вал. Амід III	1200–1300	
	деф.	800–1300	
C–O	вал.	900–1350	
C=O	вал.	1550–1825	с
	вал. Амід I	1640	с
CH в CH <sub>2</sub>	вал. асим., сим.	300–2840	стабільні, с
	деф. асим, сим.	1375–1440	
	деф. ножичні	1465	стабільні, с
C–H ароматичного кільця	деф.	400–800	
CH <sub>2</sub> –CH <sub>2</sub>	C–C вал.	800–1200	сл
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		1080–1130	с, ш

**Примітка 1.** Позначення типів коливання: валентні – вал., деформаційні – деф., асиметричні – асим., симетричні – сим.

**Примітка 2.** Позначення інтенсивності с.п.: сильна – с, середня – ср, слабка – сл, вузька – в, широка – ш.

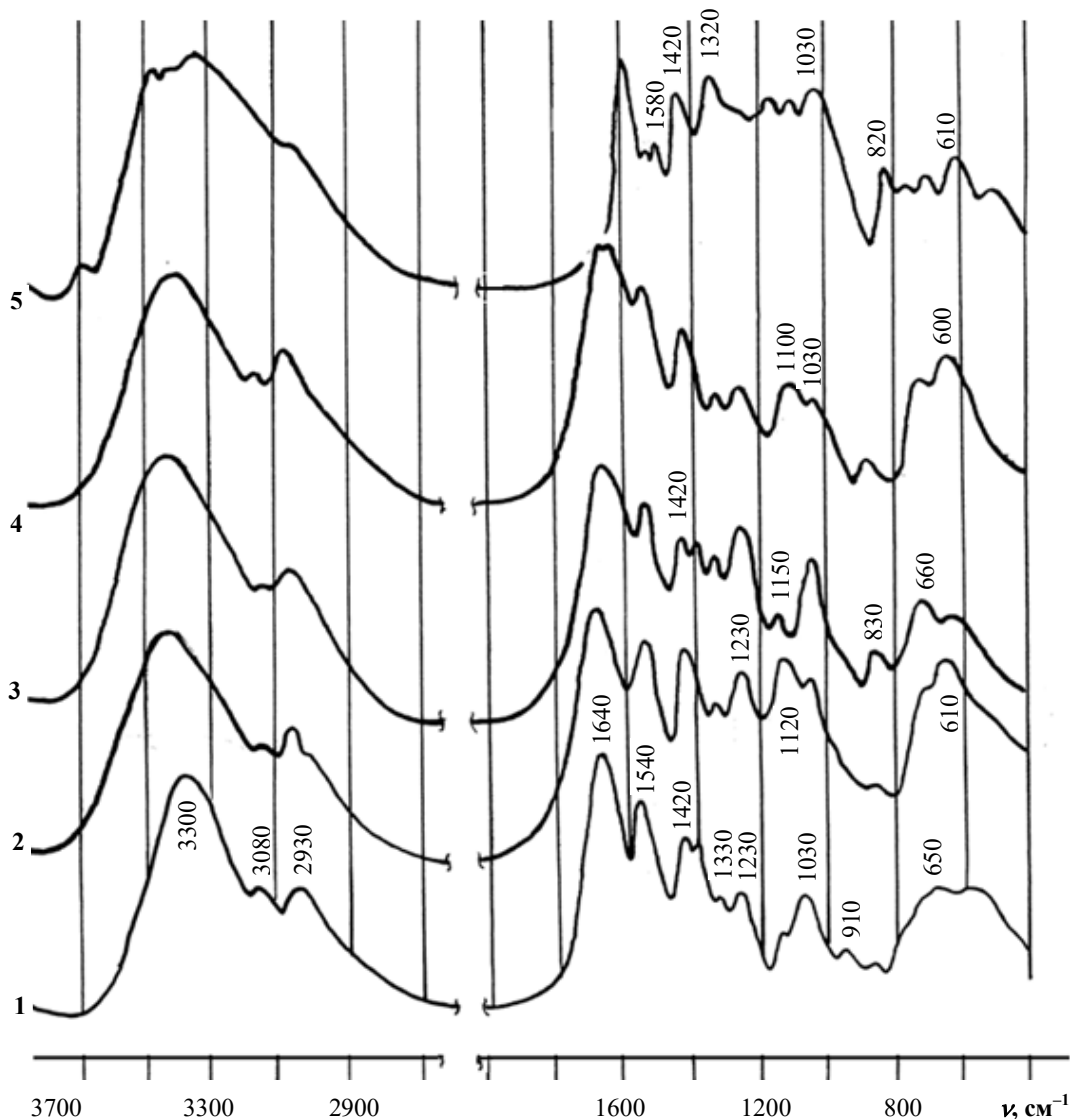
### Виклад основного матеріалу

Для визначення ефективності рослинного дубителя – екстракту чорнодеревної акації в процесах додублювання-наповнювання шкіряного напівфабрикату використано метод ІЧ-спектроскопії. Спектри отримані на спектрофотометрі марки Specord 75-IR фірми Analytik Jena AG (Німеччина) в інтервалі хвильових чисел  $\nu$  400–3800  $\text{cm}^{-1}$ . При цьому досліджена взаємодія танідів екстракту акації з хромованим напівфабрикатом.

Предметами дослідження слугували плівки товщиною 50–60  $\mu\text{m}$ , отримані з 2 % оцтовокислої розчину колагену дерми [12], які формувались на поліетиленовій плівці в спеціальних розбірних кюветах. Двокомпонентні системи «розчин колагену-реагент» отримуються шляхом суміщення реагентів з врахуванням умов технологічного режиму процесу додублювання-наповнювання. Вода з розчину колагену при формуванні плівок видалялася протягом доби за температури 22–25  $^{\circ}\text{C}$  з наступним доведенням їх до постійної маси у вакуумній сушильній шафі СВ-30 об'ємом (ТОВ "НВП "Укроргсинтез") за температури 75–85  $^{\circ}\text{C}$ .

Віднесення смуг пропускання (с.п.) ІЧ-спектрів вихідних речовин і продуктів взаємодії проводиться відповідно з частотами коливання характеристичних смуг (таблиця 1).

ІЧ-спектр колагену не відрізняється від спектру полідисперсної суміші поліпептидів желатину як продукту гідролізу колагену [12], які детально описані у роботі. Як видно з рис. 1 (крива 1), найхарактернішими в ІЧ-спектрі колагену є ділянки с.п. 400–1650  $\text{cm}^{-1}$  і 2700–3600  $\text{cm}^{-1}$ .



**Примітка.** Криві ІЧ-спектрів: 1 – колагену дерми, 2 – хромованого колагену, 3 – екстракту акації, 4 – колагену модифікованого екстрактом акації, 5 – продукту взаємодії хромованого колагену з екстрактом акації

**Рис. 1.** Залежність інтенсивності смуг пропускання вихідного і модифікованого колагену дерми від хвильового числа

В низькочастотній ділянці ІЧ-спектра спостерігається низка смуг, що є характерними для валентних і деформаційних коливань функціональних груп колагену. Так, карбоксильним групам відповідає с.п. при  $1390\text{ см}^{-1}$ , яка відображає коливання угруповання С–ОН карбоксильної групи. С.п. цієї ділянки  $1230, 1540, 1640\text{ см}^{-1}$  характеризують коливання вторинних амідів, які відповідають с.п. Амід III, Амід II і Амід I. Поглинання при  $1420\text{ см}^{-1}$  характеризує деформаційні коливання метиленових груп, зв'язаних з карбонільною групою. С.п. в ділянці  $1300\text{--}1400\text{ см}^{-1}$  зумовлені деформаційними коливаннями  $\text{NH}_2$ -груп і наявністю ковалентних зв'язків між вуглецем і азотом пептидних груп, а також скелетними коливаннями молекул колагену. Сильна с.п. з максимумом  $3300\text{ см}^{-1}$  найбільш ймовірно належить валентним коливанням NH-груп первинних і вторинних амідів. С.п.  $2930, 3080\text{ см}^{-1}$  – валентним коливанням СН-груп.

Дослідження природи взаємодії сполук хрому з колагеном [17–19] указують на складність цього процесу. Як показує крива 2 ІЧ-спектру ефект взаємодії колагену з сполуками хрому характеризується відсутністю с.п. з максимумом  $1390\text{ см}^{-1}$ , появою сильних с.п. при  $610, 1120, 1420\text{ см}^{-1}$  та розширенням сильної с.п. при  $3300\text{ см}^{-1}$ . Зміни в низькочастотній ділянці спектру можуть бути прямим підтвердженням участі йонізованих карбоксильних груп колагену в реакції взаємодії з комплексами хрому (III) та утворенням координаційних зв'язків між молекулами колагену

Поява у ІЧ-спектрі сильної с.п. з максимумом при  $1120\text{ см}^{-1}$  характеризує вихід сульфогруп хромових комплексів із внутрішньої сфери при заміні їх карбоксильними групами. При підвищенні рН середовища аміногрупи колагену поступово входять у внутрішню сферу хромових комплексів, що підтверджується появою с.п. при  $610\text{ см}^{-1}$ . Розширення високочастотної с.п. при  $3300\text{ см}^{-1}$  може свідчити про збільшення кількості водневих зв'язків між азотом аміногруп колагену і лігандами хромових комплексів.

ІЧ-спектр екстракту акації (крива 3), основним компонентом якого є поліфеноли, характеризується наявністю найбільш характерних с.п. при  $3610\text{ см}^{-1}$ , що відповідають коливанням ОН-груп фенолів. Поряд з цим в ділянці  $1400\text{--}1600\text{ см}^{-1}$  виявляються характерні для ароматичних сполук с.п. з максимумами  $1430, 1500, 1580, 1600\text{ см}^{-1}$ . Наявність в екстракті акації танідів фенольних сполук підтверджується с.п.  $1030$  і  $1320\text{ см}^{-1}$ , що характеризують валентні та деформаційні коливання відповідно С–О і ОН груп в фенолкарбонових кислотах. Про присутність сильних міжмолекулярних водневих зв'язків у структурі танідів свідчить широка с.п. з максимумами  $3280, 3300$  і  $2400\text{ см}^{-1}$ .

Аналіз кривих 4 і 1 ІЧ-спектрів свідчить про виникнення нових с.п. середньої інтенсивності з максимумами  $830$  і  $1150\text{ см}^{-1}$  та розширення с.п. при  $1230, 1640, 3300\text{ см}^{-1}$ . Такі зміни в спектрі продукту колаген-таніди екстракту акації можливо зумовлені взаємодією між аміно- і пептидними групами колагену з гідроксильними групами танідів з утворенням міжмолекулярних водневих зв'язків. Розширення с.п., що характеризують білкові аміногрупи також свідчить про наявність водневих зв'язків між колагеном гідрофільної ділянки молекул і функціональними групами танідів.

Про взаємодію танідів екстракту акації з колагеном хромового дублення (криві 5 і 2) свідчить виникнення нових с.п. в низькочастотній ділянці спектру при  $830$  і  $1100\text{ см}^{-1}$  та розширення с.п., що належать валентним і деформаційним коливанням аміногруп колагену. Це може свідчити про утворення водневих зв'язків, а також зв'язків йонного типу за участю аміно- і пептидних груп колагену та гідроксильних і карбонільних груп танідів.

Отже, проведено ІЧ-спектроскопічні дослідження взаємодії колагену дерми з сполуками хрому і танідами екстракту акації з врахуванням умов технологічного процесу. Ефективність взаємодії танідів акації з колагеном хромового дублення обумовлена утворенням численних водневих і електровалентних зв'язків за участю аміно- і пептидних груп колагену та гідроксильних груп танідів. Для більш детального дослідження взаємодії колагену дерми з танідами акації, в подальшому проведені дослідження дифузії танідів акації в структуру хромованого напівфабрикату при його подублюванні-наповнюванні.

#### **Використання екстракту танідів акації для подублювання-наповнювання шкіряного напівфабрикату**

Для подублювання-наповнювання шкіряного напівфабрикату використано зразки шкір великої рогатої худоби – ялівки середньої хромового дублення з витратою  $4,8\%$  сполук хрому (III) ТУ 2141-033-54138686-2003 від маси зеленого напівфабрикату, отриманого в умовах приватного АТ «Чинбар» м. Київ (Україна) за технологією [20]. При цьому для дослідження дифузії танідів у напівфабрикат хромового дублення вибрані зразки товщиною  $3\text{ мм}$ , а для наповнення-жирування – після його стругання на товщину  $1,4\text{ мм}$ . Для дублення напівфабрикату використовуються такі реагенти: хлорид натрію ТУ 9192-069-00200009527-98, мурашина і сірчана кислоти відповідно ДСТУ ГОСТ 1706-78 і ДСТУ ГОСТ 2184:2018 та карбонат натрію ІСО 6353-2-83. Для наповнювання дубленого напівфабрикату – екстракт акації чорнодеревної сумісно з продуктом синтезу 2-нафтолсульфокислоти з діоксидифенілсульфоном – синтетичний дубитель БНС ТУ 17-06-165-89. Жирування напівфабрикату виконується в процесі його наповнювання з використанням емульсії Fosfol L-1301 компанії «Cromogenia Units, S.A.» (Іспанія). Шкіряний напівфабрикат обробляється у дерев'яному барабані об'ємом  $18\text{ дм}^3$  при постійному обертанні зі швидкістю  $18\text{--}20\text{ хв}^{-1}$  (рис. 2).



Рис. 2. Лабораторна установка формування шкіри

Технологія додублювально-наповнювальних процесів технології виготовлення шкір для верху взуття наведена в таблиці 2. Всі процеси виконуються при неперервному обертанні барабана. Після подвійного промивання струганого напівфабрикату водою з підвищенням її температури нейтралізуючі реагенти повільно заливаються у вигляді 10 % розчинів. Завершується процес нейтралізації напівфабрикату за рН середовища 5,8–6,3. Для проведення наповнювально-жирувальних процесів температура підвищується до 53–55 °С при наступному промиванні напівфабрикату. Заключну фіксацію дифундованих реагентів на фібрилах структурованого напівфабрикату виконують при зниженні рН до 4,2 за допомогою алюмокалієвого галуна.

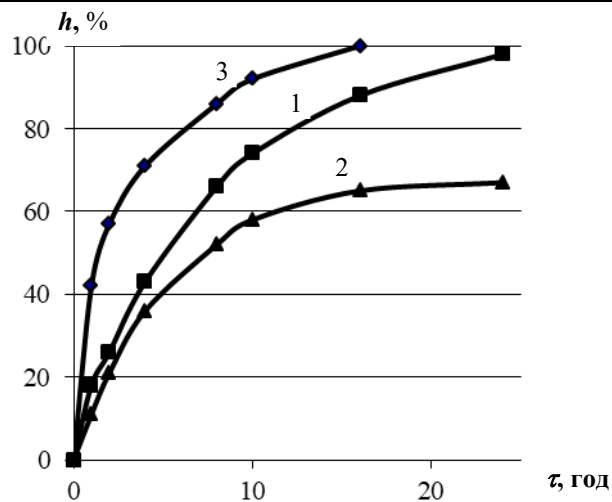
Таблиця 2

#### Параметри додублювально-наповнювальних процесів

Процес	Реагент – витрата, % маси напівфабрикату	Режим
Промивання	Вода перша 25–27 °С – 100 друга 33–36 °С – 100	У 2 два прийоми по 15–20 хв
Нейтралізація	Вода 33–36 °С – 100 Форміат натрію – 1,0 Гідрокарбонат натрію – 1,0	15 хв У два прийоми по 20 хв
Промивання	Вода перша 41–42 °С – 100 друга 53–55 °С – 100	по 10–15 хв
Жирування	Вода – 100 Fosfol L-1301 – 7	20 хв
Додублювання-наповнювання	Синтан БНС – 1,2 Екстракт акації – 5,0	10 хв 60 хв
Фіксація	Алюмокалієвий галун – 5	25–30 хв
Промивання	Вода 20–25 °С – 100	5–10 хв

Вплив процесів наповнювання-жирування напівфабрикату на формування шкіряного матеріалу визначається за комплексом фізико-хімічних і технологічних характеристик зразків за методиками [20] після доведення їх вологості до 12–16 % та кондиціонування при  $20 \pm 2$  °С і відносній вологості повітря  $65 \pm 5$  %. При цьому дослідження дифузії танідів рослинних дубителів в структуру напівфабрикату хромового дублення проводиться мікроскопічним методом. Гідротермічна стійкість напівфабрикату, °С, заміряється початковим скороченням довжини зразка при нагріванні у суміші води з гліцирином 4:1 зі швидкістю 2–3 °С/хв; пористість напівфабрикату, % – за відношенням об'ємів пор зразка до його уявного об'єму; об'ємний вихід,  $\text{см}^3/100$  г білка – як об'єм напівфабрикату, що містить 100 г голинної речовини; паропроникність,  $\text{мг}/\text{см}^2 \cdot \text{год}$  – ексикаторним методом у спеціальних стаканчиках з використанням сірчаної кислоти густиною 1,84 г/мл за відношенням маси водяної пари, що проходить через одиницю площі зразка із простору з більшою пружністю пара у простір з меншою її пружністю; повітропроникність,  $\text{мл}/\text{см}^2 \cdot \text{год}$  – за об'ємом повітря, що проходить через одиницю площі напівфабрикату при різниці тисків з обох боків зразка 1 кПа. Фізико-механічні показники напівфабрикату визначаються на розривній машині марки РТ-250М (Росія) при швидкості деформування  $90 \text{ мм} \cdot \text{хв}^{-1}$ .

Результати дифузії танідів різного виду в структуру напівфабрикату хромового дублення наведені на рис. 3. З наведених даних видно, що більшу дифузійну здатність має суміш екстракту акації з синтетичним дубителем БНС, а найменшу – таніди екстракту верби. При цьому в першому випадку протягом години дифузія досягає понад 40 % товщини зразка і в подальшому швидкість дифузії сповільнюється, а через 16 год настає повне профарбування зразка танідами. У випадку танідів верби глибина дифузії за цей час досягає тільки 65 % товщини зразка і в подальшому практично не змінюється. Разом з тим таніди акації після 16 год продовжують дифундувати в напівфабрикат із незначним сповільненням швидкості, а через 25 год зріз зразка майже повністю профарбовується.



**Примітка.** Криві: 1 – акації, 2 – верби, 3 – акації : БНС = 4 : 1

**Рис. 3.** Кінетика дифузії танідів у напівфабрикат хромового дублення

Отже, синтетичний дубитель БНС суттєво прискорює процес дифузії танідів, що дає можливість скоротити тривалість процесу додублювання-наповнювання напівфабрикату хромового дублення при використанні комплексного дубителя. Це дає можливість більш ефективно наповнювати лицьовий шар напівфабрикату, підсилити його з'єднання з сітчастим шаром дерми і тим самим підвищити фізико-хімічні властивості шкіряного матеріалу.

Результати визначення комплексу фізико-механічних і технологічних властивостей шкіряного напівфабрикату хромового дублення після наповнювання й наповнювання-жирування з використанням танідів акації наведені в таблиці 3. З наведених даних видно, що після застосування танідів акації відбувається подальше формування об'єму напівфабрикату, що підтверджується суттєвим підвищенням повітропроникності зразків, їх пористості та об'ємного виходу. При цьому об'ємний вихід наповненого напівфабрикату підвищується внаслідок заповнення переважно крупних пор частинками синтетичного та рослинного дубителів гідрофільної природи. В меншій мірі це стосується відносного подовження і міцності напівфабрикату. Слід відзначити, що після жирування отриманого напівфабрикату позитивний ефект підсилюється. Однак, як і після додублювання-наповнювання напівфабрикату танідами екстракту акації, так і після його жирування спостерігається зменшення паропроникності зразків шкіряного матеріалу. Характер змін фізико-хімічних і технологічних властивостей напівфабрикату хромового дублення після його додублювання-наповнювання та жирування свідчить про взаємодію танідів акації і жирувальної емульсії з волокнистою структурою напівфабрикату. Це супроводжується зменшенням міжфібрилярної взаємодії в колагені дерми, що сприяє збільшенню об'ємного виходу отриманого напівфабрикату. При цьому відсутність кореляції зміни пористості й повітропроникності, з одного боку, і паропроникності, з іншого боку, може бути обумовлено складним механізмом процесів дифузії парів води через пористу структуру напівфабрикату. Це пов'язано з процесами адсорбції і десорбції молекул води в процесі їх дифузії, які, в значній мірі, обумовлені не тільки геометрією пористої структури напівфабрикату, але й природою поверхні його пор.

Таблиця 3

**Фізико-хімічні показники шкіряного напівфабрикату хромового дублення на різних стадіях оброблення**

Показник	Напівфабрикат		
	хромового дублення	для верху взуття	
		наповнений	наповнений-жирований
Товщина, мм	1,4	1,6	1,7
Гідротермічна стійкість, °С	103	105	105
Границя міцності при розриванні, МПа	19,0	20,5	22,7
Відносне подовження при навантаженні 9,81 МПа, %	18,0	22,0	38,0
Відносне подовження при розриванні, %	31,0	44,0	62,0
Пористість, %	47,0	53,0	57,0
Об'ємний вихід, см <sup>3</sup> /100 г білка	185,0	214,0	253,0
Паропроникність, мг/см <sup>2</sup> ·год, з боку бахтарми	13,0	11,0	8,5
– лицьового	4,0	3,0	2,1
Повітропроникність, мл/см <sup>2</sup> ·год, з боку бахтарми	370,0	560,0	690,0
– лицьового	310,0	510,0	570,0

Отже, використання танідів екстракту акації і жирувального матеріалу забезпечує формування шкіряного матеріалу з комплексом фізико-хімічних властивостей, необхідних для виготовлення еластичних шкіряних матеріалів.

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Проведено ІЧ-спектроскопічне дослідження взаємодії колагену дерми з танідами чорнодеревної акації та його використання для додублювання-наповнювання шкіряного напівфабрикату при виготовленні еластичних шкір для верху взуття. Аналіз ІЧ-спектрів продуктів взаємодії колагену дерми хромового дублення з танідами екстракту акації може свідчити про утворення міжмолекулярних йонних зв'язків і густої сітки водневих зв'язків за участю аміногруп колагену та фенольних і карбонільних груп танідів рослинного екстракту. Використання в процесах додублювання-наповнювання шкіряного напівфабрикату хромового дублення синтану БНС в комплексі із танідами екстракту акації забезпечує підвищення його дифузії в структуру та скорочення тривалості процесу. Застосування танідів екстракту акації в технології виготовлення еластичних шкір дає можливість отримувати наповнений-жирований напівфабрикат з підвищеними фізико-хімічними властивостями – пористістю, об'ємним виходом, повітропроникністю відповідно на 21, 37, 86 % порівняно з напівфабрикатом хромового дублення. Одержані результати дають підстави рекомендувати використання танідів екстракту акації в технологіях виготовлення еластичних шкір широкого асортименту.

Подальші дослідження будуть проводитись у напрямку використання танідів рослинних дубителів для виготовлення шкіряних матеріалів безхромового дублення та визначення впливу оздоблення на властивості шкіряного матеріалу.

### Література

1. Чурсин В. И. Новые материалы для додубливания и наполнения кож / В. И. Чурсин // Кож.-обув. пром. – 1998. – № 2. – С. 28–29.
2. Лебедев О. П. Вопросы использования растительных дубителей в кожевенном производстве / О. П. Лебедев // Экспресс-информация. Кожев. пром. за рубежом. – 1977. – № 20. – С. 6–7.
3. Джанпоизова В. М. Обеспечение качества и экологической безопасности изделий из натуральной кожи / В. М. Джанпоизова // Изв. вузов. Технол. текстил. промышленности. – 2013. – № 6. – С. 124–126.
4. Плаван В. П. Застосування сполук фосфонію для комбінованого дублення шкір / В. П. Плаван, О. В. Ковтуненко // Вісник КНУТД. – 2008. – № 6(44). – С.42–48.
5. Плаван В. П. Застосування танідів сумаху для поліпшення експлуатаційних властивостей шкір / В. П. Плаван // Вісник КНУТД. – 2010. – №5. – С. 79–85.
6. Вознесенский Э. Ф. Влияние плазменной модификации дубящих экстрактов и кожевенных полуфабрикатов на микроструктуру получаемых кож / Э. Ф. Вознесенский, И. Ш. Абдуллин // Вести Казн. технол. унив. – 2014. – № 17(22). – С. 97–98.
7. Вознесенский Э. Ф. Влияние плазменной модификации дубящих экстрактов и кожевенных полуфабрикатов на качество процессов выделки / Э. Ф. Вознесенский, И. Ш. Абдуллин // Вести Казн. технол. унив. – 2014. – № 17 (21). – С. 66–68.
8. D'Aquino A., Barbani N., D'Elia G. et al. Combined organic tanning based on mimosa and oxazolidine : development of a semi-industrial scale process for high-quality bovine upper leather. SLTC. 2013. № 1(1). P. 9–15.
9. Musa A. E., Madchan B., Madhalulatchan W., Sadulla S., Gasmelseed J. A. Henna extract: can it be an alternative retanning agent? JALCA. 2008. № 103(6). P. 188–193.
10. Наполнение и додубливание хромовых кож полимерами нового поколения. Сообщение 2 / В. Д. Виноцкий, О. П. Лебедев, Л. Л. Макаров-Землянский, Л. И. Гинзбург, С. В. Горбатов // Кож.-обув. пром. – 2003. – № 1. – С. 33–34.
11. Gürler Karaman D., Gülümser G. Possibilities of usage of alkali aluminosilicates as tanning material in chromium-free leather production. JTATK. 2016. № 26(1). S. 117–124.
12. Головтеева А. А. Проблема растворения и реконструкции коллагена, Сообщение 3 / А. А. Головтеева, М. С. Шестакова, Н. В. Чернов // Изв. ВУЗов. Технол. легкой пром. – 1966. – № 4. – С. 84–91.
13. Nashy E. H. A., Osman O., Mahmoud A. A., Ibrahim M. Molecular spectroscopic study for suggested mechanism of chrome tanned leather. Spectrochim. Acta. Part A. 2012. 88:171–176.
14. Hedberg Y. S., Lidén C., Wallinder I. O. Correlation between bulk- and surface chemistry of Cr-tanned leather and the release of Cr(III) and Cr(VI). Journal of Hazardous Materials. 2014. 280. P. 654–661.
15. Pantoja-Castroa M. A., González-Rodríguez H. Study by infrared spectroscopy and thermogravimetric analysis of tannins and tannic acid. Latinoam. Quím. 2011. № 39. P. 107–112.
16. Технологічна методика виробництва шкір різноманітного асортименту для верху взуття і підкладки взуття, галантерейних виробів із шкур великої рогатої худоби та кінських. – Київ : АТ Чинбар, 2003. – 64 с.
17. Данилкович А. Г. Практикум з хімії і технології шкіри та хутра / А. Г. Данилкович. – Київ : Фенікс, 2006. – 340 с.



## References

1. Chursin V. I. Novye materialy dlya dodublvaniya i napolneniya kozh / V. I. Chursin // *Kozh.-obuv. prom.* –1998. – № 2. – S. 28–29.
2. Lebedev O. P. Voprosy ispolzovaniya rastitelnyh dubitelej v kozhevnom proizvodstve / O. P. Lebedev // *Ekspress-informaciya. Kozhev. prom. za rubezhom.* – 1977. – № 20. – S. 6–7.
3. Dzhanpoizova V. M. Obespechenie kachestva i ekologicheskoy bezopasnosti izdelij iz naturalnoj kozhi / V. M. Dzhanpoizova // *Izv. vuzov. Tehnol. tekstil. promyshlennosti.* – 2013. – № 6. – S. 124–126.
4. Plavan V. P. Zastosuvannia spoluk fosfoniiu dlia kombinovanoho dublennia shkir / V. P. Plavan, O. V. Kovtunenکو // *Visnyk KNUTD.* – 2008. – № 6(44). – S.42–48.
5. Plavan V. P. Zastosuvannia tanidiv sumakhu dlia polipshennia ekspluatatsiinykh vlastyvostei shkir/ V. P. Plavan // *Visnyk KNUTD.* – 2010. – №5. – S. 79–85.
6. Voznesenskij E. F. Vliyanie plazmennoj modifikacii dubyashih ekstraktov i kozhevnykh polufabrikatov na mikrostrukturu poluchaemykh kozh / E. F. Voznesenskij, I. Sh. Abdullin // *Vesti Kazn. tehnol. univ.* – 2014. – № 17(22). – S. 97–98.
7. Voznesenskij E. F. Vliyanie plazmennoj modifikacii dubyashih ekstraktov i kozhevnykh polufabrikatov na kachestvo processov videlki / E. F. Voznesenskij, I. Sh. Abdullin // *Vesti Kazn. tehnol. univ.* – 2014. – № 17 (21). – S. 66–68.
8. D'Aquino A., Barbani N., D'Elia G. et al. Combined organic tanning based on mimosa and oxazolidine : development of a semi-industrial scale process for high-quality bovine upper leather. *SLTC.* 2013. № 1(1). P. 9–15.
9. Musa A. E., Madchan B., Madhalulatchan W., Sadulla S., Gasmelseed J. A. Henna extract: can it be an alternative retanning agen? *JALCA.* 2008. № 103(6). P. 188–193.
10. Napolnenie i dodublvanie hromovykh kozh polimerami novogo pokoleniya. *Soobshenie 2 / V. D. Vinickij, O. P. Lebedev, L. L. Makarov-Zemlyanskij, L. I. Ginzburg, S. V. Gorbatov // Kozh.-obuv. prom.* – 2003. – № 1. – S. 33–34.
11. Gürlür Karaman D., Gülümser G. Possibilities of usage of alkali aluminosilicates as tanning material in chromium-free leather produgtion. *JTATK.* 2016. № 26(1). S. 117–124.
12. Golovteeva A. A. Problema rastvorenija i rekonstrukcii kollagena, *Soobshenie 3 / A. A. Golovteeva, M. S. Shestakova, N. V. Chernov // Izv. VUZov. Tehnol. legkoj prom.* – 1966. – № 4. – S. 84–91.
13. Nashy E. H. A., Osman O., Mahmoud A. A., Ibrahim M. Molecular spectroscopic study for suggested mechanism of chrome tanned leather. *Spectrochim. Acta. Part A.* 2012. 88:171–176.
14. Hedberg Y. S., Lidén C., Wallinder I. O. Correlation between bulk- and surface chemistry of Cr-tanned leather and the release of Cr(III) and Cr(VI). *Journal of Hazardous Materials.* 2014. 280. R. 654–661.
15. Pantoja-Castroa M. A., González-Rodríguez H. Study by infrared spectroscopy and thermogravimetric analysis of tannins and tannic acid. *Latinoam. Quím.* 2011. № 39. R. 107–112.
16. *Tekhnolohichna metodyka vyrobnytstva shkir riznomanitnoho asortymentu dlia verkhu vztuttia i pidkladky vztuttia, halantereynykh vyrobiv iz shkur velykoi rohatoi khudoby ta kinskykh.* – Kyiv : AT Chynbar, 2003. – 64 s.
17. *Danylkovych A. H. Praktykum z khimii i tekhnolohii shkiry ta khutra / A. H. Danylkovych.* – Kyiv : Feniks, 2006. – 340 s.

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-82-86>

УДК 675.14 : (675.22 + 675.031.4)

ДАНИЛКОВИЧ Анатолій

Київський національний університет технологій та дизайну

<https://orcid.org/0000-0002-5707-0419>

e-mail: [ag101@ukr.net](mailto:ag101@ukr.net)

ЛІЩУК Віктор

Київський національний університет технологій та дизайну

<https://orcid.org/0000-0003-1943-8048>

e-mail: [lishukviktor@gmail.com](mailto:lishukviktor@gmail.com)

## ФОРМУВАННЯ ВЗУТТЄВОЇ ШКІРИ З СПИЛКУ ШКУР СВИНЕЙ

Розроблена технологія формування лакових шкір з високопористого напівфабрикату шкір свиней хромового дублення після його двійння та застосування ґрунтуючих композицій різного хімічного складу і поліуретанових плівкоутворювачів. Використання пігментованого водного поліуретанового латексу дозволило скоротити тривалість стадії ґрунтування і витрати ґрунтуючої композиції порівняно з попереднім акриловим вирівнювальним і пігментованим ґрунтуванням у два рази та підвищити адгезію покриття до напівфабрикату на 18–21 %. Встановлено, що застосування поліуретанового латексу і реакційноздатної поліуретанової композиції сприяє формуванню лакових шкір з підвищеним опором до мокрої тертя на 27 % та децю вищими гігієнічними властивостями. За комплексом фізико-хімічних властивостей досліджені лакові шкіри відповідають вимогам ДСТУ 2726-94 «Шкіри для верху взуття. Технічні вимоги» і переважають промислові зразки та можуть бути використані для виготовлення модельного взуття.

**Ключові слова:** напівфабрикат хромового дублення, свинячий спилок, ґрунтування, поліуретанове покриття, адгезія, лакова шкіра, фізико-механічні властивості.

DANYLKOVIYCH Anatolii, LISHCHUK Viktor

Kyiv National University of Technologies and Design

## FORMATION OF SHOE LEATHER FROM SPLIT PIG HIDES

The technology of forming patent leather has been developed from highly porous semi-finished chrome-tanned pig hides, obtained after their doubling according to the method of public JSC "Chynbar" Ukraine, Kyiv. Finishing of the tanned semi-finished product TU-U 00302391-03-98 is performed using acrylic priming compositions and polyurethanes (PU) of different chemical composition. Acrylic pigmented primer is applied to the surface of the semi-finished product after its absorption properties are equalized by double application of acrylic non-pigmented primer. The priming PU composition has a chemical composition, % – wt.: pigment concentrate, 40% – 20.0; PU latex, 20% – 80.0; water – up to a density of 1.07. PU solutions of different chemical composition are used for both options for forming the coating on a leather semi-finished product. In particular, PU linear structure PPE-201 based on ether and PU reactive composition (RZK). The investigated film-forming reagents form highly elastic films of high strength.

The use of pigmented aqueous polyurethane latex made it possible to reduce the duration of the priming stage and the consumption of the priming composition compared to the previous acrylic leveling and pigmented priming by two times, and to increase the adhesion of the coating to the semi-finished product by 18–21%. It was established that the use of polyurethane latex and the reactive polyurethane composition contributes to the formation of lacquer leather with increased resistance to wet friction by 27% and somewhat higher hygienic properties. According to the complex of physical and chemical properties, the investigated patent leathers meet the requirements of DSTU 2726-94 "Leathers for shoe uppers. Technical requirements" and industrial samples prevail and can be used for the production of model shoes.

**Key words:** chrome tanning semi-finished product, split pig hide, priming, polyurethane coating, adhesion, patent leather, physical and mechanical properties.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сучасний розвиток технологій виробництва шкіряних матеріалів спрямований на розширення асортименту виробів з них в результаті зниження їх собівартості при використанні малоцінної сировини. В першу чергу це стосується пористої сировини шкір свиней після видалення волосяного покриву.

Вимоги до експлуатації шкіряних матеріалів суттєво відрізняються від їх цільового використання. Технології виготовлення і умови експлуатації взуттєвих виробів відрізняються підвищеними вимогами до них порівняно зі шкірами для одягу. З цією метою при використанні дефектно-пористої шкіряної сировини для верху взуття особливе значення має розроблення. Науково-обґрунтованих технологій з використанням композицій реакційно-здатних полімерів з високими фізико-хімічними властивостями. Особливо це стосується поліуретанових матеріалів. При цьому необхідно враховувати їх комплекс фізико-механічних показників, гідрофільність, морозостійкість та інших властивостей, які можуть забезпечити якісні характеристики пористих шкіряних матеріалів при застосуванні їх в технологіях виробництва.

### Аналіз попередніх досліджень і публікацій

При виготовленні натуральних матеріалів на завершальній стадії, особливо з пористої шкіряної сировини, для формування кінцевих властивостей матеріалу вирішальне значення має оздоблення, що включає ґрунтування і нанесення покривної плівки. З цією метою використовують широкий асортимент полімерних матеріалів різного хімічного складу. Так, у роботі [1] для модифікації поверхні шкіри автори розглядають можливість застосування для захисних покриттів композицій, що включають акрилати,

поліуретани (ПУ), казеїн та інші інгредієнти. Розглянутий широкий комплекс фізико-хімічних властивостей цих матеріалів та їх переваги перед іншими реагентами. Для формування лакового покриття на шкірі автором використано 20 % розчину лакової композиції структурно забарвлених ПУ в бутилацетаті [2] з додаванням 30-відсоткової нітроцелюлози в кількості 10 % маси полімеру. Отримані за розробленою технологією шкіри за фізико-механічними, експлуатаційними і гігієнічними показниками не поступаються покриттям, сформованим за діючою технологією. Автором роботи [3] розроблені водні композиції ПУ дисперсій з розмірами частинок 20–50 нм. Їх застосування у покривному фарбуванні дозволило отримати високоякісні глянцеві покриття. У огляді [4] розглянуто синтез органічно-неорганічних нанокомпозитів на основі полімерів та їх застосування для оздоблювання шкір, які підвищують естетичні показники матеріалу і забезпечують високі механічні властивості. Розроблено оздоблювальну композицію на основі ПУ з дисульфідними зв'язками у головному ланцюгу [5], що дає можливість самовідновлюватись покриттю за температури 60 °С протягом 12 год після утворення експлуатаційних дефектів. Аліфатичні й ароматичні водні дисперсії катіонних і аніонних композитних ПУ [6] використані для фінішного оздоблення одягового напівфабрикату з сировини шкур свиней. Встановлено, що аніонні емульсії ПУ і ПУ-поліакрилату характеризуються високою покривною здатністю і адгезією до шкіри [7]. При цьому ПУ-поліакрилатні емульсії забезпечують вищу адгезію покриття та стійкість до дії розчинників. Для фінішного формування лакових шкір авторами роботи [8] використані водні ПУ композиції і в органічних розчинниках – етил-, бутилацетаті. При цьому отримані лакові шкіри, оздоблені водними ПУ композиціями характеризуються високими фізико-хімічними властивостями.

Аналіз науково-технічної літератури з оздоблення шкіряного напівфабрикату свідчить про використання поліуретанів різного хімічного складу і реакційної здатності. При цьому процес оздоблення супроводжується підвищенням комплексу фізико-механічних і естетичних властивостей матеріалу. Разом з тим, слід відзначити практичну відсутність досліджень з формування лакового покриття на шкірах отриманих з високопористої сировини.

#### Формулювання цілей статті

Метою роботи є розроблення технології формування лакового покриття на високопористому напівфабрикаті хромового дублення з сировини шкур свиней при використанні поліуретанових композицій для виготовлення шкіряних взуттєвих матеріалів.

#### Виклад основного матеріалу

При дослідженні процесу формування лакового покриття на шкіряному напівфабрикаті, що включає ґрунтування і нанесення покривної композиції на шкіри, мають вирішальне значення в технології виготовлення якісних шкіряних матеріалів. В роботі використовується дублений напівфабрикат шкур свиней ТУ-У 00302391-03-98 площею 70–80 дм<sup>2</sup>, отриманий за методикою публічного АТ «Чинбар» Україна, м. Київ [8], що відзначається наявністю наскрізних отворів від видалення щетини. За результатами технічного аналізу напівфабрикат має товщину 1,1–1,3 мм і містить 3,8 мас. % оксиду хрому III та 7,9 мас. % речовин екстрагованих органічними розчинниками. Оздоблювання напівфабрикату виконується з використанням акрилових ґрунтуючих композицій і поліуретанів різного хімічного складу, що наносяться шляхом їх розпилювання в агрегаті моделі Rotana фірми Svit Чехія при швидкості транспортеру 0.2 м/с. При акриловому ґрунтуванні напівфабрикату спочатку вирівнюються його всмоктувальні властивості подвійним нанесенням акрилового непігментованого (АН) ґрунту, що містить, мас. % [9]: акрилову емульсію МБМ-3, 20 % – 58,8; дисперсію МХ-30, 20 % – 29,4 і пенетратор – 11,8 при витраті 65±5 г/м<sup>2</sup> за одне нанесення. Після 8–10 год витримування напівфабрикату в штабелі, підсушування у конвективній сушарці до вологовмісту 14–16 % і обробляється на гідропресі. Далі на нього наноситься акриловий пігментований (АП) ґрунт, мас. %: пігментний концентрат, 40 % – 18,1; розчин казеїну, 10 % – 5,4; воскову емульсію, 20 % – 2,7; алізаринове масло – 1,8; латекс ДММА-65ГП, 20 % – 36,0; дисперсія МХ-30, 20 % – 27,0; емульсія акрилова МБМ-3, 20 % – 9,0 з густиною 1,07 г/см<sup>3</sup>. Для нанесення АП ґрунту з витратою 70±5 г/м<sup>2</sup> за один раз. Завершується ґрунтування напівфабрикату пресуванням.

При ґрунтуванні композицією поліуретанового латексу (ПУЛ) на відміну від акрилового ґрунтування не використовується непігментований ґрунт. При цьому ґрунтуюча композиція має хімічний склад, мас. %: пігментний концентрат, 40 % – 20,0; поліуретановий латекс, 20 % – 80,0; вода – до густини 1,07. Композиція ПУЛ характеризується наступними фізико-хімічними властивостями: вміст поліуретану 39 %, в'язкість 0,022–0,03 Па·с, поверхневий натяг 340–370 Н/м, розмір частинок 10 мкм, рН 3,0–3,5. Всі інші технологічні операції є аналогічними.

На стадії фінішного формування покриття на шкіряному напівфабрикаті для обох варіантів оздоблення напівфабрикату використовуються розчини ПУ різного хімічного складу. Зокрема, 25 % розчин в диметілформаміді високомолекулярного ПУ ППЕ-201 лінійної будови на основі етеру і 30 % етилацетатного розчину діетиленгліколя, адипінової кислоти і поліізоціанату ТТ-75 – поліуретанова реакційно-здатна композиція (ПУ РЗК). Досліджені плівкоформуючі реагенти утворюють високоеластичні плівки високої міцності (таблиця 1). Причому, за міцністю ПУ ППЕ-201 переважає ПУ РЗК у 2,3 рази, а за модулем еластичності навпаки – у 2,8 рази. Враховуючи різний хімічний склад і реакційну здатність досліджені ПУ використані для формування лакових покриттів на шкіряному напівфабрикаті.

Процес лакування ґрунтованого напівфабрикату виконується на поливальної машині у 1–3 стадії з витратою ПУ розчину на кожній стадії  $45 \pm 5$  г/м<sup>2</sup> і подальшим підсушуванням нанесених шарів поліуретанових розчинів після кожної стадії. Завершується процес формування покривної плівки нітроцелюлозним закріпленням.

Таблиця 1

**Фізико-механічні властивості поліуретанових плівок**

Показник	ПУ ППЕ-201	ПУ РЗК
Границя міцності при розтягуванні, МПа	68,0	29,0
Модуль еластичності при 100 % подовженні, МПа	6,5	18,0
Подовження при розриванні, %	530,0	165,0

Для встановлення оптимальних умов формування покриттів на шкіряному напівфабрикаті визначається вплив хімічного складу і кількості нанесеної ґрунтуючої композиції та розчину ПУ на адгезію до поверхні ґрунтованого напівфабрикату (таблиця 2). Фізико-хімічні випробування шкір з поліуретановим покриттям виконуються за методикою [10], тільки для визначення адгезії замість міткалю використовується спилкок напівфабрикату свиней та відповідний покриттю плівкоутворювач. Зразки пресуються під тиском 0,5 МПа протягом 20 хв та підсушуються за температури 60 °С протягом 0,25 і 1 год відповідно для ПУ ППЕ-201 і ПУ РЗК. Фізико-механічні випробування підготовлених зразків визначаються на розривній машині РТ-250М при швидкості деформування 80 мм · хв<sup>-1</sup>.

Таблиця 2

**Адгезія лакового покриття до ґрунтованого напівфабрикату**

Ґрунт	Кількість нанесень ґранту і його витрати, г/м <sup>2</sup>	Адгезія, Н/м, при витратах, г/м <sup>2</sup>					
		ПУ ППЕ-201			ПУ РЗК		
		45±5	2(45±5)	3(45±5)	45±5	2(45±5)	3(45±5)
АП	2(70±5)	1150	1100	750	880	810	720
ПУЛ		1100	1060	1000	970	930	800
АП	3(70±5)	1100	1000	700	920	840	630
ПУЛ		1190	1480	1000	1200	1400	980
АП	4(70±5)	1200	1250	1100	980	1200	700
ПУЛ		1200	1040	970	950	890	870

У всіх досліджених варіантах лакових шкір руйнування адгезійних зв'язків має в основному когезійний характер по шкіряному напівфабрикату. Це зумовлено ефективним суміщенням ПУ розчинів плівкоутворювачів з ґрунтуючою композицією та наступною взаємодією з функціональними групами ґрунту і білка. Максимальне значення адгезії досягається при ґрунтуванні ПУЛ і двошаровому нанесенні ПУ покриття. Зменшення адгезії на 17–18 % спостерігається при чотирьохкратному акриловому ґрунтуванні шкіряного напівфабрикату і тій же витраті ПУ плівкоутворювача. При збільшенні витрат ПУ ґрунту відбувається зниження адгезії, що може бути обумовлено зменшенням концентрації функціональних груп колагену в результаті надлишку АП ґрунту в структурі шкіряного напівфабрикату. Аналогічний ефект спостерігається при збільшенні витрат поліуретанового плівкоутворювача внаслідок можливого збільшення його дефектності та внутрішніх напружень покриття. Отримані результати свідчать, що оптимальне значення поліуретанового покриття до ґрунтованого шкіряного напівфабрикату досягається відповідно при трикратному і чотирикратному нанесенні пігментованого поліуретанового латексу і акрилового пігментованого ґрунту та двократній витраті плівкоутворювача.

Результати дослідження фізико-механічних і гігієнічних властивостей отриманих лакових шкір наведено в таблиці 3. Після формування покриттів на ґрунтованому акриловою дисперсією напівфабрикаті спостерігається підвищення міцності лакової шкіри, причому в більшій мірі при використанні плівкоутворюючого розчину ПУ РЗК. У випадку ґрунтування напівфабрикату ПУ латексом цей показник збільшується на 6,5–14,0 % порівняно з акриловим ґрунтуванням. При цьому максимальне значення міцності лакової шкіри досягається при використанні плівкоутворювача ПУ РЗК. Розривне подовження залежно від умов ґрунтування та складу покриття змінюється мало і практично не відрізняється від промислових зразків.

Адгезія ПУ покриття до ґрунтованого напівфабрикату ПУ латексом порівняно зі зразками ґрунтованими акриловою дисперсією підвищується до 20 %. Причому порівняно з промисловим зразком адгезія покриття до напівфабрикату є більшою на 64 % і знижується в меншій мірі до шкіряного напівфабрикату в мокрому стані. При багаторазовому згинанні найбільш стійкими до знакоперемінних деформацій виявляють шкіри ґрунтовані ПУ латексом з ПУ ППЕ-201 покриттям. Це може бути обумовлено високоеластичними властивостями ПУ плівки. Зниження цього показника при використанні ПУ РЗК може бути обумовлено формуванням покриття жорсткішої структури внаслідок утворення міжмолекулярних хімічних зв'язків. Це проявляється більшим опором поверхні лакової шкіри з ПУ РЗК покриттям до мокрої шкіри.

Високі сорбційні властивості лакових шкір зберігається у більшій мірі у випадку ґрунтування ПУЛ порівняно з акриловим ґрунтуванням, що можна пояснити вищим ступенем дифузії непігментованого вирівнюючого ґрунту в пористу структуру напівфабрикату хромового дублення при акриловому ґрунтуванні. При цьому гігроскопічність і сорбційна ємність у випадку латексного ПУ ґрунту і ПУ покриття дещо перевищують їх значення порівняно з лаковими шкірами отриманими зо промисловою технологією.

Таблиця 3

**Фізико-хімічні властивості лакових шкір**

Показник	Тип ґрунту і покриття					
	немає	АП+ ПУ ППЕ-201	ПУЛ+ПУ ППЕ-201	АП + ПУ РЗК	ПУЛ+ПУ РЗК	проми- слові
Границя міцності при розтягуванні, МПа	14,0	16,4	18,7	18,3	19,5	18,0
Подовження при розриванні, %	54,0	59,0	57,0	56,0	54,0	57,0
Адгезія покриття до напівфабрикату, Н/м						
сухого	–	950	1150	930	1100	670
мокрого	–	320	360	300	420	270
Стійкість покриття до:						
багаторазового згинання, тис. циклів	–	78	100	46	67	58
мокрого тертя, оберти	–	220	220	270	280	210
Гігроскопічність, %	9,1	6,1	6,6	6,3	6,8	6,5
Сорбційна ємність, мг/г	10,3	8,3	8,7	8,5	8,9	8,2

Отже, за комплексом фізико-механічних і гігієнічних властивостей отримані шкіри з поліуретановими лаковими покриттями перевищують зразки промислової технології. Особливо це стосується адгезії покриттів до шкір у сухому і мокрому стані та опору їх поверхні до мокрому тертя.

**Висновки з даного дослідження** Розроблена технологія формування лакових шкір з високопористого напівфабрикату шкір свиней хромового дублення після його двоїння та застосування ґрунтуючих композицій різного хімічного складу і поліуретанових плівкоутворювачів. Використання пігментованого водного 39 % поліуретанового латексу дозволило скоротити тривалість стадії ґрунтування і витрати ґрунтуючої композиції порівняно з попереднім акриловим вирівнювальним і пігментованим ґрунтуванням у два рази та підвищити адгезію покриття до напівфабрикату на 18–21 %. Встановлено, що застосування поліуретанового латексу і реакційно-здатної поліуретанової композиції сприяє формуванню лакових шкір з підвищеним опором до мокрому тертя на 27 % та дещо вищими гігієнічними властивостями. За комплексом фізико-хімічних властивостей досліджені лакові шкіри переважають промислові й можуть бути використані для виготовлення модельного взуття.

Отримані лакові шкіри за фізико-механічними властивостями відповідають вимогам ДСТУ 2726-94 «Шкіри для верху взуття. Технічні вимоги». Розроблена технологія виготовлення лакових шкір з напівфабрикату хромового дублення шкір свиней може бути використана для виготовлення лакових шкір з низькоміцного напівфабрикату іншої сировини, зокрема шкір овець.

**Перспективи подальших досліджень**

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на встановлення закономірностей впливу особливостей пористої структури на фізико-хімічні властивості високопористих шкіряних матеріалів.

**Література**

1. Winter C., Schultz M. E. R., Gutterres M. Evaluation of polymer resins and films formed by leather finishing. Latin American Applied Research. 2015. 45. P. 213–217.
2. Касьян Е. С. Лакування шкір забарвленими поліуретанами. Вісник Хмельницького національного університету. Техн. науки. 2007. № 2(1). С. 98–104.
3. Потапочкина И. И. Водные полиуретановые дисперсии для отделки натуральной кожи. Кож.-обув, пром-сть. 2009. № 1. С. 35.
4. Qianqian Fan, Jianzhong Ma, Qunna Xu Insights into functional polymer-based organic-inorganic nanocomposites as leather finishes. Journal of Leather Science and Engineering. 2019. 3. <https://link.springer.com/article/10.1186/s42825-019-0005-9>
5. Feifei Liang, Tianyou Wang, Haojun Fan, Haojun Fan, Jun Xiang & Yi Chen A leather coating with self-healing characteristics. JLSE 2020. 5. <https://link.springer.com/article/10.1186/s42825-020-0018-4>
6. Chai S., Zhang Z. Comparison of finishing application for aliphatic polyurethane dispersions and polyurethane/ polyacrylate composite emulsions. J. Amer. Leather Chem. Assoc. 2010. 105(2). P. 41–50.
7. Bacardit A., Olle L., Moreraalt J. M. el. Study of aqueous patent leather finish with a pull-up effect. J. Amer. Leather Chem. Assoc. 2009. 3(104). P. 103–112.
8. Технологічна методика виробництва шкір різноманітного асортименту для верху взуття і підкладки взуття, галантерейних виробів із шкір великої рогатої худоби та кіньських. Київ : АТ Чинбар,

2003. 64 с.

9. Данилкович А. Г., Мокроусова О. Р., Охмат О. А. Технологія і матеріали виробництва шкіри. Київ : Фенікс, 2009. 580 с.

10. Данилкович А. Г. Практикум з хімії і технології шкіри та хутра. Київ : Фенікс, 2006. 340 с.

#### References

1. Winter C., Schultz M. E. R., Gutterres M. Evaluation of polymer resins and films formed by leather finishing. *Latin American Applied Research*. 2015. 45. P. 213–217.
2. Kasian E. Ye. Lakuvannia shkir zabarvlenymy poliuretanamy. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhn. nauky*. 2007. № 2(1). S. 98–104.
3. Potapochkina I. I. Vodnye poliuretanovye dispersii dlja otdelki natural'noj kozhi. *Kozh.-obuv, prom-st'*. 2009. № 1. S. 35.
4. Qianqian Fan, Jianzhong Ma, Qunna Xu Insights into functional polymer-based organic-inorganic nanocomposites as leather finishes. *Journal of Leather Science and Engineering*. 2019. 3. <https://link.springer.com/article/10.1186/s42825-019-0005-9>
5. Feifei Liang, Tianyou Wang, Haojun Fan, Haojun Fan, Jun Xiang & Yi Chen A leather coating with self-healing characteristics. *JLSE* 2020. 5. <https://link.springer.com/article/10.1186/s42825-020-0018-4>
6. Chai S., Zhang Z. Comparison of finishing application for aliphatic polyurethane dispersions and polyurethane/ polyacrylate composite emulsions. *J. Amer. Leather Chem. Assoc.* 2010. 105(2). R. 41–50.
7. Bacardit A., Olle L., Moreraalt J. M. et. Study of aqueous patent leather finish with a pull-up effect. *J. Amer. Leather Chem. Assoc.* 2009. 3(104). P. 103–112.
8. *Tekhnolohichna metodyka vyrobnytstva shkir riznomanitnoho asortymentu dlia verkhu vztuttia i pidkladky vztuttia, halantereinykh vyrobiv iz shkur velykoi rohatoi khudoby ta kinskykh*. Kyiv : AT Chynbar, 2003. 64 s.
9. Danylkovych A. H., Mokrousova O. R., Okhmat O. A. *Tekhnolohiia i materialy vyrobnytstva shkiry*. Kyiv : Feniks, 2009. 580 s.
10. Danylkovych A. H. *Praktykum z khimii i tekhnolohii shkiry ta khutra*. Kyiv : Feniks, 2006. 340 s.

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-87-93>

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](mailto:markzalubovskiy@gmail.com)

**ПАНАСЮК Ігор**

Київський національний університет технологій та дизайну  
<https://orcid.org/0000-0001-6671-4266>  
e-mail: [panasyuk1961@gmail.com](mailto:panasyuk1961@gmail.com)

**ЛИЧОВ Дмитро**

Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»  
<https://orcid.org/0000-0002-3231-5985>  
e-mail: [dimalychov@gmail.com](mailto:dimalychov@gmail.com)

**КОШЕЛЬ Ганна**

Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»  
<https://orcid.org/0000-0003-1862-1553>  
e-mail: [a\\_koshel@ukr.net](mailto:a_koshel@ukr.net)

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ РЕЖИМІВ РУХУ РОБОЧОГО МАСИВУ В ГАЛТУВАЛЬНІЙ МАШИНІ З ДОДАТКОВОЮ РУХОМОЮ ЛАНКОЮ ПОВЗУНОМ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ЗМІНИ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ

За допомогою системи автоматизованого проектування SolidWorks виконані аналітичні дослідження галтувальної машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості типу «Turbula», яка містить у своєму кінематичному ланцюзі додаткову рухому ланку повзун. На основі проведених аналітичних досліджень визначено взаємозв'язок між зміною режимів руху робочого масиву в середині ємкості, значенням кутової швидкості ведучого валу, масштабним типорозміром та відношенням міжосьової відстані ємкості до міжосьової відстані вилочного валу, представлено класифікація режимів руху робочого масиву, зокрема, до яких слід віднести каскадний, змішаний та водоспадний режими руху. Кожен режим руху відповідає реалізації відповідних типів галтувальних технологічних операцій або змішування сипких дрібнодисперсних речовин. Встановлений вплив зміни довжини робочої ємкості, яка характеризується відношенням міжосьової відстані робочої ємкості до міжосьової відстані ведучої чи веденої вилочної машини, на зміну режимів руху робочого масиву. Отримано математичні залежності для визначення граничної кутової швидкості ведучого валу галтувальної машини типу «Turbula» з додатковою рухомою ланкою повзунком, яка буде відповідати утворенню необхідного режиму руху робочого масиву. 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: додаткова рухома ланка, повзун, робочий масив, галтування.

**ZALYUBOVSKYI Mark**

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

**PANASYUK Igor**

Kyiv National University of Technology and Design

**LYCHOV Dmitro**

Open International University of Human Development "Ukraine"

**KOSHEL Ganna**

Open International University of Human Development "Ukraine"

### RESEARCH OF THE CHANGE OF THE MOTION MODES OF THE WORKING ARRAY IN A TURNING MACHINE WITH AN ADDITIONAL MOVEABLE SLIDING LINK DEPENDING ON THE CHANGE OF DESIGN FEATURES

With the help of the SolidWorks automated design system, analytical studies of the rolling machine with complex spatial movement of the working capacity of the "Turbula" type, which contains an additional moving link of the slider in its kinematic chain, were performed. On the basis of the analytical studies, the relationship between the change in the modes of movement of the working array in the middle of the container, the value of the angular velocity of the drive shaft, the scale standard size and the ratio of the interaxial distance of the container to the interaxial distance of the forks was determined. The classification of the movement modes of the working mass is presented, in particular, which should include cascade, mixed and waterfall movement modes. Each movement mode corresponds to the implementation of the corresponding types of felting technological operations or mixing of loose fine-dispersed substances. The effect of changing the length of the working capacity, which is characterized by the ratio of the interaxial distance of the working capacity to the interaxial distance of the leading or driven forks of the machine, on the change in the modes of movement of the working array has been established. Mathematical dependencies have been obtained for determining the maximum angular velocity of the drive shaft of the "Turbula" type rolling machine with an additional movable slider link, which will correspond to the formation of the necessary mode of movement of the working array. 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:** additional moving link, slider, working array, felting.

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

При роботі будь-якої галтувальної машини у середині її рухомої ємкості можна реалізувати різний характер та різну інтенсивність переміщення сипкого робочого масиву, які залежать від кутової швидкості ведучого валу машини, а також, які класифікуються, як каскадний, водоспадний та змішаний режими руху [1].

Оскільки для виконання тої чи іншої галтувальної технологічної операції [2] необхідне забезпечення визначеного режиму руху робочого масиву, то важливою задачею є встановлення математичних закономірностей між зміною конструктивних особливостей машини, значенням кутової швидкості ведучого валу та реалізації самого режиму руху.

### Аналіз досліджень та публікацій

У роботі [1] наведені детальні характеристики усіх режимів руху робочого масиву у галтувальних обертальних барабанах. У [3] представлено характеристики відтворення тих само режимів руху робочого масиву, однак, у ємкостях, які виконують складне просторове переміщення, наведено особливості переміщення масиву в середині ємкостей.

У матеріалах статті [4] представлено дослідження «базової» конструкції галтувальної машини типу «Turbula», встановлений взаємозв'язок між кутовою швидкістю ведучого валу, габаритами ємкості та зміною режимів руху. У роботі [5] аналогічні дослідження виконані для галтувальної конструкції машини зі складним рухом робочої ємкості, в просторовому механізмі якої використовується додаткова рухома ланка коромисло з вертикальною віссю обертання, а у [6] – для галтувальної конструкції машини зі складним рухом робочої ємкості, у якій ведучий вал обертається згідно отриманого закону зміни кутової швидкості [7], який забезпечує переміщення робочого масиву між протилежними торцями ємкості у зустрічних напрямках з однаковою інтенсивністю.

### Виділення невирішених частин

Базуючись на дослідженнях, які проведені раніше, можна стверджувати, що для кожної розробленої конструкції галтувальної машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості, що має індивідуальні конструктивні особливості, характерні власні окремі математичні залежності, які не раціонально застосовувати для розрахунку режимів руху у інших конструкціях галтувальних машин зі складним просторовим рухом робочих ємкостей. Відомий ряд розроблених галтувальних конструкцій машин з індивідуальними конструктивними особливостями для яких раніше не проводилися дослідження зміни режимів руху робочого масиву. Окрім того, у роботі [3] встановлено закономірність між зміною режимів руху робочого масиву, значенням кутової швидкості ведучого валу та типорозміром робочої ємкості, але лише для одного сталого співвідношення міжосьової відстані робочої ємкості до міжосьової відстані вилок машини. Залишається недослідженим питання встановлення цих закономірностей, що будуть характерними для інших співвідношень міжосьової відстані робочої ємкості до міжосьової відстані вилок галтувальної машини з додатковою рухомою ланкою повзуном.

### Формулювання цілей статті

Мета даної роботи полягає у аналітичному визначенні залежності між реалізацією режимів руху робочого масиву в середині ємкості та зміною відповідних конструктивних особливостей галтувальної машини типу «Turbula» з додатковою рухомою ланкою повзуном.

### Виклад основного матеріалу

У роботі [8] представлено один із можливих варіантів звільнення від пасивного зв'язку просторового кінематичного ланцюгу галтувальної машини типу «Turbula», яка оснащена додатковою рухомою ланкою повзуном, який кінематично з'єднаний з веденим валом. Модель машини з додатковою рухомою ланкою повзуном представлена на рис. 1. а, кінематична схема – на рис. 1. б.

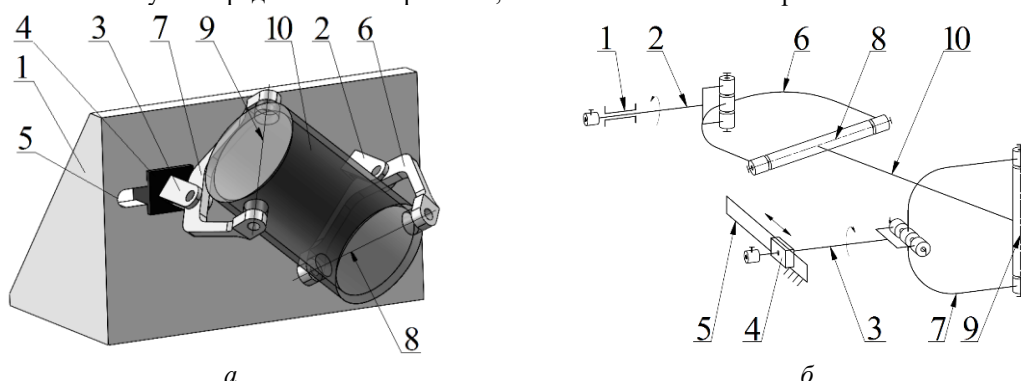


Рис. 1. Конструкція машини з додатковою рухомою ланкою повзуном: а – модель машини, б – кінематична схема



Просторовий механізм машини містить станину 1, ведучий 2 та ведений 3 вали, при чому, ведучий вал 2 встановлений в підшипниковій опорі, а ведений вал 3 кінематично з'єднаний з повзуном, який рухомо, з можливістю зворотно-поступального переміщення, встановлений у горизонтальній напрямній 5. Ведучий 2 та ведений 3 вали шарнірно з'єднані другими кінцями з ведучою 6 та веденою 7 вилками відповідно, діаметрально взаємно перпендикулярні вісі яких 8 та 9 є всіяма кріплення робочої ємкості 10.

На основі проведених раніше досліджень, які висвітлені у роботі [6] були сформульовані базові положення утворення відповідного режиму руху робочого масиву в середині ємкостей, які виконують складний просторовий рух. У роботі [9] зазначається, що на характер руху частинок робочого масиву в середині ємкості впливають максимальні значення повних прискорень  $a_{maxA}$  та  $a_{maxB}$  точок  $A$  та  $B$ , що розташовані у центрі основ ємкості відповідного масштабного типорозміру  $n$ , а також кутова швидкість ведучого валу машини  $\omega_{ведуч}$ . У [10] зазначається, що перехід до вільного польоту частинок робочого масиву буде розпочинатися у той момент, коли максимальне прискорення відповідного торця ємкості  $a_{maxA}$  ( $a_{maxB}$ ), де сконцентрований робочий масив, стане перевищувати прискорення вільного падіння  $g$ .

Слід зазначити, що максимальні прискорення торців ємкості  $a_{maxA}$  та  $a_{maxB}$  також будуть залежати від значення коефіцієнту  $\lambda$ , який характеризує відношення міжосьової довжини робочої ємкості  $l_{PC}$  до міжосьової довжини ведучої чи веденої вилок  $l_B$ :

$$\lambda = l_{PC} / l_B. \tag{1}$$

Аналітичні дослідження галтувальної конструкції машини з додатковою рухомою ланкою повзуном виконували з комплексним урахуванням трьох параметрів, а саме: кутової швидкості ведучого валу машини  $\omega_{ведуч}$ , масштабного типорозміру конструкції  $n$ , коефіцієнту  $\lambda$ . Із застосуванням САПР SolidWorks виконували кінематичне дослідження п'яти масштабних типорозмірів ( $n=1; 1,5; 2; 3,5; 4$ ) машини, враховуючи зміну коефіцієнту  $\lambda$  ( $\lambda=1,4; 1,6; 1,8; 2,0$ ). За «базовий типорозмір» ( $n=1, \lambda=1,0$ ) було прийнято машину з такими геометричними параметрами:  $l_{PC} = l_B = 0,077$  м, діаметр ємкості  $d_{PC} = 0,095$  м.

У таблицях 1 – 4 наведені максимальні значення повних прискорень  $a_{maxA}$  та  $a_{maxB}$  для 5-ти типорозмірів галтувальної машини при різних значеннях кутових швидкостей ведучого валу з урахуванням зміни коефіцієнту  $\lambda$ . Отримані максимальні значення повних прискорень торців ємкості було апроксимовано у вигляді графічних залежностей квадратичної функції. На рис. 2 – рис. 5 представлено відповідні графічні залежності.

Таблиця 1

$\omega_{ведуч}$ , град/с	Масштабний коефіцієнт $n$ , при $\lambda=1,4$									
	$n=1$		$n=1,5$		$n=2$		$n=3,5$		$n=4$	
	$a_{maxA(1)}$	$a_{maxB(1)}$	$a_{maxA(1,5)}$	$a_{maxB(1,5)}$	$a_{maxA(2)}$	$a_{maxB(2)}$	$a_{maxA(3,5)}$	$a_{maxB(3,5)}$	$a_{maxA(4)}$	$a_{maxB(4)}$
	Максимальні значення прискорень [м/с <sup>2</sup> ]									
1,1	0,27	0,38	0,4	0,6	0,6	0,8	1	1,3	1,1	1,5
2,1	1,1	1,5	1,7	2,2	2,3	3	4	5,3	4,6	6
3,2	2,6	3,4	3,9	5,1	5,1	6,8	9,1	11,9	10,3	13,5
4,2	4,6	6	6,9	9	9,1	12	16,1	21,2	18,3	24
5,3	7,2	9,4	10,7	14,1	14,3	18,8	25,2	33,2	28,7	37,6
6,3	9,8	13,5	15,4	20,3	20,6	27	36,3	47,8	41,4	54,1
7,4	14	18,9	21	27,7	28	36,9	49,4	65	56	73,8

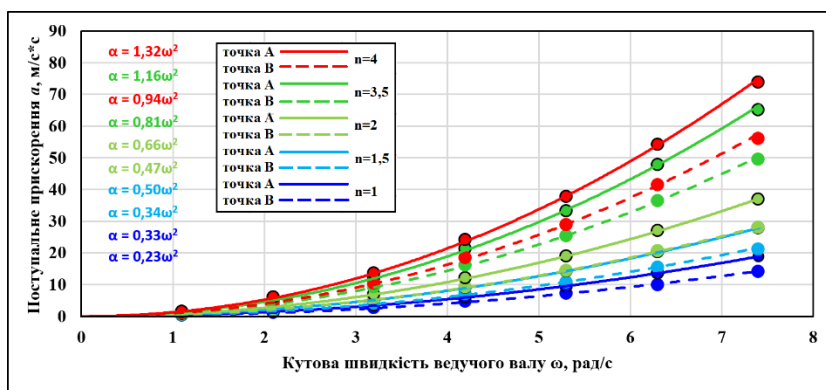


Рис. 2. Графік залежності максимальних значень прискорень  $a_{maxA}$  та  $a_{maxB}$  від кутової швидкості  $\omega_{ведуч}$  ведучого валу машини при коефіцієнті  $\lambda=1,4$

Таблиця 2

$\omega_{ведуч}$ , град/с	Масштабний коефіцієнт $n$ , при $\lambda=1,6$									
	$n=1$		$n=1,5$		$n=2$		$n=3,5$		$n=4$	
	$a_{maxA(1)}$	$a_{maxB(1)}$	$a_{maxA(1,5)}$	$a_{maxB(1,5)}$	$a_{maxA(2)}$	$a_{maxB(2)}$	$a_{maxA(3,5)}$	$a_{maxB(3,5)}$	$a_{maxA(4)}$	$a_{maxB(4)}$
	Максимальні значення прискорень [м/с <sup>2</sup> ]									
1,1	0,3	0,5	0,5	0,7	0,7	1	1,2	1,7	1,4	2

2,1	1,3	1,9	2,1	2,9	2,8	3,9	4,7	6,7	5,6	7,9
3,2	3	4,3	4,7	6,7	6,2	8,9	10,7	15,1	12,6	17,7
4,2	5,4	7,6	8,4	11,8	11,1	15,8	19	26,8	22,4	31,5
5,3	8,4	11,9	13,1	18,5	17,5	24,7	29,6	41,9	35,1	49,4
6,3	12,1	17,1	18,8	26,7	25,2	35,5	42,7	60,4	50,2	71,1
7,4	16,5	23,3	25,7	36,4	34,2	48,5	58,1	82,1	68,4	97

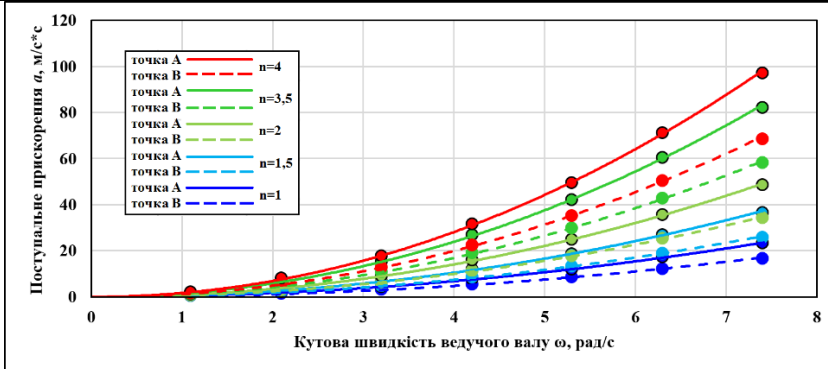


Рис. 3. Графік залежності максимальних значень прискорень  $a_{maxA}$  та  $a_{maxB}$  від кутової швидкості  $\omega_{ведуч}$  ведучого валу машини при коефіцієнті  $\lambda=1,6$

Таблиця 3

$\omega_{ведуч}$ [рад/с]	Масштабний коефіцієнт $n$ , при $\lambda=1,8$									
	$n=1$		$n=1,5$		$n=2$		$n=3,5$		$n=4$	
	$a_{maxA(1)}$	$a_{maxB(1)}$	$a_{maxA(1,5)}$	$a_{maxB(1,5)}$	$a_{maxA(2)}$	$a_{maxB(2)}$	$a_{maxA(3,5)}$	$a_{maxB(3,5)}$	$a_{maxA(4)}$	$a_{maxB(4)}$
	Максимальні значення прискорень [м/с <sup>2</sup> ]									
1,1	0,4	0,6	0,6	0,9	0,8	1,2	1,4	2,2	1,6	2,5
2,1	1,7	2,4	2,5	3,6	3,3	5	5,7	8,7	6,7	9,9
3,2	3,8	5,5	5,6	8,4	7,4	11,3	12,8	19,6	14,9	22,4
4,2	6,7	9,8	10	14,9	13,2	19,9	22,8	34,9	24,5	39,8
5,3	10,4	15,5	15,5	23,4	20,7	31,1	35,6	54,5	41,6	62,3
6,3	14,9	22,3	22,3	33,6	29,8	44,7	51,2	78,5	59,5	89,6
7,4	20,3	30,4	30,4	45,9	40,5	61,1	69,7	106,9	81,1	122,2

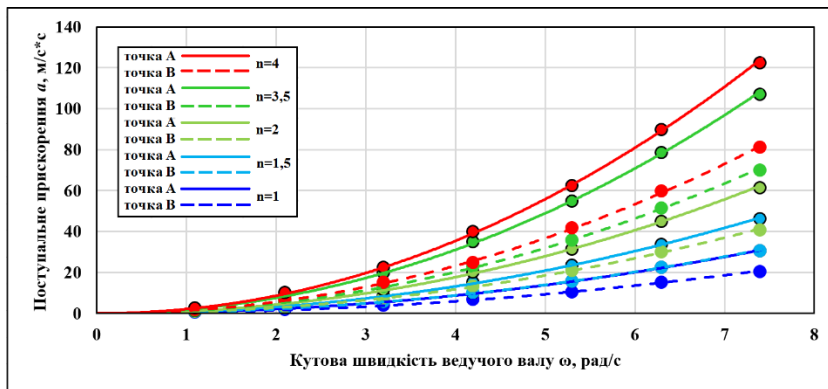


Рис. 4. Графік залежності максимальних значень прискорень  $a_{maxA}$  та  $a_{maxB}$  від кутової швидкості  $\omega_{ведуч}$  ведучого валу машини при коефіцієнті  $\lambda=1,8$

Таблиця 4

$\omega_{ведуч}$ [рад/с]	Масштабний коефіцієнт $n$ , при $\lambda=2,0$									
	$n=1$		$n=1,5$		$n=2$		$n=3,5$		$n=4$	
	$a_{maxA(1)}$	$a_{maxB(1)}$	$a_{maxA(1,5)}$	$a_{maxB(1,5)}$	$a_{maxA(2)}$	$a_{maxB(2)}$	$a_{maxA(3,5)}$	$a_{maxB(3,5)}$	$a_{maxA(4)}$	$a_{maxB(4)}$
	Максимальні значення прискорень [м/с <sup>2</sup> ]									
1,1	0,5	0,8	0,7	1,1	1	1,5	1,7	2,8	1,9	3
2,1	1,9	3,2	2,9	4,5	3,9	6,1	6,8	11,2	7,7	12,1
3,2	4,3	7,1	6,5	10,3	8,6	13,8	15,3	25,2	17,3	27,3
4,2	7,7	12,7	11,6	18,2	15,3	24,3	27,2	44,7	30,7	48,6
5,3	12,1	19,8	17,9	28,5	24	38	42,5	69,9	48,1	76,1
6,3	17,3	28,5	25,8	41,1	34,5	54,6	61,2	100,4	68,9	109,5
7,4	23,6	38,8	35,2	56,1	47	74,7	83,3	137	93,9	149,4

Після аналізу отриманих даних у таблицях та на рис. 2 – рис. 5 встановлено, що приріст прискорень  $a_{maxA}$  та  $a_{maxB}$  від кутової швидкості ведучого валу  $\omega_{ведуч}$  машини відбувається за квадратичною залежністю, за допомогою Microsoft Excel було отримано відповідні функції (рис. 2). Значення прискорень  $a_{maxA}$  та  $a_{maxB}$  також залежать від зміни коефіцієнту  $\lambda$ , було встановлено відповідну залежність між цими двома параметрами.

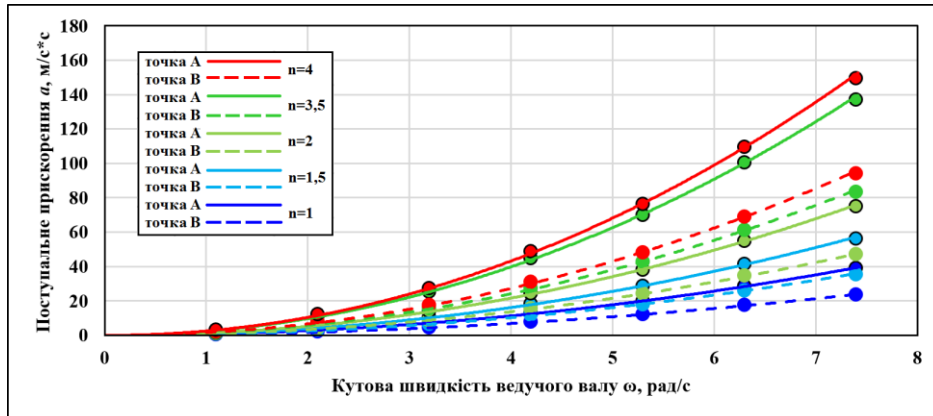


Рис. 5. Графік залежності максимальних значень прискорень  $a_{maxA}$  та  $a_{maxB}$  від кутової швидкості  $\omega_{ведуч}$  ведучого валу машини при коефіцієнті  $\lambda=2,0$

В результаті, для досліджуваної конструкції машини, отримано загальні математичні вирази для визначення максимальних прискорень  $a_{maxA}$  та  $a_{maxB}$  в залежності від зміни коефіцієнтів  $n$  та  $\lambda$ :

$$a_{maxA} = 0,23n\omega_{ведучA}^2(\lambda - 0,4)^{1,1}; \tag{3}$$

$$a_{maxB} = 0,33n\omega_{ведучB}^2(\lambda - 0,4)^{1,5}. \tag{4}$$

Раніше проведеними дослідженнями у роботі [3] було визначено умови, які характеризують зміну режимів руху робочого масиву в середині ємкості. Таким чином, з урахуванням умов, представлених у роботах [3, 4, 6], запишемо рівняння (3) та (4), виразивши з них значення  $\omega_{ведуч}$ :

$$\omega_{ведучA} = \sqrt{\xi \frac{g}{0,23n(\lambda - 0,4)^{1,1}}}; \tag{5}$$

$$\omega_{ведучB} = \sqrt{\xi \frac{g}{0,33n(\lambda - 0,4)^{1,5}}}, \tag{6}$$

де  $\xi$  – коефіцієнт, який відповідає частині робочого масиву, який зможе перейти до стану вільного польоту.

При  $\xi=0,5$  перейти до стану вільного польоту зможе приблизно половина робочого масиву, відповідно, за виразами (5), (6) можна буде розрахувати кутову швидкість ведучого валу, при якому в середині ємкості почнуть реалізуватися перші ознаки змішаного режиму руху. При  $\xi=1$  весь робочий масив зможе перейти до стану вільного польоту, отже, за виразами (5) та (6) можна здійснити розрахунок кутової швидкості ведучого валу, при якому в середині ємкості почнуть реалізуватися перші ознаки водоспадного режиму руху.

Із застосуванням виразів (5) та (6) розраховано граничні значення кутової швидкості ведучого валу машини, що відповідають зміні режимів руху робочого масиву в середині ємностей машин із відповідним коефіцієнтом  $\lambda$ . Розраховані граничні значення кутової швидкості ведучого валу представлено у таблицях 5–8.

Таблиця 5

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

Таблиця 9

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

Таблиця 7

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

Таблиця 8

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

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Для галтувальної машини зі складним рухом робочої ємкості, що містить додаткову рухома ланку повзун у своєму кінематичному ланцюзі, встановлено взаємозв'язок між зміною режимів руху робочого масиву, кутовою швидкістю ведучого валу, масштабним типорозміром та відношенням міжосьової відстані ємкості до міжосьової відстані вилوک.

2. Отримані математичні залежності для визначення граничної кутової швидкості ведучого валу галтувальної машини типу «Turbula» з додатковою рухома ланкою повзун, яка буде відповідати утворенню необхідного режиму руху робочого масиву.

### Література

1. Першин В.Ф. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа : монография / Першин В.Ф., Однолюк В.Г., Першина С.В. – М. : Машиностроение, 2009. – 220 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. – Хмельниц., 2007. – 255 с.
3. 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.
4. Панасюк І.В. Визначення залежності режиму руху робочого середовища у ємкості зі складним рухом від кутової швидкості ведучого валу / І.В. Панасюк, М.Г. Залюбовський // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну – 2015. – № 1. – С. 43-52.
5. Zaliubovskiy M. G., Panasiuk I. V., Smirnov Yu. I., Malyshev V. V. Synthesis and research of the tumbling machine spatial mechanism. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2020. 178, issue 4, 69-75.
6. Panasyuk I., Zalyubovskiy M. Driving machine shaft angular velocity impact on motion conditional change of granular medium in working reservoir for components compounding and process. *Metallurgical and Mining Industry* 2015. № 3. P. 260-264.
7. Панасюк І.В. Визначення закону зміни кутової швидкості ведучого валу машини для обробки деталей зі складним рухом робочої ємкості / І.В. Панасюк, М.Г. Залюбовський // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну – 2015. – № 5. – С. 40-46.
8. Zalyubovskiy M. G., Panasyuk I.V., Koshel' S.O., Koshel' G.V. Synthesis and analysis of redundant-free seven-link spatial mechanisms of part processing machine. *International Applied Mechanics*, 57, No. 4, July 2021, 466–476.
9. 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.
10. Панасюк І.В. Експериментальне дослідження руху частинки сипкого середовища у робочій ємкості, що здійснює складний рух / І.В. Панасюк, М.Г. Залюбовський // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2014. – № 6. – С. 35-42.

### References

1. Pershin V.F. Pererabotka sypuchih materialov v mashinah barabannogo tipa : monografiya / Pershin V.F., Odolko V.G., Pershina S.V. – M. : Mashinostroenie, 2009. – 220 c.
2. Burmistenkov O.P. Vyrobnystvo lytykh detalei ta vyrobiv z polimernykh materialiv u vztutievii ta shkirhalantereyinii promyslovosti : monohrafiia / O. P. Burmistenkov, B. M. Zlotenko, V. P. Konoval, I. V. Panasiuk, M. Ye. Skyba, O. M. Syniuk. – Khmelnyts., 2007. – 255 c.
3. Zaliubovskiy M.H. Mashyny zi skladnym rukhom robochykh yemkosti dlia obrobky polimernykh detalei : monohrafiia / M.H. Zaliubovskiy, I.V. Panasiuk, V.V. Malyshev. – K. : Universytet «Ukraina», 2018. – 228 s.

4. Panasiuk I.V. Vyznachennia zalezhnosti rezhymu rukhu robochoho seredovyshcha u yemkosti zi skladnym rukhom vid kutovoi shvydkosti veduchoho valu / I.V. Panasiuk, M.H. Zaliubovskiy // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu – 2015. – № 1. – S. 43-52.
5. Zaliubovskiy M. G., Panasiuk I. V., Smirnov Yu. I., Malyshev V. V. Synthesis and research of the tumbling machine spatial mechanism. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2020. 178, issue 4, 69-75.
6. Panasyuk I., Zalyubovskiy M. Driving machine shaft angular velocity impact on motion conditional change of granular medium in working reservoir for components compounding and process. Metallurgical and Mining Industry 2015. № 3. P. 260-264.
7. Panasiuk I.V. Vyznachennia zakonu zminy kutovoi shvydkosti veduchoho valu mashyny dlia obrobky detalei zi skladnym rukhom robochoi yemkosti / I.V. Panasiuk, M.H. Zaliubovskiy // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu – 2015. – № 5. – S. 40-46.
8. Zalyubovskiy M. G., Panasyuk I.V., Koshel S.O., Koshel G.V. Synthesis and analysis of redundant-free seven-link spatial mechanisms of part processing machine. International Applied Mechanics, 57, No. 4, July 2021, 466–476.
9. Zaliubovskiy M.H. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu rezhymiv rukhu robochoho masyvu ta obiemu zapovnennia yemkosti na intensyvniat viddilennia metalevykh detalei vid lyvnykiv / M.H. Zaliubovskiy, I.V. Panasiuk // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. – 2020. – № 1 (142). – S. 27-38.
10. Panasiuk I.V. Eksperymentalne doslidzhennia rukhu chastynky sypkoho seredovyshcha u robocii yemkosti, shcho zdiisniuie skladnyi rukh / I.V. Panasiuk, M.H. Zaliubovskiy // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. – 2014. – № 6. – S. 35-42.

ЗЕЛІНСЬКА Оксана

Донецький національний університет імені Василя Стуса

<https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>email: [zeloksanavlad@gmail.com](mailto:zeloksanavlad@gmail.com)

ПОТАПОВА Надія

Донецький національний університет імені Василя Стуса

МЕЛЬЯНОВА Анастасія

Донецький національний університет імені Василя Стуса

## ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ВЕДЕННЯ РЕЄСТРУ КЛІЄНТІВ БАНКУ

В роботі розглядається проектування інформаційної системи ведення реєстру клієнтів банку і спрямована на детальне вивчення процесів, які відбуваються на кожному етапі розробки інформаційної системи до моменту її програмної реалізації.

Ключові слова: інформаційна система, клієнт-серверний веб-додаток, веб-сайт, база даних, реєстр банку.

ZELINSKA OKSANA, POTAPOVA NADIYA, YEMELIANOVA ANASTASIIA

Vasyl' Stus Donetsk National University

## INFORMATION SYSTEM FOR MAINTAINING THE REGISTER OF CLIENTS OF THE BANK

The information system (IS) is designed to collect, transmit, process, store, and provide information needs of users. An information system consists of people, equipment, processes, procedures, data, and operations. Today, many systems already exist and are being created, the purpose of which is simple management, and easy and accessible provision of all the necessary information that the user wants. Each information system is created to fulfill a given task in the field of its application. All of them are different, and unique, and have many different functions that can be not only useful but also sometimes redundant. An information system, in simple words, is a large reference book on a certain topic, but in an electronic version, in which any person can easily find what he needs without much effort. Therefore, the relevance of the article lies in the creation of a highly specialized, simple, and intuitive information system without overloading with unnecessary information, which in the future will be able to compete with already existing systems of a similar nature. The purpose of the article is a detailed study of the processes that take place at each stage of the development of an information system up to the moment of its software implementation, as well as the creation of such an information system that can be easily worked with without undue effort. An information system is also an important tool for performing management functions. Therefore, the study of the processes of creating an information system will take place on the example of creating an information system for maintaining a register of bank clients. The article outlines the tasks that must be completed to achieve the goal. Besides the article examines in detail the process of analysis and development of an information system in the form of conceptual and logical models. Also, for a better understanding of the processes, the research results are visually presented in the form of tables and diagrams.

Keywords: information system, client-server web application, website, database, bank register.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

В часи, коли більшість даних базується в електронних джерелах, виникає така проблема, як перевантаження сайтів інформацією, в якій важко орієнтуватись і знаходити те, що потрібно. До того ж, пошук займає вдосталь часу, в той час як сучасний користувач звик все отримувати швидко тут і зараз всього за декілька кліків і без зайвих намагань.

### Аналіз досліджень та публікацій

Різні аспекти проблем, пов'язаних з впровадженням і використанням сучасних інформаційно-комунікаційних технологій банківськими установами досліджувалися у наукових працях українських дослідників: Т.В. Січко, Т.В. Нескородоєвої, І.Я. Карчевої, О.Ю. Кучанського, Н. В. Гребенюк, О. Г. Єсіної, Т.В. Майорової та ін. Зокрема, в дослідженнях І.Я. Карчевої, Г.Т. Карчевої, Т.В. Майорової і М.Є. Трудової розглядається вплив інновацій на розвиток банківської системи.

### Формулювання цілей статті

Мета роботи – детальне вивчення етапів проектування інформаційної системи (далі ІС) на основі розробки ІС реєстру клієнтів банку, яка матиме ефективний функціонал без зайвих деталей і міститиме усю необхідну інформацію, до якої можна буде швидко і легко отримати доступ.

Для здійснення зазначеної мети служать наступні задачі:

- 1) формування і аналіз вимог для створення ІС (концептуальне проектування системи);
- 2) проектування системи (логічне проектування системи).

### Виклад основного матеріалу

Розглянемо кожен етап створення інформаційної системи детальніше. Першим етапом виступає формування і аналіз вимог для створення ІС.

Концептуальна (аналітична) модель системи вважається першим кроком до моделі проектування, тобто служить вхідними даними для проектування системи. Модель дозволяє використовувати більше формалізму та аналізувати внутрішні механізми системи, декомпозуючи її на більш дрібні елементи, тобто визначати властивості системи або середовища, що оточують систему [2, с. 37]. Правильно розроблена концептуальна модель бази даних має підтримувати всі уявлення користувачів.

На цьому етапі проектування необхідно:

- 1) визначити сутності, інформацію про які зберігатиме БД;
- 2) визначити зв'язки між сутностями, їхній тип, обмеження і навести опис;
- 3) відобразити результати у графічному вигляді (за допомогою діаграми прецедентів, ER-діаграми, схеми IDEF0).

ІС ведення реєстру клієнтів банківської установи передбачає у собі наступні функціональні можливості:

- створення, ведення і зберігання інформації про клієнта банку;
- пошук даних про клієнтів;
- аналіз і збір статистики по клієнтам;
- авторизація у систему як працівнику банківської установи, так і клієнту банку;
- перегляд і можливість самостійної зміни даних клієнта, без допомоги працівника банку.

Для рішення цих задач у додатку необхідно розробити:

- форму авторизації у систему;
- звіт із особистою інформацією клієнта у особистому кабінеті;
- форму для створення картки клієнта;
- поле для пошуку даних про певного клієнта у реєстрі;
- звіт по знайденій інформації у реєстрі внаслідок пошуку;
- звіт по аналізу клієнтів працівником.

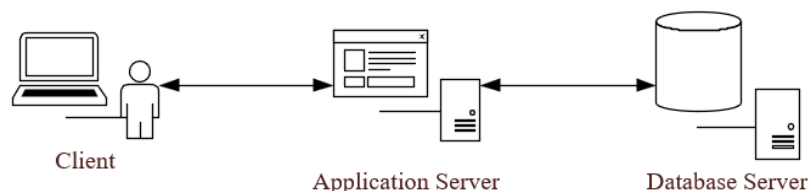
Розроблювана ІС має клієнт-серверну архітектуру. Як можна зрозуміти, в даній концепції приймають участь дві сторони: клієнт і сервер. Такий розподіл доцільний, оскільки сервери потрібні для постачання певних послуг (у даному випадку надання інформації), а клієнтські комп'ютери виступають їх споживачами. В якості клієнта зазвичай виступає браузер, а в якості сервера, наприклад, MySQL сервер. В основі взаємодії клієнта і сервера лежить принцип того, що взаємодію завжди починає клієнт, а сервер лише йому відповідає [3].

Перевагою такої архітектури є: розділення навантаження і програмного коду клієнтської та серверної частин, підтримка багатокористувацької роботи, гарантія цілісності даних та наявність механізмів керування правами доступу до ресурсів сервера.

У ІС, яка розробляється у даній роботі, клієнтською частиною є браузер із інтуїтивно простим і зрозумілим інтерфейсом, який отримує запити від користувача (який вводить дані у поле пошуку, формує клієнтську картку, авторизується у системі тощо), генерує ці запити до БД на мові SQL та відправляє їх на сервер. Серверна ж частина ІС відповідає за отримання і обробку запитів до БД (перевірка логіну і паролю для входу, обробка даних про реєстрацію нового клієнта, обробка даних при пошуку тощо) і передачу отриманих результатів назад до клієнта.

Щодо мережевої моделі, то дана ІС відноситься до лінійної мережевої топології, оскільки вона не має складної структури. Призначення ІС – надання користувачу відповіді на його запити, тобто пошук потрібної інформації. А для виконання цього завдання системі потрібен тільки доступ до сховища даних, тому із цього випливає лінійна модель «Клієнт – ІС – Сховище даних».

ІС можна представити у вигляді багаторівневої лінійної клієнт-серверної моделі, яка зображена на рис. 1. Першим рівнем цієї моделі є клієнт (браузер), який генерує різні SQL-запити до бази даних. Другим рівнем є сервер (Apache HTTP Server + PHP), який інтерпретує запити і реалізує взаємодію між клієнтом і базою даних. Третій рівень – це безпосередньо сама СУБД, яка є сховищем даних [3].



**Рис. 1. Багаторівнева архітектура взаємодії клієнт-сервер**

Кінцевим етапом проектування концептуальної моделі є представлення результатів у графічному вигляді. Зазвичай це представлення у вигляді моделі «сутність – зв'язок». Але також її можна представити за допомогою діаграми прецедентів та схеми IDEF0. Розглянемо окремо ці варіанти подання:

- 1) Діаграма прецедентів.

На рис. 2 зображена діаграма прецедентів до розроблюваної ІС. Система має два актори – клієнт і працівник банку. Прецедентами для клієнта є авторизація в системі, пошук клієнта включно із переглядом

інформації, перегляд і зміна особистих даних. Прецедентами для працівника є авторизація у систему, пошук клієнта включно із переглядом інформації, створення картки клієнта включаючи занесення у реєстр (БД), збір статистики по клієнтам.



Рис. 2. Діаграма прецедентів

2) Модель «сутність – зв’язок» або ER-діаграма.

Дана модель дає візуальне представлення різних сутностей всередині системи і взаємозв’язків між ними.

У таблиці 2 наведена коротка характеристика зв’язків між сутностями розроблюваної ІС. Із цієї таблиці випливає те, що один об’єкт кожного набору об’єктів А може бути пов’язаний лише із одним об’єктом із набору об’єктів Б. Наприклад, клієнт при авторизації у систему може отримати доступ лише у один унікальний особистий кабінет і навпаки, особистий кабінет може бути доступний тільки при авторизації одного унікального користувача. Або ж у одного клієнта може бути тільки один паспорт (згідно з Конституцією України) і навпаки.

Таблиця 1

Характеристика зв’язків

Ім'я сутності 1	Ім'я сутності 2	Ім'я зв'язку	Тип зв'язку
Авторизація_клієнт	Дані_клієнт	Захищає	1:1
Дані_клієнт	Дані_робота	Працює	1:1
Дані_клієнт	Дані_паспорт	Належить	1:1
Дані_клієнт	Картка	Прикріплений	1:1
Авторизація_працівник	Дані_працівник	Захищає	1:1
Дані_працівник	Картка	Опікується	1:N

У системі також присутній зв’язок «один до багатьох». Це означає, що один об’єкт із одного набору об’єктів А може бути пов’язаний із декількома об’єктами. Наприклад, один працівник може курувати декілька карток клієнтів, в той час як у одній картки (клієнта) може бути лише один наставник.

На рис. 3 зображена модель «сутність – зв’язок», яка візуалізує подану інформацію із таблиці 2.

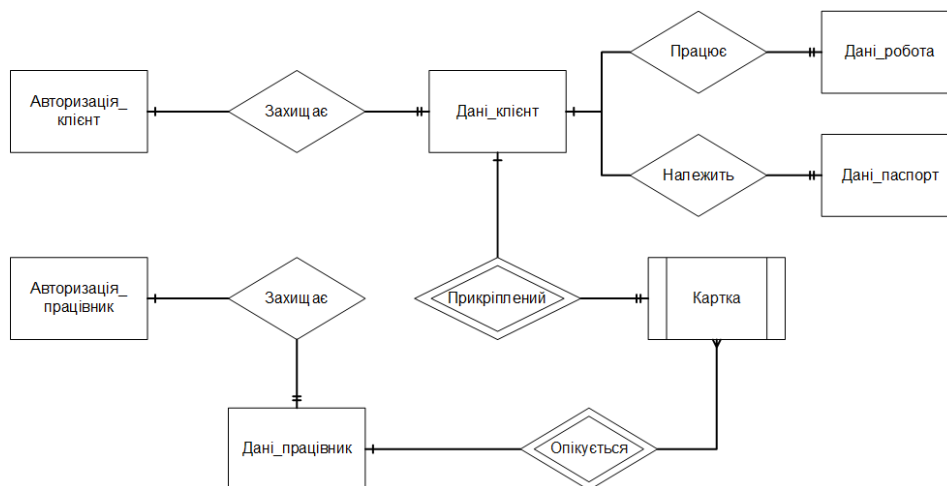


Рис. 3. ER-діаграма



3) Схема IDEF0.

Центральним елементом моделі IDEF0 є функція, яка на схемі відображається у вигляді функціонального блоку – прямокутника, всередині якого зазначено дію в формі дієприслівника. Незалежно від масштабу дій всі функції відображаються одноманітно і обов'язково містять 4 ключових потоки, які жорстко закріплені за сторонами функціонального блоку:

- зліва – входи або використувані ресурси для виконання функції;
- праворуч – виходи або результати виконання функції;
- зверху – керуючі впливи (або управління), які визначають, як і скільки потрібно зробити результатів; управління прив'язує всі дії до системи правил компанії, чітко позначаючи правила і вимоги, які повинні бути збережені в процесі виконання функції;
- знизу – механізми, які відображають, хто і за допомогою чого повинен виконати цю роботу.

Такий підхід дозволяє трохи заощадити на поясненнях в схемах і домогтися однозначності в відображенні потоків, що надає стрункості всій моделі [8]. На рис. 4 зображена контекстна діаграма розроблюваної інформаційної системи.

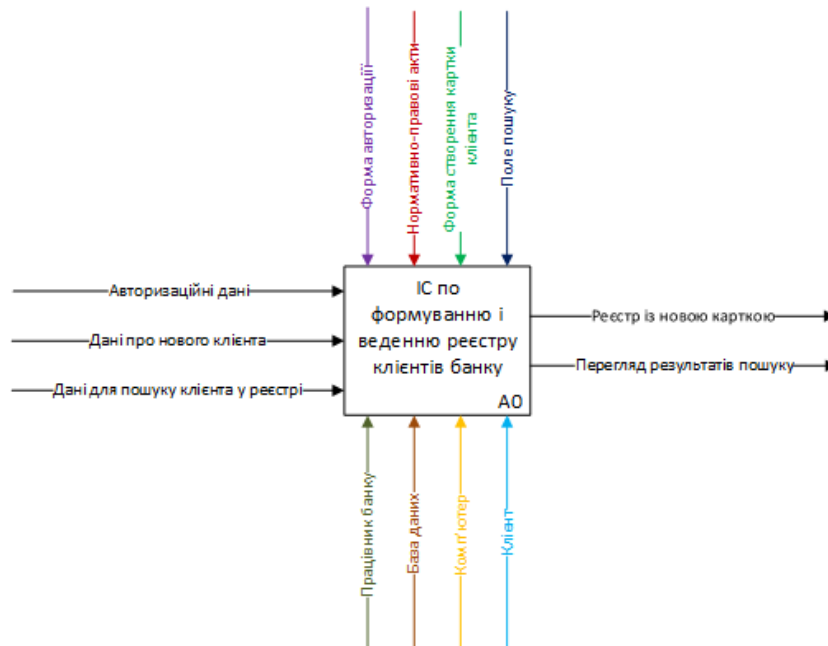


Рис. 4. Контекстна діаграма

Далі розглянемо безпосередньо проектування системи, тобто етап логічного проектування. Основою логічної моделі даних є модель, яка була отримана на етапі концептуального проектування, але вже із урахуванням особливостей процесів організації та їхньої реалізації у обраній СУБД. Однак на цьому етапі ігнорується безпосередня робота у СУБД, тобто фізична організація. В деякій мірі логічна модель даних є протилежністю до концептуальної, яка описує семантику організації без будь-яких посилань на технології.

На даному етапі проектування необхідно виконати наступні кроки:

- 1) виконати перетворення ER-діаграми у відношення;
- 2) для кожного відношення визначити свої атрибути та їхні властивості;
- 3) привести відношення до нормальних форм (1 НФ, 2 НФ і 3НФ);
- 4) результати роботи привести у графічному вигляді (ER-діаграма, повна атрибутивна модель за стандартом IDEF1X).

Як зазначалось раніше, в основі взаємодії клієнт-серверу лежить принцип того, що таку взаємодію завжди починає клієнт, тому розглянемо три варіанти взаємодії між клієнтом та сервером у розроблюваній ІС: авторизація у систему, пошук користувача у реєстрі і формування картки клієнта, які наведені у таблиці 1.

Таблиця 2

Інформаційний потік даних				
Клієнт			Сервер БД	
Дія	Дані	Тип даних	Дія	Дані
Авторизація у систему	Логін, пароль	Рядок, SQL-запит	Перевірка коректності даних, повернення результату	SQL-запит
Пошук у реєстрі	Прізвище, ім'я (необов'язково)			
Створення картки клієнта	Необхідні персональні дані		Перевірка коректності даних, занесення і збереження у БД	

При авторизації у систему користувач (клієнт або працівник банку) вводить у поля авторизації свій логін і пароль. Після чого ці дані заносяться у змінну, якій присвоюється рядок, який потім вставляється у SQL-запит і відправляється на сервер БД, який перевіряє, чи існує такий логін і пароль та чи вони коректні, і відправляє назад відповідь. Якщо такі логін і пароль правильні, то користувач заходить у ІС, інакше – ні, і намагається ввести коректні дані.

Пошук клієнта у реєстрі. Користувач вводить прізвище, ім'я та за потреби по-батькові. Ці дані перетворюються у SQL-запит і відправляються на сервер. Сервер БД шукає у себе надіслані дані і повертає назад запит із знайденими результатами, які форматуються у читабельний вигляд і виводяться на екран браузера користувачу.

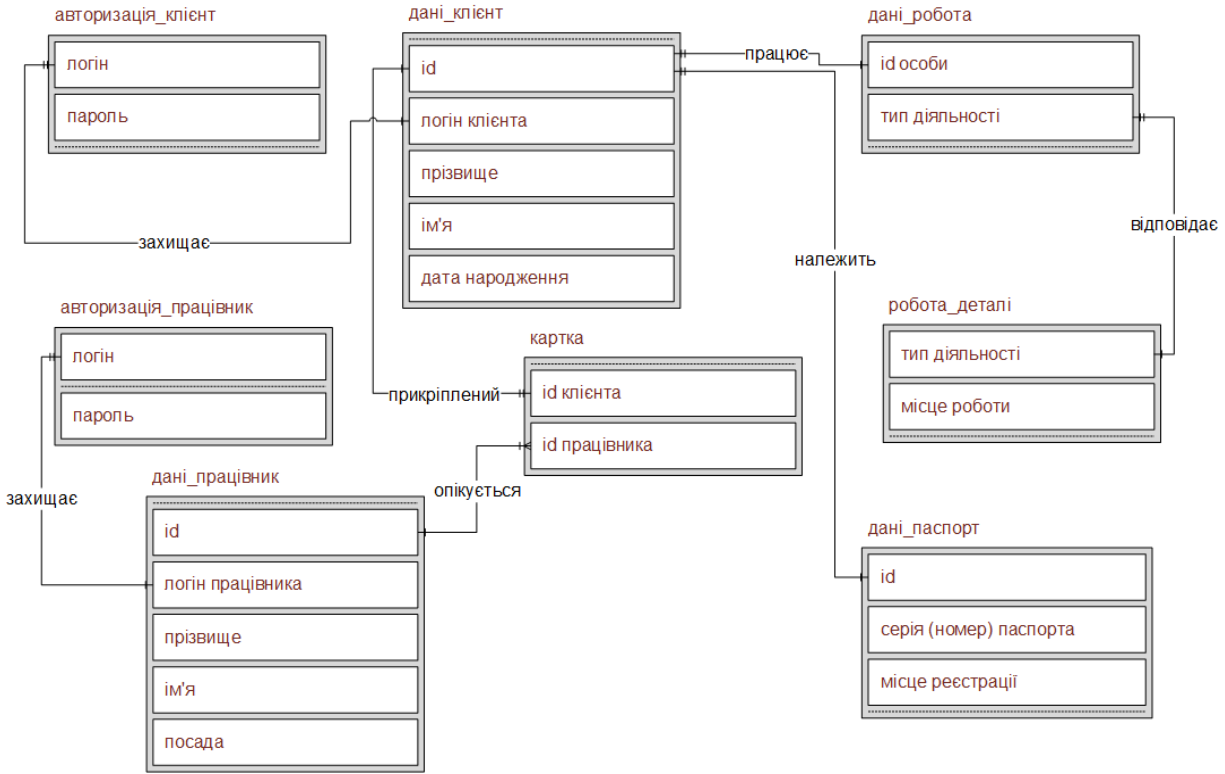


Рис. 5. Логічна ER-діаграма

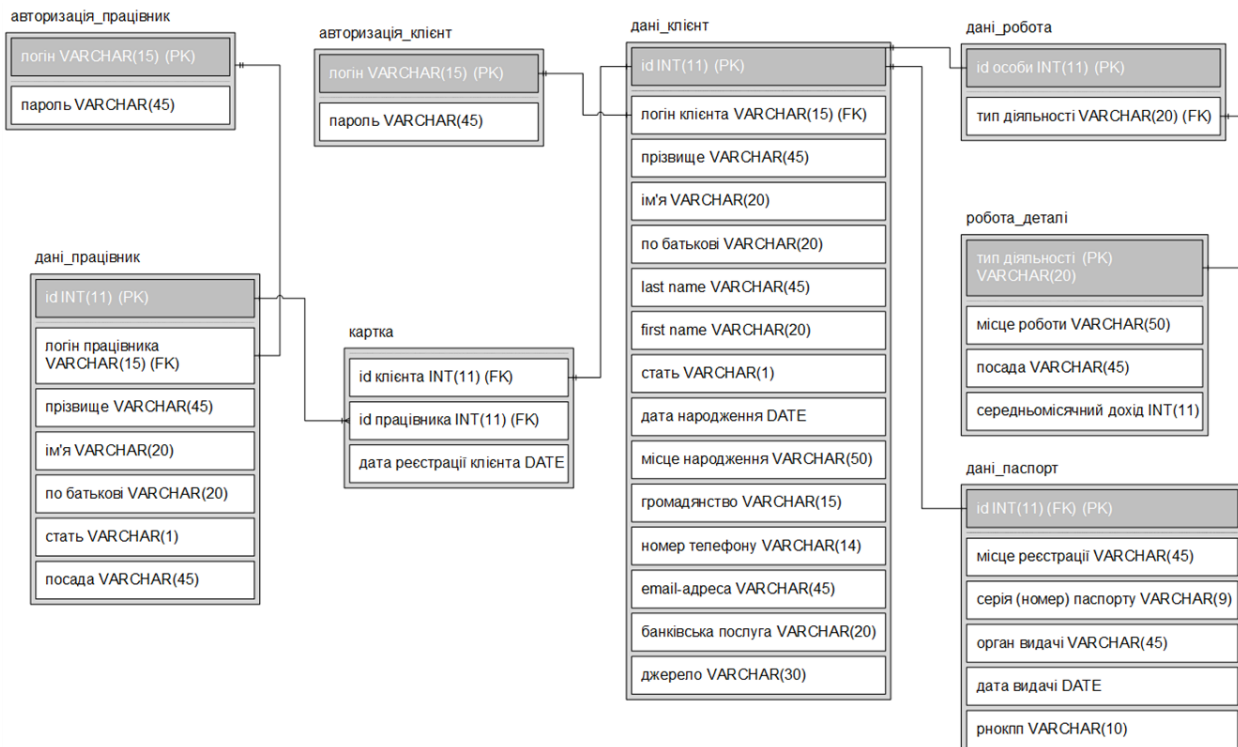


Рис. 6. Повна атрибутивна модель за стандартом IDEF1X

При формуванні картки клієнта, користувач заповнює реєстраційну форму, після чого всі дані перевіряються на правильність вводу і аналогічно до попередніх пунктів, за допомогою SQL-запитів записуються до бази даних.

Уся передача даних між клієнтом та сервером БД відбувається за допомогою HTTP протоколу.

Нижче наведено два види графічного представлення логічної моделі: у вигляді класичної ER-діаграми та розширеної (повної атрибутивної моделі за стандартом IDEF1X) вже перетворених і нормалізованих відношень.

На рис. 5 зображена ER-діаграма логічного етапу проектування, яка визначає відношення та зв'язки між ними.

Модель IDEF1X найчастіше використовується для створення баз даних, тобто для опису даних для їхньої майбутньої автоматизації та обробки за допомогою СУБД. На рис. 6 зображена IDEF1X модель розробленої інформаційної системи.

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У статті було проведено аналіз та проектування інформаційної системи по веденню реєстру клієнтів банку, а саме: створення концептуальної і логічної моделей ІС. Дані етапи включають у себе детальний аналіз вимог, визначення функціональності і архітектури системи, опис протоколів взаємодії, нормалізація відношень тощо. А також візуальне представлення проведених досліджень у вигляді таблиць, діаграм і схем, яке допомагає ширше зрозуміти результати процесів проектування системи.

### Література

1. Зелінська О. В. Інформаційні системи та технології в галузі : навчальний посібник / О. В. Зелінська, Н. А. Потапова, Л. О. Волонтир. – Вінниця : ВНАУ, 2020. – С. 263.
2. Марченко А. В. Проектування інформаційних систем : навчальний посібник / А. В. Марченко. – 2015. – С. 40.
3. О модели взаимодействия клиент-сервер простыми словами. Архитектура «клиент-сервер» с примерами [Електронний ресурс]. – 2016. – Режим доступу : <https://zametkinapolyah.ru/servera-i-protokoly/o-modeli-vzaimodejstviya-klient-server-prostymi-slovami-arhitektura-klient-server-s-primerami.html>.
4. Что нужно знать про HTTP протокол веб-разработчику. Правила HTTP протокола [Електронний ресурс]. – 2016. – Режим доступу : <https://zametkinapolyah.ru/servera-i-protokoly/cto-nuzhno-znat-pro-http-protokol-veb-razrabotchiku-pravila-http-protokola.html>.
5. Марголин А. UML для бизнес-моделирования: для чего нужны диаграммы процессов [Електронний ресурс] / А. Марголин. – 2021. – Режим доступу : <https://evergreens.com.ua/ru/articles/uml-diagrams.html>.
6. Диаграмма ER в СУБД [Електронний ресурс]. – 2019. – Режим доступу : <https://coderlessons.com/tutorials/bazy-dannykh/osnovy-subd/5-diagramma-er-v-subd>.
7. Верников Г. Основные методологии обследования организаций. Стандарт IDEF0. Корпоративный менеджмент [Електронний ресурс] / Г. Верников. – 2000. – Режим доступу : <https://www.cfin.ru/vernikov/idef/idef0.shtml>.
8. Решетова Н. Э. Актуально ли на сегодня моделирование в IDEF0? [Електронний ресурс] / Н. Э. Решетова – Режим доступу : <http://projectimo.ru/biznes-processy/idef0.html>.

### References

1. Zelinska O. V. Informatsiini systemy ta tekhnolohii v haluzi : navchalnyi posibnyk / O. V. Zelinska, N. A. Potapova, L. O. Volontyr. – Vinnytsia : VNAU, 2020. – S. 263.
2. Marchenko A. V. Proektuvannia informatsiinykh system : navchalnyi posibnyk / A. V. Marchenko. – 2015. – S. 40.
3. O modeli vzaimodejstviya klient-server prostymi slovami. Arhitektura «klient-server» s primerami [Elektronnij resurs]. – 2016. – Rezhim dostupu : <https://zametkinapolyah.ru/servera-i-protokoly/o-modeli-vzaimodejstviya-klient-server-prostymi-slovami-arhitektura-klient-server-s-primerami.html>.
4. Chto nuzhno znat' pro HTTP protokol veb-razrabotchiku. Pravila HTTP protokola [Elektronnij resurs]. – 2016. – Rezhim dostupu : <https://zametkinapolyah.ru/servera-i-protokoly/cto-nuzhno-znat-pro-http-protokol-veb-razrabotchiku-pravila-http-protokola.html>.
5. Marholyn A. UML dlia biznes-modeliuvannia: dlia choho potrebni diahramy protsesiv [Elektronnij resurs] / A. Marholyn. – 2021. – Rezhym dostupu : <https://evergreens.com.ua/ru/articles/uml-diagrams.html>.
6. Dyahramma ER v SUBD [Elektronnij resurs]. – 2019. – Rezhym dostupu : <https://coderlessons.com/tutorials/bazy-dannykh/osnovy-subd/5-diagramma-er-v-subd>.
7. Vernikov G. Osnovnye metodologii obsledovaniya organizacij. Standart IDEF0. Koroporativnyj menedzhment [Elektronnij resurs] / G. Vernikov. – 2000. – Rezhim dostupu : <https://www.cfin.ru/vernikov/idef/idef0.shtml>.
8. Reshetova N. Je. Aktual'no li na segodnja modelirovanie v IDEF0? [Elektronnij resurs] / N. Je. Reshetova – Rezhim dostupu : <http://projectimo.ru/biznes-processy/idef0.html>.

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-100-104>

УДК 688.3.072

**КОВАЛЬОВ Юрій**

Київський національний університет технологій та дизайну

<https://orcid.org/0000-0003-2321-6763>

e-mail: [kovalev.yuri2012@gmail.com](mailto:kovalev.yuri2012@gmail.com)

**ПЛЕШКО Сергій**

Київський національний університет технологій та дизайну

<https://orcid.org/0000-0003-4348-2858>

e-mail: [pleshko-s-a@ukr.net](mailto:pleshko-s-a@ukr.net)

**СУВОРОВ Іван**

Київський національний університет технологій та дизайну

e-mail: [suv.ivan@ukr.net](mailto:suv.ivan@ukr.net)

## РОЗРОБКА УДОСКОНАЛЕНОЇ РОБОТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЗАВАНТАЖЕННЯ ЕКСТРУДЕРА

*В роботі запропоновано роботизовано систему завантаження одного або кількох екструдерів для переробки термопластичних полімерних матеріалів у довгомірні вироби (труби, профіль, плівки і тощо). Система містить великий бункер завантажений сировиною на цілу робочу зміну. З цього бункера автоматично здійснюється наповнення робочого бункера екструдера за допомогою шнекового живильника. Автоматичний контроль стану наповнення бункерів здійснюється мікроконтролером за допомогою датчиків рівня сировини.*

*Ключові слова: екструдер, полімерні гранули, бункер, завантаження, мікроконтролер, оптичні датчики, шнековий живильник.*

KOVALYOV Yuri, PLESHKO Sergey, SUVOROV Ivan

Kyiv National University of Technologies and Design

### DEVELOPMENT OF IMPROVED ROBOTICS EXTRUDER LOADING SYSTEM

*The relevance of the study is due to the fact that the loading of granulated polymer material into the working hopper of extruders is mainly carried out manually from bags by production operators. The capacity of working hoppers of extruders is limited due to the fact that with a significant height of the bulk material, an increase in static pressure occurs in the lower layers, which leads to the formation of vaults, uneven supply of polymer into the material cylinder and deterioration of the quality of products. Since the work process of extrusion is continuous and lasts an entire work shift, there is a need to constantly control the filling level of the work hoppers of the extruders.*

*The paper proposes a robotic extruder loading system for the processing of thermoplastic polymer materials into long products (pipes, profiles, films, etc.). The paper proposes a system for loading one or more extruders, which contains a large hopper loaded with raw materials for an entire work shift. From this hopper, the working hopper of the extruder is automatically filled with the help of a screw feeder. Automatic monitoring of the filling status of the hoppers is carried out by a microcontroller with the help of raw material level sensors. The object of research is the process of automatic control of periodic loading of loose materials into technological machines. The subject of the research is a robotic system for loading granulated polymers into the working hoppers of extruders. The purpose of the research is to develop a control system for devices for periodic dosing of granular polymer materials and loading them into working hoppers of limited capacity, which can be used in extruders. The task of the work is an analytical study of the effectiveness of the application of extruder loading systems based on a screw feeder and the development of its design and automatic control scheme. The methodological and theoretical basis of the research are the basic provisions of the theory of automatic control of technological processes, the design of transport equipment for loose media, and the basis of the calculation of machine parts. A scientific novelty is that the work proposed for the first time a device for automatic control of the extruder loading system based on a microcontroller with the possibility of programming the work algorithm. The results of the work can be used to create new systems for controlling the operation of equipment for processing polymer materials and creating new designs. The methodological and theoretical basis of the research are the basic provisions of the theory of automatic control of technological processes, the design of transport equipment for loose media, and the basis of the calculation of machine parts. A scientific novelty is that the work proposed for the first time a device for automatic control of the extruder loading system based on a microcontroller with the possibility of programming the work algorithm. The results of the work can be used to create new systems for controlling the operation of equipment for processing polymer materials and creating new designs.*

*Key words: extruder, polymer granules, hopper, loading, microcontroller, optical sensors, screw feeder.*

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Екструзійні лінії призначені для випуску довгомірних виробів. Принцип роботи обладнання точно такий, як у звичайних екструдерів для штучних виробів, проте конструкція має деякі відмінності. Комплекс обладнання включає в себе екструдер з пристроєм для завантаження полімерної сировини, формуючу головку і пристрій для охолодження виробів.

Особливістю їх експлуатації є те, що технологічний процес відбувається практично безперервно протягом робочої зміни, що вимагає постійного поповнення робочих бункерів екструдерів полімерною сировиною, або прагнути якомога збільшувати об'єм завантаження цих бункерів.

### Аналіз досліджень та публікацій

Екструзія – метод формування в екструдері виробів або напівфабрикатів необмеженої довжини продавланною розплатою полімеру через формуючу головку з каналами необхідного профілю. Для цього використовують шнекові або черв'якові екструдери [1–3].

Сипкі матеріали мають особливості статичного, який має певний вплив на процес завантаження

екструдера [2, 3]. В наведених роботах розглянуті закономірності гравітаційного розвантаження бункерів.

Механічні живильники та дозатори, тобто такі, в яких для переміщення матеріалу використовується зусилля робочого органу, набули в промисловості найбільшого поширення як для регулювання витрат, так і як пристрої дозування [4–11].

### Формулювання цілей статті

**Метою роботи** є розробка системи керування пристроями для періодичного дозування гранульованих полімерних матеріалів і завантаження їх в робочі бункери обмеженої ємності, які можуть бути використані в екструдерах.

### Виклад основного матеріалу

На початку дослідження, була поставлена задача – розробити комбіновану схему системи завантаження екструдера на основі шнекового живильника.

Головні причини, що спонукають до необхідності удосконалення системи завантаження екструдера полягають в наступному:

- процес екструзії є практично безперервним (протягом робочого часу обладнання);
- ємність бункера екструдера обмежена по причині виникнення високого тиску в насипному шарі полімерного сипкого матеріалу, що призводить до утворення склепінь, затримок витоків гранул і до пульсацій в роботі екструдера;
- як правило, виникає необхідність періодично обслуговувати кілька екструдерів, які працюють в одному цеху, що потребує від оператора підвищеної уваги.

З метою удосконалення системи завантаження екструдера запропоновано використовувати один бункер великої ємності, який оснащений шнековим живильником для періодичного поповнення рівня матеріалу в одному або кількох малих (робочих) бункерів екструдера (групи машин). Для можливості автоматичної роботи системи завантаження пропонується оснащення робочих бункерів датчиками рівня насипного полімерного матеріалу.

На рис. 1 представлено комбіновану схему удосконаленої системи завантаження екструдера.

Система завантаження складається з екструдера 1, робочого бункера екструдера 2, шнекового живильника 3 з електроприводом 4, великого бункера 5.

В бункері 2 встановлені датчики – нижнього рівня матеріалу D3 і верхнього рівня – D2. В великому бункері встановлено тільки датчик нижнього рівня сипкого матеріалу D1 тому, що верхній рівень оператор може контролювати візуально при наповненні його матеріалом з мішків.

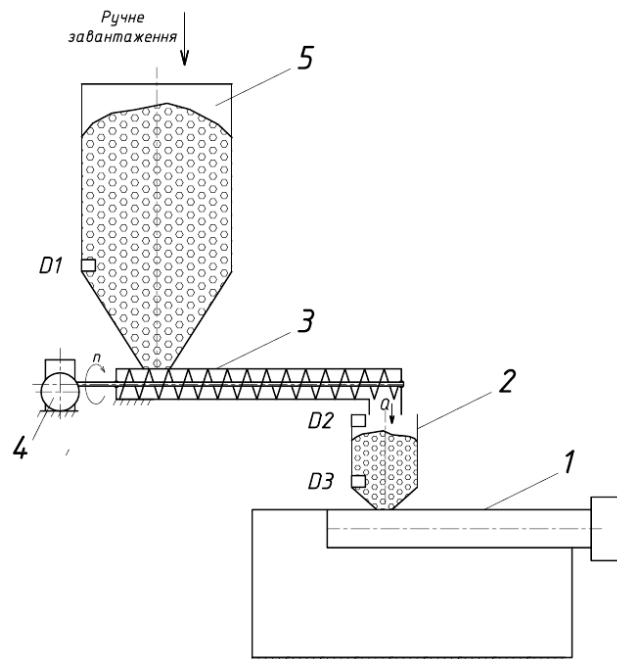


Рис. 1. Схема кінематична системи завантаження екструдера: 1 – екструдер; 2 – бункер екструдера; 3 – шнековий живильник; 4 – електропривод шнекового живильника; 5 – бункер великий; D1 – оптичний датчик нижнього рівня великого бункера; D2 – оптичний датчик верхнього рівня бункера екструдера; D3 – оптичний датчик нижнього рівня бункера екструдера; n – частота обертання шнеку живильника; Q – об'ємна продуктивність живильника

Шнек живильника 3 приводиться до обертання за допомогою приводу 4, що як правило складається з асинхронного електродвигуна і черв'ячного редуктора. Його частота обертання n може бути змінною при умові використання для живлення електродвигуна частотного перетворювача з векторним керуванням від мікроконтролера.

Наступним етапом була розробка структурної схеми системи завантаження екструдера на основі шнекового живильника. Розроблена структурна схема на рис. 2.

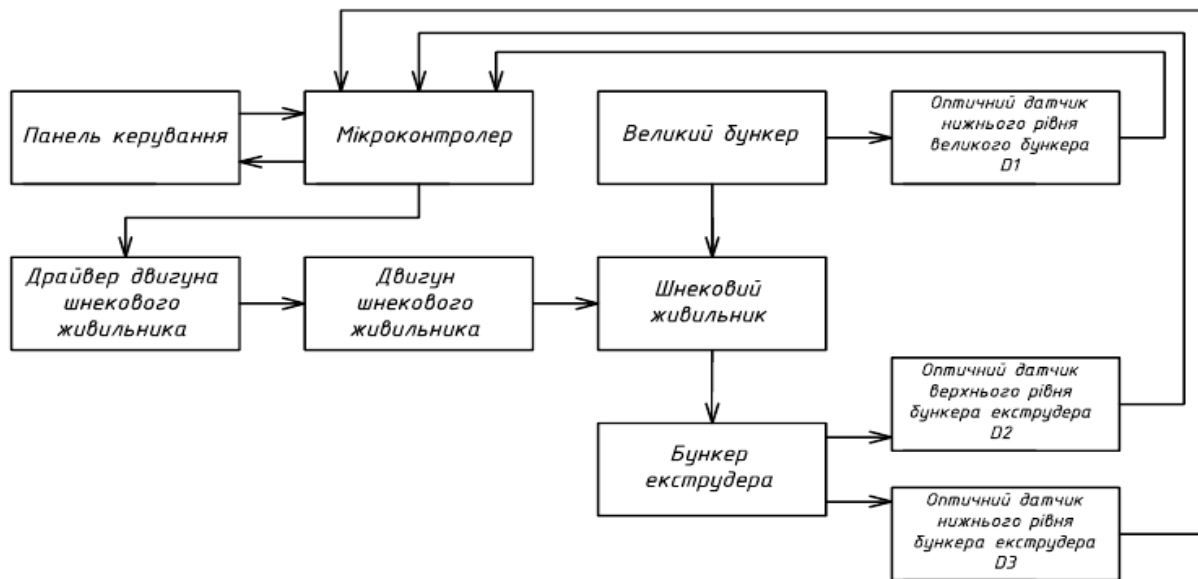


Рис. 2. Схема структурна системи завантаження екструдера

Основою структурної схеми на рис. 2 є мікроконтролер, який може бути індивідуальним (тільки для цієї системи) або частково задіяний той, що керує головними процесами роботи екструзійної лінії:

- керування температурними режимами нагрівання зон матеріального циліндра та екструзійної головки;
- температурними режимами охолодження полімерного профілю на виході з головки екструдера;
- швидкістю обертання черв'яка екструдера;
- швидкістю відведення екструдованого профілю з робочої зони екструзії;
- іншими процесами аварійних, або нештатних ситуацій, що можуть виникати при роботі обладнання.

Згідно схемі на рис. 2, мікроконтролер опитує стан датчиків D1, D2, D3, що контролюють рівні наповнення бункерів. І в залежності від їх стану подає команди на увімкнення або вимкнення електродвигуна шнекового живильника.

З панелі керування здійснюється увімкнення/вимкнення системи завантаження, а також може задаватись швидкість обертання шнеку живильника залежно від використовуваного матеріалу і продуктивності процесу екструзії.

Для створення програми, що керує роботою мікроконтролера системи завантаження екструдера було розроблено алгоритм її роботи, який представлено на рис. 3.

Згідно розробленому алгоритму система завантаження екструдера працює наступним чином.

Вмикається живлення всіх блоків і агрегатів екструдерної лінії. Мікроконтролер, згідно програми опитує стан всіх датчиків, що встановлені в бункерах екструдера.

Якщо стан датчика великого бункера  $D1=0$ , то це свідчить про наявність в ньому матеріалу, якщо ні ( $D1=1$ ), то мікроконтролер дає команду на увімкнення звукового або світлового сигналу про необхідність його наповнення.

В процесі роботи мікроконтролером постійно оцінюється стан датчика наповнення робочого бункера D3. Якщо  $D3=1$ , то рівень матеріалу в бункері недостатній то подається команда на увімкнення двигуна шнекового живильника і відбувається наповнення робочого бункера екструдера матеріалом.

Процес наповнення робочого бункера триває до тих пір доки стан другого датчика (верхнього рівня) не становитиме  $D2=0$ . Тоді подається команда на вимкнення електродвигуна шнекового живильника.

Після зупинення подачі матеріалу живильником в робочий бункер продовжується процес контролю стану датчиків D1, D3.

Процес нормальної роботи екструдера продовжується до тих пір доки не відбудеться зміна стану одного з датчиків.

Були розроблені оптичні датчики системи завантаження екструдера на основі шнекового живильника. Ці датчики мають переваги:

- висока роздільна здатність і точність при роботі з будь-якими матеріалами (матовими, блискучими, світлими і темними поверхнями);
- висока надійність вимірювань навіть при сильній контрастності;
- портативність габаритних розмірів датчиків.

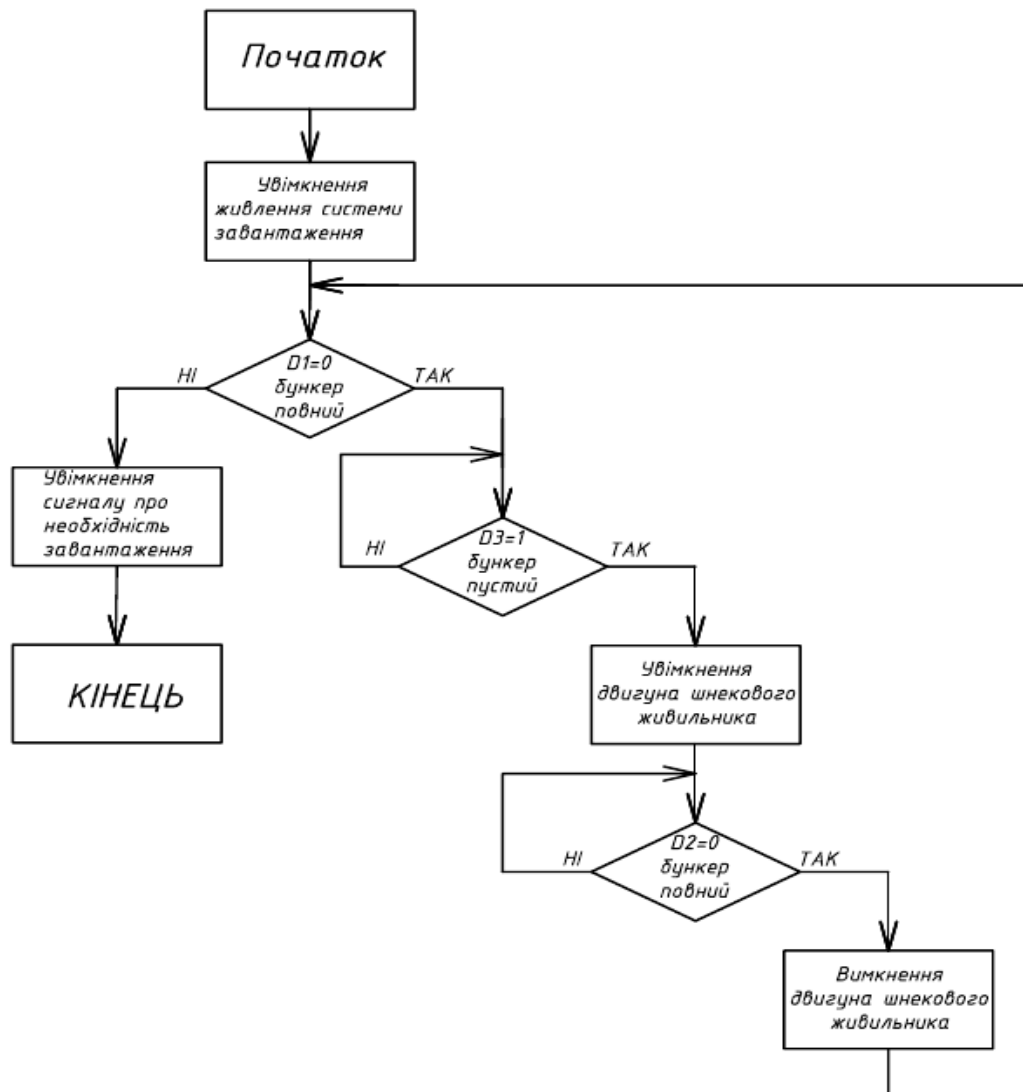


Рис. 3. Алгоритм роботи системи завантаження екструдера

Необхідність розробки конструкції чутливого елемента оптичного датчика, що встановлюється в бункері екструдера обумовлена наступними особливостями його роботи:

- світловий потік оптичної пари повинен перериватись тільки тоді, коли рівень гранульованого полімеру досягне певного значення;
- оптична пара датчика повинна бути захищена від випадкових переривань світлового потоку падаючими гранулами матеріалу, що подається в бункер шнековим живильником.

Запропоновано конструкцію чутливого елемента оптичного датчика, що представлена на рис. 4.

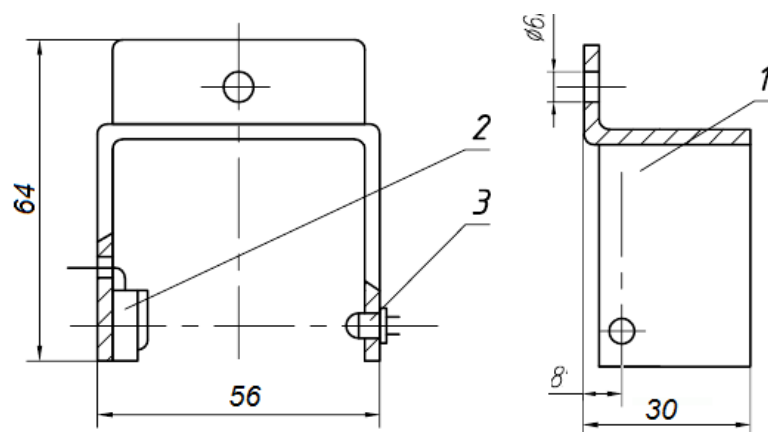


Рис. 4. Складальний кресленник чутливого елемента оптичного датчика для контролю рівня полімерних гранул в бункері екструдера: 1 – кронштейн; 2 – інфрачервоний фотоелемент; 3 – інфрачервоний світлодіод

Кронштейн 1 (рис. 4) виготовлений з алюмінієвого або сталюого листа товщиною 3 мм.

Конструкція датчика передбачає закріплення інфрачервоного фотоелементу 2 і інфрачервоного світлодіоду 3 у відповідних позиціях на кронштейні 1 за допомогою клею, наприклад епоксидної смоли.

Чутливі елементи кріпляться на внутрішній бічній поверхні бункерів за допомогою гвинтів М6.

Завдяки такій конструкції чутливого елемента гранули матеріалу потрапляють в чутливий оптичний проміжок тільки при наповненні і спустошенні бункера.

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. З метою удосконалення системи завантаження екструдера розроблено структурну схему системи завантаження екструдера і алгоритм роботи розробленої системи, який може бути основою для розробки програмного забезпечення мікроконтролера.

2. Розроблено конструкцію і запропоновано електричну схему оптичних датчиків системи завантаження екструдера на основі шнекового живильника.

### Література

1. <http://uk.plasticextrusion.net/product/pvc-pipe-extrusion-machine>
2. Коваленко І.В. Основні процеси, машини та апарати хімічних виробництв : підручник / І.В. Коваленко, В.В. Малиновський. – Київ : Інрес : Воля, 2005.
3. Коваленко І.В. Розрахунки основних процесів, машин та апаратів хімічних виробництв : навч. посіб. / І.В. Коваленко, В.В. Малиновський. – Київ : Норіта-плюс, 2007. – 104 с.
4. Гвинтовий живильник–дозатор : Заявка на винахід № UA 53988 А Україна, МПК В65G 33/24, В65G 33/26 / Д.Л. Радик, В.В. Васильків – Опубл. 17.02.2003
5. Гвинтовий транспортер для дозованого транспортування сипких матеріалів : Заявка на патент № UA 27245 С2 Україна, МПК В65G 33/14 / Валлнер Фелікс (АТ), Кепплінгер Леопольд Вернер (АТ), Бьом Христиан (АТ). – Опубл. 15.08.2003.
6. Андрейко С.В. Особливості конструкції гвинтового живильника з гвинтом з еластичними пластинами / С.В. Андрейко, І.О. Казак // Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки : зб. наук. праць за матеріалами XI Всеукр. наук.-практ. конф. (Київ, 4-5 червня 2020 р.). – К. : НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2020. – С. 50-51.
7. <https://polymers.com.ua/>
8. <https://dalgakiran.ua/uk/statti/ekstruzijni-liniyi-dlya-virobnitstva-vsih-vidiv-polimernih-trub/>
9. Рубанка М. М. Відходи легкої промисловості, способи переробки та області подальшого використання / М. М. Рубанка, В. П. Місяць // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2015. – № 4 (88). – С. 34-39.
10. Рубанка М. М. Способи переробки і області подальшого використання відходів матеріалів швейної промисловості / М. М. Рубанка // Легка промисловість. – 2017. – № 2. – С. 48-55.
11. Misiats O. Determination of bulk density of mixtures of fractions of crushed polymeric materials / O. Misiats, V. Misiats, M. Rubanka, A. Polishchuk, M. Skyba // Actual problems of modern science : monograph / edited by S. Matiukh, M. Skyba, J. Musial, O. Polishchuk. – Bydgoszcz, Poland : Bydgoszcz University of Science and Technology, 2021. – P. 462-466.

### References

1. <http://uk.plasticextrusion.net/product/pvc-pipe-extrusion-machine>
2. Kovalenko I.V. Osnovni protsesy, mashyny ta aparaty khimichnykh vyrobnytstv : pidruchnyk / I.V. Kovalenko, V.V. Malynovskyi. – Kyiv : Inres : Volia, 2005.
3. Kovalenko I.V. Rozrakhunki osnovnykh protsesiv, mashyn ta aparativ khimichnykh vyrobnytstv : navch. posib. / I.V. Kovalenko, V.V. Malynovskyi. – Kyiv : Norita-plus, 2007. – 104 c.
4. Hvyntovyi zhyvylnyk–dozator : Zaiavka na vynakhid № UA 53988 A Ukraina, MPK B65G 33/24, B65G 33/26 / D.L. Radyk, V.V. Vasylykiv – Opubl. 17.02.2003
5. Hvyntovyi transporter dlia dozovanoho transportuvannya sypanykh materialiv : Zaiavka na patent № UA 27245 C2 Ukraina, MPK B65G 33/00, B65G 33/14 / Vallnier Feliks (AT), Kepplinher Leopold Verner (AT), Bom Khrystyan (AT). – Opubl. 15.08.2003.
6. Andreiko S.V. Osoblyvosti konstruktzii hvyntovoho zhyvylnyka z hvyntom z elastychnymy plastynamy / S.V. Andreiko, I.O. Kazak // Efektyvni protsesy ta obladnannya khimichnykh vyrobnytstv ta pakovalnoi tekhniki : zb. nauk. prats za materialamy XI Vseukr. nauk.-prakt. konf. (Kyiv, 4-5 chervnia 2020 r.). – K. : NTUU «KPI imeni Ihoria Sikorskoho», 2020. – S. 50-51.
7. <https://polymers.com.ua/>
8. <https://dalgakiran.ua/uk/statti/ekstruzijni-liniyi-dlya-virobnitstva-vsih-vidiv-polimernih-trub/>
9. Rubanka M. M. Vidkhody lehkoï promyslovosti, sposoby pererobky ta oblasti podalshoho vykorystannia / M. M. Rubanka, V. P. Misiats // Visnyk Kyivskoho natsionalnogo universytetu tekhnolohii ta dyzainu. – 2015. – № 4 (88). – С. 34-39.
10. Rubanka M. M. Sposity pererobky i oblasti podalshoho vykorystannia vidkhodiv materialiv shveinoï promyslovosti / M. M. Rubanka // Lehka promyslovist. – 2017. – № 2. – С. 48-55.
11. Misiats O. Determination of bulk density of mixtures of fractions of crushed polymeric materials / O. Misiats, V. Misiats, M. Rubanka, A. Polishchuk, M. Skyba // Actual problems of modern science : monograph / edited by S. Matiukh, M. Skyba, J. Musial, O. Polishchuk. – Bydgoszcz, Poland : Bydgoszcz University of Science and Technology, 2021. – P. 462-466.



<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-105-110>

УДК 519.6:001.5

**КРАВЦОВ Андрій**

Державний біотехнологічний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3103-6594>e-mail: [kravcov\\_84@ukr.net](mailto:kravcov_84@ukr.net)**ЛЕВКІН Дмитро**

Державний біотехнологічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-1980-4426>e-mail: [dimallevkin23@gmail.com](mailto:dimallevkin23@gmail.com)**БЕРЕЖНА Наталія**

Державний біотехнологічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-8740-3387>e-mail: [bereg\\_nat@ukr.net](mailto:bereg_nat@ukr.net)**ЛЕВКІН Артур**

Державний біотехнологічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-5021-5366>e-mail: [levkinar26@gmail.com](mailto:levkinar26@gmail.com)

## МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО ПОБУДОВИ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ БІООБ'ЄКТОВИХ ЗАДАЧ

В статті розроблена методика до математичного моделювання біотехнологічних систем, які містять джерела лазерної дії. В її основу покладені розрахункові та оптимізаційні математичні моделі для пошуку раціональних значень технічних параметрів випромінювачів. Авторами досліджені основні аспекти теорії аналізу і синтезу складних систем, які містять зосереджені, рухомі джерела фізичних полів. Для забезпечення життєздатності клітин зародків потрібний особливо ретельний контроль рівня нагріву зародків не лише в найближчих до місця лазерного розтину точках, а також і в момент завершення лазерної дії. Слід також відзначити, що після закінчення короткочасної дії лазерного випромінювання, потік тепла від межі розтину ембріона переходить в інші його частини. Нестационарний процес теплового розподілу триватиме допоки не встановиться стаціонарний режим, необхідний для підтримки життєздатності ембріона.

Через особливості мікробіологічного об'єкта автори здійснюють математичне моделювання нестационарної, нелінійної, багатовимірної біотехнологічної системи, яка містить дискретне, рухоме джерело лазерної дії. Досить складно здійснити реалізацію прикладних оптимізаційних математичних моделей, які застосовуються для оптимізації модельованої системи. Тому доцільно отримати наближені розв'язки крайових задач з усередненими значеннями теплофізичних параметрів лазерних випромінювачів і без врахування тришарової будови ембріона. Для підвищення рівня життєздатності клітин зародків автори пропонують реалізувати прикладну оптимізаційну математичну модель мінімізації відхилення температури лазерної дії від свого припустимого значення. Це дозволить отримати раціональні технічні параметри випромінювачів, які наближаються до дійсності і задовольняють потребам технічного використання лазерних випромінювачів.

Ключові слова: математичне моделювання, оптимізація, біотехнологічні системи, крайові задачі.

KRAVTSOV Andrii, LEVKIN Dmytro, BEREZHNA Natalija, LEVKIN Artur  
State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine

## METHODOLOGICAL APPROACH TO THE MATHEMATICAL MODELS CONSTRUCTION OF BIOOBJECT PROBLEMS

This article reveals a technique for the mathematical modeling of biotechnological systems that contain sources of laser action. Calculation and optimization mathematical models for finding rational values of the technical parameters of the emitters are the basis for this. The authors researched the main aspects of the theory of analysis and synthesis of complex systems that contain concentrated, moving sources of physical fields. To ensure the viability of embryo cells, it is necessary to carefully monitor the level of embryo heating not only at the points closest to the laser dissection site but also at the end of the laser action. It should also be noted that at the end of the short-term effect of laser radiation, the flow of heat from the border of the embryo dissection passes to other parts of it. The non-stationary process of thermal distribution will occur until a stationary mode is established, which is necessary to maintain the viability of the embryo.

Due to the peculiarities of the microbiological object, the authors perform mathematical modeling of a non-stationary, nonlinear, multidimensional biotechnological system, which contains a discrete, moving source of laser action. It is quite difficult to implement applied optimization mathematical models that are used to optimize the modeled system. Therefore, it is advisable to obtain approximate solutions to boundary value problems with averaged values of thermophysical parameters of laser emitters without considering the three-layer structure of the embryo. To increase the level of viability of germ cells, the authors propose to implement an applied optimization mathematical model for minimizing the deviation of the temperature of laser action from its acceptable value. This will make it possible to obtain rational technical parameters of the emitters, which are close to reality and satisfy the needs of the technical use of laser emitters.

Keywords: mathematical modeling, optimization, biotechnological systems, boundary value problems.

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

В основу більшості практично застосовуваних автоматизованих систем контролю покладений метод безпосереднього порівняння з еталоном. При цьому, еталоном може бути як і окремий об'єкт, що сканується одночасно з контрольованим об'єктом, так, і масив задалегідь записаної в пам'ять комп'ютера інформації. Методи відбору необхідної інформації при автоматичному аналізі мікрозображень можуть відноситися до

двох основних груп: приладові і машинні. Приладові методи припускають використання різних оптичних пристроїв, які дають змогу виділити відмінності на контрольованому об'єкті або методом амплітудної фільтрації (шляхом порівняння зображень, ділянок або точок контрольованої і еталонної структур), або методом просторової фільтрації, або шляхом прямого аналізу дифракційного зображення контрольованого об'єкту (при цьому, використовується та обставина, що світло по різному дифрагує на різних ділянках). Машинні методи контролю припускають використання спеціалізованих або універсальних комп'ютерів, які працюють на основі апріорних відомостей про оптимальні властивості контрольованого об'єкту і оброблених зображення за допомогою деяких алгоритмів. При цьому, аналізоване зображення об'єкту заздалегідь перетворюється в цифрову форму з використанням телевізійних систем або сканованих фотоелектричних перетворювачів зображення.

На відміну від приладових, машинні методи дозволяють контролювати будь-які розбіжності контрольованого і еталонного зображень, окрім того, машинні методи можуть здійснити аналіз отриманої інформації, забезпечити її статистичну обробку і дати рішення про якість об'єкту. Можливості машинних методів перевершують приладові і на їх основі можуть бути створені повністю автоматичні системи, які не вимагають участі людини на стадії класифікації дефектів і ухвалення рішень. Усі машинні методи можуть бути реалізовані на основі евристичної або математичної обробки зображень, тим або іншим способом введені на комп'ютерах.

Евристичний метод припускає використання алгоритмів на основі деяких апріорних відомостей про відмінності між дефектами і структурою об'єкту. Математичний метод в спроможності використати алгоритм розпізнавання двовимірних зображень на основі перетворень Фур'є, при цьому, на комп'ютері порівнюються спектри контрольованого і бездефектного зображень. При чому, якщо інформація про еталонне зображення записана в пам'яті комп'ютера і робиться поточкове порівняння з нею інформації про контрольоване зображення, що отримується за допомогою будь-якої або оптичної сканованої системи, то це вимагає значного об'єму пам'яті.

В статті наведена методика до побудови математичних моделей для мікробіологічного об'єкта (ембріона) під дією сканованих джерел лазерного випромінювання. Для оцінки рівня життєздатності клітин зародків в статті запропоновано реалізувати прикладну оптимізаційну математичну модель мінімізації ухилень значень лазерної дії на ембріон від критично можливих значень. Це дозволить за рахунок використання методу кластерного аналізу підвищити якість біотехнологічного процесу лазерного поділу ембріона.

### Аналіз досліджень та публікацій

Здійснивши всебічний аналіз особливостей чисельних методів, які застосовують для розпізнавання компонентів складних речовин в умовах невизначеності, авторами публікації [1] розв'язані прикладні задачі оптимізації керуючих параметрів технічних систем. З метою зменшення негативного впливу на довкілля в публікаціях [2, 3] досліджені основні аспекти застосування програмних засобів для розв'язання задач стійкого розвитку та прийняття управлінських рішень при проектуванні екологічних систем. Для дослідження динаміки перебігу екологічної ситуації на певній території здійснений моніторинг техногенного навантаження та виникнення можливих ризиків [3]. Отримані в публікаціях [4, 5] вирази для розрахунку критеріїв міцності трибосистем дали змогу її авторам визначити межі стійкості роботи різних конструкцій трибосистем.

Авторами публікації [6] визначені та всебічно обґрунтовані умови побудови коректних крайових задач для систем нелінійних диференціальних рівнянь. Визначені умови керованості та наближеної керованості для складних систем [7, 8]. В публікаціях [9, 10] розв'язана задача впровадження науково-технічних інновацій для забезпечення ефективного розвитку сільськогосподарських підприємств в умовах ринкової економіки. Обґрунтувавши теоретичні, методичні та практичні засади управління розвитком підприємства, авторами публікації [11, 12] сформований організаційно-економічний механізм стабільного розвитку сільськогосподарських підприємств в умовах ринкової економіки.

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є запропонувати методику до побудови математичних моделей біоб'єктових задач і оцінки рівня життєздатності клітин зародків ембріона.

### Виклад основного матеріалу

В автоматизованій системі визначення життєздатності ембріонів порівнюються зображення однієї і тієї ж ділянки з інтервалом в 1-3 хвилини. Принцип роботи системи базується на зміні світлопроникнення окремих ділянок живого ембріона, так званих активних зон, пов'язаний з випадковим подрібненням окремих клітин зародків, виникненням і збільшенням бластополости всередині ембріона, протіканням різних біохімічних процесів. Для аналізу власних зображень і визначення характеристик, які визначають життєздатність ембріонів, використана розрахункова математична модель процесу лазерної дії на ембріон:

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \lambda \Delta T(x, y, z, t) + P(x, y, z, t), \quad (1)$$

де  $T(x, y, z, t)$  – температурне поле;

$x, y, z$  – просторові змінні;

$t$  – координата часу;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;

$P(x, y, z, t)$  – функція розподілу джерела енергії лазерної дії:

$$P(x, y, z, t) = \begin{cases} P(x, y, z, t), & \text{якщо } (x, y, z) \in \Omega, t \in [0; T]; \\ 0, & \text{якщо } (x, y, z) \notin \Omega, t \notin [0; T], \end{cases} \quad (2)$$

де  $\Omega$  – область дії джерела випромінювання;

$T$  – час дії.

Початкова умова:

$$T(x, y, z, 0) = T(x, y, z). \quad (3)$$

Гранична умова теплообміну з навколишнім середовищем:

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial v_{01}} + h_{01}(x, y, z)T(x, y, z, t) = T_{01}, \quad (4)$$

де  $v_{01}$  – напрямок до нормалі;

$h_{01}$  – коефіцієнт теплообміну.

Рівності розділу між зовнішньою оболонкою ембріона та навколишнім середовищем:

$$\lambda_3 \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial v_3} = \lambda_4 \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial v_4}, \quad (5)$$

де  $\lambda_3, \lambda_4$  – коефіцієнти теплопровідності зовнішньої оболонки ембріона та навколишнього середовища.

З урахуванням сферичної форми ембріона, в загальному випадку, крайова задача (1)–(5):

$$\rho c \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T(\vec{r}, t)) + q(\vec{r}, t), \quad (6)$$

де  $q(\vec{r}, t)$  – функція розподілу джерела енергії термічної дії.

Граничні умови на початку та наприкінці дії лазерного променя:

$$\begin{cases} T(\vec{r}, t) \Big|_{t=t_0}^{z=z_0} = T_0; \\ T(\vec{r}, t) \Big|_{t=t_N}^{z=z_N} = T_N. \end{cases} \quad (7)$$

Граничні умови теплового потоку:

$$\left( \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} - A(T_1 - T_{ext}) \right) \Big|_{r=R} = 0, \quad (8)$$

де  $\lambda_1$  – коефіцієнт зовнішньої оболонки ембріона;

$A$  – параметр тепловіддачі зовнішньої оболонки ембріона;

$T_1, T_{ext}$  – температури зовнішньої оболонки ембріона та навколишнього середовища.

Будемо шукати розв'язок крайової задачі (6)–(8) у виді ряду:

$$T(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n(t) \frac{1}{r} \sin \frac{\pi nr}{R}. \quad (9)$$

Підставимо  $T(r, t)$  з рівності (9) в диференціальне рівняння (6):

$$b'_n(t) + B_n b_n = \frac{2}{R \rho c} \int_0^R r q(r, t) \sin \left( \frac{\pi nr}{R} \right) dr, \quad (10)$$

де  $B_n = \left( \frac{an^2 \pi^2}{R^2} \right)$ .

$$T(r, t) = \frac{2}{r \pi \rho c} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \left( \frac{\pi nr}{R} \right) F_n(r, t), \quad (11)$$

де функція  $F_n(r, t)$ :

$$F_n(r, t) = \int_0^t e^{-A_n(t-u)} \int_0^R r q(r, u) \sin \left( \frac{\pi nr}{R} \right) dr du. \quad (12)$$

З урахуванням сферичної форми ембріона, математична модель (6)–(8):

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{q(\vec{r}, t)}{\rho c}, \quad (13)$$

де  $T = T(\vec{r}, t)$  – температурне поле;

$\vec{r}$  – глибина проникнення лазерного променя в ембріон;

$t$  – час лазерної дії;

$a = \frac{\lambda}{\rho c}$  – коефіцієнт теплопровідності;

$q(\vec{r}, t)$  – густина потужності лазерної дії:

$$q(\vec{r}, t) = \begin{cases} q_0, \text{ при } \vec{r} \in [0; r_0], t \in [0; T]; \\ 0, \text{ при } \vec{r} \notin [0; r_0], t \notin [0; T]. \end{cases} \quad (14)$$

Граничні умови теплообміну зовнішньої оболонки ембріона з навколишнім середовищем:

$$\begin{cases} T(\vec{r}, t)|_{r=r_0} = 0; \\ T(\vec{r}, t)|_{r=R} = 0. \end{cases} \quad (15)$$

Для контролю теплового потоку застосовані граничні умови (8).

Коректність наведених крайових задач обґрунтована завдяки виконанню спеціалізованих умов та обмежень на символи псевдодиференціальних операторів в публікаціях [13, 14]. Використовуючи метод відокремлених змінних, шукатимемо розв'язок диференціального рівняння (13) в наступному виді:

$$T(r, t) = u(r)v(t) = e^{ct} \sum_{k=0}^{\infty} c_k r^{k-1}. \quad (16)$$

Підставивши рівність (16) в диференціальне рівняння (13), отримаємо:

$$v'(t)u(r) - av(t)(u''(r) + \frac{2}{r}u'(r)) = 0. \quad (17)$$

Використавши результати публікацій [14, 15], отримали розв'язок диференціального рівняння (13):

$$T(r, t) = 100e^{ct} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{c^k r^{2k}}{a^k ((2k+1)!!)^2} - \frac{q_e}{6a} r^2 g(t). \quad (18)$$

Для оцінки життєздатності клітин зародків застосуємо метод кластерного аналізу, який полягає в

наступному: від матриці вихідних даних  $X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} & x_{44} \end{pmatrix}$  переходимо до матриці  $Z$  нормованих

значень з елементами:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j}, \quad (19)$$

де  $\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}$  – середнє арифметичне,  $j = 1, 2, 3, 4$ ;

$i = 1, \dots, n$  – номери спостережень;

$$s_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}.$$

Відстань між двома спостереженнями  $z_i$  і  $z_v$ :

$$\rho_{BE}(z_i, z_v) = \sqrt{\sum_{e=1}^n w_e (z_{ie} - z_{ve})^2}, \quad (20)$$

де  $w_e$  – всі показники,  $0 < w_e \leq 1$ .

Запишемо отримані значення у виді матриці відстані:

$$R = \begin{pmatrix} 0 & \rho_{12} & \dots & \rho_{1n} \\ \rho_{21} & 0 & \dots & \rho_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_{n1} & \rho_{n2} & \dots & 0 \end{pmatrix}. \quad (21)$$

Використовуючи матрицю відстані, можна реалізувати алгомеративну ієрархічну процедуру кластерного аналізу. За відстанню між кластерами візьмемо відстань між найближчими елементами або між найбільш віддаленими елементами. Для мінімізації рівня травмованості клітин зародків автори пропонують

реалізувати прикладну оптимізаційну математичну модель мінімізації різниці між значеннями температури лазерного нагріву ембріона і їх припустимими значеннями. Інший приклад розв'язання задач синтезу і аналізу біотехнологічних систем для підвищення якості отриманого з надою молока наведений в статті [16].

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У статті досліджені деякі аспекти здійснення параметризації температурного поля ембріона під дією зосереджених, сканованих джерел лазерного випромінювання. Через нестандартну форму ембріона та технічні особливості джерел термічного навантаження досить складно отримати точний аналітичний розв'язок крайової задачі процесу лазерної дії на ембріон. Тому, в статті наведена методика математичного моделювання для розв'язання біооб'єктові задачі лазерного ділення ембріона без врахування його багаточислової внутрішньої будови. Для підвищення якості біотехнологічного процесу автори пропонують реалізувати прикладну оптимізаційну модель мінімізації відхилення температурного поля в ембріоні від наперед заданого припустимого значення.

### Література

1. Любченко В.А. Распознавание структуры сложных веществ в условиях неопределенности / В.А. Любченко, Е.П. Путятин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 2/9. – С. 32–34.
2. Попов О.О. Кількісний аналіз стану довкілля на техногенно забруднених територіях / О.О. Попов, А.В. Яцишин, В.О. Артемчук // Моделювання та інформаційні технології. – 2014. – Вип. 73. – С. 3–16.
3. Попов О. Нові підходи та геоінформаційні засоби вирішення екологічних задач техногенно-навантажених територій / О. Попов, А. Яцишин, В. Артемчук, В. Коваленко // Інформаційні технології та суспільство. – 2021. – Т. 1. Вип. 1. – С. 23–33. – <https://doi.org/10.32689/maup.it.2021.1.3>
4. Aulin V. Influence of high-modulus filler content on critical load on tribocouples made of microheterophase polymer composite materials. / Aulin V., Lysenko S., Hrynkiv A., Derkach, O., Makarenko D. // Problems of Tribology. – 2022. – Vol. 27. № 2/104. – P. 71–79. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-104-2-71-79>
5. Voitov A. Experimental verification between the functioning of tribosystems in the conditions of boundary lubrication. Problems of Tribology. 2022. Vol. 27. № 1/103. P. 41–49. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-103-1-41-49>
6. Andreieva D.N. [On constructing single-input non-autonomous systems of full rank.](#) / D.N. Andreieva, S.Yu. Ignatovich // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія: «Математика, прикладна математика і механіка». – Том. 88. – 2018. – С. 35–43. – DOI: 10.26565/2221-5646-2018-88-04
7. Fardigola L., Khalina K. [Controllability Problems for the Heat Equation in a Half-Plane Controlled by the Dirichlet Boundary Condition with a Point-Wise Control.](#) Journal of mathematical physics, analysis, geometry. 2022. Vol. 18. № 1. P. 75–104. – <https://doi.org/10.15407/mag18.01.075>
8. Fardigola L., Khalina K. [Reachability and Controllability Problems for the Heat Equation on a Half-Axis.](#) Journal of mathematical physics, analysis, geometry. 2019. Vol. 15. №. 1. P. 57–78. <https://doi.org/10.15407/mag15.01.057>
9. Davydenko N., Ivanko A., Nehoda Y., Titenko Z. [Prognostication of Financial Providing of Innovative Activities of Enterprises.](#) Distributed Sensing and Intelligent Systems. Springer, Cham., 2022. P. 241–250.
10. Суска А.А. Удосконалення системи управління ризиками на підприємстві / А.А. Суска, Т.М. Харченко // Вісник Харківського національного аграрного університету ім. В.В. Докучаєва. Серія: «Аграрні науки». – Харків, 2019. – № 2. – С. 254–263.
11. Levkina R. The formation of organizational-economic mechanism for stable development of agricultural enterprises. Technology Audit and Production Reserves. 2013. Vol. 5. № 3(13). P. 16–18. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2013.18518>
12. Котко Я.М. Механізм управління розвитком підприємств-виробників продукції рослинництва. / Я.М. Котко // Український журнал прикладної економіки. – 2020. – Т. 5. № 3. – С. 387–394. <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2020-3-43>
13. Макаров А.А. Задача Коши для экспоненциально-корректных псевдодифференциальных операторов / А.А. Макаров, Д.А. Левкин // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія: «Математика, прикладна математика і механіка». – 2011. – Вип. 64. № 990. – С. 42–47.
14. Мегель Ю.Е. Математическая модель теплового нагрева многослойного микробиологического объекта / Ю.Е. Мегель, Д.А. Левкин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 3/4 (57). – С. 4–8.
15. Кравцов А.Г. Методика контролю можливих ризиків у розв'язанні прикладних задач / А.Г. Кравцов, Д.А. Левкін, Н.Г. Бережна // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: «Технічні науки». – Хмельницький, 2022. – Issue. 1. Vol. 305. – С. 124–127. – DOI 10.31891/2307-5732-2022-305-1-124-127
16. Palii A.P., Mihalchenko S.A., Chechui H.F. Milking and udder health assesment in industrial farming. Ukrainian journal of Ecology. [Vol. 10. Issue. 2.](#) P. 375–381. – DOI: [10\\_15421/2020\\_112](#)

## References

1. Ljubchenko V.A. Raspoznavanie struktury slozhnykh veshchestv v usloviyakh neopredelennosti / V.A. Ljubchenko, E.P. Putjatin // Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovykh tehnologij. – 2011. – № 2/9. – S. 32–34.
2. Popov O.O. Kilkisnyi analiz stanu dovkillia na tekhnohenno zabrudnenykh terytoriiakh / O.O. Popov, A.V. Yatsyshyn, V.O. Artemchuk // Modeliuvannia ta informatsiini tekhnolohii. – 2014. – Vyp. 73. – S. 3–16.
3. Popov O. Novi pidkody ta heoinformatsiini zasoby vyryshennia ekolohichnykh zadach tekhnohenno-navantazhenykh terytorii / O. Popov, A. Yatsyshyn, V. Artemchuk, V. Kovalenko // Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo. – 2021. – T. 1. Vyp. 1. – S. 23–33. – <https://doi.org/10.32689/maup.it.2021.1.3>
4. Aulin V. Influence of high-modulus filler content on critical load on tribocouples made of microheterophase polymer composite materials. / Aulin V., Lysenko S., Hrynkiv A., Derkach, O., Makarenko D. // Problems of Tribology. – 2022. – Vol. 27. № 2/104. – Pp. 71–79. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-104-2-71-79>
5. Voitov A. Experimental verification between the functioning of tribosystems in the conditions of boundary lubrication. Problems of Tribology. 2022. Vol. 27. № 1/103. P. 41–49. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-103-1-41-49>
6. Andreieva D.N. On constructing single-input non-autonomous systems of full rank. / D.N. Andreieva, S.Yu. Ignatovich // Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V.N. Karazina. Serii: «Matematyka, prykladna matematyka i mekhanika». – Tom. 88. – 2018. – S. 35–43. – DOI: 10.26565/2221-5646-2018-88-04
7. Fardigola L., Khalina K. Controllability Problems for the Heat Equation in a Half-Plane Controlled by the Dirichlet Boundary Condition with a Point-Wise Control. Journal of mathematical physics, analysis, geometry. 2022. Vol. 18. № 1. R. 75–104. – <https://doi.org/10.15407/mag18.01.075>
8. Fardigola L., Khalina K. Reachability and Controllability Problems for the Heat Equation on a Half-Axis. Journal of mathematical physics, analysis, geometry. 2019. Vol. 15. № 1. P. 57–78. <https://doi.org/10.15407/mag15.01.057>
9. Davydenko N., Ivanko A., Nehoda Y., Titenko Z. Prognostication of Financial Providing of Innovative Activities of Enterprises. Distributed Sensing and Intelligent Systems. Springer, Cham., 2022. P. 241–250.
10. Suska A.A. Udoskonalennia systemy upravlinnia ryzykamy na pidpriemstvi / A.A. Suska, T.M. Kharchenko // Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu im. V.V. Dokuchaieva. Serii: «Ahrarni nauky». – Kharkiv, 2019. – № 2. – S. 254–263.
11. Levkina R. The formation of organizational-economic mechanism for stable development of agricultural enterprises. Technology Audit and Production Reserves. 2013. Vol. 5. № 3(13). P. 16–18. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2013.18518>
12. Kotko Ya.M. Mekhanizm upravlinnia rozvytkom pidpriemstv-vyrobnykiv produktsii roslynnytstva. / Ya.M. Kotko // Ukrainyskij zhurnal prykladnoi ekonomiky. – 2020. – T. 5. № 3. – S. 387–394. <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2020-3-43>
13. Makarov A.A. Zadacha Koshi dlja jeksponencial'no-korrektnykh psevdodifferencial'nykh operatorov / A.A. Makarov, D.A. Levkin // Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V.N. Karazina. Serii: «Matematyka, prykladna matematyka i mekhanika». – 2011. – Vyp. 64. № 990. – S. 42–47.
14. Megel' Ju.E. Matematicheskaja model' teplovogo nagreva mnogoslujnogo mikrobiologicheskogo ob'ekta / Ju.E. Megel', D.A. Levkin // Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovykh tehnologij. – 2012. – № 3/4 (57). – S. 4–8.
15. Kravtsov A.G. Metodyka kontroliu mozhlyvykh ryzykiv u rozviazanni prykladnykh zadach. / A.G. Kravtsov, D.A. Levkin, N.G. Berezhna. // Herald of Khmelnytskyi National University. – Khmelnytskyi, 2022. – Issue. 1. Vol. 305. – S. 124–127. – DOI 10.31891/2307-5732-2022-305-1-124-127
16. Pali A.P., Mihalchenko S.A., Chechui H.F. Milking and udder health assesment in industrial farming. Ukrainian journal of Ecology. Vol. 10. Issue. 2. P. 375–381. – DOI: 10\_15421/2020\_112

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-111-117>

УДК 004.5

**КРАВЧЕНКО Світлана**

Державний університет «Житомирська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-5895-9615>e-mail: [sveta@ztu.edu.ua](mailto:sveta@ztu.edu.ua)**МАРЧУК Галина**

Державний університет «Житомирська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0003-2954-1057>e-mail: [mgv.555.mgv@gmail.com](mailto:mgv.555.mgv@gmail.com)**ЛОКТИКОВА Тамара**

Державний університет «Житомирська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-3525-0179>e-mail: [tamlukt@ukr.net](mailto:tamlukt@ukr.net)**ГРИШКУН Євгеній**

Державний університет «Житомирська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-9996-2167>e-mail: [evgenii2081991@gmail.com](mailto:evgenii2081991@gmail.com)

## МЕТОДИ ЮЗАБІЛІТІ-ТЕСТУВАННЯ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ МОБІЛЬНОГО ДОДАТКУ

Проводячи дослідження з метою вивчення зручності веб-сторінки, користувацького інтерфейсу чи пристрою для його подальшого масового використання, використовується тестування на зручність (юзабіліті-тестування). Юзабіліті-тест допомагає знайти найкраще рішення інтерфейсу зі всіх напрацювань, а також перевірити придатність ресурсу для користувачів з різних країн, коли, наприклад, передбачено перемикання мов.

В роботі проаналізовано різні методи юзабіліті-тестування, на зручність використання веб-сайтів, додатків та інших інтерфейсів. Визначені основні етапи UX тестування та сценарій для опитування респондентів.

В даній статті представлено методи і оцінки тестування показників якості програмного продукту. Об'єктом дослідження є usability тестування, як взаємодія з програмним продуктом, його сприйняття цільовою аудиторією і оцінювання якості і визначення критеріїв оцінки юзабіліті мобільного додатку для iOS купівлі електронного квитка для туристичних подорожей.

В результаті UX-тестування виявляються слабкі місця інтерфейсу, що викликають утруднення у користувачів і невідповідність інтерфейсу їх очікуванням. За результатами тестування розробники допрацьовують продукт і доводять його до оптимальних вимог користувача.

Було проведено тестування зручності користування за допомогою опитування респондентів без участі модератора. Розроблено схему для покрокової реалізації тестування. Використовуючи шкалу Лейкерта, здійснено оцінювання додатку за допомогою опитувальника, який включає п'ять факторів: здатність до навчання, ефективність, запам'ятовування, помилки та задоволення. Був представлений результат за кожним критерієм і загальний показник зручності використання мобільного додатку.

Ключові слова: Usability-тестування, User Experience, UI, додаток, методи, сценарій, завдання, критерії.

KRAVCHENKO Svitlana, MARCHUK Galina, LOKTIKOVA Tamara, GRISHKUN Yevgenii  
State University «Zhytomyr polytechnic»

## USABILITY TESTING METHODS FOR ASSESSING A MOBILE APPLICATION

When conducting research to study the usability of a web page, user interface or device for its further mass use, usability testing is used. The usability test helps to find the best solution of the interface from all efforts, as well as to check the suitability of the resource for users from different countries, when, for example, language switching is provided. The work analyzes various methods of usability testing for the ease of use of websites, applications and other interfaces. The main stages of UX testing and the scenario for interviewing respondents are defined.

This article presents methods and evaluations of software product quality indicators testing. The object of the study is usability testing, as interaction with the software product, its perception by the target audience and quality assessment and determination of criteria for evaluating the usability of the mobile application for iOS for purchasing an electronic ticket for tourist trips. As a result of UX-testing, the weak points of the interface are revealed, which cause difficulties for users and the inconsistency of the interface with their expectations. Based on the results of testing, the developers refine the product and bring it to the optimal user requirements.

Usability testing was conducted using a survey of respondents without the participation of a moderator. A scheme for step-by-step implementation of testing has been developed. Using a Likert scale, the application was evaluated using a questionnaire that includes five factors: learnability, efficiency, recall, errors, and satisfaction. The result for each criterion and the overall usability indicator of the model application were presented.

Keywords: Usability testing, User Experience, UI, application, methods, scenario, tasks, criteria.

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

Безперервний процес отримання та обробки зворотного зв'язку від користувачів, а також своєчасна реакція на неї – ключ до успіху проекту. Такий процес необхідний за будь-яких сценаріїв: чи-то розробка ПЗ з нуля, чи поліпшення вже існуючого [1].

Тестування – це метод оцінки ефективності та зручності роботи продукту. На даний час актуальність UX тестування необхідно, якщо потрібно перевірити існуючий інтерфейс на зручність користувацьких сценаріїв, відзначити всі “проблемні” місця і поліпшити їх.

Аналіз важливості проведення дослідження в наступних напрямках:

- інтернет-магазини, які хочуть збільшити прибуток, забезпечити зростання продажів (на будь-якому етапі їх роботи);
- проекти, які знаходяться в розробці, щоб на початковому етапі зробити ресурс ефективним;
- сайти, у яких великий трафік, але низькі показники конверсій;
- мобільні додатки, у яких відсоток завантажень значно перевищує реальне використання;
- портали з великою кількістю корисних функцій, які користувачі не використовують з невідомих причин тощо.

Естетика, зручність і дизайн мають неймовірне значення. Програма може бути максимально корисною, але якщо «обгортка» відстає на десять років від модерного стилю, навряд чи додаток набере багато користувачів. Знову ж таки, дизайн може бути чудесним, але якщо програма складна у використанні, чимало людей від неї одразу й відмовляться. Формально тестування зручності – це перевірка додатку на користувацький досвід.

Є низка питань з точки зору користувача, які мають бути вирішеними перед запуском продукту у світ:

1. Де я маю натиснути далі?
2. На якій сторінці потрібно перейти далі?
3. Що означає ця іконка?
4. Де я маю знайти меню?
5. Чому повідомлення про помилку відображається не ефективно?
6. Чому на вирішення потреби не достатньо однієї сесії?

Якщо вирішити ці та інші питання перед запуском, це може врятувати продукт від фіаско на ринку. А ще юзабіліті-тестування може допомогти придумати шляхи вирішення тих проблем, на які команда витрачає надто багато часу. Отже, переваг у юзабіліті-тестування чимало [2].

Зручність сайту для користувачів (юзабіліті) залишається одним із основних факторів ранжування в пошукових системах. Пошуковики навчилися точно враховувати зацікавленість відвідувачів та успішність вирішення їхніх проблем за допомогою веб-ресурсу.

Тестування сайту та спостереження за поведінкою користувачів необхідно для вирішення різних завдань:

- перевірити прохідність користувацьких сценаріїв, тобто цільових дій за максимально короткий час;
- оцінити затребуваність продукту та лояльність до нього користувачів, зокрема порівняно з конкурентами;
- проаналізувати зручність навігації – як швидко покупець може знайти товар, зорієнтуватися в опціях;
- оцінити користь, повноту та доступність опублікованого контенту – наскільки інформація зрозуміла для відвідувачів.

Конкретних критеріїв «зручності» не існує, тому необхідно перевіряти гіпотези, проводити тести і тим самим знаходити найкращі ідеї для опрацювання сайту.

Тут на допомогу приходять юзабіліті-тестування. Послуга з експериментальної перевірки зручності та зрозумілості інтерфейсу для кінцевих користувачів. В результаті UX-тестування виявляються слабкі місця інтерфейсу, що викликають утруднення у користувачів і невідповідність інтерфейсу їх очікуванням. За результатами тестування розробники допрацьовують продукт і доводять його до оптимальних вимог користувача.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Одним з основоположників UX Design є Дональд А. Норман, який сформулював поняття UX. Дон Норман вигадав термін «Користувацький досвід». UX визначається як продукт та все, що з ним пов'язано, у тому числі те, як бізнес підлаштовується, щоб забезпечити найкращий досвід роботи із продуктом [3].

Наприклад, UX охоплює як інтерфейс, так й те, як відчуються натискання клавіші, його включення, відкриття, замовлення через Інтернет, служба підтримки клієнтів, розпакування тощо. UX покликаний враховувати цілісний досвід; все і всіх до нього залучених. Дослідник і науковець в своїх роботах вказував, що «UX» в своєму першопочатковому визначенні більше не відображує те, про що пишуть сьогодні. Судячи за посадовими інструкціями, UX-фахівців поміщають у дедалі вужчі рамки та просять ігнорувати широкі питання, викладені в оригінальному значенні UX [3].

Таким чином, UX був визначений як доказовий, орієнтований на людину цикл досліджень і проектування, який чергує об'єктивність і креативність для надання оптимізованого досвіду залежно від потреб. Це комплексний підхід, який враховує кожен рівень впливу досвід.

Сучасний UX потребує поняття історії дизайну та розробки з 1990-х років. Вони неперервно пов'язані між собою. В своєму чистому формі UX Design оснований на каскадній моделі розробки.



З випуском функціоналу один чи два рази на місяць не було часу чекати, доки UX дизайнери виконають свій процес. У Agile-номенклатурі UX став стопором і це було погано.

Зіткнувшись із нерухомим блоком, більшість команд просто відмовилися від UX. Вони найняли молодих графічних дизайнерів, які могли випускати ресурси за двотижневі ітерації. Ці дизайнери не були справжніми UX дизайнерами в класичному сенсі, але вони знали достатньо про дизайн, орієнтований на користувача, щоб уникнути страшних помилок. Тому класичний UX був несумісний із сучасною методологією гнучкої розробки.

UI/UX дизайнери перейшли на дизайн, орієнтований на користувача. Він має вирішальне значення для зростання UX у сфері дизайну, але обмежений по охопленню. Його упередження до цифрового та графічного дизайну сильно спотворило сприйняття бізнес-світом ролі UX. Це залишається проблемою і сьогодні.

Google Ventures вигадали дизайн спринт, який дозволив командам швидко визначити та протестувати прототипи з низькою точністю. Це початок циклу Lean UX для нових груп продуктів і ефективно усунув проблему витрат і переробок [4].

### Виклад основного матеріалу

#### Постановка задачі

Цілі юзабіліті-тестування відрізняються залежно від дослідження, але зазвичай вони включають:

- Виявлення проблем у дизайні продукту чи послуги.
- Розкриття можливостей вдосконалення.
- Вивчення поведінки та вподобань цільового користувача.

Тестування зручності використання допомагає виявляти проблеми, відкривати можливості та дізнаватися про користувачів.

Для чого потрібно юзабіліті-тестування? Хіба професійний UX-дизайнер не знає, як створити чудовий інтерфейс користувача? Навіть найкращі UX-дизайнери не можуть розробити ідеальний, або навіть достатньо хороший досвід користувача без ітеративного дизайну, керованого спостереженнями за реальними користувачами та їхньою взаємодією з дизайном.

Існує багато змінних у розробці сучасного інтерфейсу користувача, а ще більше змінних в людському мозку. Загальна кількість комбінацій величезна. Єдиний спосіб отримати правильний UX-дизайн — це протестувати його.

#### Елементи Usability Testing

Існує багато різних типів юзабіліті-тестування, але основними елементами більшості юзабіліті-тестів є фасилітатор, завдання та учасник. У сеансі юзабіліті-тестування беруть участь учасник і фасилітатор, який дає учасникам завдання та спостерігає за поведінкою учасника. Ведучий роздає завдання учасникам. Коли учасник виконує ці завдання, фасилітатор спостерігає за поведінкою учасника та прислухається до зворотного зв'язку.

Модератор також може поставити додаткові запитання, щоб дізнатися деталі від учасника.

#### Фундаментальні підходи до юзабіліті-тестування із залученням користувачів.

Існують деякі юзабіліті-тести, які провести досить складно, так як вони тісно пов'язані з аналітикою, а значить потрібна велика кількість перевіряючих. Такі тести проводяться реальними користувачами, після чого результати обробляються і аналізуються.

Це потрібно в тих випадках, коли знання продукту дизайнерами, маркетологами, тестувальниками або власниками заважає зрозуміти реальну зручність користування програмою [6].



Рис. 1. Тестування користувацького досвіду

Три загальних типи юзабіліті-тестування включають в себе:

- З модератором (з навченим дослідником і тест учасниками) або без модератора (без прямого контролю).

- Віддалене тестування (підходить для великої кількості людей) або навпаки особисто (в присутності UX-дослідника/модератора).

- Дослідницьке тестування (є відкритим) або порівняльне (погляд на конкурента), а також оцінювання (перевірка задоволеності).

Юзабіліті-тестування можна також поділити на віддалене та особисте. Віддалене користується більшою популярністю, оскільки не вимагає великих затрат грошей і часу.

Тож як провести тест на зручність? Юзабіліті-тестування – це своєрідна «гра» з двома дійовими особами: фасилітатор і учасник. Обоє мають виконати завдання. Фасилітатор формує завдання та передає його учаснику. Останній виконує завдання, звертає увагу на недоліки системи. Фасилітатор у цей час слідкує за поведінкою учасника, отримує від нього зворотній зв'язок.

#### Етапи UX тестування

1. Постановка задачі і вибір методів
2. Складання гіпотез
3. Визначення виду тестування

Етап 1. Формулювання цілей, постановка завдань, вибір методів та респондентів.

Мета цього етапу – визначення проблеми, яку потрібно вирішити за допомогою тестування. Виходячи з мети формуються проблеми та завдання. Наприклад, знайти причину зниження конверсії після редизайну інтернет-магазину.

Вибір респондентів також залежить від продукту, який тестуємо: є тестування, які можна проводити на своїх же співробітниках, а є ті, де дуже важливо знайти відповідну ЦА. Наприклад, не можна перевіряти зручність сайту автосалону на домогосподарці, яка не має авто, а сайт віп-салону краси на школярах. Просто тому, що їхні відповіді будуть зовсім не тими, які дасть ваша цільова аудиторія.

Етап 2. Упорядкування гіпотез.

Гіпотеза – припущення про причини поведінки користувача та вплив на нього юзабіліті-елементів. Важливо розуміти, що хороша гіпотеза – та, яку можна спростувати. Наприклад, гіпотезою може бути така заява “Розташування форми замовлення невдало. Користувач просто не бачить”.

Дуже важливо не розпорошуватися на кілька гіпотез відразу. Один тест перевіряє одну гіпотезу. Після проведення тестування можна отримати результати трьох типів: гіпотеза підтвердилася, не підтвердилася, частково підтвердилася. Щодо форми замовлення гіпотеза може змінюватися, доки знайдено справжня причина чому користувачі її ігнорують.

✗ Форма громіздка та незручна для заповнення

✗ Користувачі її не бачать

✓ Користувачі просто не розуміють для чого вона потрібна

Етап 2а. Створення сценаріїв користувача

Цей етап ми виділили окремо, оскільки він проводиться паралельно з рештою роботи, а не після здійснення певного етапу.

Сценарій – модель поведінки користувача на сайті, виходячи із заданих наперед його цілей та точки входу. Допомогає прорахувати всі можливі реальні ситуації, в яких можуть опинитися користувачі.

Для кожної сторінки потрібно розробити окремий сценарій, обов'язково відповівши на 4 ключові питання:

- Звідки прийшов користувач?
- Що він має побачити на цій сторінці?
- З якою метою він прийшов на сторінку?
- Чим має закінчитися відвідування?

Є ще один тип сценаріїв, який також включає інформацію про характер користувача, його вік, рівень освіти і поінформованості в темі.

Чим коротше можливий сценарій користувача на вашому ресурсі, тим краще. При цьому потрібно враховувати, що сценарій завжди безпосередньо залежить від бізнесу та того, з якими групами клієнтів він працює.

Етап 3. Визначення виду та методики тестування

Визначивши гіпотези, слід вибрати оптимальний тип та метод тестування та провести його випробування на ЦА.

#### Методи юзабіліті-тестування

Існує дуже багато доступних методів тустування взаємодії з користувачем.

Існують два методи тестування на зручність використання веб-сайтів, додатків та інших інтерфейсів - якісне та кількісне.

Якісне тестування – це збір інформації, проблем та висновків про те, як клієнт користується тією чи іншою послугою. Це поширена форма юзабіліті-тестування.

Якісне тестування зручності використання зосереджено на зборі інформації, висновків про те, як люди використовують продукт або послугу. Якісне тестування зручності використання найкраще підходить для виявлення проблем у взаємодії з користувачем. Ця форма юзабіліті-тестування більш поширена, ніж кількісне юзабіліті-тестування [5].



Рис. 2. Методи юзабіліті-тестування

Кількісне тестування – це перевірка продукту на досвід користувача. Головні параметри при цьому – успіх, досягнення цілі користувачем і час, який йде на виконання завдання. У тестуванні зазвичай рекомендують залучити п'ять людей, аби виявити всі помилки системи.

### Результати

Було проведено юзабіліті-тестування додатку замовлення квитка для подорожей мобільної версії для iOS.

Цей додаток призначений обирати спосіб замовлення і купівлі квитка для подорожей та зосереджений на виконанні основних атрибутів на основі потреб споживача:

- Обирання відповідного виду транспорту
- Список рейсів
- Пошуку необхідного туру
- Отримання електронного квитка

Інтерфейс даного додатку представлений на рис. 3.

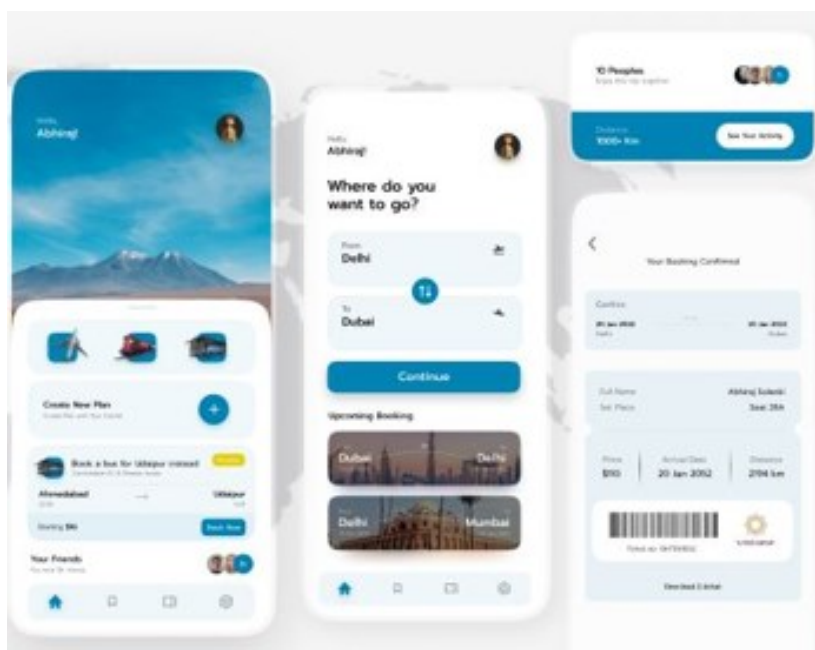


Рис. 3. Інтерфейс додатку

### Методи

В юзабіліті-тестуванні було обрано 5 респондентів, віком від 25–40 років, які часто подорожують і замовляють електронні квитки. Респонденти користуються саме мобільними додатками на операційній системі iOS.

Було визначено наступні питання щодо перевірки зручності використання для нового додатку, а саме п'яти аспектів: навчання, ефективність, запам'ятовуваність, помилки та задоволеність.

- Можливість навчання: є частиною ефективності та стосується здатності користувача керувати системою до рівня компетенції, визначеного після кількох попередньо визначених обсягів і періодів навчання.
- Ефективність: наскільки швидко по часі користувачеві зорієнтуватись в додатку.
- Запам'ятовуваність: ступінь зручності для користувача виконання різних функцій додатку.
- Помилки: Частота помилок серед усіх учасників або кількість кроків, необхідних для виконання завдання.
- Задоволеність: відноситься до сприйняття, почуттів і думок користувача про продукт, зазвичай отриманих через письмові та усні запитання

**Шкала Лайкерта** – це шкала, за якою учасники реєструють свою згоду або незгоду з твердженням. Судження зображені кількісно за п'ятибальною шкалою. Сюди входять: повністю згоден, згоден, ні згодний, ні не згодний, не згодний і категорично не згодний. Таблиця 1 – це інтерпретація інтервального балу з використанням діапазону Лайкерта [7].

Таблиця 1

Інтерпретація балів	
Інтерпретація	Інтервальний бал
Категорично не згодний	1
Не згодний зовсім	2
Не згодний	3
Згодний	4
Повністю згодний	5

Далі потрібно помножити кількість відповідей усіх учасників, які відповідають на кожну точку відповіді, на вагу відповідей, щоб отримати загальну кількість відповідей та індексну оцінку.

$$\text{Total answer score} = (n \times 5) + (n \times 4) + (n \times 3) + (n \times 2) + (n \times 1) \quad (1)$$

$$\text{Index Score} = \frac{\text{total answer score}}{\text{maximum score}} \times 100\% \quad (2)$$

Перевірка зручності використання виконується за кроками, наведеними на рис. 4, як описано нижче [7]:

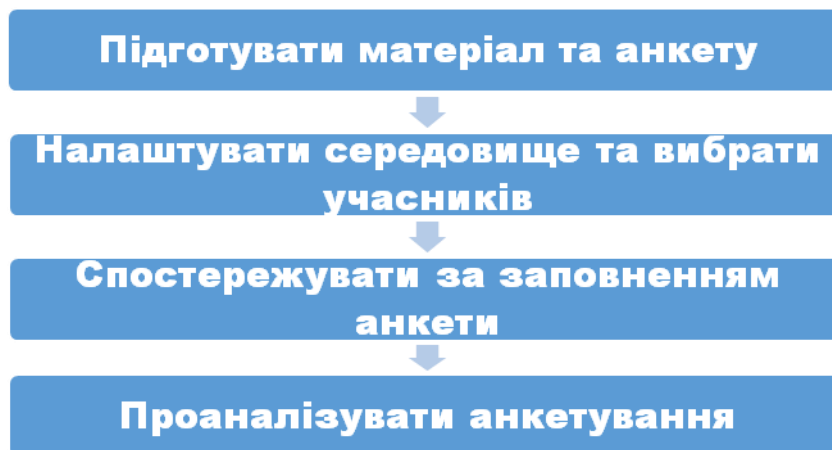


Рис. 4. Кроки Usability Testing

Респонденти ознайомились з мобільним додатком, протестували його і отримали анкети для заповнення даних. Тестування проходило без участі модератора.

#### Результати анкетування

В таблиці 2 наведено узагальнені результати відповіді респондентів.

$$\text{Learnability / Efficiency / Memorability / Error / Satisfaction} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \times 100\% \quad (3)$$

де  $x_i$  = кількість респондентів  $\times$  кількість питань  $\times$  кількість балів і  $n$  = кількість респондентів  $\times$  кількість питань  $\times$  максимальний бал.

$$\text{Learnability}(\%) = \frac{46}{50} \times 100\% = 92\%$$

Таблиця 2

## Результати анкетування

№	Питання	Юзабіліті фактор	Респондент 1	Респондент 2	Респондент 3	Респондент 4	Респондент 5
1.	Легкий для сприйняття інтерфейс користувача	Можливість навчання	4	4	5	5	5
2.	Простота використання		5	4	4	5	5
3.	Продуманий дизайн	Ефективність	5	5	5	5	4
4.	Розташування меню		4	5	5	3	4
5.	Логотип і символ легко зрозуміти		5	5	5	5	5
6.	Простий доступ і швидкість завантаження	Запам'ятовуваність	4	4	5	5	5
7.	Легкий доступ до пошуку маршруту		5	4	4	5	5
8.	Легкий спосіб завантаження електронного квитка		4	4	5	5	5
9.	Легко запам'ятовується меню і користувацький інтерфейс		5	5	4	5	4
10.	Немає помилок під час користування додатком	Помилки	4	5	5	5	5
11.	Колір зручний і не набридає	Задоволеність	5	4	5	4	4
12.	Додаток відповідає головній цілі і задачі		4	5	4	5	4

$$\text{Efficiency}(\%) = \frac{70}{75} \times 100\% = 93\%$$

$$\text{Memorability}(\%) = \frac{92}{100} \times 100\% = 92\%$$

$$\text{Error}(\%) = \frac{73}{25} \times 100\% = 29\%$$

$$\text{Satisfaction}(\%) = \frac{44}{50} \times 100\% = 88\%$$

$$\text{Usability Score}(\%) = \frac{\text{Learnability} + \text{Efficiency} + \text{Memorability} + \text{Error} + \text{Satisfaction}}{5} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{Usability Score}(\%) = \frac{82 + 93 + 92 + 29 + 88}{5} \times 100\% = 79\%$$

Результати тесту за п'ятьма факторами: здатність до навчання (92%), ефективність (93%), запам'ятовуваність (92%), задоволення (88%) і помилка (29%). Із загального підрахунку можна зробити висновок, що загальна оцінка юзабіліті-тестування «Tikket travel» наразі становить 79%.

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В даній статті розглянуто різні методи тестування UX, які допоможуть покращити програмний продукт. Визначено важливість обрання методу тестування, який найбільш підходить для конкретних цілей. Було проведено тестування з залученням 5 респондентів, без модератора. Розроблено схему для перевірки зручності використання мобільного додатку. За допомогою шкали Лейкерта здійснено оцінювання додатку за допомогою п'яти критеріїв: навчання, ефективність, запам'ятовуваність, помилки та задоволення. Визначено Usability Score, який дав результат 79%.

Напрямок подальших досліджень авторів – проведення більш детального аналізу та порівняння різних методів UX тестування з метою подальшого вдосконалення різних типів програмного продукту для випуску на ринок.

### Література

1. Usability Testing от А до Я: подробный гид (2020). URL: <https://dou.ua/lenta/articles/usability-testing-guide>
2. Юзабіліті-тестування: врятуватись від поразки заздалегідь (2021). URL: <https://luxnet.io/uk/blog/usability-testing>
3. Don Norman. The Design of Everyday Things. URL: <http://kowym.com/wp-content/uploads/2018/08/The-Design-of-Everyday-Things-Don-Norman.pdf>

4. О Доне Нормане, вандализации UX и широком подходе к дизайну (2020). URL: <https://ux.pub/editorial/o-donie-normanie-vandalizatsii-ux-i-shirokom-podkhodie-k-dizainu-333k>
5. Usability Testing 101. URL: [Usability Testing 101 \(nngroup.com\)](https://nngroup.com)
6. Usability testing. URL: <https://training.qatestlab.com/blog/technical-articles/usability-testing-check-list-testing/>
7. Nur Aini Shofiya Asy'ari, Dihin Muriyatmoko. Usability Testing for Android Radio Streaming Apps of Songgolangit Fm. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1471 (2020) 012011
8. Harwati and Widodo I. D. Usability Testing for Android Based Application 'Jogja Smart Tourism, IOP Conf Ser Mater Sci Eng, vol. 215, no. 1, 2017.

#### References

1. Usability Testing of A do Ya: podrobnii hyd (2020). URL: <https://dou.ua/lenta/articles/usability-testing-guide>
2. Yuzabiliti-testuvannia: vriatuvatys vid porazky zazdalehid (2021). URL: <https://luxnet.io/uk/blog/usability-testing>
3. Don Norman. The Design of Everyday Things. URL: <http://kowym.com/wp-content/uploads/2018/08/The-Design-of-Everyday-Things-Don-Norman.pdf>.
4. О Доне Нормане, вандализации UX и широком подходе к дизайну (2020). URL: <https://ux.pub/editorial/o-donie-normanie-vandalizatsii-ux-i-shirokom-podkhodie-k-dizainu-333k>
5. Usability Testing 101. URL: [Usability Testing 101 \(nngroup.com\)](https://nngroup.com)
6. Usability testing. URL: <https://training.qatestlab.com/blog/technical-articles/usability-testing-check-list-testing/>
7. Nur Aini Shofiya Asyari, Dihin Muriyatmoko. Usability Testing for Android Radio Streaming Apps of Songgolangit Fm. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1471 (2020) 012011
8. Harwati and Widodo I. D. Usability Testing for Android Based Application 'Jogja Smart Tourism, IOP Conf Ser Mater Sci Eng, vol. 215, no. 1, 2017.

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-119-122>

УДК 621.3.035.183

КУЧЕРЕНКО Юлія

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3406-9850>

e-mail: [fortyna1910@gmail.com](mailto:fortyna1910@gmail.com)

## ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МАТЕРІАЛУ ПОКРИТТІВ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ

На основі методу холодного газодинамічного напилення створюються технології для вирішення завдань енерго- та ресурсозбереження в різних галузях промисловості та вводяться в практику нетрадиційні і ефективні способи виробництва, ремонту, відновлення, антикорозійного захисту, отримання електро- та теплопровідних, антифрикційних та інших покриттів функціональних вузлів, а також елементів найрізноманітнішої техніки і обладнання.

У цій роботі проведено аналіз різноманітних матеріалів покриттів, що використовуються при відновленні деталей методом холодного газодинамічного напилення. Визначені сильні та слабкі сторони різних технологій нанесення покриттів, а також наведені рекомендації щодо вибору матеріалу при відновленні деталей методом холодного газодинамічного напилення.

**Ключові слова:** технології покриттів, захист від корозії, холодне газодинамічне напилення, адгезійна міцність, дефекти.

KUCHERENKO Yulia

Vinnitsia National Agrarian University

## SUBSTANTIATION OF THE CHOICE OF COATING MATERIAL WHEN RESTORING PARTS OF AGRICULTURAL MACHINERY BY COLD GAS-DYNAMIC SPRAYING

Based on the method of cold gas-dynamic spraying, technologies are being created to solve problems of energy and resource saving in various industries and non-traditional and effective methods of production, repair, restoration, anti-corrosion protection, obtaining electrical and heat-conductive, anti-friction and other coatings of functional units, and as well as elements of a wide variety of machinery and equipment.

The main feature of cold gas-dynamic spraying is the absence of high temperatures during the formation of metal coatings, therefore, the absence of oxidation of particle and base materials, non-equilibrium crystallization processes, and high internal stresses in the workpieces. Coatings created in this way are a metal matrix with ceramic particles embedded in it. They are characterized by high strength, good performance properties and can be applied in any thickness. One of the important characteristics of coatings is the adhesion strength. Before spraying on any part, it is necessary to find out which coating material will give the best strength characteristics between the two materials. Therefore, before spraying, it is important to study the specifics of the formation of a durable coating for a given part, as well as to compare the strength characteristics of the cold gas-dynamic spraying method with other methods for restoring parts. In this paper, an analysis of various coating materials used in the restoration of parts by the method of cold gas-dynamic spraying is carried out. The strengths and weaknesses of various coating technologies are determined, as well as recommendations for choosing a material when restoring parts by cold gas-dynamic spraying.

**Key words:** coating technologies, corrosion protection, cold gas-dynamic spraying, adhesive strength, spraying, defects.

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

Холодне газодинамічне напилення (ХГДН) – метод порошкового нанесення покриттів, в якому частинки з характерним розміром 10–150 мкм прискорюються в надзвуковому потоці газу до швидкостей 400–1200 м/с і при ударі об підкладку закріплюються на ній без фазових переходів.

На основі методу холодного газодинамічного напилення створюються технології для вирішення завдань енерго- та ресурсозбереження в різних галузях промисловості та вводяться в практику нетрадиційні і ефективні способи виробництва, ремонту, відновлення, антикорозійного захисту, отримання електро- та теплопровідних, антифрикційних та інших покриттів функціональних вузлів, а також елементів найрізноманітнішої техніки і обладнання.

Однією з важливих характеристик покриттів є адгезійна міцність зчеплення. Перед напиленням на якусь деталь, необхідно з'ясувати, яке покриття надасть найкращі показники міцності між двома матеріалами. Тому перед напиленням важливо вивчити специфіку формування міцного покриття для заданої деталі, а так само порівняти характеристики міцності методу ХГДН з іншими методами відновлення деталей [1].

### Виклад основного матеріалу

На сьогоднішній день при ремонті автомобільної техніки, застосовуючи технологію ХГДН, можна усувати дефекти наступних деталей:

- відновлення поверхні кузова (на стиках, за наявності дефектів, вм'ятин);
- антикорозійна обробка зварних швів, локальних зон кузова (цинкування) та зварних швів, локальних ділянок вихлопного тракту (алюмінівання);
- усунення дефектів у блоці циліндрів, усунення дефектів у головці блоку циліндрів (ГБЦ) (прогари, корозійні проміїни), реставрація свічкового різьблення в ГБЦ;

- реставрація посадкових місць підшипників;
- усунення дефектів в алюмінієвих, чавунних, сталевих деталях двигуна, їх герметизація (мікротечі, невеликі тріщини та інші дефекти в ГБЦ, блоці циліндрів, коробці перемикачів передачі тощо);
- усунення дефектів в елементах системи автокондиціонування (витік фреону);
- усунення прогарів, промоїн на бронзових поршнях [2].

Всі вище представлені види деталей, виготовлені з різних матеріалів, і при їх відновленні методом ХГДН необхідно враховувати даний фактор, так як адгезійна міцність безпосередньо впливає на довговічність покриття і ефективність відновлення того чи іншого вузла, або агрегату.

Як порошкові матеріали використовуються порошки металів, сплавів або їх механічні суміші з керамічними добавками. Порошкових матеріалів що застосовуються дуже багато, вони можуть бути як з легкоплавких металів (Al, Cu, Ni, Zn, V, Co, Fe), так і з тугоплавких (Ti, Mo, W). Тому перед напиленням необхідно визначити який порошок або їх суміш (у відсотковому співвідношенні) вибрати для напилення тієї чи іншої деталі, виготовленої з певного матеріалу і з певними властивостями.

Зацікавленість до технології ХГДН за останні роки значно зросла, про що свідчить велика кількість публікацій. Є дослідження адгезійної та когезійної міцності зчеплення різних матеріалів, а також порівняння характеристик міцності методу ХГДН з іншими методами відновлення деталей [3].

Для кількісної оцінки властивостей міцності використовувалися відомі методи: клейовий і штифтовий за ДСТУ 2639-94. При цьому зразки не зазнавали спеціальної поверхневої підготовки. В якості клею застосовувалася епоксидна смола та плівковий клей ВК-7. Діаметр напилених зразків складав 6–10 мм. Відрив зразка склеєного з шайбою, здійснювався за допомогою розривного пристрою, виготовленого на основі важільних ваг, і дозволяє вимірювати навантаження, які прикладаються, в діапазоні 0–300 кг з точністю 0,01 кг.

Характерні значення адгезійної та когезійної міцності зчеплення наведені в таблиці 1, де так само вказані характеристики міцності деяких покриттів, отриманих іншими методами напилення.

Таблиця 1

## Значення адгезійної та когезійної міцності зчеплення покриття з основою

Матеріал		Метод напилення	Метод випробування	Міцність зчеплення, МПа
Покриття	Основа			
Al	Mg+6Al+12Zn	Плазмовий	Штифтовий	44
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al сплав	Детонаційний	Штифтовий	20-25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ст. низьковугл.	Плазмовий	Клейовий	10
Al	Al	Ел. дуговий	Клейовий	9
Al	Ст. вугл.	Ел. дуговий	Клейовий	19
Al	Ст. вугл.	Газопламеневий	Клейовий	10
Al	Cu	ХГДН, $k_d < 1$	Клейовий	62-67
Al	ЛС-59	ХГДН, $k_d < 1$	Клейовий	64-65
Al	X18H9T	ХГДН, $k_d < 1$	Клейовий	62-65
Al	Cu	ХГДН, $k_d < 1$	Штифтовий	30-40
Al	Ст.35	ХГДН, $k_d < 1$	Штифтовий	20-30
Al	40X	ХГДН, $k_d < 1$	Штифтовий	38-40
Al	Д16Т	ХГДН, $k_d < 1$	Штифтовий	50-55
Al	ЛС-59	ХГДН, $k_d < 1$	Штифтовий	38-66
Cu	Cu	$k_d \sim 1$ , гел.+пов	Штифтовий	40-45
V	Cu	$k_d \sim 1$ , гел.+пов	Штифтовий	20
Zn	Cu	$k_d \sim 1$ , гел.+пов	Штифтовий	12-15
Al	Cu	$k_d \sim 1$ , гел.+пов	Штифтовий	10-20
V	Ст.35	$k_d \sim 1$ , підігр. пов.	Штифтовий	25
Ni	Ст.35	$k_d \sim 1$ , підігр. пов.	Штифтовий	35
Zn	Ст.35	$k_d \sim 1$ , підігр. пов.	Штифтовий	15
X18H10T	ЛС-59	$k_d \sim 1$ , підігр. пов.	Штифтовий	50-51
X18H10T	40X	$k_d \sim 1$ , підігр. пов.	Штифтовий	22

З таблиці видно, що характеристики покриттів нанесених методом ХГДН досить високі, і величина зчеплення покриттів з основами становить  $\sigma_{br} = 10-66$  МПа, що практично не поступається значенням для покриттів, напилених газотермічними методами. Слід зазначити, що при випробуваннях штифтовим методом вищі значення отримані для основ з менш твердих матеріалів (латунь ЛЗ-59, дюраль Д16Т, мідь). Подібна залежність пов'язана, мабуть, з більш значною глибиною проникнення частинок у основу ( $\sim 10$  мкм) та більш розвиненою контактною поверхнею для цих матеріалів, ніж для зразків зі сталей, що підтверджується даними мікроскопічних спостережень.



Встановлено, що алюмінієві покриття, отримані в режимі  $k_d < 1$  ( $k_d$  – коефіцієнт напилення), істотно перевищують міцність зчеплення з основою покриття, отримані при  $k_d \sim 1$ , що також пояснюється, мабуть, ефектом ударного пресування.

Таким чином, дані клейових, штифтових випробувань показують, що когезійна міцність алюмінієвих покриттів, отриманих при  $k_d < 1$ , можна порівняти з міцністю компактного алюмінію, в той час як адгезійна міцність істотно залежить від матеріалу основи і може бути як нижчою когезійною (на основах з твердих матеріалів, наприклад, сталях), і вищою (на основах із пластичних матеріалів). Покриття з різних матеріалів, напилених при  $k_d \sim 1$ , володіють меншими властивостями міцності і порівняні з властивостями покриттів, одержуваних газотермічними методами.

Одним із важливих факторів при напиленні є коефіцієнт напилення. Коефіцієнт напилення – це відсоток частинок порошку, що закріпилися на поверхні, від загальної маси витраченої сировини. При напиленні чистого матеріалу (без змішування різних порошків) коефіцієнт напилення дуже малий (0,01-0,1%), що спричиняє перевитрату порошку та низьку якість покриття, без використання керамічних частинок у складі. Наявність керамічних частинок в напилюваному порошковому матеріалі є важливою особливістю технології формування покриттів так, як тверді керамічні частинки сприяють:

- очищенню поверхні від забруднень і створенню більш придатного до напилення мікрорельєфу поверхні основи, а це суттєво збільшує міцність зчеплення покриття з нею;
- зменшенню пористості та збільшенню когезії (міцності зчеплення частинок один з одним) завдяки деформації поверхні із-за ударів металевих частинок;
- зрізання з поверхні покриття металевих частинок, які слабо закріпилися, що покращує якість покриття.

Як керамічні частинки зазвичай використовують частинки з оксиду алюмінію (корунду), які є хімічно абсолютно інертними. Тому наявність або відсутність таких частинок не погіршуватиме корозійну стійкість покриття [4].

Якщо намагатися наносити покриття тільки з порошку металу, без корунду, то коефіцієнт напилення впаде до неприйнятних значень, а міцність зчеплення з основою може зменшитися в 2-3 рази, а порошок міді зазвичай або взагалі не закріплюватиметься на поверхні, або не створюватиме товстих покриттів.

Дані досліджень щодо залишкового вмісту компонентів у покритті дозволяють вибрати склад вихідного порошку, необхідний для отримання заданого вмісту компонентів у покритті. Наприклад, максимальний залишковий вміст міді в покритті (95% міді в покритті) може бути отриманий при додаванні у вихідний порошок 30-40% алюмінію від загальної ваги. При такій вихідній концентрації алюмінію коефіцієнт напилення міді становитиме  $\approx 0,5\%$ , що все-таки помітно вище, ніж коефіцієнт напилення чистої міді (0,01%). Якщо, наприклад, потрібно отримати залишковий вміст міді  $\approx 50\%$  у покритті, необхідно додати у вихідний порошок  $\approx 60\%$  алюмінію від загальної ваги. У цьому випадку коефіцієнт напилення міді помітно зростає і буде  $\approx 15\%$  ( $k_d = 0,15$ ). Відсоток вмісту корунду зазвичай становить у суміші від 1 до 20% (від загальної ваги). При вмісті керамічних частинок більше 20% порошку, коефіцієнт напилення різко прямує до нуля [5].

З цього дослідження можна дійти невтішного висновку, що у процесі напилення компоненти суміші впливають один на одного. Імовірно, механізм взаємодії компонентів полягає в тому, що вони з різною ймовірністю закріплюються на поверхні, яка складається з різних матеріалів (тобто ймовірність закріплення мідних частинок на поверхні з алюмінієвих частинок вища, ніж ймовірність закріплення мідних частинок на поверхні зі сталі або самих мідних частинок).

Також більший вплив на адгезійну міцність мають технологічні режими встановлення холодного газодинамічного напилення, такі як нагрівання повітряного потоку, витрата порошкового матеріалу та робочий тиск повітря.

Найбільш якісне утворення покриттів відбувається за наступних технологічних режимів установки ХГДН:

- робочий тиск 0,5-0,7 МПа;
- енергетичний режим 2,3 та 4 (200, 300 та 400 СО відповідно);
- витрати порошку 0,2-0,4 г/с.

Таким чином, перед відновленням деталі методом ХГДН дуже важливо визначити склад покриття, який наноситься на деталь виготовлену з будь-якого матеріалу, а так само встановити технологічні режими установки ХГДН при яких, покриття, що наноситься, матиме найкращі показники адгезійної міцності.

### **Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі**

У статті проведено аналіз сучасних технологій відновлення деталей, визначені сильні та слабкі сторони різних технологій покриттів. Як результат, приведені рекомендації що до вибору матеріалу при відновленні деталей методом холодного газодинамічного напилення. Враховуючи ці аспекти, вибір залишається за споживачем, які технології відновлення підходять до конкретних потреб, виходячи з перерахованих основних видів і характеристик нанесення захисно-декоративних покриттів.

**Література**

1. Кучеренко Ю.С., Матвійчук В.А. Основні технології та способи нанесення покриттів газотермічним напиленням. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. 2021. № 6 (303). С. 240–242.
2. Гайдамак О.Л., Матвійчук В.А., Кучеренко Ю.С. Перспективи створення полімерних функціональних покриттів із застосуванням газодинамічного напилення. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2020. № 2 (109). С. 105–112.
3. Марьянко В. П. Газопламенное напыление полимерных порошковых красок. Промышленная окраска. 2014. № 1. С. 24–28.
4. Гайдамак О.Л. Дослідження властивостей покриттів на основі алюмінію, створених холодним газодинамічним напиленням. Вісник машинобудування та транспорту. 2015. № 1. С. 14–20.
5. Газотермічні покриття. Оборудование и технологии малого бизнеса. 2014. URL: <https://proizvodim.com/gazotermichni-pokrityya.html>.

**References**

1. Kucherenko YU.S., Matviychuk V.A. Osnovni tekhnolohiyi ta sposoby nanesennya pokryttiv hazotermichnym napylennyam. Herald of Khmelnytskyi National University. 2021. № 6 (303). S. 240-242.
2. Haydamak O.L., Matviychuk V.A., Kucherenko YU.S. Perspektyvy stvorennya polimerykh funktsional'nykh pokryttiv iz zastosuvanniam hazodynamichnoho napylennya. Tekhnika, enerhetyka, transport APK. 2020. № 2 (109). S. 105-112.
3. Mar'yanko V. P. Hazoplamennoe napylenie polimerykh poroshkovykh krasok. Promyshlennaya okraska. 2014. №1. С. 24–28.
4. Haydamak O.L. Doslidzhennya vlastyvostry pokryttiv na osnovi alyuminiyu, stvorenykh kholodnym hazodynamichnym napylennyam. Visnyk mashynobuduvannya ta transportu. 2015. № 1. S. 14-20.
5. Hazotermichni pokryttya. Oborudovanie y tekhnologii malogo biznesa. 2014. URL: <https://proizvodim.com/gazotermichni-pokrityya.html>.

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-123-127>

УДК 004.7:519

ЛЕМЕСЬКО 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](mailto:artem.v.antonenko@gmail.com)

ЦВИК Олександр

Державний університет телекомунікацій  
<https://orcid.org/0000-0001-7786-1712>

## АНАЛІЗ І ОСОБЛИВОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТРАФІКУ

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

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

ANTONENKO Andrii, LEMESHKO Artem, TSVIK Oleksandr  
State University of Telecommunications

## ANALYSIS AND FEATURES OF TRAFFIC MONITORING SOFTWARE

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

Keywords: traffic control, TCP, network packets, network

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

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

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

### **Аналіз останніх джерел**

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

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

### **Виклад основного матеріалу**

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

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

- Пакети запитів
- Пакети відповідей
- Пакети інструкцій

Корпорація Intel провела опитування та повідомила, що «відбувається за хвилину в інтернеті»: більше 23 000 годин відео-переглядів на Netflix, 138 000 годин відео переглянуто на YouTube, 4,1 мільйонів пошукових запитів у Google, 3,3 мільйони поділилися контентом. Ці два мультимедійні веб-сайти генерують більше половини всього інтернет-трафіку. Сьогодні ми можемо сказати, що кількість підключених

електронних пристроїв дорівнює населенню світу. Очікується, що в 2023 року кількість підключених пристроїв втричі перевищить чисельність населення світу.

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

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

Якщо вивчати контроль трафіку, з'являються основні питання:

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

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

- затримок у черзі
- втрати кадрів або пакетів даних
- блокування нових з'єднань
- зменшення швидкості вдалого введення

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

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

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

Основний перелік програми для контролю трафіку:

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

- NetFort LANGuardian
- ManageEngine NetFlow Analyzer
- Nagios

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

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

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

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

### **Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі**

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

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

### **Література**

1. Абед С.А. Порівняльний аналіз алгоритмів роботи протоколу TCP в самоподібному трафіку. *Journal of Communications and Network*, 2013. 92.
2. Ke Xu Hongying Liu, Jiangchuan Liu, Jixiu Zhang. LBMP: A Logarithm- Barrier-Based Multipath Protocol for Internet Traffic Management. *IEEE TRANSACTIONS ON PARALLEL AND DISTRIBUTED SYSTEMS*, VOL. 22, NO. 3, MARCH 2011.
3. Даррелл М.В. Еволюція потокового відео та доставки цифрового вмісту. *Journal of Technology Innovation at Brookings*, 2014. 86.
4. Федеріко Б. Інтернет у розробці майбутніх систем контролю трафіку. *Internet Research Journal*, 2010. 168.
5. Shahwaiz Afaqui M., Villegas E.G., Aguilera E.L. IEEE 802.11 ax: Challenges and requirements for future high efficiency WiFi. *IEEE Wireless Communications*. 2016. № 99. P. 2–9.
6. Зайцев Є.О., Антоненко А.В., Березниченко В.О., Закусило С.А. Smart засоби визначення аварійних станів у розподільних електричних мережах міст. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*, 2022, (5).
7. Tanenbaum A.S., Wetherall D.J. *Computer Networks*. 5-th Ed. Prentice Hall, Cloth, 2011. 960 p.
8. Bellalta B. IEEE 802.11 ax: High-efficiency WLANs. *IEEE Wireless Communications*. 2016. № 23(1). P. 38–46.
9. Barrachina-Munoz S., Francesc Wilhelmi, Ioannis Selinis, Boris Bellalta. *Wireless Network Simulator for Next-Generation High-Density WLANs*. *IEEE 2019 Wireless Days (WD)*. 2019. P. 1–8.
10. Ткаченко О.М., Гринкевич Г.О., Перепелиця Н.Л., Цімура Б.В., Яворський А.О. Оцінка працездатності каналу зв'язку. *Наукові записки УНДІЗ*. 2016. № 3(43). С. 30–36.
11. Sure P., Bhuma C. M. A survey on OFDM channel estimation techniques based on denoising strategies. *Eng. Sci. Technol. Int. J. V.2 0. № 2*, 2017. P. 629–636.
12. Sur S., Pefkianakis I., Zhang X., Kim K., Kim H. Practical MU-MIMO user selection on 802. 11ac commodity networks. *Proc. ACM MobiCom*. 2016. P. 122-134.
13. Zhuang Y., Syed Z., Georgy J., El-Sheimy N. Autonomous smartphone-based Wi-Fi positioning system by using access points localization and crowdsourcing. *Pervasive and Mobile Computing*. V. 18. 2015. P. 118-136.
14. Kulkarni P., Fengming Cao. Taming the densification challenge in next generation wireless LANs: An investigation into the use of dynamic sensitivity control. *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, 2015 IEEE 11th International Conference on. 2015. P. 860–867.
15. Shen Z., Bo Li, Mao Yang, Zhongjiang Yan, Xiaobo Li, Yi Jin. Research and Performance Evaluation of Spatial Reuse Technology for Next Generation WLAN. *International Wireless Internet Conference*. 2019. P. 41–51.

16. Lei Song, Biswanath Mukherjee. On the Study of Multiple Backups and Primary-Backup Link Sharing for Dynamic Service Provisioning in Survivable WDM Mesh Networks. *IEEE Journal on selected areas in Telecommunication*, 2008. Vol. 26, No 6. p. 84-91.

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

#### References

1. Abed S.A. Porivnialnyi analiz alhorytmiv roboty protokolu TCP v samopodibnomu trafiku. *Journal of Communications and Network*, 2013. 92.
2. Ke Xu Hongying Liu, Jiangchuan Liu, Jixiu Zhang. LBMP: A Logarithm- Barrier-Based Multipath Protocol for Internet Traffic Management. *IEEE TRANSACTIONS ON PARALLEL AND DISTRIBUTED SYSTEMS*, VOL. 22, NO. 3, MARCH 2011.
3. Darrell M.W. Evoliutsiia potokovoho video ta dostavky tsyfrovoho vmistu. *Journal of Technology Innovation at Brookings*, 2014. 86.
4. Federiko B. Internet u rozrobtsi maibutnikh system kontroliu trafiku. *Internet Research Journal*, 2010. 168.
5. Shahwaiz Afaqui M., Villegas E.G., Aguilera E.L. IEEE 802.11 ax: Challenges and requirements for future high efficiency WiFi. *IEEE Wireless Communications*. 2016. № 99. P. 2–9.
6. Zaitsev Ye.O., Antonenko A.V., Bereznychenko V.O., Zakusylo S.A. Smart zasoby vyznachennia avariinykh staniv u rozpodilnykh elektrychnykh merezhakh mist. *Tavriyskyi naukovyi visnyk. Seriya: Tekhnichni nauky*, 2022, (5).
7. Tanenbaum A.S., Wetherall D.J. *Computer Networks*. 5-th Ed. Prentice Hall, Cloth, 2011. 960 p.
8. Bellalta B. IEEE 802.11 ax: High-efficiency WLANs. *IEEE Wireless Communications*. 2016. № 23(1). P. 38–46.
9. Barrachina-Munoz S., Francesc Wilhelmi, Ioannis Selinis, Boris Bellalta. *Wireless Network Simulator for Next-Generation High-Density WLANs*. *IEEE 2019 Wireless Days (WD)*. 2019. P. 1–8.
10. Tkachenko O.M., Hrynkevych H.O., Perepelytsia N.L., Tsimura B.V., Yavorskyi A.O. Otsinka pratsezdatsnosti kanalu zviazku. *Naukovi zapysky UNDIZ*. 2016. № 3(43). S. 30–36.
11. Sure P., Bhuma C. M. A survey on OFDM channel estimation techniques based on denoising strategies. *Eng. Sci. Technol. Int. J. V.2 0. № 2*, 2017. P. 629–636.
12. Sur S., Pefkianakis I., Zhang X., Kim K., Kim H. Practical MU-MIMO user selection on 802. 11ac commodity networks. *Proc. ACM MobiCom*. 2016. P. 122-134.
13. Zhuang Y., Syed Z., Georgy J., El-Sheimy N. Autonomous smartphone-based Wi-Fi positioning system by using access points localization and crowdsourcing. *Pervasive and Mobile Computing*. V. 18. 2015. P. 118-136.
14. Kulkarni P., Fengming Cao. Taming the densification challenge in next generation wireless LANs: An investigation into the use of dynamic sensitivity control. *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, 2015 *IEEE 11th International Conference on*. 2015. P. 860–867.
15. Shen Z., Bo Li, Mao Yang, Zhongjiang Yan, Xiaobo Li, Yi Jin. Research and Performance Evaluation of Spatial Reuse Technology for Next Generation WLAN. *International Wireless Internet Conference*. 2019. P. 41–51.
16. Lei Song, Biswanath Mukherjee. On the Study of Multiple Backups and Primary-Backup Link Sharing for Dynamic Service Provisioning in Survivable WDM Mesh Networks. *IEEE Journal on selected areas in Telecommunication*, 2008. Vol. 26, No 6. p. 84-91.
17. Kulakov Yu. A., Kohan A. V., Khrapov V. M. Sposob konstruyrovaniya trafika pry orhanyzatsyy mnohoputevoi marshrutyzatsyy. *Visnyk NTUU «KPI». Informatyka, upravlinnia ta obchysliuvalna tekhnika*. Vyp. 65. 2017. S. 28–33.

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-128-134>

УДК 004.77

**МАМУТА Марина**

КПІ ім. Ігоря Сікорського  
<https://orcid.org/0000-0002-7674-4984>  
e-mail: [rybalkomaryna@gmail.com](mailto:rybalkomaryna@gmail.com)

**КРАВЧЕНКО Ігор**

КПІ ім. Ігоря Сікорського  
<https://orcid.org/0000-0002-9223-057X>  
e-mail: [kravchenko.igor@iit.kpi.ua](mailto:kravchenko.igor@iit.kpi.ua)

**МАМУТА Олександр**

Інститут фізики НАН України  
<https://orcid.org/0000-0002-6404-5879>  
e-mail: [mamuta.aleksandr@gmail.com](mailto:mamuta.aleksandr@gmail.com)

## ХОСТИНГ СТАТИЧНОГО ВЕБ-САЙТУ ЗАСОБАМИ AWS S3

*В роботі проаналізовано особливості реалізації хостингу статичних веб-сайтів засобами хмарного сервісу Amazon S3. Розглянуто особливості налаштувань дозволів та політик. Досліджено інтеграцію з сервісом CloudFront для забезпечення безпечної доставки контенту за протоколом https.*

*Ключові слова: AWS, S3 bucket, хостинг, веб-сайт.*

MAMUTA Maryna, KRAVCHENKO Igor  
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"  
MAMUTA Oleksandr  
Institute of Physics, National Academy of Sciences of Ukraine

### AMAZON S3 STATIC WEBSITE HOSTING

*Nowadays, especially in period of energetic crisis, it is very important to get reliable data storage and uninterrupted access to websites. Considering that the world's mainstream is using the clouds services for educational, scientific, business purposes it is important to explore features of hosting websites in major cloud service providers. One of the leader's vendors in cloud servicing is Amazon with its Web Services (AWS). AWS offers hosting solutions such as Lightsail, Amplify Console, Simple Storage Service (S3) and Elastic Cloud Computing, from simple static websites to complicated dynamic.*

*The article deals with the method of hosting static websites. Simple Storage Service was used for this purpose. The method has many benefits: the service is simple, cheap, scales well, manages everything and has great integration with other AWS services. This method is the best for websites that do not contain server-side scripting, like PHP or ASP.NET. It is ideal for websites that change infrequently, such as personal, promo, startup websites, websites of small businesses and organizations.*

*The article focuses on how set permissions, properties and policies of AWS S3 bucket for hosting a website. But usage of S3 bucket alone provides only http connection. That's why to deploy secure connection and speed up delivery of the static content was proposed to use AWS CloudFront service. CloudFront is content delivery network service, that uses the latest version of Transport Layer Security Protocol and saves files in the cache for 24 hours. The article shows how to configure CloudFront distribution to serve https requests for an Amazon S3 bucket. Configuration S3 bucket REST API endpoint was used as the most secure case. As a result, latency was reduced, security was improved due to traffic encryption and the content of S3 bucket was kept private.*

*Keywords: AWS, S3 bucket, hosting, website.*

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

На сьогоднішній день актуальним для України є питання надійності зберігання даних та забезпечення безперервного доступу до веб-сайтів. Загальносвітовою тенденцією вирішення вказаних вимог є перехід в хмару. Тому важливим є дослідження особливостей хостингу веб-сайтів у провідних вендорів хмарних сервісів [1], зокрема в Amazon Web Services (AWS). За інформацією вендора [2] AWS забезпечує хостинг з доступністю 99,99% протягом року та має надійність 99,999999999%.

AWS містить засоби для хостингу та конструювання і динамічних, і статичних сайтів, як-то Lightsail, Amplify, Elastic Cloud Computing та Simple Storage Service (S3).

Для хостингу статичних сайтів [3] з довільною кількістю сторінок, які не потребують виконання серверних програм на PHP, ASP.NET тощо, найпростішим є використання сервісу S3.

### Аналіз досліджень та публікацій

В роботі [4] наведено дані про правовий аспект питання хостингу, в [5] розглянуто загальні питання хостингу, в тому числі й в хмарі, в [6] викладені загальні питання хмарних сервісів, а от технічні моменти та налаштування потребують уточнення.

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є дослідження особливостей налаштувань дозволів та політик контейнера (bucket) S3 для хостингу статичних веб-сайтів, а також особливостей налаштувань CloudFront для забезпечення https з'єднання з S3.



### Виклад основного матеріалу

Підготовка хостингу сайту проводиться в консолі AWS в діалоговому режимі та складається з наступних етапів: створення нового поіменованого контейнера, наповнення контейнера контентом сайту, визначення відповідних дозволів та політик доступу до сайту.

#### Створення контейнера.

Створення контейнера (bucket) активується кнопкою **Create bucket** (рис. 1а) консолі AWS. У вікні створення контейнера (рис. 1б) слід визначити унікальне ім'я контейнера **Bucket name** та регіон розміщення **AWS Region**. Регіон розміщення визначає територіальне розташування серверів Amazon (AWS endpoint, website endpoint), через які буде проводитися хостинг. Визначене ім'я та регіон стають частками доменного імені сайту, яке формується автоматично:

`http://bucket-name.s3-website.aws-region.amazonaws.com`

або

`http://bucket-name.s3-website-aws-region.amazonaws.com`

Для України найбільш близькими є регіони східної Європи eu-west-1 (Ireland), eu-west-2 (London), eu-west-3 (Paris).

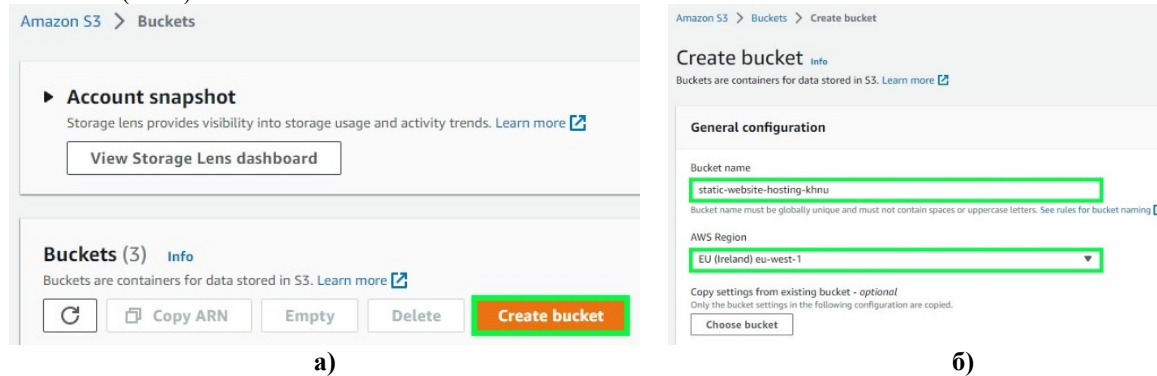


Рис. 1. Створення контейнера: а) панель консолі AWS; б) поля сторінки створення bucket

#### Наповнення контейнера.

Наповнення bucket контентом сайту активується кнопкою **Upload** (рис. 2а) вкладки **Objects** для обраного контейнера. У вікні завантаження даних (рис. 2б) кнопкою або перетягуванням в поле слід додати файли сайту в контейнер. Зазвичай обов'язковим є завантаження домашньої сторінки сайту – файлу `index.html`.

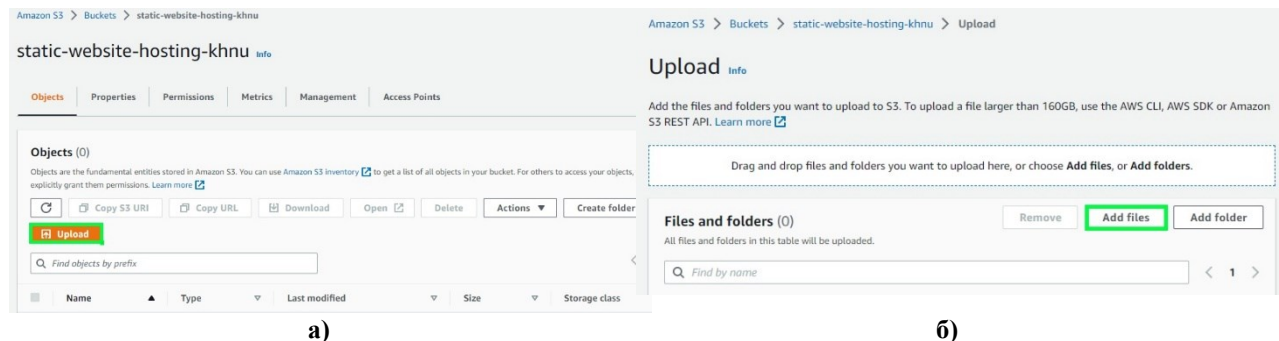


Рис. 2. Завантаження контенту статичного веб-сайту: а) список завантажених файлів; б) сторінка завантаження

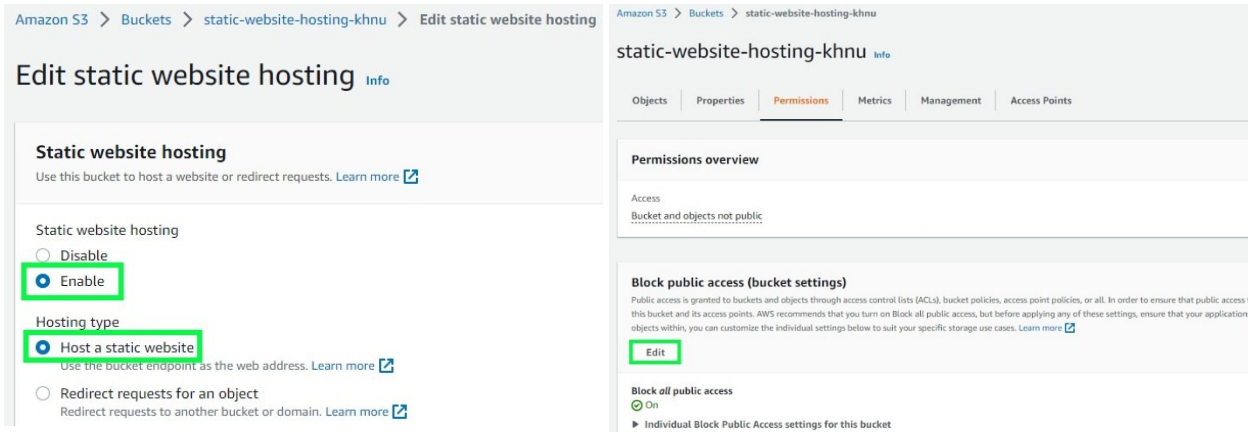
#### Визначення доступу до сайту

Для того, щоб файли контейнера інтерпретувалися як контент сайту та запити відображалися в веб-браузерах як сторінки сайту слід надати контейнеру властивості веб-сайту. Для цього на вкладці **Properties** (рис. 2а) контейнера потрібно активізувати поля **Static website hosting – Enable** та **Hosting type – Host a static website** (рис. 3а).

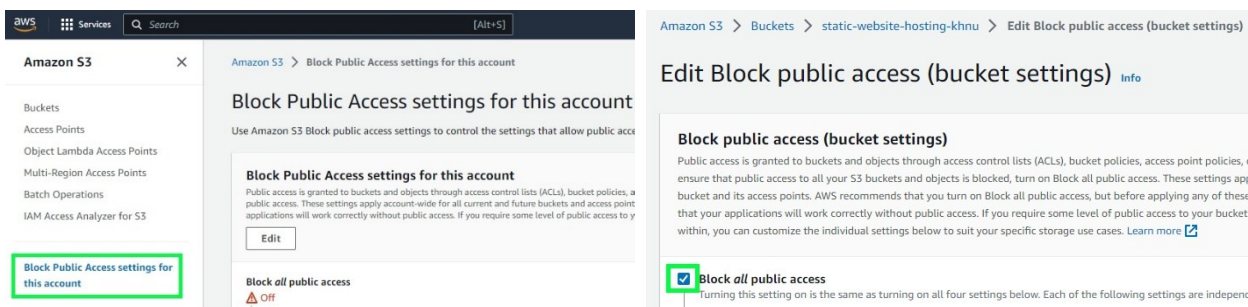
Дозволом на публічний доступ через інтернет до контейнера керує властивість **Block public access**. Поле **Block all public access** можна заповнити у вікні створення контейнера, кнопкою **Edit** блоку **Block public access** на вкладці дозволів **Permissions** контейнера (рис. 3б) та пунктом **Block Public Access settings for this account** головного меню консолі AWS S3 (рис. 4а).

Слід відмітити, що тільки надання дозволу публічного доступу недостатньо для хостингу статичних сайтів, додатково слід визначити правила доступу – політику **Bucket policy**.

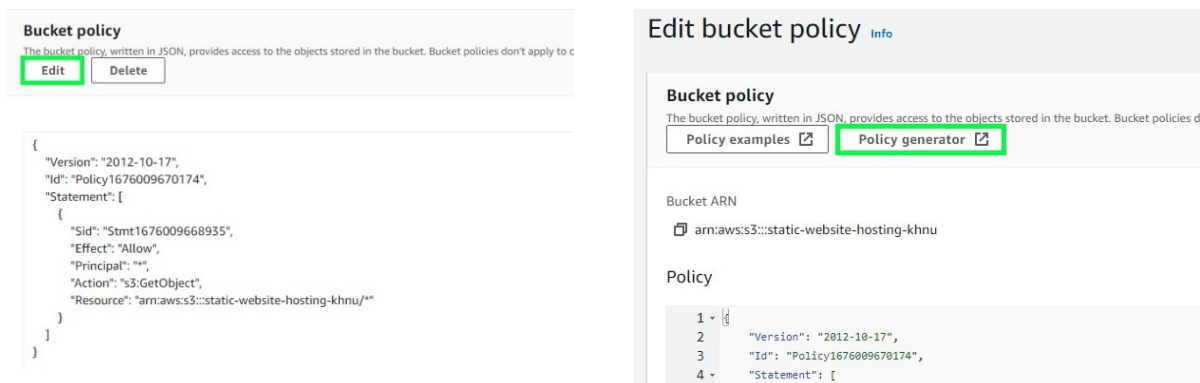
Політика може бути написана безпосередньо вручну в редакторі політик контейнера, вставлена в редактор політик із зовнішнього файлу формату JSON або вставлена «Ctrl-C/Ctrl-V» з вбудованого генератора політик. Редактор політик активується кнопкою **Edit** групи **Bucket policy** (рис. 5а) вкладки **Permissions** контейнера. Генератор політик активується кнопкою **Policy generator**, яка знаходиться над редактором політик (рис. 5б).



а) б)  
Рис. 3. Хостинг статичного веб-сайту: а) визначення типу контейнера; б) стан публічного доступу



а) б)  
Рис. 4. Керування публічним доступом: а) глобально; б) локально



а) б)  
Рис. 5. Політики доступу: а) вмикання редагування; б) локально

Генератор політик дозволяє в діалоговому режимі визначити правила роботи з контейнером та сформувавати файл в форматі JSON (рис. 6). Для забезпечення інтернет-доступу до статичного сайту обов'язковими є наступні записи: тип політики **Type of Policy** – *S3 Bucket Policy*, **Effect** – *Allow*, **Principal** – \*, **Actions** – *GetObject*, **ARN** – *arn:aws:s3:::bucket-name/\**.

**Вартісний аспект.** В межах пакета *Free Tier* [7] виділяється безкоштовно 5 Гб для контейнерів, 20 000 запитів *Get* та 2 000 запитів *Put*. Подальша оплата складає для перших 50 Тб на місяць – 0,023\$ за 1 Гб.

Недоліком описаного вище найбільш простого та дешевого способу хостингу сайту на AWS S3 є те, що він забезпечує тільки незахищене з'єднання за протоколом *http*. З урахуванням того, що сучасні браузерери на кшталт *Google Chrome*, *Mozilla Firefox* обмежують обмін з веб-сайтами за протоколом *https*, це стає суттєвим недоліком.

Для організації захищеного доступу до веб-сайту за протоколом *https* призначений сервіс AWS *CloudFront* [8]. *CloudFront* – це сервіс глобальної мережі доставки контенту (content delivery network CDN). За інформацією вендора [8, 9] *CloudFront* забезпечує зберігання даних в кеші протягом 24 годин (за замовчуванням) і використовує протокол TLSv1.3.

Підключення *CloudFront* до S3 проводиться в консолі AWS в діалоговому режимі та складається з наступних етапів: створення нової доставки контенту (distribution) та зміни відповідних дозволів та політик контейнера (S3 bucket).

Створення доставки контенту.

Створення доставки контенту (distribution) активується кнопкою **Create distribution** (рис. 7а) консолі AWS. У вікні створення доставки контенту (рис. 7б) здійснюються налаштування в групах **Origin**, **Default cache behavior** та **Settings**.

### Step 1: Select Policy Type

A Policy is a container for permissions. The different types of policies you can create are an IAM Policy, an S3 Bucket Policy, and an SQS Queue Policy.

Select Type of Policy **S3 Bucket Policy**

### Step 2: Add Statement(s)

A statement is the formal description of a single permission. See a description of elements that you can use in sta

Effect  Allow  Deny

Principal \*

Use a comma to separate multiple values.

AWS Service Amazon S3  All :

Use multiple statements to add permissions for more than one service.

Actions 1 Action(s) Selected  All Actions (\*\*)

Amazon Resource Name (ARN)

- GetMultiRegionAccessPointPolicy
- GetMultiRegionAccessPointPolicyStatus
- GetObject {BucketName}/\${KeyName}.
- GetObjectAcl
- GetObjectAttributes
- GetObjectLegalHold
- GetObjectRetention
- GetObjectTagging

d. You must enter a valid ARN

Рис. 6. Генератор політик

Налаштування в групі Origin.

Ключовим моментом є вибір вихідного домену **Origin domain**, оскільки це визначає спосіб підключення *CloudFront* до S3 і, відповідно, всі подальші налаштування. *CloudFront* можна налаштувати двома способами: використовуючи протокол обміну S3 REST API endpoint або стандартний веб доступ – S3 website endpoint. За замовчуванням AWS пропонує підключення через REST API endpoint (рис. 8а). Підключення через website endpoint потребує введення в поле **Origin domain website endpoint** контейнера (рис. 8б).

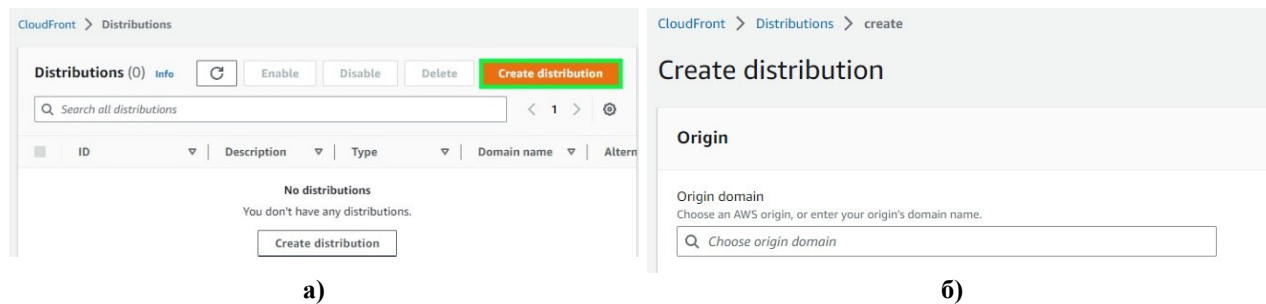


Рис. 7. Створення доставки контенту: а) панель консолі AWS; б) поля сторінки створення *distribution*

Конфігурація REST API endpoint підтримує SSL з'єднання для загальнодоступного (public) та приватного (private) контенту, що вдовольняє сучасним вимогам кібербезпеки та забезпечує найбільш захищене з'єднання. Тому детальніше зупинимось на особливостях налаштувань з конфігурацією REST API endpoint.

Обирається вихідний домен **Origin domain** за назвою контейнера (рис. 8а), після чого з'являється можливість налаштувати правила доступу до контенту. Для підвищення безпеки сайту рекомендується використовувати *Origin access control settings* (рис. 9а), при якому доступ до контенту буде здійснюватися виключно через *CloudFront*. Налаштування контролю доступу до контенту активуються кнопкою **Create control setting** (рис. 9а) після активації *Origin access control settings (recommended)* та створюються AWS автоматично (рис. 9б). При цьому генерується нова політика доступу до контейнера (S3 bucket policy), яка стає доступною для копіювання після визначення способу доставки контенту (distribution).

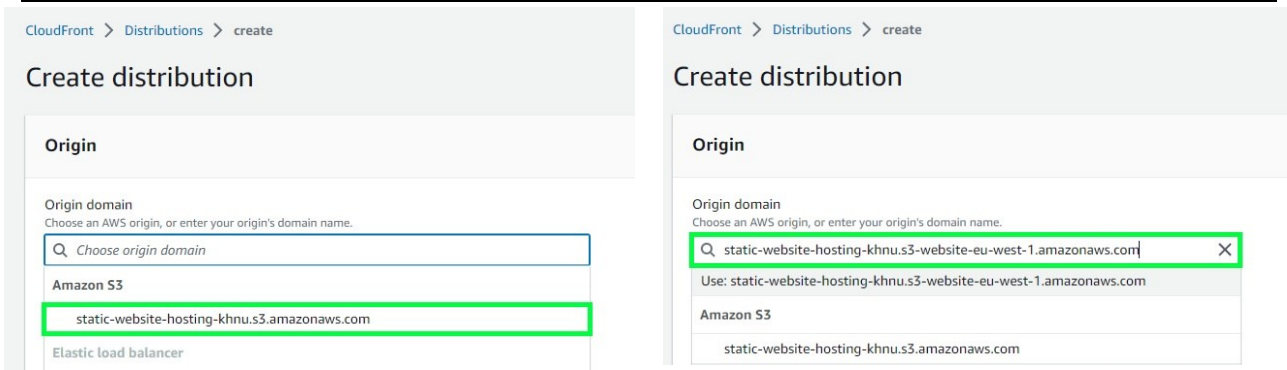


Рис. 8. Підключення CloudFront до S3: а) через S3 REST API endpoint; б) через S3 website endpoint

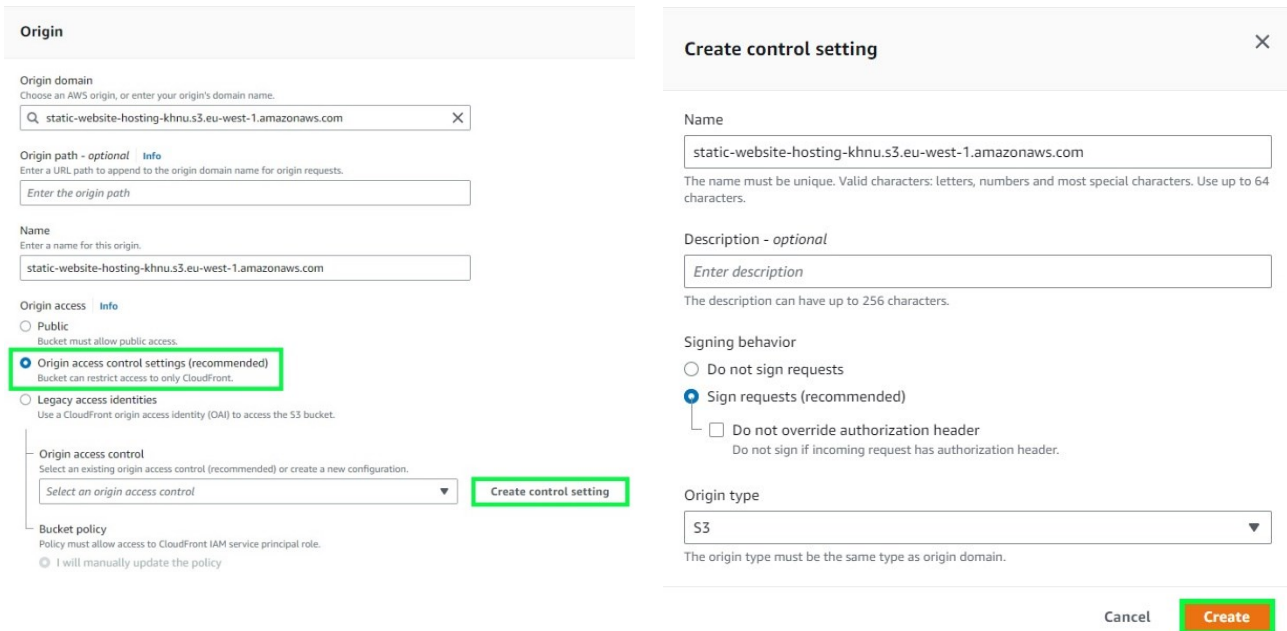


Рис. 9. Налаштування правил доступу до контенту: а) встановлення доступу до контенту виключно через CloudFront; б) поля сторінки створення контролю доступу

*Налаштування в групі Default cache behavior.*

В даній групі налаштовується протокол з'єднання. Оскільки найбільш безпечним є з'єднання за протоколом *https*, то слід активізувати поле **Redirect http to https** для того, щоб всі *http* запити були перенаправлені по *https*.

*Налаштування в групі Settings.*

В групі вказується ім'я домашньої сторінки сайту, зазвичай файлу *index.html*, яке буде вказувати кореневий об'єкт за замовчуванням **default root object**

*Зміна дозволів та політик контейнера (S3 bucket).*

Для забезпечення приватності даних контейнера слід скасувати публічний доступ до нього та вимкнути властивість здійснювати хостинг статичного веб-сайту. Для цього активується поле **Block all public access** на вкладці **Permissions** та деактивується поле **Static website hosting – Disable** на вкладці **Properties** контейнера. Також змінюється політика **Bucket policy** на ту, що була згенерована при створенні *distribution* (рис. 10а). Рекомендується її скопіювати та замінити одразу після створення *distribution* (рис. 10б). Або ж здійснюється копіювання нової політики доступу до контейнера в групі **Settings** вкладки **Origin** створеної доставки контенту (*distribution*) після активації вікна змін вкладки **Origin** кнопкою **Edit**.

**Вартісний аспект.** В межах пакета *Free Tier* [10] для сервісу *CloudFront* виділяється безкоштовно 1 Тб передачі даних на місяць, 10 000 000 *http/https* запитів на місяць, 2 000 000 запусків на місяць та безкоштовний SSL сертифікат. Подальша оплата залежить від обраного класу та кількості запитів [10]. При використанні всіх точок доступу (*All edge locations*) отримуємо найкращу продуктивність, але трохи більшу вартість. При виборі *North America, Europe, Asia, Middle East and Africa* виключаються найбільш дорогі точки. Найдешевшим варіантом є *Only North America and Europe*.

Недоліком розглянутого методу є незручна назва сайту, яку надає *CloudFront* автоматично. Наприклад, *https://d61hcg6rlrnk1.cloudfront.net*.

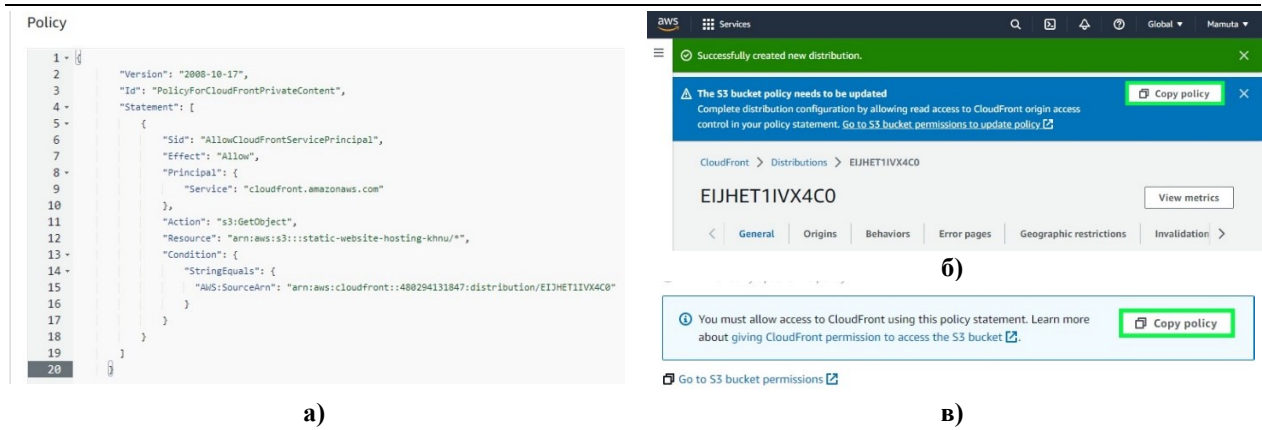


Рис. 10. Нова політика доступу до контейнера: а) власне політика; б) копія політики після створення distribution; в) копія політики в групі Settings вкладки Origin

Проте можна отримати доменне ім'я скориставшись сервісом Route 53 або ж можна скористатись послугами інших DNS провайдерів. За умови використання сервісу Route 53 вартість послуги стартує з 9\$ на рік залежно від розширення, наприклад, .com коштує 13\$ на рік, .org – 12\$ на рік. Детально з вартістю послуг Route 53 можна ознайомитися за посиланням [11].

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Сервіс S3 за рахунок інтеграції в основний сервіс AWS Simple Storage Service «зберігання даних як послуга» (Storage as a Service – SaaS) можливостей хмарного сервісу «об'єктний контейнер як послуга» (Container as a Service – CaaS) у вигляді контейнерів (bucket) для зберігання html, css, мультимедіа та інших файлів сайту надає можливість зберігати контент статичних веб-сайтів, та проводити хостинг сайтів.

Інтеграція AWS S3 з програмним забезпеченням мережі доставки контенту (Content Delivery Network – CDN) AWS CloudFront та сервісом адміністрування доменних імен (Domain Name Service – DNS) AWS Route 53 забезпечує повний набір інструментів для зручного та безпечного хостингу сайтів.

Сервіс може бути корисним для приватних користувачів, малих підприємств та організацій, стартапів тощо.

### Література

- Смірнова Т. В. Дослідження хмарних технологій як сервісів / Т. В. Смірнова, Л. І. Поліщук, О. А. Смірнов, К. О. Буравченко, та А. О. Макевнін // Кібербезпека: освіта, наука, техніка. – 2020. – Т. 3, № 7. – С. 43-62.
- Офіційний сайт AWS. Amazon S3 Storage Classes [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://aws.amazon.com/s3/storage-classes/>
- Офіційний сайт AWS. Web Hosting [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://aws.amazon.com/websites/>
- Клейменова С. М. Послуги хостингу в системі послуг / С. М. Клейменова // Наукові записки Центральноукраїнського державного педагогічного університету імені В. Винниченка. Серія: Право». – 2019. – Вип. 6. – С. 26-29.
- Комарова Д. В. Дослідження можливостей хмарних технологій у сфері інтернет-хостингу / Д. В. Комарова, А. В. Григор'єв // Системи обробки інформації. – 2014. – Вип. 2 (118). – С. 171-173.
- Кравченко, І. В. Інформаційні технології [Електронний ресурс] : підручник для студ. спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / І. В. Кравченко, В. І. Микитенко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 17.29 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 447 с.
- Офіційний сайт AWS. Amazon S3 pricing [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://aws.amazon.com/s3/pricing/>
- Офіційний сайт AWS. Amazon CloudFront [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://docs.aws.amazon.com/AmazonCloudFront/latest/DeveloperGuide/Introduction.html>
- Офіційний сайт AWS. Amazon CloudFront Key Features [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://aws.amazon.com/cloudfront/features>
- Офіційний сайт AWS. Amazon CloudFront Pricing [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://aws.amazon.com/cloudfront/pricing/>
- Офіційний сайт AWS. Amazon Route 53. Registering a new domain [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://docs.aws.amazon.com/Route53/latest/DeveloperGuide/domain-register.html>

---

**References**

1. Smirnova T. Research of Cloudy Technologies as a Services / T. Smirnova, L. Polishchuk, O. Smimov, K. Buravchenko & A. Makevnin // *Cybersecurity: Education, Science, Technique*. – 2020. – Vol. 3, № 7. – S. 43-62.
2. AWS S3. Amazon S3 Storage Classes. URL: <https://aws.amazon.com/s3/storage-classes/>
3. AWS. Web Hosting. URL: <https://aws.amazon.com/websites/>
4. Kleimenova S. Hosting Services in the Service System / S. Kleimenova // *Scientific Notes. Series: Law*. – 2019. – Vol. 6. – S. 26-29.
5. Komarova D. V. Research of Cloud Technology Opportunities in the Internet-Hosting / D. V. Komarova, A. V. Grigoriev // *Information Processing Systems*. – 2014. – Vol. 2 (118). – S. 171-173.
6. Kravchenko I. V. Information technologies. Textbook / I. V. Kravchenko, V.I. Mykytenko ; Igor Sikorsky KPI . – Kyiv : Igor Sikorsky KPI, 2022. – 447 p.
7. AWS. Amazon S3 pricing. URL: <https://aws.amazon.com/s3/pricing/>
8. AWS. Amazon CloudFront. URL: <https://docs.aws.amazon.com/AmazonCloudFront/latest/DeveloperGuide/Introduction.html>
9. AWS. Amazon CloudFront Key Features. URL: <https://aws.amazon.com/cloudfront/features>
10. AWS. Amazon CloudFront Pricing. URL: <https://aws.amazon.com/cloudfront/pricing/>
11. AWS. Amazon Route 53. Registering a new domain. URL: <https://docs.aws.amazon.com/Route53/latest/DeveloperGuide/domain-register.html>

**МАРТИНЮК Тетяна**Вінницький національний технічний університет  
<https://orcid.org/0000-0001-9952-9438>  
e-mail: [martyniuk.t.b@gmail.com](mailto:martyniuk.t.b@gmail.com)**КОЖЕМ'ЯКО Андрій**Вінницький національний технічний університет  
<https://orcid.org/0000-0001-7323-7146>  
e-mail: [kvantron@gmail.com](mailto:kvantron@gmail.com)**БОРТНИК Геннадій**Вінницький національний технічний університет  
<https://orcid.org/0000-0001-7083-2775>  
e-mail: [bgen88@gmail.com](mailto:bgen88@gmail.com)**ВОЙНАЛОВИЧ Олександр**Вінницький національний технічний університет  
e-mail: [sashavoinalovich@gmail.com](mailto:sashavoinalovich@gmail.com)

## АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ «ТРИВАЛІСТЬ-КОД»

У статті представлено результати аналізу особливостей аналого-цифрового перетворення неперервної величини як тривалості вхідного сигналу у вихідний цифровий код. Перетворювачі, які працюють за таким принципом, відомі як аналого-кодові перетворювачі, а сам принцип перетворення є різновидом відомої широтно-імпульсної модуляції (ШИМ). Як вхідну аналогову інформацію може бути використано інформацію різної природи, наприклад, тривалість оптичного, електричного або звукового сигналу. Конкретно принцип даного перетворення з подальшим обробленням цифрової інформації використовує відомий логіко-часовий базис, оскільки основним операційним параметром перетворення є тривалість часу, а оброблення цифрових даних виконується за правилами картинної логіки з природним паралелізмом оброблення на двовимірному полі подання інформації. Особливістю такого підходу до перетворення тривалості вхідних сигналів є кодування вихідної цифрової інформації в одиничних кодах. У цьому випадку задіяно два відомих одиничних коди: одиничний нормальний та одиничний позиційний коди. Це пов'язано з тим, що одиничне кодування є найбільш пристосованим для аналого-цифрового перетворення «тривалість-код» через квантування тривалості вхідного сигналу часом спрацьовування лінійки бістабільних елементів. Показано, що найбільш прийнятною реалізацією стосовно швидкодії та енергоємності є симбіоз цих двох кодів, оскільки одиничний нормальний код є більш швидкодіючим при записі інформації, але програє одиничному позиційному коду в енергоємності при збереженні даних. Враховуючи контролездатність одиничного позиційного коду, областю його ефективного застосування визначено кодування станів пристроїв керування та адресацію вмісту запам'ятовувальних пристроїв, наприклад, у складі асоціативних процесорів.

Ключові слова: аналого-цифрове перетворення, одиничний код, логіко-часове оброблення.

MARTYNIUK Tatiana, KOZHEMIAKO Andriy, BORTNYK Gennadiy, VOINALOVYCH Oleksandr  
Vinnytsia National Technical University

### ANALYSIS OF FEATURES OF ANALOG-TO-DIGITAL CONVERSION "DURATION-CODE"

The article presents the analysis results of the features of the analog-to-digital conversion of a continuous value as the duration of the input signal into the output digital code. Converters that work according to this principle are known as analog-code converters, and the conversion principle is a type of well-known pulse-width modulation (PWM). Information of a different nature can be used as input analog information, for example, the duration of an optical, electrical or sound signal. Specifically, the principle of this conversion with further processing of digital information uses a well-known logic-time basis, since the main operational parameter of the conversion is the duration of time, and the processing of digital data is performed according to the rules of picture logic with natural parallelism of processing on a two-dimensional field of information presentation. A feature of this approach to the conversion of input signals duration is the coding of output digital information in unit codes. In this case, two well-known unit codes are involved: unit normal and unit positional codes. This is because unit encoding is best suited for duration-to-code analog-to-digital conversion due to the quantization of the input signal duration by the trigger time of a line bistable elements. It is shown that the most acceptable implementation in terms of speed and energy consumption is the symbiosis of these two codes, since the unit normal code is faster when recording information, but loses to the unit positional code in terms of energy consumption when storing data. Taking into account the controllability of a unit positional code, the area of its effective application is the coding of the states of control devices and the addressing of the contents of storage devices, for example, as part of associative processors.

Keywords: analog-to-digital conversion, unit code, logic-time processing.

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

Навоколишнє середовище є аналоговим за своєю природою сприйняття людиною. Разом з тим, організм людини пристосований для орієнтування у цьому світі. Це стосується таких факторів, як світло, тепло, дальність (відстань), колір, рух (наприклад, рух повітряних мас), а також час. Всі вони крім конкретних, належних тільки їм властивостей, мають одну загальну, а саме, тривалість у часі.

Разом з тим, уся наявна вимірювальна та обчислювальна техніка оперує оцифрованими даними. Отже, актуальною залишається потреба в ефективних перетворювачах інформації аналого-цифрового та цифро-аналогового типу із застосуванням як поширених двійково-кодованих, так і альтернативних способів подання цифрових даних [1, 2].

### Аналіз досліджень та публікацій

Серед широко відомих публікацій на тему аналого-цифрового та цифро-аналогового перетворень варто відзначити праці проф. О. Д. Азарова [1, 2], в яких увагу приділено надлишковим позиційним системам числення. Крім того, альтернативним двійковим методам кодування інформації, а саме, кодам Фібоначчі, присвячено монографію проф. В. А. Лужецького [3]. У низці монографій проф. В. П. Кожем'яки [4, 5] запропоновано специфічний метод перетворення вхідного зображення як неперервної оптичної інформації у цифровий код, для чого використовується різновид відомих одиничних кодів. Разом із тим, особливості перетворювачів неперервних величин в код у складі бортових систем оброблення сигналів детально розглянуто у монографії В. О. Погрібного [6].

### Формування цілей статті

Метою роботи є аналіз особливостей аналого-цифрового перетворення із застосуванням такої характеристики як тривалість вхідної інформації з представленням результату з нетрадиційним кодуванням.

### Різновид широтно-імпульсної модуляції

У монографіях проф. В. П. Кожем'яки [4, 5] наведено та докладно досліджено принцип перетворення неперервної величини, а саме тривалості вхідного сигналу у цифровий код. Такі перетворювачі відомі як аналого-кодові перетворювачі [6]. А сам принцип перетворення є різновидом відомої широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

У працях [4, 5] цей принцип перетворення оптичного сигналу визначено як «квантування світла променем, що несе у своїй тривалості інформацію». Разом з тим, такий підхід може бути ефективно застосований до вхідної аналогової інформації різної природи, наприклад, тривалості неперервного електричного сигналу, а сам метод перетворення можна визначити як аналого-цифрове (АЦ) перетворення «тривалість-код».

Отже, базове правило такого виду перетворення можна подати в такий спосіб [7]:

$$\theta = n\tau, \quad (1)$$

де  $\theta$  – тривалість вхідного сигналу;  $\tau$  – час спрацювання бістабільного елемента;  $n$  – кількість бістабільних елементів.

Ще однією особливістю даного методу АЦ перетворення є застосування при його реалізації так званого логіко-часового базису [4, 5, 6]. Таку назву операційного базису можна пояснити тим, що основним інформаційним параметром є тривалість часу, а оброблення інформації виконується за принципами картинної логіки, а саме, з природним паралелізмом подання та оброблення на двовимірному полі зображення [4, 5, 8, 9].

У даній статті не розглядається спосіб визначення та усунення похибок такого методу АЦ перетворення, хоча це є обов'язковою складовою у теорії аналого-цифрового та цифро-аналогового перетворення. У даному випадку основну увагу приділено особливостям кодування вихідної цифрової інформації.

### Особливості одиничного кодування інформації

Особливістю АЦ перетворення «тривалість-код» за виразом (1) є те, що найбільш природним для кодування вихідної цифрової інформації є одиничний код [5, 10, 11]. Відомо три різновиди одиничних кодів: одиничний парний, одиничний нормальний та одиничний позиційний коди [10 – 12].

Кодові комбінації  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ , де  $m$  – розрядність подання кодового слова, для трьох одиничних кодів мають такий вигляд:

а) для одиничного парного коду:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 1100\dots 00, \\ \alpha_2 &= 0110\dots 00, \end{aligned} \quad (2)$$

...

$$\alpha_m = 0000\dots 11,$$

б) для одиничного нормального коду :

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 100\dots 0, \\ \alpha_2 &= 110\dots 0, \end{aligned} \quad (3)$$

...

$$\alpha_m = 111\dots 1,$$

в) для одиничного позиційного коду:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 100\dots 0, \\ \alpha_2 &= 010\dots 0, \end{aligned} \quad (4)$$

...

$$\alpha_m = 000\dots 1.$$



Серед наведених трьох кодів еквідистантним, тобто здатним виявляти одиночні помилки, є тільки одиничний позиційний код, оскільки відстань Хеммінга між будь-якими двома його кодовими комбінаціями (4) дорівнює 2 [13]. У подальшому доцільно розглянути тільки два коди одиничний нормальний (3) та одиничний позиційний (4), оскільки саме таке кодування є найбільш пристосованим для АЦ перетворення «тривалість-код» через квантування тривалості вхідних сигналів за правилом (1).

У статтях [14, 15] детально досліджено ці два коди за такими показниками, як контролездатність, надлишковість, систематичність, лінійність, циклічність, рівномірність та рівнозваженість. Для дослідження було задіяно такі базові поняття з алгебраїчної теорії кодування, як матричне кодування, блокова довжина, перевірна матриця, синдром, кодова попарна відстань, вага слова, суміжний клас, лідер. Крім того, у статті [16] розглянуто функціональну повноту логіко-часового принципу зображення інформації у вигляді цих двох одиничних кодів.

Очевидно, що для апаратного запису, збереження та зчитування одиничних кодів доцільно використовувати зсувні регістри як аналог так званих операційних модулів, що містять лінійку з  $n$  бістабільних елементів [4, 5, 10]. Останні зорієнтовано на реалізацію на оптоелектронній елементній базі.

У працях [4, 5, 10, 17] розглянуто особливості одиничних кодів з точки зору їх ефективної апаратної реалізації. Показано переваги їх реалізації на зсувних регістрах (операційних модулях) порівняно з реалізацією на двійкових лічильниках [17].

Крім того, у працях [4, 5, 10] проведено аналіз одиничного нормального та одиничного позиційного кодів стосовно таких параметрів, як швидкодія та енергоємність при їх записі та збереженні. В результаті підтверджено, що одиничний нормальний код є більш швидкодіючим при записі, ніж одиничний позиційний код, але програє йому в енергоємності при збереженні інформації. Тому, під час апаратної реалізації процесу запису і подальшого збереження інформації було запропоновано їх симбіоз, тобто використання одиничного нормального коду при записі («шторка») та перетворення результату в одиничний позиційний код при збереженні («маркер») [4, 5, 10].

Щодо області ефективного застосування тільки для одиничного позиційного коду, враховуючи його контролездатність, визначено доцільність кодування станів пристроїв керування на базі R-автомата [18] та адресацію вмісту запам'ятовувального пристрою, наприклад, в асоціативному процесорі [19].

#### **Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі**

Разом із відомими методами та засобами аналого-цифрового перетворення існує достатньо досліджений метод, що використовує перетворення типу «тривалість-код» у логіко-часовому базисі.

Доведено, що результатом такого підходу є формування вихідного сигналу у вигляді одного із двох одиничних кодів: одиничного нормального або одиничного позиційного коду, які є альтернативними двійковим кодам.

Дослідження обох одиничних кодів за вимогами алгебраїчної теорії кодування показало співвідношення їх базових показників, з яких найважливішим є показник контролездатності одиничного позиційного коду завдяки його практичній значимості, зокрема, для безпомилкового функціонування пристроїв керування.

#### **Література**

1. Азаров О. Д. Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення: монографія / О. Д. Азаров. – Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2004. – 257 с.
2. Азаров О. Д. Аналого-цифрове порозрядне перетворення на основі систем числення з ваговою надлишковістю: монографія / О. Д. Азаров. – Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2010. – 232 с.
3. Луژهцький В. А. Високнадійні математичні Фібоначчі – процесори: монографія / В. А. Луژهцький. – Вінниця: "УНІВЕРСУМ - Вінниця", 2000. – 248 с.
4. Кожемяко В. П. Оптоэлектронные логико-временные информационно-вычислительные среды / В. П. Кожемяко. – Тбилиси : Изд-во Мецниереба, 1984. – 260 с.
5. Свечников С. В. Квазиимпульсно-потенциальные оптоэлектронные элементы и устройства логико-временного типа / С. В. Свечников, В. П. Кожемяко, Л. И. Тимченко. – Киев: Наук. думка, 1987. – 256 с.
6. Погрибной В. А. Бортовые системы обработки сигналов / В.А.Погрибной. – Киев: Наук. думка, 1984. – 216 с.
7. Мартинюк Т. Б. Особливості аналого-цифрового перетворення в логіко-часовому базисі/ Т. Б.Мартинюк, М. О.Зайцев, М. В. Микитюк// Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2021. - №1(50). – С. 80 – 85. DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2021-50-1-80-85>
8. Кожем'яко В. П. Квантові перетворювачі на оптоелектронних логіко-часових середовищах для око-процесорної обробки зображень: монографія/ В. П.Кожем'яко, Т. Б.Мартинюк, О. І Суприган., Д. І.Клімкіна. - Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 126с.
9. V. Kozhemiako, T. Martyniuk, O. Kozhemiako. Vector-matrix conversions for parallel information processing in logic-time base. Proceedings of SPIE, Vol. 4425. pp. 106-108. 2001.
10. Кожемяко В.П. Оптоэлектронная схемотехника: учеб. пособие / В.П. Кожемяко,

О.Г.Натрошвили, Т.Б.Мартынюк, Л.Ш.Имнашвили. – Киев: УМК ВО, 1988. – 276с.

11. Самофалов К. Г. Цифровые многозначные элементы и структуры / К. Г. Самофалов, В. И. Корнейчук, А. М. Романкевич, В. П. Тарасенко. - Киев: Вища школа, 1974. – 162 с.

12. Мартинюк Т. Б. Особливості логіко-часового зображення числової інформації / Т. Б. Мартинюк, О. М. Тарасова, М. М. Аль-Хіярі // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2000. – №1. – С.72 – 76.

13. Мартинюк Т. Б. Еквідистантність та одиничні коди / Т. Б. Мартинюк, О. В. Войцеховська, О. С. Городецька // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2021. – №1(41). – С.20 – 24.

14. DOI : 10.31649/1681-7893-2021-41-1-20-24.

15. Кожем'яко В. П. Класифікація одиничних кодів / В. П. Кожем'яко, Т. Б. Мартинюк, В. В. Дмитрук,

В. В. Власійчук // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2006. – №1(11). – С. 36 – 42.

16. Мартинюк Т. Б. Аналіз можливостей одиничного кодування числової інформації / Т. Б. Мартинюк, Мохамед Салем Нассер, В. В. Власійчук, О. М. Наконечний // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2005. – №2(10). – С. 39 – 44.

17. Мартинюк Т. Б. Функційна повнота логічно-часового принципу зображення інформації / Т. Б. Мартинюк, М. М.Аль-Хіярі, С. А. Василецький // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2000. – №2. – С.48 – 52.

18. Мартинюк Т. Б. Ефективність одиничного кодування даних / Т. Б. Мартинюк, О. В.Войцеховська // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2021. – №2(51). – С 30-36. DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2021-51-2-30-36>.

19. Мартинюк Т. Б. Завадостійкість одиночного кодування для пристроїв керування / Т. Б. Мартинюк, О. В. Войцеховська, М. А. Очуров // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2022. – №1(53). – С. 37-42. DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2022-53-1-37-42>.

20. Мартынюк Т. Б. Организация ассоциативного процессора с поразрядно-последовательной обработкой информации/ Т. Б. Мартынюк // Электронное моделирование. – 1996. – Т.18. – №3. – С. 28 – 31.

#### References

1. Azarov O. D. Osnovy teorii analoho-tsyfrovoho peretvorennia na osnovi nadlyshkovykh pozytsiinykh system chyslennia: monohrafiia / O. D. Azarov. – Vinnytsia: UNIVERSUM, 2004. – 257 s.

2. Azarov O. D. Analoho-tsyfrove porozriadne peretvorennia na osnovi system chyslennia z vahovoiu nadlyshkovistiui: monohrafiia / O. D. Azarov. – Vinnytsia: UNIVERSUM, 2010. – 232s.

3. Luzhetskyi V. A. Vysokonadiini matematychni Fibonachchi – protsesory: monohrafiia / V. A. Luzhetskyi. – Vinnytsia: "UNIVERSUM - Vinnytsia", 2000. – 248 s.

4. Kozhemiako V. P. Optoelektronnye lohyko-vremennye ynformatsyonno-vychyslytelnye srede / V. P. Kozhemiako. – Tbylisy : Yzd-vo Metsnyereba, 1984. – 260 s.

5. Svechnykov S. V. Kvazyimpulsno-potentsyalnye optoelektronnye elementy y ustroistva lohyko-vremennoho typu / S. V. Svechnykov, V. P. Kozhemiako, L. Y. Tymchenko. – Kyev: Nauk. dumka, 1987. – 256 s.

6. Pohrybnoi V. A. Bortovye systemy obrabotky syhnalov / V. A. Pohrybnoi. – Kyev : Nauk. dumka, 1984. – 216 s.

7. Martyniuk T. B. Osoblyvosti analoho-tsyfrovoho peretvorennia v lohiko-chasovomu bazysi / T. B. Martyniuk, M. O. Zaitsev, M. V. Mykytiuk // Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna inzheneriia. – 2021. – №1(50). – S. 80 – 85. DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2021-50-1-80-85>

8. Kozhemiako V. P. Kvantovi peretvoriuvachi na optoelektronnykh lohiko-chasovykh seredovyshchakh dlia oko-protseornoi obrobky zobrazen: monohrafiia / V. P. Kozhemiako, T. B. Martyniuk, O. I. Supryhan., D. I. Klimkina. – Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia, 2007. – 126 s.

9. V. Kozhemiako, T. Martyniuk, O. Kozhemiako. Vector-matrix conversions for parallel information processing in logic-time base. Proceedings of SPIE, Vol. 4425. Pp. 106 –108. 2001.

10. Kozhemiako V.P. Optoelektronnaia skhemotekhnika: ucheb. posobyie / V. P. Kozhemiako, O. H. Natroshvyly, T. B. Martyniuk, L. Sh. Ymnaishvily. – Kyev: UМК ВО, 1988. – 276 s.

11. Samofalov K. H. Tsyfrovye mnohoznachnye elementy y struktury / K. H. Samofalov, V. Y. Korneichuk, A. M. Romankevych, V. P. Tarasenko. – Kyev: Vyshcha shkola, 1974. – 162 s.

12. Martyniuk T. B. Osoblyvosti lohiko-chasovoho zobrazhennia chyslovoi informatsii / T. B. Martyniuk, O. M. Tarasova, M. M. Al-Khiari // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnogo instytutu. – 2000. – №1. – S.72 – 76.

13. Martyniuk T. B. Ekvidystantnist ta odynychni kody / T. B. Martyniuk, O. V. Voitsekhovska, O. S. Horodetska // Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii. – 2021. – №1(41). – S.20 – 24. DOI : 10.31649/1681-7893-2021-41-1-20-24.

14. Kozhemiako V. P. Klasyfikatsiia odynychnykh kodiv / V. P. Kozhemiako, T. B. Martyniuk, V. V.Dmytruk, V. V. Vlasiihuk // Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii – 2006. – №1(11). – S. 36 – 42.

15. Martyniuk T. B. Analiz mozhlyvostei odynychnogo koduvannia chyslovoi informatsii / T. B. Martyniuk, Mokhamed Salem Nasser, V. V.Vlasiichuk, O. M.Nakonechnyi // Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii. – 2005. – №2(10). – S. 39 – 44.

16. Martyniuk T. B. Funktsiina povnota lohichno-chasovoho pryntsyup zobrazhennia informatsii/ T. B. Martyniuk, M. M.Al-Khiari, S. A. Vasyletsyky // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnogo instytutu. – 2000. – №2. – S. 48 –52.

17. Martyniuk T. B. Efektyvnist odynychnogo koduvannia danykh/ T. B. Martyniuk, O. V.Voitsekhovska //Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna inzheneriia. – 2021. – №2(51). – S. 30 – 36. DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2021-51-2-30-36>.

18. Martyniuk T.B. Zavadoostiikist odynochnogo koduvannia dlia prystroiv keruvannia / T. B. Martyniuk, O. V. Voitsekhovska, M. A. Ochkurov // Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna inzheneriia. – 2022. – №1(53). – S. 37 –42. DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2022-53-1-37-42>.

19. Martyniuk T.B. Orhanyzatsiia assotsyatyvnoho protseornia s porazriadno-posledovatelnoi obrabotkoi ynformatsyy / T. B. Martyniuk // Elektronnoe modelyrovanye. – 1996. – Т.18. – №3. – S. 28 – 31.

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-139-144>

УДК 687.17:620.193

МИХАЙЛОВА Ніна

Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, м. Северодонецьк

ПРИВАЛА Валерій

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3465-6369>

[pva2012hnu@gmail.com](mailto:pva2012hnu@gmail.com)

ЛУЩЕВСЬКА Олена

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-2689-798X>

[lushchevskao@khmnu.edu.ua](mailto:lushchevskao@khmnu.edu.ua)

## ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР НА МАТЕРІАЛИ ІЗ ПОЛІМЕРНИМ ПОКРИТТЯМ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ В СТАТИЧНИХ УМОВАХ

*В статті проаналізовано результати дослідження впливу низьких температур в діапазоні від  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $-40^{\circ}\text{C}$  на проби матеріалів, які розглядаються як вірогідні для створення ізолюючих костюмів для слюсарів-апаратників хімічних виробництв. Для проведення досліджень авторами публікації розроблена відповідна методологія, яка ґрунтується на використанні оригінальної дослідної установки. За результатами досліджень визначені ті матеріали, які є найбільш стійкими до впливу низьких температур, і які можуть бути рекомендовані для виготовлення ізолюючих захисних костюмів для працівників хімічних виробництв.*

*Ключові слова: ізолюючий костюм, хімічна промисловість, низькі температури, агресивне середовище, статичні умови.*

МИХАЙЛОВА Ніна

Volodymyr Dahl Eastern National University, m. Severodonetsk

PRIVALA Valerii, LUSHCHEVSKA Olena

Khmelnytskyi National University

## STUDY OF THE INFLUENCE OF LOW TEMPERATURES ON MATERIALS WITH A SPECIAL PURPOSE POLYMER COATING UNDER STATIC CONDITIONS

*The domestic chemical industry urgently needs the creation of special high-class protective clothing that would allow working in extreme conditions without endangering the life and health of employees. In previous publications, it was determined that the necessary comprehensive protection against the effects of harmful production factors is provided by the creation and use of an insulating suit, which should become a barrier that prevents the penetration, and therefore the influence of mineral acids, alkalis, ammonia, salt solutions, etc. of different concentrations. That is, it is about the creation of special clothing with the required level of protection and preservation of such basic protective indicators as chemical resistance and impermeability of the material while preserving the tightness of the product as a whole.*

*Equipment for preparation and locksmiths for cleaning closed containers for transportation and storage of aggressive environments can simultaneously be exposed not only to mineral acids, alkalis, salt solutions based on them, but also to the remains of liquid ammonia, the evaporation of which occurs when temperatures drop, which leads to primary destruction polymer coating materials for special suits. For example, local destruction in contact with liquid ammonia leads to a sharp cooling (up to  $-340^{\circ}\text{C}$ ) of the contact surface of the material and destruction of the polymer coating, especially during operation (in dynamics), which can lead to a violation of the tightness of the protective product.*

*Since workers have to perform a significant number of work movements while wearing an insulating suit, there was a need to investigate such an indicator as the resistance of materials to both dynamic loads and static conditions at low temperature. The research was conducted on samples of materials with a polymer coating, which belong to the class of special purpose artificial leathers of both foreign and domestic manufacturers.*

*Key words: insulating suit, chemical industry, low temperatures, aggressive environment, static conditions.*

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Як було зазначено раніше [1], на вітчизняних підприємствах хімічної промисловості існують певні проблеми щодо забезпечення робітників якісним спеціальним одягом. Особливо гостро це питання постало у напрямку створення захисного одягу для працівників, виконання професійних обов'язків яких відбувається в умовах активного агресивного середовища. Зокрема це стосується слюсарів-апаратників, які здійснюють технічно-регламентні роботи ємностей для зберігання та транспортування речовин, що входять до комплексу небезпечних і шкідливих виробничих факторів (НШВФ). Особливості умов праці і наліз якості захисного одягу саме для цієї категорії робітників детально розглянуто у попередніх публікаціях [2].

З огляду на це визначено, що необхідний комплексний захист від впливу НШВФ передбачається за рахунок створення і використання ізолюючого костюму (ІК), який має стати бар'єром, що перешкоджає проникненню та впливу розчинів солей, лугів, мінеральних кислот, аміаку, тощо різних концентрацій.

Отже, йдеться про створення спеціального одягу з необхідним рівнем забезпечення та збереження таких основних захисних показників, як хімічна стійкість і непроникність матеріалу при збереженні

герметичності виробу в цілому. Тому питання методології добору матеріалів (або їх пакету) для створення ІК є первинним та актуальним.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні міжнародні розробки періодично наповнюють світовий ринок зразками виробничого захисного одягу для використання в різноманітних шкідливих умовах праці. Закордонні виробники захисного одягу постійно пропонують нові конструктивні і технічні рішення [3–7], проте переважна їх більшість спрямована на створення захисту тільки від вологи та переохолодження. Що ж стосується комплексного захисту від впливу цілої низки хімічно агресивних речовин, які присутні на хімічних підприємствах, то створення такого одягу вимагає особливих матеріалів і розробки відповідної методології роботи з ними. Крім того, створення нових матеріалів зазначеного функціоналу є тривалим за часом і вимагає значних фінансових витрат.

На підставі проведеного аналізу робіт [8, 9], пропонується провести дослідження, мета яких полягає у експериментальній оцінці проб матеріалів із полімерним одно- або двостороннім покриттям на тканий основі в умовах низьких температур.

Зазначені матеріали є аналогом штучної шкіри і широко використовуються світовими фірмами для виготовлення захисного одягу різного призначення. Зазвичай в таких спеціальних матеріалах за тканию основу використовують текстильне полотно полотняного або саржевого переплетення зі 100% модифікованих поліамідних волокон. Лицьова сторона полотна, залежно від функціонального призначення ІК, може бути покрита полімером з ПВХ (полівінілхлориду), бутилкаучуку або «вітону», а виворотна сторона – з ПВХ або бутилкаучуку, що надає їм певної еластичності [10]. Оскільки еластична штучна шкіра має полімерне покриття, то при виготовленні захисного одягу унеможлиблюється використання деяких видів ниткових швів, а фіксація припусків на шви допускається тільки шляхом настрочування їх припусків з обов'язковою наступною герметизацією. Крім того, деякі матеріали з полімерним покриттям є нестійкими до дії низьких температур, або до перепаду температур за короткий проміжок часу [11, 12].

Необхідність вивчення впливу низьких температур на текстильні матеріали з полімерним покриттям обґрунтована не тільки присутністю в переліку небезпечних і шкідливих виробничих факторів такої речовини як аміак, але й частотою застосування захисних виробів, старінням полімерного покриття з часом та інше. Вплив низьких температур на текстильні матеріали може спричинити появу негативних деформацій, що зумовлює зменшення геометричних характеристик, стійкості до змінання, еластичності та сприяти погіршенню фізико-механічних та захисних показників майбутнього виробу.

Однією із суттєвих причин впливу низьких температур на властивості текстильних матеріалів вважається наявність вологи в їхній структурі. В процесі впливу низьких температур волога (привнесена або хімічно пов'язана) перетворюється на кристалики льоду, які сприяють розвитку в структурі полімеру механічні напруги, що призводять до її розпушення, утворення тріщин, усадки, втрати міцності та інше. Необхідно визначити також, що ступінь впливу низьких температур залежать від природи, ступеня гідрофільності та впорядкованості молекулярної структури як волокон, так і полімерного покриття дослідних матеріалів. Наприклад, експериментально встановлено, що чим вище щільність упаковки макромолекул, тим більшою мірою проявляється розпушуюча дія кристаликів льоду, що утворилися під час дії низької температури [13].

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є вивчення стійкості до низьких температурах в статичних умовах матеріалів, які можуть бути рекомендованими при виготовленні ізолюючих костюмів для слюсарів-апаратників, які здійснюють очищення закритих ємностей для транспортування та зберігання агресивних середовищ. Дані робітники часто працюють із залишками рідкого аміаку, випаровування якого відбувається при зниженні температури, що призводить до першочергового руйнування полімерного покриття матеріалів спеціальних костюмів. Наприклад, локальні руйнування при контакті з рідким аміаком призводять до різкого охолодження (до мінус 34°C) контактної поверхні матеріалу та руйнування полімерного покриття не тільки в процесі роботи (в динаміці), а й в статичних умовах, що може призвести до порушення герметичності захисного виробу. Тому на підставі запропонованої функціонально-логічної схеми вибору та оцінки захисних властивостей спеціальних матеріалів для виготовлення ізолюючого костюма [14], виникла потреба у проведенні зазначених досліджень.

### Викладення основного матеріалу

На основі аналізу існуючих методів оцінки морозостійкості різних матеріалів у статичних умовах [15, 16], розроблено та апробовано новий спосіб вивчення впливу низьких температур на полімерні покриття спеціальних штучних шкір різного асортименту, що застосовуються при виготовленні ізолюючих костюмів.

Сутність запропонованого методу полягає в контролі зміни повітропроникності проби, підданій примусовому заморожуванню при заданій температурі та часу, а також примусовому розморожуванню при заданій температурі (плюсовій) і часу. У зв'язку з цим розроблений спосіб оцінки морозостійкості проб матеріалів з полімерним покриттям у статичних умовах передбачає циклічність випробувань у режимі «заморожування-розморожування», що може спричинити появу дефектів по товщині полімерного покриття.

Критерієм оцінки морозостійкості в статичних умовах випробувань у даному випадку є коефіцієнт морозостійкості ( $K$ ), який визначається як відношення значень повітропроникності «до» та «після» впливу фактору за формулою (1):

$$K = \frac{B_0}{B_1}; \quad (1)$$

де  $B_0$  – вихідна (початкова) величина повітропроникності проби матеріалу,  $\text{дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ;  
 $B_1$  – повітропроникність після проведення випробування проби матеріалу в режимі «заморожування-розморожування»,  $\text{дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ .

Аналіз запропонованого співвідношення показує, що з рівності абсолютних значень контрольованих показників коефіцієнт морозостійкості дорівнюватиме одиниці, а при збільшенні  $B_1$  його величина буде зменшуватися, наближаючись до нуля. Таким чином, значення коефіцієнта морозостійкості ( $K$ ) є основним критерієм. Вивчення повітропроникності в даному випадку проводилося за допомогою експериментальної установки МПЗ, яка є авторською розробкою вітчизняних вчених-дослідників. Принцип роботи установки МПЗ та алгоритм її використання детально описано в попередніх публікаціях та патентах [17].

Експерименти щодо морозостійкості спеціальних матеріалів у статистиці були проведені з пробами спеціальних матеріалів вітчизняного виробництва: ІЗК, ПМБК-Н, ТСК-15, БЦК (табл. 1).

Таблиця 1

**Деякі фізико-механічні характеристики спеціальних досліджуваних матеріалів із полімерним покриттям**

Найменування матеріалу	Товщина проби, мм	Поверхнева щільність, $\text{г}/\text{м}^2$	Жорсткість при згині, сН		Розривальне навантаження смужки розміром 50 x 100 мм, Н		Роздиральне навантаження смужки розміром 50 x 100 мм, Н	
			осн.	пітк.	осн.	пітк.	осн.	пітк.
ТСК-15	0,30	420,0	1,9	2,3	552,0	504,0	29,0	27,0
БЦК	0,35	479,0	5,6	3,8	931,0	514,0	43,0	43,0
ПМБК-Н	0,40	563,0	3,9	4,1	539,0	408,0	27,0	22,0
ІЗК	0,50	550,0	9,8	9,8	500,0	500,0	25,0	25,0

Відповідно до запропонованої методики, розмір зразків для проведення досліджень має бути діаметром 100 мм, або він може бути у вигляді квадрата зі стороною 100 мм. Попередньо проведені дослідження показали, що для отримання коректних результатів, що дають можливість робити обґрунтовані висновки стосовно морозостійкості проб у статичних умовах, достатньо вивчити п'ять зразків матеріалу кожного виду. Тобто повторювальність отриманих результатів є стабільною і не перевищують 5% похибки. Час експозиції від 3600 с (1 година) до 18000с (5 годин) з безперервної дії низькотемпературного фактору (мінус  $40^\circ\text{C}$ ) при інтервалі в 3600 с, а розморожування у всіх випадках проводилося при позитивній температурі (+  $70^\circ\text{C}$ ) протягом 1200 с в термошафі. Після охолодження матеріалу в умовах лабораторії проводили вивчення повітропроникності проб за допомогою установки МПЗ.

Таблиця 2

**Зміна значення повітропроникності та коефіцієнта морозостійкості проб спеціальних матеріалів від часу впливу низької температури (мінус  $40^\circ\text{C}$ ) у статичних умовах**

Час заморожування проби, с	Найменування спеціального матеріалу:							
	ТСК-15		БЦК		ПМБК-Н		ІЗК	
	Повітропроникність, $B_1$ , $\text{дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$	Коефіцієнт морозостійкості, $K$	Повітропроникність, $B_1$ , $\text{дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$	Коефіцієнт морозостійкості, $K$	Повітропроникність, $B_1$ , $\text{дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$	Коефіцієнт морозостійкості, $K$	Повітропроникність, $B_1$ , $\text{дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$	Коефіцієнт морозостійкості, $K$
0	0,13	-	0,19	-	0,27	-	0,10	-
3600	0,13	1,0	0,22	0,86	0,29	0,93	0,10	1,0
7200	0,14	0,93	0,25	0,76	0,30	0,90	0,10	1,0
10800	0,15	0,87	0,29	0,66	0,32	0,84	0,10	1,0
14400	0,17	0,74	0,32	0,59	0,36	0,75	0,10	1,0
18000	0,21	0,61	0,37	0,51	0,43	0,63	0,10	1,0

На підставі проведених експериментів та аналізу отриманих результатів нами встановлено, що проби матеріалу ІЗК протягом усього часу експозиції впливу низької температури (мінус  $40^\circ\text{C}$ ) залишалися

морозостійкими, оскільки значення їх повітропроникності залишалися постійним  $= 0,1 \text{ дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ , а коефіцієнт морозостійкості  $K=1$  (табл. 2).

Щодо інших спеціальних матеріалів, які приймали участь у дослідженні, то слід зазначити, що вплив низької температури та режим випробувань призводить до деструкції полімерного покриття за відсутності деформацій проб. Наприклад, початкове значення повітропроникності проб матеріалу ПМБК-Н дорівнює  $0,27 \text{ дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$  (табл. 2). Після 3600 с випробувань повітропроникність проб збільшилася до  $0,29 \text{ дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ , а при наступних експериментах її значення збільшилося від  $0,3 \text{ дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$  (при 7200 с) до  $0,43 \text{ дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$  (при 18000 с) при контакті з низькою температурою.

На основі отриманих експериментальних даних побудовано графічну залежність зазначених величин, що відображено на рис. 1.

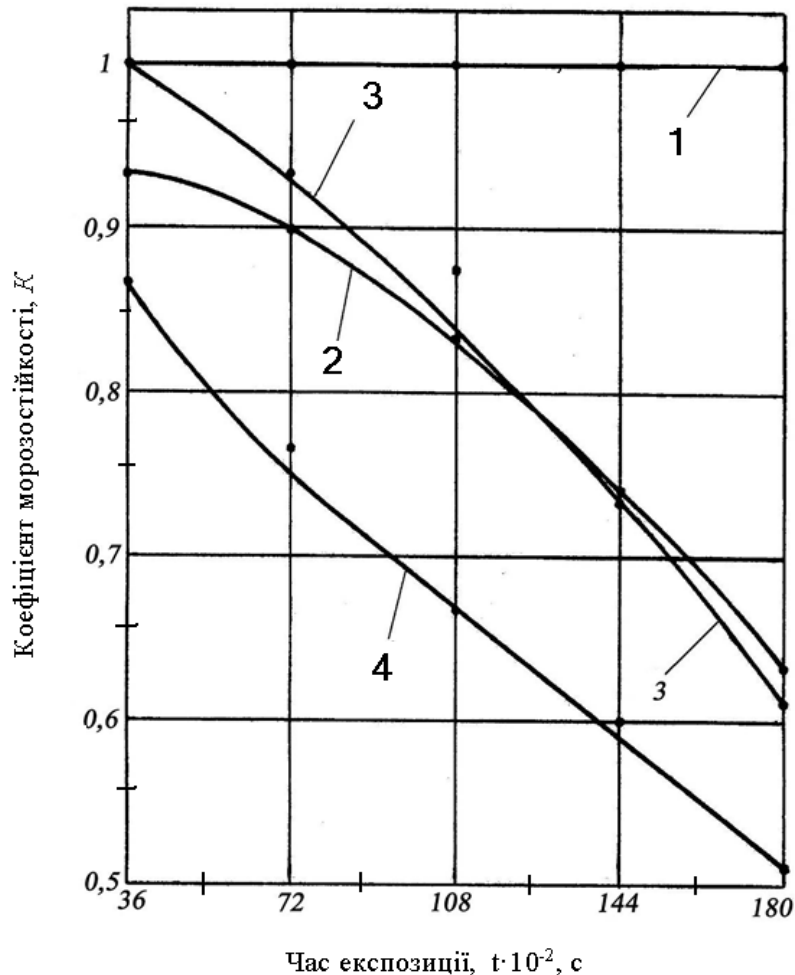


Рис. 1. Зміна коефіцієнта морозостійкості залежно від часу впливу низької температури ( $-40^\circ\text{C}$ ) у статичних умовах на проби матеріалів: 1 – ІЗК; 2 – ПМБК-Н; 3 – ТСК-15; 4 – БЦК

Аналіз кривих залежності зміни повітропроникності проб спеціальних матеріалів від тривалості і кількості циклів «заморожування-розморожування», свідчить про плавну зміну коефіцієнта морозостійкості (рис. 1), при цьому у пробах матеріалу ІЗК контрольований показник залишається незмінним протягом усього часу проведення експерименту (рис. 1, 1).

Однозначні висновки проведених досліджень можна зробити і по відношенню щодо проб спеціальних матеріалів ТСК-15 та БЦК. Так, після першої години експозиції коефіцієнт морозостійкості у статичних умовах матеріалу ТСК-15 залишився на рівні одиниці, а матеріалу БЦК – зменшився та став рівним 0,86 (табл. 2). Отже загальна тенденція є очевидною: збільшення часу експозиції призводить до зменшення значення коефіцієнта морозостійкості в обох пробах зазначених спеціальних матеріалів, проте темп зменшення для ПМБК-Н у часі є більш інтенсивним (рис. 1, 2).

#### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Проведені експерименти та аналіз отриманих результатів дають право стверджувати, що найбільш морозостійким спеціальним матеріалом у статичних умовах низьких температур є спеціальний матеріал ІЗК з полімерним покриттям, який виготовлений на тканинній основі (поліамід 40 % + бавовна 60%) з двостороннім покриттям з каучуку типу СКЕПТ-40.

Крім того, необхідно зазначити, що запропонована методологія проведення досліджень надає можливість ефективного вивчення та оцінювання впливу низьких температур у статичних умовах на захисні властивості спеціальних матеріалів для ізолюючих костюмів.

### Література

1. Михайлова Н.В. Дослідження матеріалів, які використовують для виготовлення захисного одягу робітників-апаратників та слюсарів хімічної промисловості / Н.В. Михайлова, В.О. Привала // Вісник Хмельницького національного університету. – 2018 р. – № 1. – С. 124–129.
2. Михайлова Н.В. Аналіз умов праці робітників, які виконують очищення закритих ємностей від хімічно агресивних речовин / Н.В. Михайлова, В.О. Привала // Вісник Хмельницького національного університету. – 2017 р. – № 2. – С. 96–103.
3. Ukrprofzashchita. URL: <https://http://ukrprofzahyst.com.ua/ru/odezhda-khimzaschity>.
4. Types of overalls for protection against chemically aggressive environments. URL: <https://pcgroup.ru/blog/vidy-specodezhdy-dlya-zaschity-ot-himicheskii-agressivnyh-sred>.
5. Galieva E.R., Nurullina G.N., Abzaltdinova M.A. Analysis of insulating chemical suits as the main factor in the development of a universal technology for the manufacture of special protective clothing. Kazan, Bulletin of the Technological University. 2016. No. 8. P. 73–74.
6. Overalls and footwear with protection against chemicals. URL: <https://forma-odezhda.ru/encyclopedia/specodezhda-i-obuv-s-zaschitoj-ot-himicheskiih-vecshestv>
7. Protective suits "Lakeland". URL: [https://www.raboservice.ru/images/doc/lakeland\\_1.pdf](https://www.raboservice.ru/images/doc/lakeland_1.pdf)
8. ГОСТ 27652-88. Костюмы мужские для защиты от кислот. Технические условия. – Взамен ГОСТ 12.4.036-78; Введ. 01.01.90. – Изд-во стандартов, 1988. – 23 с.
9. Польская норма Р № 72/Р-04639. Определение кислотостойкости тканей. – Варшава, 1972. – 17 с.
10. ОСТ 17-345-85. Ткани из химических волокон и их смесей с хлопком с кислотоотталкивающей пропиткой для спецодежды. Технические условия. Введ. 01.01.85. – Калинин : ЦНИИШВ. 1984. – 6 с.
11. ГОСТ 20876-75. Кожа искусственная. Метод определения морозостойкости в динамических условиях [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://ohranatruda.ru/ot\\_biblio/standart/181960](https://ohranatruda.ru/ot_biblio/standart/181960)
12. Костюми захисні в Україні [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://prom.ua/Kostyumu-izoliruyuschie.html>.
13. Бузов Б.А., Никитин А.В. Исследование материалов для одежды в условиях пониженных температур / Бузов Б.А., Никитин А.В. – М. : Легпромбытиздат, 1980. – 224 с.
14. Михайлова Н.В. Обґрунтування вибору показників для вивчення і оцінки захисних властивостей спеціальних матеріалів ізолюючого костюма працівників хімічної промисловості / Н.В. Михайлова, В.О. Привала // Вісник Хмельницького національного університету. – 2018. – № 5. – С. 50–54.
15. ГОСТ 15162-82. Кожа искусственная и синтетическая и пленочные материалы. Методы определения морозостойкости в статических условиях. Взамен ГОСТ 15162-69, ГОСТ 8974-78; Введ. 01.07.83. – М. : Изд-во стандартов, 1982. – 9 с.
16. ГОСТ 28789-90 (ИСО 4675-79). Ткани с резиновым или пластмассовым покрытием. Испытание на изгиб при низкой температуре. Введ. 01.01.92. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 6 с.
17. Привала В.О. Новий прилад по визначенню повітропроникнення матеріалів для одягу / В.О. Привала, А.А. Мичко, Н.В. Михайлова // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2003. – № 5. – С. 63–65.

### References

1. Mykhailova N.V. Doslidzhennia materialiv, yaki vykorystovuiut dlia vyhotovlennia zakhysnoho odiahu robotnykiv-aparatnykiv ta sliusariv khimichnoi promyslovosti / N.V. Mykhailova, V.O. Pryvala // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2018 r. – № 1. – S. 124–129.
2. Mykhailova N.V. Analiz umov pratsi robotnykiv, yaki vykonuiut ochyshchennia zakrytykh yemnostei vid khimichno ahresyvnykh rechovyn / N.V. Mykhailova, V.O. Pryvala // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2017 r. – № 2. – S. 96–103.
3. Ukrprofzashchita. URL: <https://http://ukrprofzahyst.com.ua/ru/odezhda-khimzaschity>.
4. Types of overalls for protection against chemically aggressive environments. URL: <https://pcgroup.ru/blog/vidy-specodezhdy-dlya-zaschity-ot-himicheskii-agressivnyh-sred>.
5. Galieva E.R., Nurullina G.N., Abzaltdinova M.A. Analysis of insulating chemical suits as the main factor in the development of a universal technology for the manufacture of special protective clothing. Kazan, Bulletin of the Technological University. 2016. No. 8. P. 73–74.
6. Overalls and footwear with protection against chemicals. URL: <https://forma-odezhda.ru/encyclopedia/specodezhda-i-obuv-s-zaschitoj-ot-himicheskiih-vecshestv>
7. Protective suits "Lakeland". URL: [https://www.raboservice.ru/images/doc/lakeland\\_1.pdf](https://www.raboservice.ru/images/doc/lakeland_1.pdf)
8. GOST 27652-88. Kostyumu muzhskie dlya zashity ot kislot. Tehnicheskie usloviya. – Vzamen GOST 12.4.036-78; Vved. 01.01.90. – Izd-vo standartov, 1988. – 23 s.
9. Polskaya norma R № 72/R-04639. Opredelenie kislotostojkosti tkanej. – Varshava, 1972. – 17 s.
10. OST 17-345-85. Tkani iz himicheskiih volokon i ih smesej s hlopkom s kislotootalki-vayushej propitkoj dlya specodezhdy. Tehnicheskie usloviya. Vved. 01.01.85. – Kalinin : CNIIShV. 1984. – 6 s.
11. GOST 20876-75. Kozha iskusstvennaya. Metod opredeleniya morozostojkosti v dinamiceskiih usloviyah [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : [https://ohranatruda.ru/ot\\_biblio/standart/181960](https://ohranatruda.ru/ot_biblio/standart/181960)
12. Kostyumu zakhysni v Ukraini [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <https://prom.ua/Kostyumu-izoliruyuschie.html>.

- 
13. Buzov B.A., Nikitin A.V. Issledovanie materialov dlya odezhdyy v usloviyakh ponizhennykh temperatur / Buzov B.A., Nikitin A.V. – M. : Legprombytizdat, 1980. – 224 s.
14. Mykhailova N.V. Obgruntuvannya vyboru pokaznykiv dlia vyvchennia i otsinky zakhysnykh vlastyvostei spetsialnykh materialiv izoliuiuchoho kostiuma pratsivnykiv khimichnoi promyslovosti / N.V. Mykhailova, V.O. Pryvala // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2018. – № 5. – S. 50–54.
15. GOST 15162-82. Kozha iskusstvennaya i sinteticheskaya i plenchnye materialy. Metody opredeleniya morozostojkosti v staticheskikh usloviyakh. Vzamen GOST 15162-69, GOST 8974-78; Vved. 01.07.83. – M. : Izd-vo standartov, 1982. – 9 s.
16. GOST 28789-90 (ISO 4675-79). Tkani s rezinovym ili plastmassovym pokrytiem. Ispytanie na izgib pri nizkoj temperature. Vved. 01.01.92. – M. : Izd-vo standartov, 1991. – 6 s.
17. Pryvala V.O. Novyi prylad po vyznachenniu povitropronyknennia materialiv dlia odiahu / V.O. Pryvala, A.A. Mychko, N.V. Mykhailova // Visnyk Tekhnolohichnoho universytetu Podillia. – 2003. – № 5. – S. 63–65.



<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-145-150>

УДК 677. 076

**ОЛІЙНИК Галина**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-6519-7938>e-mail: [oliinykha@khmnu.edu.ua](mailto:oliinykha@khmnu.edu.ua)**ДАНЧЕНКО Юлія**

Національний університет національної гвардії України, м. Харків

<https://orcid.org/0000-0003-3865-2496>e-mail: [yuliyadanchenko7@gmail.com](mailto:yuliyadanchenko7@gmail.com)**КОРНИЦЬКА Лариса**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-8816-096X>e-mail: [kornitskala@khmnu.edu.ua](mailto:kornitskala@khmnu.edu.ua)**РАСТОРГУЄВА Марія**

Херсонський національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-0824-4726>e-mail: [mrastorgueva65@gmail.com](mailto:mrastorgueva65@gmail.com)

## ДОСЛІДЖЕННЯ АСОРТИМЕНТУ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРОДУКЦІЇ СЕРІЇ DECODER DERUFA ДЛЯ ОЗДОБЛЕННЯ СТИНИ В СУЧАСНОМУ ІНТЕР'ЄРІ

В роботі наведено результати досліджень воднодисперсійних акрилових фарб, а також декоративних покриттів та ґрунтовок до фарб, професійної серії DecoDer марки DERUFA. Розглянуто асортимент продукції, технологічні та експлуатаційні характеристики. Досліджено особливості застосування продукції, використання спеціальних матеріалів та технік для створення або підсилення декоративного ефекту при оздобленні стіни в сучасному інтер'єрі.

Ключові слова: воднодисперсійні акрилові фарби, декоративні покриття, ґрунтовки, оздоблення стіни, сучасний інтер'єр.

OLIJNYK Halina

Khmelnyskyi National University

DANCHENKO Yuliya

National Academy of the National Guard of Ukraine

KORNYTSKA Larysa

Khmelnyskyi National University

RASTORHUIEVA Mariia

Kherson National Technical University

## STUDY OF THE RANGE AND TECHNOLOGICAL FEATURES OF THE DERUFA DECODER SERIES FOR WALL DECORATION IN A MODERN INTERIOR

The use of the products of the well-known German brand - DERUFA DecoDer series in decorative wall decoration in a modern interior gives unlimited opportunities for one's creativity and unique design. The range of products presented on the domestic market is distinguished by a wide range of colors, various environmental, operational, and technological characteristics, etc. Water-dispersed acrylic paints, decorative coatings, primers, and other DERUFA products of the DecoDer series offer unique innovative solutions with high-quality characteristics, focused on each client, following current market trends in the field of interior design and design. The available information about the finishing materials intended for wall decoration in modern interiors and represented by the DERUFA DecoDer series of products is insufficient and needs more clarification.

The work presents the results of research related to the identification of the features of DERUFA products of the DecoDer series. The use of DERUFA water-dispersed acrylic paints of the DecoDer series has the following advantages: no smell when applying the paint to the wall, quick drying of the paint, and resistance to abrasion and moisture. Such paints are environmentally friendly and aesthetically attractive. DERUFA water-dispersed acrylic wall paints of the professional DecoDer series can be used together with decorative coatings, which are produced separately and can be applied to the painted surface to obtain a decorative relief coating on the wall surface in a modern interior. Such a coating is produced with various fillers imitating the effects of polished marble, velvet, suede, etc. To enhance the decorative effect, special primers of the DecoDer DERUFA series are used, the application of which, if a certain technology is followed, enhances the decorative effect. STUCCO PENELLO and STUCCO RILEVATO primers can be applied without restrictions on any mineral bases: plaster, brick, or plasterboard. However, it is not allowed to apply a primer on surfaces made with lime plaster, as well as on surfaces previously painted with oil, alkyd, or silicate paints. The primer is applied to the surface of the wall with a roller, and then the necessary relief of the surface is provided with a brush. To create relief, it is recommended to use chaotic cross-shaped or semicircular movements and special techniques. To add special decorative effects, it is possible to apply the material with a spatula or trowel. If you want to get a deeper relief, it is recommended to apply the material in two stages. POLICROMO BRILLIANTE primer can be applied with a brush, roller, sponge, or spatula on previously painted surfaces, except those painted with oil, alkyd, and silicate paints. When applying to the surface using a roller, the primer is first evenly distributed over the surface, and later the necessary effects are created using a spatula or brush. In addition, it is recommended to apply the material in limited areas to avoid its drying before the decoration begins.

Thus, the considered studies presented in this work allow us to identify features related to the technological and operational capabilities of DERUFA products of the DecoDer series. The considered information is important for organizing the informative market.

Keywords: wall decoration, modern interior, technological characteristics, operational capabilities, DERUFA products of the DecoDer series, water-dispersed acrylic paints, decorative coatings, primers.

## Постановка проблеми у загальному вигляді

### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Воднодисперсійні акрилові фарби, декоративні покриття, ґрунтовки та інша продукція відомого німецького бренду серії DecoDer DERUFA, що використовуються для оздоблення стіни у сучасному інтер'єрі, широко представлені на вітчизняному ринку. Асортимент даної продукції є різноманітним і з кожним роком збільшується [1, 2]. Наразі, недостатньо відомостей, що стосується особливостей використання даної продукції, а саме її технологічних та експлуатаційних характеристик, використання спеціальних матеріалів та технік, наявності професійних навиків при використанні продукції тощо.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Воднодисперсійні акрилові фарби, декоративні покриття, ґрунтовки та інша продукція серії DecoDer DERUFA пропонують унікальні інноваційні рішення з високоякісними характеристиками, орієнтовані на кожного окремого клієнта, дотримуючись актуальних трендів ринку в галузі інтер'єру та дизайну. Наявні відомості про оздоблювальні матеріали серії DecoDer DERUFA є недостатніми та потребують більшого висвітлення. Особливо це стосується продукції, призначеної для оздоблення стіни у сучасному інтер'єрі [3, 4].

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є дослідження асортименту та технологічних особливостей продукції серії DecoDer DERUFA, що присутня на вітчизняному ринку, та призначена для оздоблення стіни у сучасному інтер'єрі, з метою укомплектування інформативного ринку.

### Виклад основного матеріалу

Заслуженою популярністю на вітчизняному ринку користуються воднодисперсійні акрилові фарби, декоративні покриття, ґрунтовки та інша продукція надійного німецького виробника на вітчизняному ринку серії DecoDer DERUFA [1–4]. Використання воднодисперсійних акрилових фарб серії DecoDer DERUFA має такі переваги:

- Відсутність запаху при нанесенні фарби на стіну. Саме з цієї особливості технології одразу визначають фарбу, якою було пофарбовано приміщення.
- Воднодисперсійна акрилова фарба швидко висихає на поверхні. Для висихання на стіні такої фарби потрібно приблизно 1,5-2 години.
- Така фарба не боїться вологих приміщень і постійного прибирання. Одне з ключових властивостей воднодисперсійних акрилових фарб – стійкість до стирання та вологи. Якісна фарба від надійного виробника «витримує» часте миття з дезінфекцією в офісі, художнє «мистецтво» в дитячій кімнаті та навіть постійну вологість у ванній кімнаті.
- Воднодисперсійні акрилові фарби зберігають свій колір навіть через 10-15 років після фарбування.
- Воднодисперсійні акрилові фарби можна використовувати практично для будь-якої поверхні стіни.
- Воднодисперсійні фарби на акриловій основі вважаються екологічно чистими. Вони не виділяють ніяких шкідливих і небезпечних речовин, тому їх можна використовувати для декоративного оздоблення стіни в інтер'єрі дитячих кімнат, шкіл, лікарень.
- Фарбування стін воднодисперсійними акриловими фарбами не потребує попередніх навиків, тому буде під силу навіть початківцям. Для фарбування потрібно буде мати зручний валик та пензлик; так як ця фарба швидко висихає, то навіть художник-початківець зможе створити своє домашнє «графіті» на пофарбованій стіні.

Воднодисперсійні акрилові фарби для стін професійної серії DecoDer DERUFA зроблені з натуральних складових, вони дозволяють стінам дихати та довго зберігають естетичний та привабливий вигляд, їх технологічні та експлуатаційні особливості представлені в Таблиці 1.

Воднодисперсійні акрилові фарби для стін професійної серії DecoDer DERUFA можуть використовуватися разом з декоративними покриттями [5], які випускаються окремо і які можна наносити на пофарбовану поверхню для отримання декоративного рельєфного покриття на поверхні стіни у сучасному інтер'єрі. Особливості та характеристики декоративних покриттів серії DecoDer DERUFA, які є наразі найбільш затребуваними на вітчизняному ринку, представлені в таблиці 2.

При визначенні показників стійкості до стирання (показника зносостійкості) що представлені в Таблиці 1 і в Таблиці 2, фарб та декоративних покриттів серії DecoDer DERUFA використовували тест Мартиндейла (тест Martindale) [6].

Таблиця 1

**Технологічні та експлуатаційні характеристики  
воднодисперсійних акрилових фарб серії DecoDer DERUFA**

№ з/п	Назва	Особливості	Витрати, гр./м.	Час висихання, год	Стійкість до стирання, цикли
1	STUCCO PENELLO	Швидковисихаюча водорозчинна фарба на основі модифікованих акрилових полімерів; володіє підвищеною адгезією; може використовуватись для декоративного оздоблення стіни в інтер'єрі житлового чи суспільного приміщення	300-500	2:00	10000
2	POLICROMO BRILLIANTE	Перламутрова лєсирувальна акрилова фарба; випускається в трьох варіантах: золота, срібна і "хамелеон"; напівпрозора фарба з перламутровими пігментами «золота» чи «срібла» створює на поверхні, що фарбується, неповторні колірні переливи; "хамелеон" змінює колір пофарбованої стіни залежно від кута зору.	120-150	1:00	10000
3	RUGOSO MURO	Водорозчинна фарба з кварцовим наповнювачем на основі модифікованих акрилових полімерів; рекомендується використовувати фарбу у вигляді адгезійного ґрунту при нанесенні різних рельєфних покриттів на раніше пофарбовану поверхню.	300-500	1:00	10000
4	TIMANTTI NK	Водорозчинна акрилова фарба для стін у інтер'єрі; перешкоджає утворенню цвілі та грибка; використовується для сухих та вологих приміщень; фарба стійка до стирання та миття з використанням хімічних засобів; для фарбування бетонних, оштукатурених, зашпакльованих цегляних поверхонь	150-300	2:00	10000

Таблиця 2

**Технологічні та експлуатаційні характеристики декоративних покриттів серії DecoDer DERUFA**

№ з/п	Назва	Особливості	Витрати, гр./м пог.	Час висихання, год	Стійкість до стирання, цикли
1	STUCCO RILEVATO MY	Рельєфне декоративне покриття з середньозернистим мармуровим наповнювачем; імітує ефект полірованого мармуру; представляє собою полімерну композицію на основі акрилових смол і мармурового наповнювача; володіє прекрасною адгезією, гарною водостійкістю і стійкістю до мокрого стирання.	1000-2000	2:00	10000
2	PASTELLO MEDITERRANEO KM	Декоративне напівпрозоре матове покриття, що надає стінам ефект оксамиту; фарбування з нерівномірним розподілом кольору по поверхні; краще всього наносити на поверхні, що раніше пофарбовані фарбами з жорстким мінеральним наповнювачем.	120-150	1:00	10000
3	CRKOSTA VS	Рельєфне декоративне покриття з дрібнозернистим наповнювачем; імітує ефект замші; представляє собою полімерну композицію на основі акрилових смол і дрібнозернистого наповнювача; володіє прекрасною адгезією, гарною водостійкістю і стійкістю до мокрого стирання.	1000-2000	2:00	10000



Рис. 1. Використання декоративного покриття серії DecoDer DERUFA на стіні

Для підсилення декоративного ефекту на стіні у сучасному інтер'єрі, великої популярності набирають спеціальні ґрунтовки серії DecoDer DERUFA[7], нанесення яких при дотриманні певної технології підсилюють декоративні ефекти; характеристики ефектів наведені в Таблиці 3.

Таблиця 3

Характеристики декоративних ефектів, при використанні спеціальних ґрунтовок серії DecoDer DERUFA

№ з/п	Назва	Декоративний ефект
1	<b>STUCCO PENELLO</b>	Для посилення ефектів рельєфу і надання стінам традиційного вигляду середземноморської стіни, виробник рекомендує наносити поверх покриття PASTELLO MEDITERANEO.
2	<b>STUCCO RILEVATO</b>	Для посилення ефектів рельєфу і надання стінам традиційного вигляду морського середовища, виробник рекомендує наносити поверху покриття стіни, пофарбованої в блакитний колір.
3	<b>POLICROMO BRILLIANTE</b>	Особливих декоративних ефектів можна досягнути, коли наносити послідовно шар за шаром фарби різних кольорів. Привабливі поверхні можна отримати, коли наносити POLICROMO BRILLIANTE на поверхню стіни, що пофарбована в різні кольори; така стіна має високі експлуатаційні характеристики водостійкості та стійкості до стирання.
4	<b>RUGOSO MURO</b>	Підкреслює глибокий декоративний ефект при нанесенні на поверхні, які вже оздоблені фарбами IMPRONTA, STUCCO RILEVATO і CROSTA. Матеріал імітує ефект зістареної стіни з плавними кольорними переходами.
5	<b>PASTELLO MEDITERRANEO</b>	Для посилення ефектів рельєфу і надання стінам традиційного вигляду морозного візерунку, виробник рекомендує наносити поверх пофарбованої стіни це покриття.
6	<b>CROSTA SR</b>	Для підсилення і виділення декоративного ефекту кори дерева при нанесенні на пофарбовані раніше поверхні, виконані фарбами STUCCO RILEVATO і CROSTA.

Ґрунтовки серії DecoDer DERUFA [7] використовуються для фарб з цієї серії та забезпечують вишукані декоративні покриття на стіні, варіанти такого оздоблення представлені на Рисунку 2, ці ґрунтовки можна використовувати не тільки для пофарбованих стін, їх можна наносити на дерев'яні, оцинковані, пластикові поверхні тощо. Особливі умови нанесення ґрунтовок забезпечуються завдяки використанню певних технік, матеріалів, обладнання тощо. Розглянемо більш детально асортимент ґрунтовок серії DecoDer DERUFA та їхні характеристики[7].

Ґрунтовки STUCCO PENELLO і STUCCO RILEVATO можна наносити без обмежень на будь-які мінеральні основи: штукатурку, цеглу, гіпсокартон. Проте не допускається нанесення ґрунтовок на поверхні, виконані вапняною штукатуркою, а також на поверхні, раніше пофарбовані олійними, алкідними або силікатними фарбами. Ґрунтовку наноситься на поверхню стіни валиком, а потім необхідний рельєф поверхні надається пензлем. Для створення рельєфу рекомендовано використовувати хаотичні хрестоподібні або напівколові рухи та спеціальні техніки. Для додання особливих декоративних ефектів можливе нанесення матеріалу за допомогою шпателя або кельми. Якщо потрібно отримати більш глибокий рельєф, рекомендується наносити матеріал у два етапи.

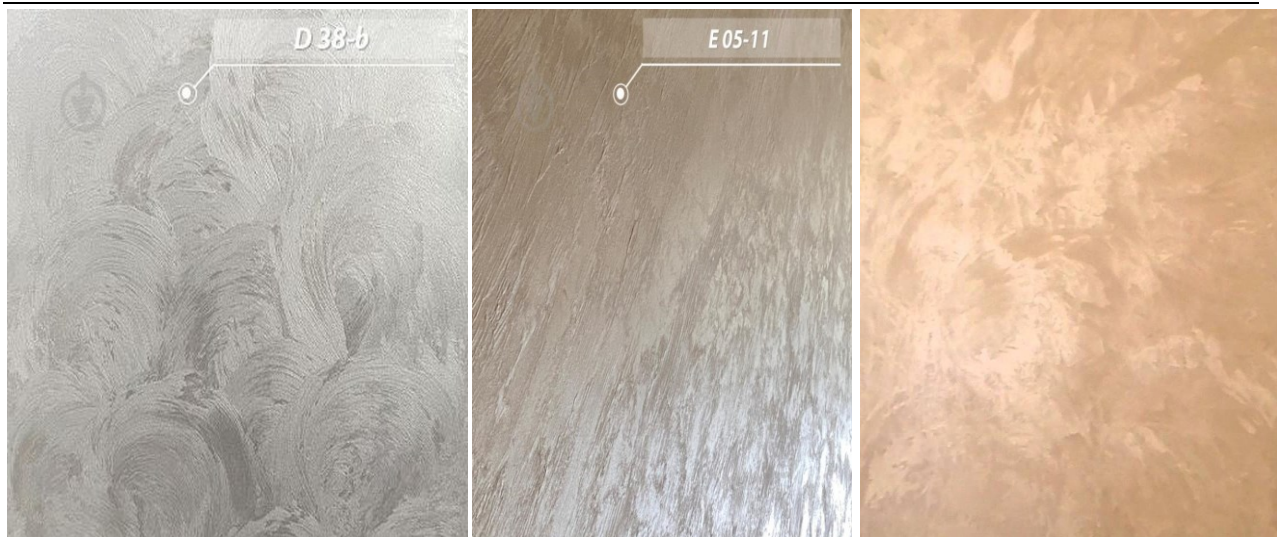


Рис. 2. Декоративні покриття на стіні фарб серії DecoDer DERUFA з використанням спеціальних ґрунтовок

Ґрунтовку POLICROMO BRILLIANTE можна наносити пензликом, валиком, губкою, шпателем на раніше пофарбовані поверхні за винятком таких, що були пофарбовані олійними, алкідними і силікатними фарбами. Коли нанесення на поверхню відбувається за допомогою валика, то ґрунтовка спочатку рівномірно розподіляється по поверхні, а вже пізніше за допомогою шпателя або кисті створюються необхідні ефекти. Щоб уникнути видимих стиків фахівці рекомендують наносити матеріал використовуючи техніку «по мокрому краю». А також можна наносити матеріал на стіну добре віджатою вологою губкою. Цікавий декоративний ефект можна отримати, коли нанести матеріал спеціальним тампоном зі шматочками штучної шкіри.

Ґрунтовку RUGOSO MURO можна наносити на різні мінеральні основи, включаючи штукатурку, цеглу та гіпсокартон. Проте не допускається нанесення продукту на поверхні, що виконані вапняною штукатуркою, а також на поверхні, раніше пофарбовані олійними, алкідними або силікатними фарбами. Перед нанесенням матеріалу на стіну рекомендовано стіну попередньо поґрунтувати. Ґрунтовку рекомендовано наносити на поверхню стіни валиком або пензлем.

Ґрунтовку PASTELLO MEDITERRANEO можна наносити на раніше забарвлені поверхні. Причому, не допускається наносити на поверхні, пофарбовані олійними, алкідними і силікатними фарбами. Її можна розбавляти водою до 30%. Роботи рекомендовано проводити у два етапи. Спочатку матеріал наноситься на поверхню валиком або кистю, потім відразу ж, не даючи матеріалу підсохнути, виконується остаточне декорування пензлем або губкою. При цьому пензлем можна виконувати переривисті кругові рухи, а губка здатна забезпечити в «потрібних» місцях збір матеріалу з поверхні. Крім того, рекомендується наносити матеріал обмеженими площами, щоб уникнути його висихання до початку декорування.

Ґрунтовку CROSTA SR можна наносити без обмежень на будь-які мінеральні основи: штукатурку, цеглу, гіпсокартон тощо. Не допускається нанесення ґрунтовки на поверхні, які виконані вапняною штукатуркою, а також на поверхні, що були раніше пофарбовані олійними, алкідними або силікатними фарбами. Перед нанесенням ґрунтовки на стіну слід переконатися в тому, що раніше нанесений матеріал володіє достатньою несучою здатністю, в інакшому випадку стіну потрібно буде спочатку поґрунтувати. Сам матеріал наноситься на поверхню стіни кельмою. Перший шар матеріалу рекомендовано нанести максимально рівномірно. Потім слід все залишити на 30 хвилин. Після цього, слід кельмою затирати поверхню. І вже залежно від напрямку руху кельми на поверхні з'являються вертикальні, горизонтальні або кругові борозенки- так відбувається створення декоративного ефекту на поверхні стіни в сучасному інтер'єрі.

### **Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі**

Таким чином, розглянуті дослідження, що представлені в даній статті, дозволяють виявити особливості, що стосуються технологічних та експлуатаційних можливостей використання акрилових фарб серії DecoDer DERUFA. Створення декоративних ефектів на стіні можна забезпечити тільки за умови правильного дотримання технологічних умов нанесення матеріалу на стіну, а також використовуючи спеціальні матеріали та техніки.

Дані дослідження представляють інтерес з точки зору як практики так і теорії декоративного оздоблення стіни у сучасному інтер'єрі. Дослідження сучасного асортименту продукції серії DecoDer DERUFA, процесу нанесення на стіну, створення декоративних ефектів тощо є важливими напрямками дизайнерської, технічної та наукової діяльності. Розглянута інформація по продукції для декоративного оздоблення стіни серії DecoDer є важливою для упорядкування інформативного ринку та має забезпечити успішне використання продукції відповідно до споживчих потреб.

**Література**

1. WALL Décor. URL: <https://walld.ru/catalog/gruntovka/tief-profi-grund-item697/>(дата звернення 14.11.2022).
2. Фарба Derufa. Інтер'єр. / <https://kiev.prom.ua/ua/Kraska-derufa-interer-20.html/>(дата звернення 14.11.2022).
3. Фарба для інтер'єру DecoDer DERUFA./ <https://kiev.prom.ua/ua/p886626045-kraska-dlya-interera.html/> (дата звернення 04.12.2022).
4. Фарби DecoDer DERUFA. / <https://uadepe.ru/interier/21061-farbi-derufa-dlja-stin-dekorativni-farbi-dlja-stin.html/> (дата звернення 14.12.2022).
5. Продукція DecoDer DERUFA. Декоративні покриття./ <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=68F./> (дата звернення 16.12.2022).
6. Martindale Test./ [https://en.wikipedia.org/wiki/Martindale\\_Test/](https://en.wikipedia.org/wiki/Martindale_Test/) (дата звернення 16.12.2022).
7. Продукція DecoDer DERUFA. Грунтовки. / <https://www.google.com/search?q=7nt=gws-wiz-serp/> (дата звернення 17.12.2022).

**References**

1. WALL Décor. URL: <https://walld.ru/catalog/gruntovka/tief-profi-grund-item697/>(date of application 14/11/2022).
2. Derufa paint. Interior.URL: / <https://kiev.prom.ua/ua/Kraska-derufa-interer-20.html/>(date of application 14/11/2022).
3. DecoDer DERUFA interior paint. URL: ./ <https://kiev.prom.ua/ua/p886626045-kraska-dlya-interera.html/> (date of application 04/12/2022).
4. DERUFA DecoDer paints. URL: <https://uk.thebest-home.com/14266274-priming-paint-for-walls-types-prices-opinions-advice> (access date 14/12/2022).
5. DecoDer DERUFA products. Decorative coatings. <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=68F./> (date of application 16/12/2022).
6. Martindale Test./ [https://en.wikipedia.org/wiki/Martindale\\_Test/](https://en.wikipedia.org/wiki/Martindale_Test/) (date of application 16/12/2022).
7. DecoDer DERUFA products. Primers. / <https://www.google.com/search?q=gws-wiz-serp/> (date of application 17/12/2022).

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-151-154>

УДК 577.15, 573.6.

ОНИЩУК Оксана

Волинський національний університет ім. Лесі Українки, м. Луцьк, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-8342-3011>

## ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ФЛОКУЛЯЦІЇ ТА КОАГУЛЯЦІЇ ПРИ ОЧИЩЕННІ ВОДИ ДЛЯ ПРОМИСЛОВОГО ЗАСТОСУВАННЯ

*Для промислового застосування при очищенні води важливими критеріями є вибір методики освітлення. У статті розглянуто методики дослідження процесу коагуляції та флокуляції. На сьогодні актуальним є вдосконалення методики та використання флокулянтів і коагулянтів, які пришвидшують процес коагуляції та флокуляції. Розглянуто в якості коагулянтів сірчаноокислий солі  $Al_2(SO_4)_3$  і  $FeSO_4$ . Відмічено перевагу над солями алюмінію, оскільки солі заліза можуть використовуватися для очищення вод з різним сольовим складом і різними значеннями рН, краще діють при низьких температурах, характеризуються більшою міцністю і крупністю пластівців. Досліджено та розглянуто застосування і вплив катіонного флокулянта «PuroFloc 890» або аніонного «Flopam», які дозволяють виконувати освітлення води без застосування коагулянту. Було визначено та розглянуто процес утворення коагулянта. Досліджено методи та процеси для інтенсифікації процесу поділу, в тому числі за рахунок укрупнення частинок в агрегаті під дією коагулянтів і флокулянтів (коагуляторів), розділення рідкої та твердої фази. Отримано, що перевагою отриманого зваженого шару є те, що він працює по типу фільтру, витягаючи з води дрібнодисперсні частинки. У міру накопичення частинок їх концентрація збільшується і виникає явище стисненого осадження, при якому швидкість осадження зменшується, тому що витрачається енергія на взаємотертя. До зниження продуктивності освітлювача необхідно знижувати швидкість висхідного потоку.*

*Ключові слова:* коагуляція, флокуляція, флокулянти, коагулят, освітлення води.

ONYSHCHUK Oksana

Lesya Ukrainka Volyn National University

## TO THE STUDY OF THE FLOCCULATION AND COAGULATION PROCESS IN THE PURIFICATION OF WATER FOR INDUSTRIAL APPLICATION

*It is an important criterion the choice of lighting technique for industrial applications in water purification. In the article it was examined the research methods of the coagulation and flocculation process. Today, the improvement of these techniques and the use of flocculants and coagulants, which speed up the process of coagulation and flocculation, are relevant. It were considered as coagulants sulfuric acid salts  $Al_2(SO_4)_3$  and  $FeSO_4$ . It was noted an advantage over aluminum salts since iron salts which can be used to purify water with different salt composition and different pH values, which work better at low temperatures, and are characterized by greater strength and grain size. It was considered the application and influence of the cationic flocculant "PuroFloc 890" or the anionic "Flopam", which allow water clarification without the use of a coagulant. It was determined and considered the process of coagulant formation. Methods and processes for the intensification of the separation process have been studied, including due to the thickening of particles in the aggregate under the action of coagulants and flocculants (coagulants), separation of the liquid and solid phases. It was found that the advantage of the resulting suspended layer is that it works like a filter, removing fine particles from the water. As the particles accumulate, their concentration increases and the phenomenon of compressed deposition occurs, in which the deposition rate decreases because energy was spent on friction. It is necessary to reduce the speed of the upward flow to reduce the productivity of the illuminator,*

*Key words:* coagulation, flocculation, flocculants, coagulate, water clarification.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

В основному, в теплоенергетиці та на промислових підприємствах при очищенні води застосовують процес коагуляції, заснований на принципі взаємного коагулювання колоїдів. Сутність взаємної коагуляції колоїдних розчинів полягає в тому, що до колоїдного розчину, частинки якого мають, наприклад, негативний заряд, додають інший колоїдний розчин з позитивно зарядженими частинками. При цьому протилежні заряди колоїдних частинок нейтралізуються з подальшою агломерацією окремих частинок і утворенням твердої макрофази. При коагуляції позитивно заряджений колоїдний розчин вводять не в готовому вигляді, а отримують безпосередньо в оброблюваній воді. Так, позитивно заряджені колоїдні розчини гідроксидів заліза зазвичай отримують в результаті гідролізу їх сірчаноокислих солей. Даний фізико-хімічний процес злипання колоїдних частинок і освітлення грубодисперсних пластівців характеризується випаданням осаду і видаленням з води осадженням їх в освітлювачах або фільтруванням в освітлювальних фільтрах. Реагенти, що застосовуються для коагулювання, називають коагулянтами, а хімічні агенти, що викликають коагуляцію колоїдних домішок води – коагуляторами [1–4].

### Формулювання мети дослідження. Постановка проблеми

Дослідити методи очистки води для промислового призначення з використанням флокулянтів і коагулянтів, які пришвидшують процес коагуляції та флокуляції, а також методики інтенсифікації процесу поділу, в тому числі за рахунок укрупнення частинок в агрегаті під дією коагулянтів і флокулянтів (коагуляторів), розділення рідкої та твердої фази.

### Викладення основного матеріалу дослідження та методика

Освітлення води після вапнування і коагуляції відбувалося в освітлювачі за рахунок значного зниження швидкості руху води і сили тяжіння. Більш глибоке очищення при вапнуванні з коагуляцією досягається при підвищенні тривалості контакту очищення води з утвореним шламом. Досягти підвищення тривалості контакту можна інтенсивним перемішуванням [5, 8, 9].

Однак такий шлях недоцільний, тому що супроводжується подрібненням шламу, що ускладнює його видалення. Тому в освітлювачі створювали зону зваженого шламу, в якій відбувається спокійний висхідний рух. Шламова зона діє як фільтр, затримуючи і збільшуючи більш дрібні частинки. При здійсненні технологічного процесу велике значення має динаміка коагуляції.

Для створення оптимальних умов процесу спочатку швидко перемішували воду з коагулянтном, а потім процес відбувався більш спокійно. Режим потоку води дуже впливає на формування пластівців, а також сприяє руйнуванню вже сформованих. Тому рекомендована швидкість в зоні формування пластівців і відстоювання не більше  $1 \div 1,5$  мм/с. Для інтенсифікації процесу коагуляції використовують і флокулянти. Агрегація колоїдних частинок відбувається не тільки безпосередньо, а й через молекули флокулянта. Як флокулянт використовуються неорганічні (активна кремнекислота) і органічні високомолекулярні сполуки. Особливо актуально застосування флокулянту в період паводку, коли знижується лужність і збільшується вміст суспензії, кремнекислоти та органічних речовин, що вимагає збільшувати дозу коагулянту. В результаті підвищується вміст солі і жорсткість освітленої води, отже знижується фільтроцикл іонообмінних фільтрів знесолювальної установки.

Для очищення вод від колоїдно-дисперсних домішок ми розділяли рідку і тверду фази. Це ускладнювалося через малий розмір часток, а також через агрегативну і седиментаційну стійкість системи. Агрегативна стійкість колоїдної системи пояснюється існуванням подвійного електричного шару на межі розділу фаз, що представляє собою тонкий шар з просторово розділених електричних зарядів протилежного знака. Подвійний електричний шар утворюють іони і дипольні молекули. Іонний подвійний шар виникає або в результаті дисоціації іоногенних груп речовини твердої фази, або вибіркової адсорбції іонів. Іони, що розташовуються на поверхні твердої частинки, називаються потенціалотворюючими. Внаслідок появи заряду на частинці навколо неї концентруються іони протилежного знаку – протиіони [5–7].

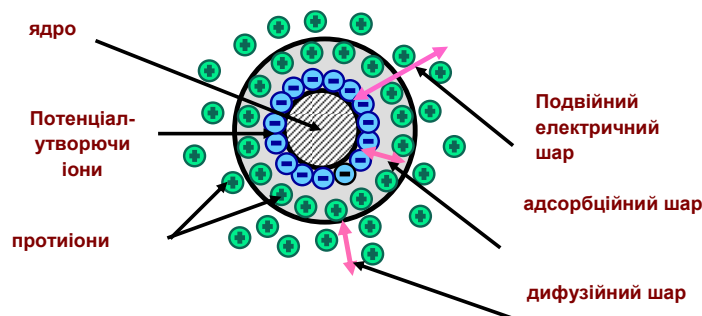


Рис. 1. Будова колоїдної міцели

Освітлення твердої фази з пересиченого розчину розглядають як результат протікання процесів агрегації і орієнтації. Флокулянт має високу масу, добре адсорбується частинками дисперсії і розчиняється в дисперсійному середовищі. При орієнтації відбувається процес вдосконалення структури кристалів, що приводить до зменшення їх питомої поверхні та збільшення розмірів кристалів. За співвідношенням швидкостей цих процесів визначено структуру осаду. При переважанні процесу агрегації виходить аморфний осад, що складається з дрібних частинок. Якщо переважає процес орієнтації, то виходить крупнозернистий кристалічний осад. Структура осаду має велике значення для процесів його виділення з розчину. Вся маса частинок знаходиться в стані динамічної рівноваги з подаються знизу потоком води. Зважені в потоці частки твердої фази знаходяться в безперервному хаотичному русі, при цьому сам зважений шар в цілому нерухомий.

В якості коагулянтів застосовували сірчаноокислий солі  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  і  $\text{FeSO}_4$ . У порівнянні з солями алюмінію солі заліза використовували для очищення вод з різним сольовим складом і різними значеннями рН, краще діють при низьких температурах, характеризуються більшою міцністю і крупністю пластівців. Недоліками солей заліза, як коагулянтів, є підвищені кислотні властивості, що впливають на корозійні процеси конструкційних матеріалів апаратів. При взаємодії іонів заліза з деякими органічними сполуками утворювався сильно забарвлений комплекс.

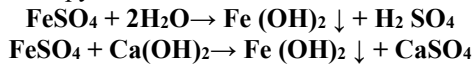
Призначенням фази коагуляції є видалення колоїдних домішок вихідної води; осадження комплексного робочого шламу з високорозвиненою поверхнею. Як коагулянт використовували сірчаноокисле залізо  $\text{FeSO}_4$ . Коагуляція води  $\text{FeSO}_4$  є процесом, який поліпшує формування важкого осаду, що сприяє видаленню колоїдних речовин, заліза і кремнекислоти. При додаванні до води сірчаноокислому залізу, воно повністю дисоціює, як сильний електроліт,



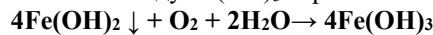
Іони  $\text{Fe}^{2+}$ , як катіони слабких основ, піддаються гідролізу, який для багатозарядних іонів протікала



по наступних ступенях. На першій стадії в результаті гідролізу та взаємодії  $\text{FeSO}_4$  з  $\text{Ca(OH)}_2$  відбувається утворення осаду  $\text{Fe(OH)}_2$  зеленого кольору:

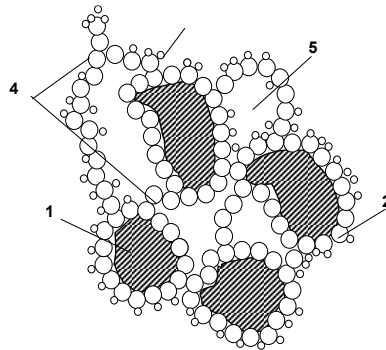


На другій стадії, в лужному середовищі ( $\text{pH} > 8$ ),  $\text{Fe(OH)}_2$  окиснюється, розчиненим у воді киснем з утворенням мікропластівців важкорозчинного осаду  $\text{Fe(OH)}_3$  коричневого кольору:



Лужне середовище в необхідному діапазоні досягається дозуванням вапна. Коагулюючий гідроксид  $\text{Fe(OH)}_3$  сорбується на поверхні домішок і одночасно утворює "клейові містки", що зв'язують частинки домішок між собою в комплекси. Органічні речовини сорбуються на поверхні коагулірующего гідроксиду. Утворені пластівці мають пухку структуру, тому що проміжки між частинками заповнені водою. Утворювані комплекси виділяються з води в процесі освітлення. Процес коагуляції представлений на **рис. 2**. Наведені реакції гідролізу можуть протікати лише за умовами, якщо сірчана кислота буде частково нейтралізована бікарбонатами кальцію і магнію, які знаходяться у воді, а при їх відсутності або недоліку - додаються в воду лужним реагентом (вапном):  $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Ca(HCO}_3)_2 \rightarrow \text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2$

Процес гідролізу іонів  $\text{Fe}^{2+}$  призводить, як це видно з рівнянь реакцій гідролізу, до підвищення концентрації іонів водню. Введення солей заліза в природну воду не викликає істотного підвищення іонів  $\text{H}^+$  тому, що вони зв'язуються іонами  $\text{HCO}_3^-$  відповідно до рівняння:



**Рис. 2.** Структура пластівців, що утворюються при коагуляції: 1 – частинки ГДП, 2 – частинки  $\text{Fe(OH)}_3$ , 3 – органічні речовини, 4 – «клейові» містки, 5 – «захоплена» вода

Залежно від умов, в яких проходить процес коагуляції, розмір частинок які утворюються з твердої макрофази може бути дуже різним: від ледве помітних неозброєним оком до великих пластівців розміром в кілька міліметрів [4, 6].

Процес утворення коагулянта, або пластівцеутворення (флокуляція), протікає не миттєво, а потребує для свого завершення певного проміжку часу. Встановлено, що в процесі укрупнення колоїдні частинки проходять стадії "прихованої", а потім "явної" коагуляції, супроводжувані утворенням пластівців і осадженням їх в осад [1, 9]. Пластівці, що утворюються безпосередньо після присадки коагулянта і не видимі неозброєним оком, поступово з'єднуються в більші комплекси, відбувається помутніння води, яке з плином часу посилюється, після чого утворюються ще більші пухкі пластівці, що осідають на дно і захоплюють з собою всі грубо дисперсні забруднення. Поступове осадження пластівців супроводжується підвищенням прозорості води. Для прискорення процесу коагуляції застосовуються її перемішування, завдяки чому колоїдні частинки забруднень і коагулянту мають більш часті і сильні зіткнення, що призводять до злипання. Правильний вибір дози коагулянта – одна з основних умов ефективного протікання процесу коагуляції як колоїдно-дисперсних, так і грубо дисперсних домішок води. Оптимальна доза коагулянту, тобто та мінімальна його кількість, при якій досягається досить швидко і повне освітлення і зниження окиснюваності води, залежить від фізико-хімічних властивостей домішок води, а також від температури і способу здійснення коагуляції [5–7].

### 1. Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

2. В даний час актуальним є вдосконалення методики освітлення води промислового призначення методами коагуляції та флокуляції.

3. Розглянуто застосування катіонного флокулянта «PuroFloc 890» або аніонного «Florant» дозволяє виконувати освітлення води без застосування коагулянту. При використанні методів осадження дуже велике значення мають процеси утворення осаду.

4. Основною перевагою отриманого зваженого шару є те, що він працює по типу фільтруючого завантаження, витягаючи з води дрібнодисперсні частинки в результаті адгезійних і сорбційних процесів. У міру накопичення частинок їх концентрація збільшується і виникає явище стисненого осадження, при якому швидкість осадження зменшується, тому що витрачається енергія на взаємодію. Для утримання шару в підвищеному стані необхідно знижувати швидкість висхідного потоку. Це призведе до зниження

продуктивності освітлювача.

5. Досліджено методи та процеси для інтенсифікації процесу поділу, в тому числі за рахунок укрупнення частинок в агрегаті під дією коагулянтів і флокулянтів (коагуляторів), розділення рідкої та твердої фази.

### Література

1. Физико-химические методы очистки воды. Управление водными ресурсами / [под ред. И.М. Астрелина, Х. Ратнавиры]. – К. : Проект «Водная гармония», 2015. – 614 с.
2. Запольський А.К. Водопостачання, водовідведення та якість води / А.К. Запольський. – К. : Вища школа, 2005. – 671 с.
3. Кульський Л.А. Основы химии и технологии воды / Л.А. Кульский. – К. : Наукова думка, 1991. – 568 с.
4. Тугай А.М. Водопостачання / А.М. Тугай, В.О. Орлов. – Рівне : РДТУ, 2001. – 429 с.
5. Крамаренко Л.В. Технологія очищення природних вод : навчальний посібник / Л.В. Крамаренко. – Харків : ХНАМГ, 2008. – 145 с.
6. Куликов Н.И. Теоретические основы очистки воды : уч. пособие / Н.И. Куликов, А.Я. Найманов и др. – Макеевка : ДГАСА, 1999. – 277 с.
7. 14. Загальна хімічна технологія : [підруч. для студентів вищих навч. закл.] / В.Т. Яворський, Т.В. Перекупко, З.О. Знак, Л.В. Савчук. – Львів : Національний університет «Львівська політехніка», 2005. – 552 с.
8. Кульський Л.А. Технология очистки природных вод / Л.А. Кульский, П.П. Строкач. – К. : Вища школа, 1986. – 352 с.
9. Кульський Л. А. Химия воды: Физико-химические процессы обработки природных и сточных вод / Л.А. Кульский, В.Ф. Накорчевская. – К. : Вища школа. Головное изд-во, 1983. – 240 с.

### References

1. Physical and chemical methods of water purification. Management of water resources. ed. I.M. Astrelina, H. Ratnaviry. K.: Project "Water Harmony", 2015. 614 p.
2. Zapolsky A.K. Water supply, drainage and water quality. K.: Higher School, 2005. 671 p.
3. Kulsky L.A. Fundamentals of chemistry and water technology. K.: Naukova dumka, 1991. 568 p.
4. Tugai A.M., Orlov V.O. Water supply. Rivne: RDTU, 2001. 429 p.
5. Kramarenko L.V. Natural water purification technology: study guide. Kharkiv: KhNAMG, 2008. 145 p.
6. Kulikov N.I., Naimanov A.Ya. Theoretical foundations of water purification: uch. Allowance. Makeevka: DGASA, 1999. 277 p.
7. Yavorskyi V.T., Perekupko T.V., Znak Z.O., Savchuk L.V. General chemical technology: lesson. for students of higher education. app. Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2005. 552 p.
8. Kulsky L.A., Strokach P.P. Natural water purification technology. K.: Higher School, 1986. 352 p.
9. Kulsky L.A., Nakorchevskaya V.F. Water chemistry: physical and chemical processes of natural and wastewater treatment. K.: Higher school. Main publishing house, 1983. 240 p.

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА ОСНОВІ ФРЕЙМВОРКІВ

У статті проведено порівняльний аналіз веб-фреймворків на основі мови програмування Python. Правильний вибір інструменту розробки програмного забезпечення дозволить розробникам пришвидшити процес проектування та програмної реалізації веб-ресурсів.

З розвитком мов програмування почали з'являтися рішення, які полегшують програмістам створення веб-додатків. За останні роки було розроблено багато інструментів цього типу, зокрема веб-фреймворків. Важливим критерієм оцінки веб-фреймворка є час розробки базових елементів, таких як сторінка реєстрації та додаткових елементів – специфічних для конкретного випадку. Автором проведено аналіз продуктивності фреймворків за критеріями часу написання програмних модулів та об'єму програмного коду. Від вибору правильного веб-фреймворка залежить якість, надійність та час реалізації кожного розроблюваного програмного засобу.

Існуючі веб-фреймворки відрізняються один від одного і вибір їх може стати для програміста складним завданням. Тому потрібно навести кілька параметрів, які є загальними для фреймворків, згідно яких слід вибирати потрібний веб-фреймворк. Вибрані критерії дозволяють якісніше та об'єктивніше оцінити фреймворки та пришвидшити процес проектування та програмної реалізації веб-ресурсів. Через високий попит на веб-додатки розробники повинні розробляти економічно ефективні, безпечні та добре кодовані веб-додатки.

Ключові слова: фреймворки, веб-ресурси, Flask, Django.

PAZDRIY Ihor

West Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine.

### COMPARATIVE ANALYSIS OF SOFTWARE DEVELOPMENT SYSTEMS BASED ON FRAMEWORKS

The article provides a comparative analysis of web frameworks based on the Python programming language. The right choice of a software development tool will allow developers to speed up the process of designing and software implementation of web resources. With the development of programming languages, solutions have begun to appear that make it easier for programmers to create web applications. In recent years, many tools of this type have been developed, including web frameworks. Some of them are used to develop small web applications, and other frameworks are used to create large-scale systems.

The existing web frameworks differ from each other, but choosing them can be a difficult task for a programmer. Therefore, it is necessary to specify several parameters that are common to frameworks, according to which the desired web framework should be selected. The selected criteria make it possible to evaluate the frameworks more qualitatively and more objectively and speed up the process of design and software implementation of web resources. Due to the high demand for web applications, developers need to develop cost-effective, secure and well-coded web applications. Analyzing the Django framework, it can be argued that it is the most popular for web development, written in the Python programming language and using the MVC architecture. It is ideal for application projects with limited time and a small budget. If the application is not very voluminous and only simple URL routing and templates with a simple context are needed, then the Flask framework can be used instead of Django.

The framework for building a Flask application in the resulting HTML files contains additional tags and scripts. The mechanism of work of processing forms also works differently. Flask stores more information about form fields on pages. The size of HTML files created using the Flask framework turns out to be significantly larger.

**Keywords:** frameworks, web resources, Flask, Django.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Одним з важливих завдань при створенні веб-додатків є написання програмного коду легкого для читання, зрозумілого для інших програмістів та для багаторазового використання. Цю практику часто називають принципом DRY (Don't repeat yourself). Він стверджує, що код повинен створюватися таким чином, щоб жоден його фрагмент не повторювався в різних частинах програми.

Повторювані дії повинні виконуватися генераторами коду або сценаріями, призначеними для автоматизації роботи. Зі збільшенням вимог користувачів та рівня складності веб-додатків виникла необхідність створення інструментів для підтримки процесу розробки програмного забезпечення.

Ще одна складність для будь-якого програміста – розуміння коду написаного іншими програмістами. Якщо таке повторюватиметься у багатьох місцях програми, то слідкування за певним фрагментом коду може стати досить складним завданням. Це призводить до неоднозначних інтерпретацій та підвищує складність програми. Це обмежує можливість розширення існуючих додатків, а також ускладнює передачу роботи над програмним забезпеченням іншим розробникам, які не брали участі у попередніх проєктах.

Вирішенням вищезазначених проблем стали фреймворки.

Фреймворк – це готова форма моделі в IT, яка повторно використовується для програмної платформи, що включає також дизайн високого рівня. Це структура викладена на мові програмування, у той

час як інша техніка повторного використання залежить від спеціального призначення і потребує спеціальних програмних засобів. Це шаблон для програмної платформи, на основі якого можна дописати власний програмний код [1]. Структура зосереджена на кількох основних критеріях, що характеризують процес розробки програмного забезпечення, зокрема: продуктивність, здатність до модифікування програми, функціональність та відповідність стандартам [2].

Фреймворки надають програмістам певні функціонали та готові модулі, що дозволяють зосередитися лише на найважливіших аспектах розробки програмного забезпечення. Рутинні завдання, такі як обробка сеансу або перевірка даних у формах, мають другорядне значення, оскільки вони забезпечуються належним чином налаштованим каркасом програми. Налаштувавши функціональну групу під свої потреби та врахувавши бізнес-логіку, програміст може приступати до роботи. Саме це робить фреймворки додатків популярними в середовищі розробки, оскільки розробникам не доводиться "винаходити колесо" з кожним новим проектом.

Слід зазначити, що фреймворки розробки додатків забезпечують не тільки готові сценарії чи бібліотеки, а й умови програмування, які значною мірою впливають на мінімізацію часу, необхідного для створення програмного забезпечення високої якості. Деякі з них використовують для розробки невеликих веб-додатків, інші – для створення масштабних систем, які потребують численних рішень та функціональних можливостей. Кожен програміст, якому доводиться вибирати новий робочий інструмент, повинен спочатку визначитися із його вибором.

Сучасні фреймворки володіють низкою певних переваг та недоліків, а тому актуальним є питання вибору правильного та відповідного фреймворку або їх набору для кожного конкретного проекту, адже від правильного вибору залежить якість, час реалізації та надійність кожного розроблюваного програмного продукту.

*Об'єкт дослідження* – фреймворки для розробки веб-систем.

*Предмет дослідження* – підходи до розробки програмного забезпечення.

*Метою даної роботи* є проведення порівняльного аналізу вибраних фреймворків для створення веб-додатків. Для цього слід здійснити вибір, описати та обґрунтувати критерії порівняння фреймворків. Тематичне дослідження послужить вичерпною темою практичного аспекту використання вибраних фреймворків для створення програм. Результати дослідження визначають доцільність вибору та застосування сучасних фреймворків для розробки програмного забезпечення.

Для досягнення поставленої мети визначено такі основні завдання дослідження:

- виділити сучасні фреймворки на основі мови програмування Python;
- виділити критерії оцінки продуктивності фреймворків;
- на основі аналітичного підходу здійснити порівняльний аналіз фреймворків веб-розробки на основі визначених критеріїв.

### **Аналіз досліджень та публікацій**

З розвитком веб-технологій також розвиваються інтернет-сторінки. Розвиток Інтернету робить веб-додатки надзвичайно важливими. Сторінки статичні були замінені на динамічні сторінки з великою кількістю інтерактивних елементів, які можна змінювати багато разів за досить короткий час. Для допомоги створення таких веб-сторінок розробникам потрібні фреймворки. Існує велика кількість різних фреймворків. Науковці в сфері веб-технологій приділяють значну увагу сучасним фреймворкам: їх опису, аналітичному аналізу, порівнянню.

У роботі [3] автори наводять результати порівняльного аналізу трьох фреймворків для створення веб-додатків Express, Нарі і Коа. В рамках роботи реалізовано серверні тестові додатки, які виконують типові операції з базою даних. На основі отриманих результатів виявилось, що фреймворки Нарі і Коа, які працюють над одним об'єктом або рядком Hello World досягли найкращого часу відповіді. Коа виявився найкращим при більших навантаженнях, досягаючи часу відповіді приблизно на 20% кращого, ніж Express. При високих навантаженнях Нарі виявився гіршим, досягнувши більш ніж у 2 рази довшого часу відгуку, ніж фреймворк Коа.

Автори роботи [4] реалізували модель архітектури MVC (Model View Controller) із фреймворками Laravel і Slim. Шаблони проектування MVC є добре відомими шаблонами, які використовуються для інтерактивних архітектур програмного забезпечення. Проведений порівняльний аналіз продуктивності фреймворків Laravel і Slim під час навантажувального тестування на сторінці інформаційної панелі за допомогою Apache JMeter. Результати, отримані в від порівняння продуктивності, свідчать про те, що фреймворк Slim швидший і кращий за фреймворк Laravel.

Порівняння переваг та недоліків веб-розробки за допомогою фреймворку з розробкою в стилі бібліотеки розглянуто у роботі [5]. Це порівняння базується на двох основних показниках: вплив на керівництво та вплив на розробника. Багаторазове використання, гнучкість, економічність та рентабельність – це критерії, які враховуються керівництвом у визначенні свого бізнес-процесу. За вибір методу, бібліотеки чи фреймворку відповідає компанія. Фреймворк допомагає розробнику автоматично створювати структуру мережі. Показано, що обидва методи як фреймворк, так і бібліотека, з точки зору управління компанією, можуть використовуватися багаторазово.

У статті [6] представлено порівняння продуктивності реляційних баз даних SQL Server, MySQL і

PostgreSQL з використанням фреймворку Laravel. Оцінено час виконання для різних типів запитів, як простих, так і з використанням конкатенації стовпців і таблиць. Отримані результати для одних і тих самих структур баз даних відрізнялися кількістю операцій. Розглядаючи всі проведені дослідження, можна зробити висновок, що у випадку баз даних з не надто великою кількістю записів (до 1000 записів), а технічні параметри пристрою, на якому працює база даних, низького або середнього класу, MySQL працює досить добре.

Автор роботи [7] показав, що за допомогою веб-фреймворку CodeIgniter можна досить швидко створити невеликий проект, CakePHP – дозволить швидко написати проект, але оптимізувати його буде складно, Symfony – ідеально підходить під середні та великі проекти.

У статті [8] розглянуто та порівняно функції безпеки трьох найпопулярніших і найпотужніших фреймворків PHP Laravel, CodeIgniter і Symfony. Виходячи з результатів порівняння Laravel найбільш захищений. У цій статті наведено опис запропонованої концепції для впровадження безпечних програм з використанням фреймворків.

Метою статті [9] є порівняння продуктивності популярних фреймворків Angular і Vue.js у контексті вибору кращого. З наведених у статті результатів автори зробили висновок, що фреймворк Angular є більш складним, але завдяки жорсткому набору тексту він досить ефективний для створення великих проектів. Vue.js має менше функцій і, здається, є кращим вибором для програмістів-початківців, але одночасно – це більш гнучкий фреймворк, ніж Angular, і його можна використовувати для написання як великих, так і малих проектів. Незважаючи на те, що TypeScript, на якому написаний Angular, складніший і важчий для вивчення, розробити та підтримувати програмне забезпечення, створене з його допомогою, простіше і ефективніше. Фреймворк Vue.js є кращим програмним середовищем, ніж фреймворк Angular, для створення веб-додатків середнього рівня складності.

У статті [10] автор представив аналіз продуктивності восьми фреймворків. Проведене дослідження полягало у вимірюванні часу створення, модифікації та видалення елементів HTML на веб-сайті. Порівняння результатів цих досліджень показує, котрий з фреймворків найшвидший. Порівнюючи середні значення часу, Vue.js швидший, ніж Angular, але тільки у випадку видалення елементів HTML. Автор робить висновок, що Angular має найкращі результати та займає перше місце майже у всіх проведених тестах. Vue.js є одним із найшвидших фреймворків для створення та модифікації елементів, хоча він все ще повільніший за Angular у виконанні такого типу операцій.

Автор статті [11] порівнює структури для створення веб-сайту в системі керування вмістом Sitkore. Щоб визначити найбільш прийнятну технологію, автор порівнює такі показники, як кількість рядків вихідного коду, обсяг дискового простору, який використовується виконуваними файлами, складність кодування, архітектурні обмеження, введені фреймворком і продуктивність. На основі цього дослідження зроблено висновок, що для створення такого типу додатків найкраще використовувати бібліотеку React. Автор також зазначає, що фреймворк Vue.js має великі перспективи витіснити React завдяки легкому входу, мінімальній базовій конфігурації та простоті розширення архітектури коду. Для складного та багатофункціонального проекту Angular є головним конкурентом React завдяки гнучкості коду та швидкості відтворення сторінок.

Автори статті [12] провели порівняння фреймворків Angular, Vue.js і React, щоб визначити, який з них ефективніший для створення додатків SPA, для створення додатків типу MPA або для створення обох типів цих додатків. Вибрані фреймворки досліджувались на здатність генерувати сторінку на стороні сервера, здатність писати та керувати великою кількістю складного коду та можливості фреймворків у разі стиснення та мінімізації вихідних файлів. У результаті дослідження зроблено висновок, що Vue.js є найбільш придатним для створення MPA, а Angular є гіршим вибором через його розмір і складність, а також його неспроможність контролю невеликих частин структури DOM. У випадку SPA Angular, на думку авторів, це найкращий вибір. Vue.js є ефективним вибором як для розробки SPA, так і для MPA.

### **Виклад основного матеріалу Параметри оцінювання фреймворків.**

Враховавши, що фреймворки – це інструмент полегшення та покращення створення і запуску веб-додатків, для програміста відпадає необхідність самостійно прописувати велику кількість коду та затрачати час на пошук можливих помилок та прорахунків. На сьогоднішній час існує можливість вибору відповідних фреймворків веб-програмування. Вибір фреймворку здійснюється, в залежності від поставленого завдання.

Слід провести вибір критеріїв порівняння фреймворків. На основі цих критеріїв були проведені вимірювання для кожної з аналізованих структур створення веб-додатків.

Одним з таких параметрів є час, витрачений на розробку додатків. З точки зору менеджера команди розробників, досить важливо знати орієнтовний час, який слід витратити на розробку. Чим більше часу займе створення програми, тим дорожчим буде проект. Без таких даних легко недооцінити час реалізації та бюджет цілого проекту. Тому час, витрачений на розробку додатків є одним із найважливіших порівняльних критеріїв. Вимірювання включають час, витрачений на створення компонентів програми та її відлагодження. Також було виміряно середній час роботи над функційними можливостями розробленого веб-додатку.

Наступним досліджуваним параметром є час, витрачений на зміну програми. Знання часу,

витраченого на розробку програми, є важливим аспектом, але слід також враховувати можливість її модифікації. Час, витрачений на зміну існуючої програми, включаючи додавання, видалення та зміну функційних можливостей, показує якість внутрішньої структури фірми створення веб-додатків. Цей показник також дає уявлення про те, наскільки коштовною може бути підтримка програми в майбутньому. Вимірювання включають час, витрачений на зміну програми, а також кількість файлів, які підлягають зміні при виконанні певного завдання.

Наступним порівняльним критерієм є розмір написаного коду. Цей критерій пов'язаний з першим критерієм. Він допомагає оцінити загальний час, витрачений на створення веб - програми. Якщо результати вимірювань, в певній мірі, відрізняються від результатів першого критерію, то це може означати, що робота з використанням конкретного фреймворку є більш складною. Цей показник є важливим для початківців створення веб-додатків. Час, необхідний для підвищення продуктивності розробника, може суттєво збільшуватися. Цей критерій також може вказувати на перевагу використання компонентної платформи розробки додатків, оскільки, як очікується, повторне використання коду буде на значно вищому рівні. Вимірювання поділялись на розміри збереженої конфігурації, моделі та шаблонів. Результати містять вимірювання розміру (у байтах) усіх файлів використаних для реалізації даної функційності та середнього розміру файлу для кожного рішення.

Розмір згенерованого коду для веб-додатків залишається важливою проблемою. Менший код програми, зазвичай, означає менший час очікування завантаження веб-браузера. Користувачі не завжди люблять довго чекати на відповідь від сервера. Якщо час очікування буде постійно надто довгим, вони почнуть шукати альтернативні рішення.

Кожний фреймворк має певні переваги для керування шаблонами сторінок та загальною структурою файлів. Отриманий розмір HTML -файлів також може відрізнятися, оскільки вони можуть містити код з різних мов сценаріїв. Використані шаблони допомагають упорядкувати код та відокремити бізнес-логіку від рівня презентації. Розмір сформованого коду веб-програми вимірювався в байтах на шаблонах HTML. Результати вимірювань також включають середній розмір створених шаблонів.

**Порівняльний аналіз сучасних фреймворків**

Для порівняльного аналізу вибрано два сучасних фреймворки Django та Flask. Структуру веб-фреймворку Django наведено на рисунку 1.

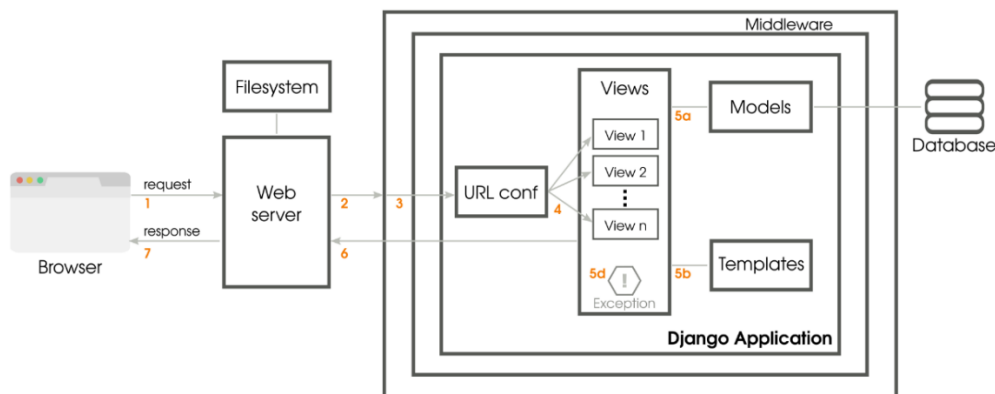


Рис. 1. Структура веб-фреймворку Django

Структуру файлів фреймворку Flask наведено на рисунку 2.

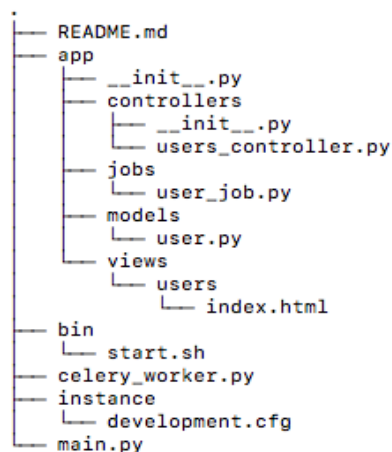


Рис. 2. Структура файлів фреймворку Flask

На час завантаження видимих елементів програми впливає продуктивність фреймворку для

створення програми разом із розміром створених файлів шаблонів HTML. Навіть якщо розмір шаблону невеликий, завантаження окремих елементів може сповільнитися через низьку продуктивність фреймворку, який використовується для створення веб-програми.

Виконані вимірювання складаються з двох тестів. Обидва з них тестували веб-додатки під великим навантаженням. Перший тест вимірював час доступу до певного шаблону під навантаженням, що виникає внаслідок численних запитів на повторний доступ.

Таблиця 1

**Час, витрачений на розробку програми**

	Час написання, хв		Виправлення помилок, хв		Загальний час, хв	
	Flask	Django	Flask	Django	Flask	Django
Вхід	80	50	0	30	80	80
Реєстрація	105	40	0	0	105	40
Активність	60	40	30	0	90	40
Додавання записів	25	35	5	0	30	35
Видалення записів	25	30	0	20	25	50
Оновлення записів	25	30	0	0	25	30
Профіль користувача	60	30	0	5	60	35
Видалення профілю	15	10	5	0	20	10
Оновлення профілю	60	25	15	0	75	25
Додавання файлів	50	25	5	0	55	25
Видалення файлів	25	20	20	0	45	20
Оновлення файлів	50	10	0	0	50	10
Перевірка даних	10	10	0	0	10	10
Панель адміністратора	30	10	0	5	30	15
Відновлення паролю	10	10	0	0	10	10
Разом	630	375	80	60	710	435

До існуючої програми було внесені чотири зміни: видалення модуля, відповідального за додавання файлів, додавання списку, що по черзі висвітлює оголошення адміністратора, об'єднання шаблону контакту з описом призначення програми та додавання календаря із записами користувача до сервера про отримання доступу до випадкових ресурсів веб-програми. Для проведення вимірювань був використаний інструмент під назвою JMeter.

Для порівняння також використовувався критерій – типова кількість файлів, необхідних для виконання веб-додатку. Цей критерій показує, наскільки складною може бути конфігурація багатофункційної веб-програми. Менша кількість файлів може означати, що розробнику буде легше налаштувати та краще орієнтуватись у вихідному коді програми. Якщо певна функційність програми вимагає, щоб для роботи було налаштовано занадто багато файлів, то наступні зміни займуть більше часу для програміста.

Виконані вимірювання включають кількість файлів, необхідних для реалізації окремих функцій, а також середню кількість файлів, необхідних для реалізації будь-якої з них.

Досить важливо знати, чи розроблена програма відповідає стандартам W3C. Для того, щоб веб-додаток правильно відображався у різних веб-браузерах, необхідно переконатися, що він створений відповідно до загальноприйнятих правил. Відповідність стандартам виконання веб-додатків було перевірено за допомогою засобу перевірки W3C. Отримана кількість помилок разом із середньою кількістю порушень представлена у наступних таблицях. Результати розбиті на підрозділи, які відповідають прийнятим критеріям. Порівняння проводилося з використанням обраних фреймворків для розробки веб-додатків. Були проаналізовані фреймворки Django та Flask.

Таблиця 2

**Час модифікації програми**

	Необхідний час, хв		Кількість модифікованих файлів	
	Flask	Django	Flask	Django
Видалення модуля	3	5	9	10
Додавання списку	22	30	11	10
Об'єднання шаблону контакту з описом призначення програми	8	15	14	11
Додавання календаря із записами користувача	13	15	10	7
Разом	46	65	44	38

Функційні можливості програми показані в тому порядку, в якому вони відображаються у представлених таблицях. Зростання ефективності помітне через скорочення часу впровадження на наступних етапах розробки веб-додатків.

Час, витрачений на розробку програми, вимірювався на основі однієї функції. Результати поділено на три групи: час розробки, час виправлення помилок та сума цих двох показників. Час вимірювався у хвилинах.

Розмір записаного коду поділений на розмір файлів конфігурації, розмір файлу перегляду та розмір шаблону HTML. Результати представлені в байтах, окремо для кожної з функційних можливостей.

Результати вимірювання для фреймворку Django не показують розмір файлів конфігурації, оскільки у всій програмі доступний лише один файл конфігурації. Натомість представлені розміри файлів, в яких працює механізм перевірки даних.

Таблиця 3

**Розмір написаного коду**

	Файл конфігурації, байт		Файл перегляду, байт		Шаблон HTML, байт		Разом, байт	
	Flask	Django	Flask	Django	Flask	Django	Flask	Django
Вхід	549	591	1121	1427	1246	816	2916	2834
Реєстрація	500	0	577	352	131	553	1208	905
Активність	673	0	1749	2555	2871	1978	5293	4533
Додавання записів	673	1984	2049	2608	3019	1632	5741	6224
Видалення записів	686	0	1550	0	932	1483	3168	1483
Оновлення записів	941	391	1733	3505	896	1130	3570	5026
Профіль користувача	612	0	2036	2304	1570	1564	4218	3868
Видалення профілю	670	0	1452	2304	1090	1760	3212	4064
Оновлення профілю	747	2256	4137	1745	3372	1752	8256	5753
Додавання файлів	684	697	1810	6242	1189	1046	3683	7985
Видалення файлів	602	444	1203	2779	749	911	2554	4134
Оновлення файлів	762	0	2005	1468	1045	1621	3812	3089
Перевірка даних	685	386	1994	3796	780	1129	3459	5311
Панель адміністратора	679	0	2067	2601	1038	1612	3784	4213
Відновлення паролю	680	385	3254	4122	1351	1120	5285	5627
Середнє	676,2	475,6	1915,8	2520,5	1418,6	1340,4	4010,6	4336,6

Загальний аналіз фреймворків Django та Flask дають подібні результати. Слід відзначити невелику перевагу Flask.

Розмір створеного HTML-коду вимірювався в байтах на функцію. Запити сторінок були відправлені на сервер і був виміряний розмір отриманих даних. Також був врахований середній розмір однієї сторінки.

Таблиця 4

**Розмір створених файлів**

	Flask, байт	Django, байт
Вхід	2640	1181
Реєстрація	2821	1353
Активність	8450	4415
Додавання записів	5442	5500
Видалення записів	5147	3407
Оновлення записів	3716	2142
Профіль користувача	3334	2021
Видалення профілю	3886	2664
Оновлення профілю	6004	5955
Додавання файлів	4282	3295
Видалення файлів	3628	2407
Оновлення файлів	3044	1811
Перевірка даних	3562	2075
Панель адміністратора	3027	1801
Відновлення паролю	3931	2061
Середнє	4194,27	2805,87



Результати цього вимірювання надають перевагу фреймворку Django. Фреймворк для побудови програми Flask в отриманих HTML-файлах містить додаткові теги та скрипти. Механізм роботи обробки формулярів також працює по-різному. Flask зберігає на сторінках більше інформації про поля формуляру. Розмір HTML-файлів, створених за допомогою фреймворку Flask, виявляється значно більшим.

Було проведено два тести, щодо ефективності проаналізованих фреймворків розробки веб-додатків. Один з тестів імітував одночасну роботу 50 користувачів, які намагались отримати доступ до однієї сторінки 100 разів (5000 запитів). Другий тест моделював роботу 100 користувачів, які періодично переглядали всі доступні сторінки 10 разів (всього 15000 запитів – 100 користувачів \* 15 доступних сторінок функціоналу \* 10 циклів). Для першого вимірювання була обрана головна сторінка панелі користувача, оскільки це найбільша доступна сторінка функційності в розробленому додатку.

Тестування продуктивності проводилося за допомогою JMeter, і програми розміщувалися на тому ж веб-сервері Apache. Вимірювання були проведені після 5000 запитів на тестування для усунення потенційних ускладнень у майбутньому.

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У даній роботі:

Виділено сучасні фреймворки на основі мови програмування Python.

На основі аналітичного підходу, визначено критерії оцінки веб-фреймворків, розроблених на основі мови програмування Python. Вибрані критерії дозволяють якісніше та об'єктивніше оцінити фреймворки.

Порівняльний аналіз фреймворків Django та Flask показав, що фреймворк Django є кращим, якщо порівнювати час, витрачений на розробку програм. Аналіз продуктивності фреймворків за об'ємом програмного коду надає перевагу фреймворку Django. Фреймворк для побудови програми Flask в отриманих HTML-файлах містить додаткові теги та скрипти. Механізм роботи обробки формулярів також працює по-різному. Flask зберігає на сторінках більше інформації про поля формуляру. Розмір HTML-файлів, створених за допомогою фреймворку Flask, виявляється значно більшим.

### Література

1. Belal M., Khedr A., Gohar A. (2012). Frameworks Between Components and Objects, *Avanced Computing*, vol. 3, № 5, pp. 9–17, 2012. <https://www.semanticscholar.org/paper/Frameworks-Between-Components-AND-OBJECTS-Belal-Khedr/79a33b455aea7ddac73881da00ea050b7c36db4e>
2. Carzaniga A., Fuggetta A., Hall R. S., Heimigner D., van der Hoek A., and Wolf A. L. (1998). A Characterization Framework for Software Deployment Technologies, Technical Report Department of Computer Science, Boulder, Colorado, April 1998 pp. 1–6. <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Characterization-Framework-for-Software-Carzaniga-Fuggetta/738bb20ec7cf51d2ec2ac854349840e741461b2e>
3. Miłosiemny Bartosz, Dzieńkowski Mariusz (2021). Analiza porównawcza szkieletów do budowy aplikacji internetowych w ekosystemie Node.js, *Journal of Computer Sciences Institute*, vol. 18, s. 42–48. <https://doi.org/10.35784/jcsi.2423>
4. Andri Sunardia, Suharjitoa (2019). MVC Architecture: A Comparative Study Between Laravel Framework and Slim Framework in Freelancer Project Monitoring System Web Based, *Procedia Computer Science*, Volume 157, pp. 134–141. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.08.150>
5. Syamsul Syafiq, Maslina Daud, Hafizah Hasan, Ahmad Zairi, Shazil Imri, Ezaini Akmar, Norbazilah Rahim (2018). Comparison of Web Development Using Framework over Library, *Systems Engineering*, vol. 12, No 3, pp. 215–218. <https://scholar.archive.org/work/3lfaywaelrasdo4sivuaak5yvaa>
6. Wodyk R., Skublewska-Paszowska M. (2020). Performance comparison of relational databases SQL Server, MySQL and PostgreSQL using a web application and the Laravel framework. *Journal of Computer Sciences Institute*, Vol 17, 2020, pp. 358-364. <https://doi.org/10.35784/jcsi.2279>
7. Kovalenko V. O. Porivnialnyi analiz naiposhyrenishykh freimvorkiv dlia PHP u sferi veb-rozrobok. *Naukovi zapysky: Zb. nauk. pr. Kirovohrad: KNTU*, 2010. Vyp. 10, ch. 3. S. 75-78. <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/5594>
8. Jibril Adamu, Raseeda Hamzah, Marshima Mohd Rosli (2020). Security issues and framework of electronic medical record: Areview. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics* Vol. 9, No 2, 2020, pp. 565–572
9. Roman Baida, Maksym Andriienko, Małgorzata Plechawska-Wójcik (2020). Analiza porównawcza wydajności frameworków Angular oraz Vue.js *Journal of Computer Sciences Institute*, Vol. 14, 2020 ss. 59–64 <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-d67eb923-19f0-4c95-aa9d-e1b017ada2d8>
10. Svensson A. Speed Performance Comparison of JavaScript MVC Frameworks. *Blekinge Institute of Technology*, 2015, p. 36.
11. Petukhova E. Sitecore JavaScript Services Framework Comparison. Åbo Akademi University, Science and Engineering, 2019 p. 74.
12. Kaluža M., Troskot K., Vukelić B. (2018) Comparison of Front-End Frameworks for Web Applications development. *Zbornik Veleučilišta u Rijeci*, Vol. 6 No. 1, (2018), pp. 261–282.

ПЕДЯШ Володимир

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку

<https://orcid.org/0000-0002-4071-357X>e-mail: [vpedyash@gmail.com](mailto:vpedyash@gmail.com)

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАВАННЯ ОТН З МОДУЛЯЦІЄЮ ПО ІНТЕНСИВНОСТІ

В роботі наведено результати дослідження параметрів якості каналів волоконно-оптичних систем передавання зі спектральним мультиплексуванням та модуляцією по інтенсивності. На прикладі каналів типу OTU1 та OTU2 системи передавання оптичної транспортної ієрархії розраховано чисельні значення Q-фактору сигналу в приймачі за повною та спрощеною формою розрахункового виразу. Виконано порівняння отриманих чисельних даних з результатами імітаційного моделювання. Доведено доцільність врахування всіх складових завад електричного струму в приймачі системи для отримання більш коректної аналітичної моделі.

Ключові слова: волоконно-оптична система передавання, завада, оптичний підсилювач, модуляція.

PEDYASH Volodymyr

State University of Intellectual Technologies and Communications

## MATHEMATICAL MODELING OF FIBER-OPTIC TRANSMISSION SYSTEM WITH INTENSITY MODULATION

Fibre optic transmission systems are widespread in the transport network. Optical Transport Hierarchy (OTH) transmission systems are the basis of the transport network. The principle of wavelength multiplexing of channels is used to increase the technical and economic performance. Technically a simpler type of intensity modulation is used to transmit OTU1 and OTU2 OTH frames. Erbium-doped fibre-based optical amplifiers also generate amplified spontaneous emission noise, which degrades the performance of the transmission system.

The qualitative characteristics of the optical channel of OTH transmission system with intensity modulation are investigated in this paper. In the simulation process, it is possible to neglect the nonlinear signal distortion in the optical fiber at the nominal signal power of the transponder transmitter. Therefore, in the studied transmission system model, an optical oscillation consisting of two components (signal and noise) arrives at the receiver input. In this case, an electrical signal consisting of three summands (signal-signal, signal-noise and noise-noise) will be generated at the output of the photodiode.

A simplified formula for calculating the Q-factor of the optical signal, which affects the error probability in the optical channel, is proposed in most of the specialized literature. Numerical Q-factor values were calculated for OTU1 and OTU2 frames. They were compared with the reference results which were obtained by simulation in Optiwave Optisystem software. The analysis of the obtained data has proved that the simplified formula for the calculation of the Q-factor has a relative error of the order of 39-59%. A more accurate result can be obtained by using an expression that takes into account both components of the noise at the photodiode output.

Keywords: fiber optic transmission system, interference, optical amplifier, modulation

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Волоконно-оптичні системи передачі (ВОСП) сьогодні широко розповсюджені на різних ділянках телекомунікаційної мережі. Основу транспортної мережі складають ВОСП оптичної транспортної ієрархії (ОТН), які використовують спектральне мультиплексування оптичних каналів. Якісні характеристики системи залежать від багатьох їх технічних характеристик, в тому числі і від методу модуляції оптичного сигналу.

Актуальною проблемою на етапі проектування нових та модернізації існуючих транспортних мереж на базі ВОСП з МІ є визначення їх якісних характеристик: відношення сигнал-шум на вході вирішуючого пристрою приймача та вірогідності помилки в цифровому каналі зв'язку. Сьогодні для проведення досліджень часто використовується імітаційне моделювання ВОСП за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Зважаючи на специфіку проблеми, комерційне програмне забезпечення є досить коштовним і потребує значних обчислювальних ресурсів. Тому актуальним завданням є дослідження більш простих аналітичних моделей, які дозволяють швидко отримати оціночні результати, хоча і мають більшу погрішність внаслідок неможливості повноцінно врахувати особливості розповсюдження сигналу в оптичному волокні.

### Аналіз останніх досліджень

Класична схема ВОСП включає в себе блоки передавача, приймача та волоконно-оптичний лінійний тракт (ВОЛТ). В свою чергу, ВОЛТ складається з кількох секцій (ділянок), які містять оптичне волокно (ОВ) та оптичний підсилювач (ОП) для компенсації загасання сигналу. Розповсюдження сигналу в ОВ описується нелінійним рівнянням Шредінгера, яке не має аналітичного вирішення [1]. Згідно з цим рівнянням, в оптичний сигнал вносяться лінійні (загасання та хроматична дисперсія) та нелінійні спотворення. Аналіз впливу потужності сигналу передавача на якість оптичного каналу [2-4] показав, що при потужності оптичного сигналу 1 мВт і нижче, проявом нелінійних спотворень в ОВ можна знехтувати. В сучасних ВОСП дисперсійні спотворення майже повністю усуваються в оптичних компенсаторах дисперсії та цифрових коректорах в складі приймача ВОСП. Тому основним фактором, що впливає на якість

оптичного каналу є шум підсиленого спонтанного випромінювання (ПСВ) оптичних підсилювачів.

Для передавання високошвидкісних інформаційних структур OTU3 (43 Гбіт/с) та OTU4 (112 Гбіт/с) ОТН застосовуються методи модуляції з когерентним прийомом, які мають високу завадозахищеність і досить добре досліджені [5, 6]. Низькошвидкісні інформаційні структури OTU1 (2,7 Гбіт/с) та OTU2 (10,7 Гбіт/с) транспортуються з використанням технічно більш простого методу модуляції по інтенсивності (МІ), який також достатньо досліджено. Але порівняння результатів аналітичних та імітаційних моделей ВОСП з МІ в літературі недостатньо висвітлено.

**Формулювання цілей статті**

Метою даної роботи є аналіз точності результатів аналітичного моделювання ВОСП з модуляцією по інтенсивності, що враховує взаємодію оптичного сигналу та шуму посиленого спонтанного випромінювання оптичних підсилювачів у приймачі.

**Виклад основного матеріалу**

Структурна схема моделі каналу ВОСП (рис. 1) включає передавач, ВОЛТ та приймач оптичного сигналу. В свою чергу, передавач містить генератор псевдовипадкової послідовності (ГПВП), оптичний модулятор (ОМ) та лазерний осцилятор (ЛО). Для визначення якісних параметрів каналу ВОСП спочатку розглянемо варіант функціонування системи без модуляції оптичного сигналу. В цьому випадку на виході передавача буде сформовано оптичний сигнал з напруженістю електричного поля:

$$E_{пер}(t) = \sqrt{2P_{пер}} \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \tag{1}$$

де  $P_{пер}$ ,  $\omega_0$  та  $\varphi_0$  – середня потужність, частота та початкова фаза коливання лазера (в подальшому тексті  $\varphi_0 = 0$ ).

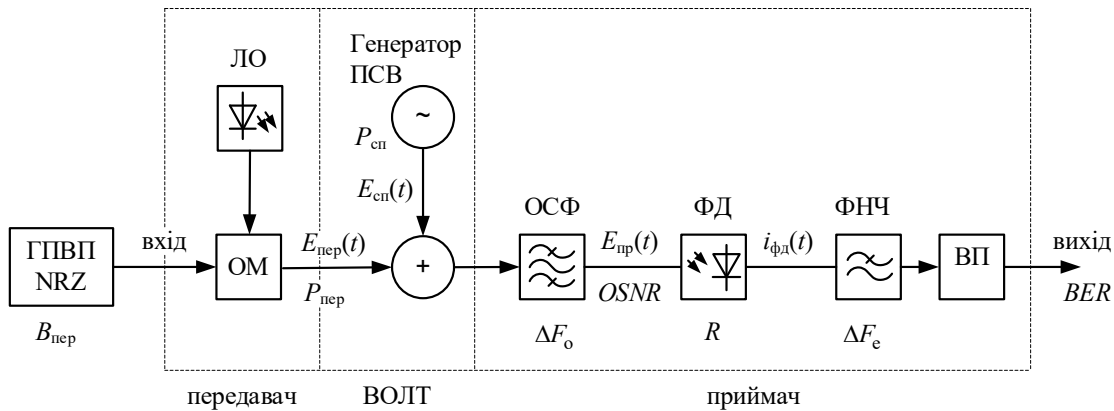


Рис. 1. Структурна схема моделі каналу ВОСП з модуляцією по інтенсивності

У випадку повної компенсації загасання ОВ в ОП, моделювання ВОЛТ зводиться до додавання до оптичного сигналу  $E_{пер}(t)$  шуму ПСВ  $E_{сп}(t)$  з сумарною потужністю в одній площині поляризації:

$$P_{сп} = PSD_{сп} \Delta F_o = n_{сп} (G - 1) h \nu N_{секц} \Delta F_o, \tag{2}$$

де  $PSD_{сп}$  – спектральна щільність потужності завади ПСВ;

$n_{сп}$  – коефіцієнт спонтанного випромінювання ОП;

$G$  – коефіцієнт посилення ОП;

$h$  – постійна Планка ( $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с);

$\nu$  – частота монохромного оптичного сигналу (для смугового сигналу співпадає з частотою ЛО

$\nu = \omega_0 / 2\pi$ );

$\Delta F_o$  – ширина смуги пропускання оптичного смугового фільтра (ОСФ) приймача ВОСП.

В свою чергу, коефіцієнт спонтанного випромінювання підсилювача визначається за його шум-фактором  $nf$  [7]:

$$n_{сп} = \frac{10^{0,1nf}}{2}. \tag{3}$$

Приймач ВОСП містить блоки оптичного смугового фільтра (ОСФ), фотодіод (ФД), фільтр нижніх частот (ФНЧ) та вирішуючий пристрій (ВП). Фотодіод є квадратичним детектором, тому сигнал на його виході складається із трьох доданків:

$$i_{фд}(t) = R |E_{пр}(t)|^2 = R |E_{пер}(t) + E_{сп}(t)|^2 = R \left( |E_{пер}(t)|^2 + 2|E_{пер}(t)||E_{сп}(t)| + |E_{сп}(t)|^2 \right) =$$

$$= i_{c-c}(t) + i_{c-сп}(t) + i_{сп-сп}(t), \quad (4)$$

де  $R$  – чутливість фотодіоду, А/Вт;

$i_{c-c}(t)$ ,  $i_{c-сп}(t)$  та  $i_{сп-сп}(t)$  – биття сигнал-сигнал, сигнал-шум та шум-шум відповідно.

Для визначення вірогідності помилки в оптичному каналі ВОСП слід розрахувати потужності всіх трьох складових електричного струму на вході вирішуючого пристрою приймача. Взаємодія сигналу та шуму в приймачі ВОСП з МІ детально проаналізована в роботі [6], тому в даному дослідженні скористаємося готовими розрахунковими виразами для визначення потужності биття сигнал-шум  $P_{c-сп}$  та шум-шум  $P_{сп-сп}$ :

$$P_{c-сп} = 4R^2 P_{пер} PSD_{сп} \Delta F_e, \quad (5)$$

$$P_{сп-сп} = R^2 PSD_{сп}^2 \Delta F_o (\Delta F_o + 2\Delta F_e), \quad (6)$$

де  $\Delta F_e$  – ширина смуги пропускання ФНЧ приймача.

Вірогідність помилки біта ( $BER$ ) на виході каналу ВОСП та  $Q$ -фактор сигналу на вході ВП визначаються за виразами [7]:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right), \quad (7)$$

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sqrt{P_{c-сп}} + \sqrt{P_{сп-сп}}}, \quad (8)$$

де  $\mu_1$  та  $\mu_0$  – середнє значення (математичне очікування) відліків символів 1 та 0;

$\sigma_1$  та  $\sigma_0$  – середньоквадратичне відхилення відліків символів 1 та 0.

З врахуванням однакової вірогідності передавання символів 1 та 0 в цифровій послідовності на вході каналу, пікова потужність оптичного сигналу в 2 рази більше середньої, тому вираз (8) після підстановки в нього (5) та (6) прийме наступну форму:

$$Q = \frac{P_{пер}}{\sqrt{P_{пер} PSD_{сп} \Delta F_e + 0,5 PSD_{сп} \sqrt{\Delta F_o (\Delta F_o + 2\Delta F_e)}}}. \quad (9)$$

Знехтувавши другим доданком (потужністю биття шум-шум) в знаменнику виразу (9), отримуємо відому з літератури [7, 8] просту формулу для визначення  $Q$ -фактору:

$$Q \approx \sqrt{\frac{P_{пер}}{PSD_{сп} \Delta F_e}} = \sqrt{OSNR \frac{\Delta F_o}{\Delta F_e}}, \quad (10)$$

де  $OSNR$  – співвідношення потужностей оптичного сигналу та шуму ( $OSNR = P_{пер} / P_{сп}$ ).

Для оцінки точності розрахунку  $Q$ -фактору за наведеними виразами, в демонстраційній версії програми Optiwave Optisystem згідно рис. 1 було розроблено імітаційну модель каналу ВОСП ОТН. За її допомогою визначалося точне значення  $Q$ -фактору і розраховувалася відносна помилка розрахунку  $\delta$ :

$$\delta = \frac{|Q_p - Q_{ow}|}{Q_{ow}} \cdot 100\%, \quad (11)$$

де  $Q_p$  – розрахункове значення  $Q$ -фактору за виразами (9), (10);

$Q_{ow}$  – визначене в програмі Optiwave Optisystem значення  $Q$ -фактору.

Чисельні результати аналітичного та імітаційного моделювання зведено до таблиці 1. Дослідження проводилися для параметрів моделі каналу ВОСП, наведеним в табл. 2. Аналіз відносної помилки розрахунку  $Q$ -фактору (табл. 3) показує, що вираз (9) має суттєво меншу відносну погрішність, яка зменшується з ростом протяжності ВОЛТ. Спрощеному виразу (10), що не враховує биття шум-шум, відповідає досить значна відносна помилка розрахунку в межах 39-59%. Також слід відмітити, що зі збільшенням протяжності лінії (кількості секцій  $N_{секц}$ ) похибка розрахунку  $Q$ -фактору за даним виразом також збільшується, на відміну від повної форми розрахункового виразу. Це пояснюється ростом ваги другого доданку в знаменнику виразу (9) зі збільшенням спектральної щільності потужності шуму  $PSD_{сп}$ .

Отримані чисельні результати доводять, що використання спрощеного виразу для розрахунку  $Q$ -фактору призводить до суттєвого завищення його значення. Враховуючи нелінійну залежність  $BER(Q)$  у виразі (7), це призводить до суттєвої погрішності у визначенні вірогідності помилки в оптичному каналі ВОСП.

Таблиця 1

## Значення Q-фактору сигналу приймача ВОСП

Рівень циклу ОТН	Спосіб визначення Q-фактору	$N_{\text{секц}}$									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
OTU1	вираз (9)	119,2	79,3	61,9	51,7	44,8	39,8	36,0	32,9	30,4	28,3
	вираз (10)	140,8	99,6	81,3	70,4	63,0	57,5	53,2	49,8	46,9	44,5
	Optiwave Optisystem	93,0	65,2	52,9	45,6	40,6	36,8	34,0	31,6	29,7	28,1
OTU2	вираз (9)	64,1	43,8	34,8	29,5	25,9	23,3	21,2	19,6	18,2	17,1
	вираз (10)	70,3	49,7	40,6	35,1	31,4	28,7	26,6	24,8	23,4	22,2
	Optiwave Optisystem	50,4	35,4	28,7	24,7	22,0	20,0	18,4	17,1	16,1	15,2

Таблиця 2

## Параметри моделі ВОСП

Функціональний блок	Параметр	Значення
Передавач	Швидкість передачі цифрового сигналу $V_{\text{пер}}$	2,666 Гбіт/с (OTU1) 10,709 Гбіт/с (OTU2)
	Середня потужність сигналу $P_{\text{пер}}$	1 мВт
	Коефіцієнт загасання	0,2 дБ/км
Оптичне волокно	Довжина однієї секції	100 км
Оптичний підсилювач	Шум-фактор $nf$	6 дБ
Оптичний смуговий фільтр	Ширина смуги $\Delta F_o$	100 ГГц
Фотодіод	Чутливість $R$	1 А/Вт
ФНЧ приймача	Ширина смуги $\Delta F_c$	0,75 $V_{\text{пер}}$

Таблиця 3

Відносна помилка розрахунку Q-фактору  $\delta$ , %

Рівень циклу ОТН	Спосіб визначення Q-фактору	$N_{\text{секц}}$									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
OTU1	вираз (9)	28,2	21,5	17,0	13,4	10,6	8,1	6,0	4,1	2,4	0,8
	вираз (10)	51,4	52,6	53,7	54,5	55,3	56,1	56,7	57,4	58,0	58,6
OTU2	вираз (9)	27,4	23,8	21,4	19,5	17,9	16,6	15,4	14,3	13,2	12,3
	вираз (10)	39,6	40,5	41,5	42,3	43,1	43,8	44,5	45,1	45,7	46,2

## Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В статті досліджена аналітична модель ВОСП з модуляцією по інтенсивності. Для інформаційних структур типу OTU1 та OTU2 визначено Q-фактор сигналу в приймачі каналу ВОСП ОТН за повною та спрощеною формою розрахункових виразів. Співставлення отриманих результатів з імітаційним моделюванням показало, що спрощеному розрахунковому виразу відповідає відносна погрішність близько 40–60%, залежно від швидкості передавання сигналу в оптичному каналі зв'язку. Доведено, що для отримання достовірного результату доцільно використовувати повну форму розрахункового виразу Q-фактору сигналу, що враховує всі складові завади в приймачі ВОСП. Погрішність визначення Q-фактору в такому випадку не перевищуватиме 15%.

Розглянуту аналітичну модель ВОСП з МІ в подальшому слід розширити з метою врахування міжсимвольної інтерференції, що виникає в ФНЧ приймача.

## Література

1. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics. New York: Academic Press, 2013. 631 p.
2. Педяш В.В. Влияние фазовой самомодуляции оптического сигнала на качество каналов ВОСП СРК / В.В. Педяш, О.С. Решетникова // Наукові праці УДАЗ ім. О.С. Попова. – 2010. – № 1. – С. 109-114.
3. Педяш В.В. Влияние нелинейных искажений оптических волокон на качество каналов ВОСП

СРК / В.В. Педяш // Наукові праці УДАЗ ім. О.С. Попова. – 2010. – № 2. – С. 70-74.

4. Педяш В.В. Оценка влияния нелинейных искажений оптического волокна на качественные показатели когерентной ВОСП / А.Д. Мазур, В.В. Педяш // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2016. – № 2. – С. 131-136.

5. Педяш В.В. Моделивання каналу оптичної системи передавання ОТН з квадратною амплітудною модуляцією / В.В. Педяш // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2022. – № 5. – С. 61-65.

6. Pedyash V., Mazur A., Rozenvasser D. (2021). Evaluation of Quality Parameters of an Intensity-Modulated Optical Transmission System. In: Vorobiyenko P., Ilchenko M., Strelkovska I. (eds) Current Trends in Communication and Information Technologies. IPF 2020. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 212. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-76343-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-76343-5_2)

7. Agrawal G.P. Fiber-Optic Communication Systems. New York: Wiley-Interscience, 2002. 580 p.

8. Stephen A.B. Optical communication receiver design. London: SPIE Publications, 1997. 337 p.

#### References

1. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics. New York: Academic Press, 2013. 631 p.

2. Pedjash V.V. Vliyanie fazovoj samomoduljacji opticheskogo signala na kachestvo kanalov VOSP SRK / V.V. Pedjash, O.S. Reshetnikova // Naukovi pratsi UDAZ im. O.S. Popova. – 2010. – № 1. – S. 109-114.

3. Pedjash V.V. Vliyanie nelinejnyh iskazhenij opticheskikh volokon na kachestvo kanalov VOSP SRK / V.V. Pedjash // Naukovi pratsi UDAZ im. O.S. Popova. – 2010. – № 2. – S. 70-74.

4. Pedyash V.V. Otsenka vliyaniya nelineinykh yskazheniy opticheskogo volokna na kachestvennyye pokazately koherentnoi VOSP / A.D. Mazur, V.V. Pedyash // Naukovi pratsi ONAZ im. O.S. Popova. – 2016. – № 2. – S. 131-136.

5. Pedyash V.V. Modeliuvannya kanalu optichnoi systemy predevavannya OTN z kvadraturnoiu amplitudnoi moduljatsiieiu / V.V. Pedyash // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky. – 2022. – № 5. – S. 61-65.

6. Pedyash V., Mazur A., Rozenvasser D. (2021). Evaluation of Quality Parameters of an Intensity-Modulated Optical Transmission System. In: Vorobiyenko P., Ilchenko M., Strelkovska I. (eds) Current Trends in Communication and Information Technologies. IPF 2020. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 212. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-76343-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-76343-5_2)

7. Agrawal G.P. Fiber-Optic Communication Systems. New York: Wiley-Interscience, 2002. 580 p.

8. Stephen A.B. Optical communication receiver design. London: SPIE Publications, 1997. 337 p.

ПЕДЯШ Володимир

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку

<https://orcid.org/0000-0002-4071-357X>e-mail: [vpedyash@gmail.com](mailto:vpedyash@gmail.com)

## ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОПТИЧНОГО ВОЛОКНА

Волоконно-оптичні системи передавання є основним типом систем для побудови сучасних телекомунікаційних мереж. В транспондерах сучасних оптичних систем передавання реалізовано ефективні методи модуляції та кодування, що дозволяє суттєво підвищити чутливість приймача і збільшити довжину ділянки регенерації. При проектуванні таких систем постає актуальне завдання з визначення характеристик якості оптичних каналів. Для вирішення цієї задачі слід розробити математичну модель системи передавання і провести імітаційне моделювання з її використанням. Одним із основних функціональних блоків моделі, що впливає на достовірність отриманих результатів, є середовища розповсюдження сигналу – оптичне волокно. В роботі проаналізовано найбільш поширений варіант побудови моделі на базі Фур'є методу розщеплення за фізичними факторами. Розглянуто перелік питань, пов'язаних зі зменшенням обчислювальної складності моделі та її тестування.

*Ключові слова:* математична модель, оптичне волокно, спотворення, дисперсія, сигнал

PEDYASH Volodymyr

State University of Intellectual Technologies and Communications

## INVESTIGATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF OPTICAL FIBER

Fiber optic transmission systems are the main type of systems for building telecommunication networks. The transponders of modern optical transmission systems implement efficient modulation and coding methods, which can significantly increase the receiver sensitivity and increase the length of the regeneration area. The task to define the quality characteristics of optical channels occurs during the design of such systems.

To solve this problem, it is necessary to develop a mathematical model of the transmission system and perform a simulation using it. One of the main blocks of the system is the propagation medium (optical fiber). The optical fiber model is based on the nonlinear Schrödinger differential equation. Several groups of modeling methods have been developed on its basis. The most widespread is the Fourier method of splitting by physical factors, as it has a simple algorithm structure, high computing speed, and high accuracy. This method is recursive, so to reduce the number of iterations, it is reasonable to use the well-known method of nonlinear phase rotation.

To check the functionality of the developed program code, it is recommended to perform testing in several stages. At the first stage, it is proposed to check the accuracy of the distortion of chromatic dispersion. Single pulses of simple shape, such as Gaussian pulses, should be used as a test signal. By calculating the pulse shape using theoretical expressions and comparing them with the modeling results, the accuracy of the optical fiber modeling algorithm can be verified. The next step in verifying the fiber model is to evaluate the accuracy of the simultaneous introduction of dispersion and nonlinear distortions. For this purpose, it is proposed to analyze the propagation of pulses of optical solitons of the first and higher orders.

*Keywords:* mathematical model, optical fiber, distortion, dispersion, signal

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Швидкий ріст обсягу трафіку в телекомунікаційних мережах і розповсюдження технологій цифрового зв'язку потребують підвищення показників ефективності систем передавання. Сьогодні для досягнення цієї мети успішно використовуються волоконно-оптичні системи передавання (ВОСП), які знайшли широке застосування на ділянках транспортних мереж та мереж доступу. В транспондерах сучасних ВОСП для збільшення спектральної ефективності сигналу та довжини ділянки регенерації реалізовано когерентні методи прийому. Якість роботи цифрового тракту залежить від характеристик оптичного сигналу (метод модуляції, потужність, довжина хвилі, тощо) та функціональних блоків системи передавання. При проектуванні нових та модернізації існуючих фрагментів телекомунікаційних мереж слід вирішувати завдання з розробки та дослідження математичних моделей трактів ВОСП. Це дозволяє обрати оптимальні характеристики сигналу, налаштування функціональних блоків системи передавання і впевнитися у задоволенні допустимих показників якості цифрових трактів ВОСП.

На даний час для моделювання ВОСП вже розроблено пакети спеціалізованого програмного забезпечення, наприклад, Optiwave OptiSystem, Rsoft OptSim та VPIphotonics VPItransmissionMaker. Ці пакети є комерційним програмним продуктом із достатньо високою вартістю, оскільки орієнтовані на використання в наукових дослідженнях із достатньою фінансовою підтримкою. Тому при проведенні бюджетних наукових досліджень виконавцям доводиться вирішувати проблему з розробки і перевірки достовірності своїх моделей трактів ВОСП з використанням більш доступних пакетів моделювання MatLab, SciLab або GNU Octave. Одним із головних функціональних блоків моделі, якість реалізації якого впливає на достовірність отриманого результату є оптичне волокно.

### Аналіз останніх досліджень

Проблема моделювання розповсюдження сигналу в ОВ не є новою і на сьогодні запропоновано кілька варіантів її вирішення. Відомо, що процес розповсюдження сигналу вздовж оптичного волокна

описується нелінійним диференційним рівнянням Шредінгера [1]. Воно встановлює взаємозв'язок між опитною оптичного сигналу на вході та виході ОВ. Зважаючи на форму виразу, аналітичного розв'язку дане рівняння не має, тому вирішується численними методами [2–4]. Найбільш поширеним є Фур'є метод розщеплення по фізичним факторам (ФМРФФ), що передбачає вирішення диференційного рівняння в часткових похідних. Таким чином, математична модель ОВ вносить спотворення, тотожні реальному оптичному волокну. Перевагою методу є точність, простота реалізації та висока швидкість алгоритму обчислень. Певним його недоліком є рекурентність, оскільки на кожному наступному кроці ітерації використовуються результати розрахунків з попереднього кроку.

Іншим менш поширеним методом моделювання ОВ є використання теорії рядів Вольєрра [5–7]. На відміну від ФМРФФ він не є рекурентним і дозволяє визначати окремі складові спектру сигналу. В своєму базовому варіанті цей метод передбачає визначати окремі складові спектру шляхом розрахунку суми нескінченної кількості доданків, кожен з яких є згортокою вхідного сигналу та функції - ядра Вольєрра. Але визначення всіх доданків є неможливим, оскільки кожен з них містить інтеграл з кратністю, що відповідає його номеру. Зважаючи на це, зазвичай враховують перші два-три доданки, що включають ядра Вольєрра першого, третього та, при необхідності, п'ятого порядку. Нехтування доданками ряду з ядрами вищих порядків призводить до значного зменшення достовірності математичної моделі ОВ. Зменшити погрішність моделювання можна використанням модифікованої версії даного методу [8, 9]. Але широкого розповсюдження даний метод не отримав. Тому в цій роботі дослідження достовірності моделювання ОВ виконано із використанням Фур'є методу розщеплення по фізичним факторам.

### Формулювання цілей статті

Метою даної роботи є аналіз методів математичного моделювання оптичного волокна та визначення критеріїв достовірності отриманих результатів.

### Виклад основного матеріалу

Зважаючи на конструкцію світловода та фізичні властивості його матеріалів, оптичний сигнал спотворюється при проходженні вздовж середовища розповсюдження. Спотворення, що призводять до зміни часової форми та спектру вихідного сигналу, можна розділити на дві основні групи – лінійні та нелінійні (рис. 1). В свою чергу, лінійні спотворення включають ефекти загасання (втрати потужності сигналу) та дисперсії (спотворення форми сигналу). При аналізі процесу передавання сигналів зі швидкістю до 40 Гбіт/с по одномодовим волокнам, проявами модової та поляризаційної дисперсії можна знехтувати [1].

Загасання призводить до зменшення потужності (інтенсивності) оптичного сигналу зі збереженням його форми в часовій та спектральній області:

$$P(z,t) = P(0,t)e^{-\alpha z}, \tag{1}$$

де  $P(z,t)$  та  $P(0,t)$  – потужність сигналу на вході та відстані  $z$  від точки вводу випромінювання в ОВ;  $\alpha$  – коефіцієнт загасання ОВ.

Потужність оптичного сигналу є квадратом модуля напруженості електричного поля:

$$P(z,t) = |A(z,t)|^2. \tag{2}$$

В оптично прозорих середовищах розповсюдження виникають також і нелінійні спотворення (залежать від потужності вхідного сигналу), які можна розділити на дві групи:

- 1) ефекти Керра, пов'язані з нелінійністю показника заломлення ОВ (фазова самомодуляція, ФСМ; перехресна модуляція, ПХМ та чотирихвильове змішування, ЧХЗ);
- 2) ефекти стимульованих Раманівського та Брілюєнівського розсіювань.

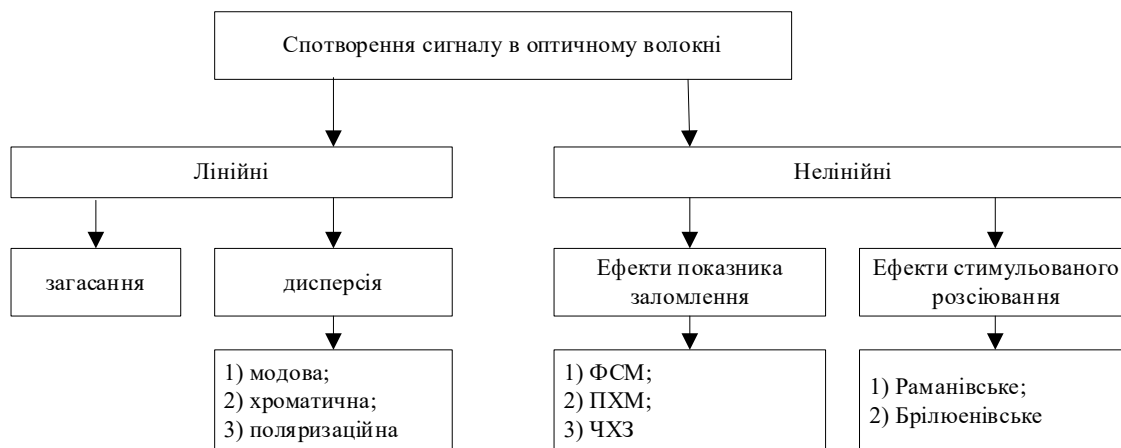


Рис. 1. Класифікація спотворень сигналу в оптичному волокні



Повну величину показника заломлення  $n_\Sigma$  оптичного матеріалу з врахуванням нелінійності матеріалу визначають за виразом

$$n_\Sigma = n_0 + n_2 \left( \frac{P_c}{A_{\text{еф}}} \right), \quad (3)$$

де  $n_0$  та  $n_2$  - відповідно постійна складова показника заломлення та його нелінійний коефіцієнт (для кварцу  $n_2 \approx 2,6 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2/\text{Вт}$ );  $A_{\text{еф}}$  - ефективна площа ОВ.

Моделі розповсюдження сигналу в оптичному волокні можна будувати на основі двох груп методів: правилами геометричної (променевої) та хвилеводної оптики. Перший варіант є більш простим для розуміння і базується на відомому у фізиці законі Снелліуса, що описує поведінку світлового променя на межі двох оптично прозорих середовищ розповсюдження з різними показниками заломлення. Але даний метод не дозволяє побудувати повноцінну модель середовища розповсюдження, що буде відповідати реальному ОВ.

Повний опис процесу розповсюдження оптичного сигналу в оптично прозорому середовищі розповсюдження з лінійними та нелінійними спотвореннями досягається шляхом використання нелінійного рівняння Шредінгера [1, 2]:

$$j \frac{dA}{dz} = -\frac{j}{2} dA + \frac{1}{2} \beta_2 \frac{d^2 A}{dT^2} - \gamma |A|^2 A, \quad (4)$$

де  $A$  - огибаюча оптичного сигналу;  $T$  - час;  $\alpha, \beta_2$  та  $\gamma$  - загасання, дисперсія та нелінійність середовища розповсюдження.

Для сигналів довільної форми, рівняння (4) аналітичного розв'язку не має, тому вирішується чисельними методами. Одним із найточніших є Фур'є метод розщеплювання по фізичним факторам (ФМРФФ). В його основу покладена ідея умовного поділу ОВ з сумарною довжиною  $L_{\text{ов}}$  на скінчену кількість  $N_c$  елементарних сегментів (відрізків) довжиною  $h_n$  кожен. Довжина сегментів може бути довільною (в тому числі однаковою), але в будь-якому випадку їхня сума повинна дорівнювати сумарній довжині ОВ.

В базовому варіанті методу [1], вхідний сигнал  $A(z, t)$  зі спектром  $A(z, \omega)$  на кожному сегменті послідовно обробляється операторами  $\hat{D}\{\}$  та  $\hat{N}\{\}$ , що відповідно вносять лінійні та нелінійні спотворення (рис. 2, а):

$$A(z+h_-, t) = F_{-1} \left\{ \hat{D} \left\{ F \left\{ A(z, t) \right\} \right\} \right\}, \quad (5)$$

$$A(z+h, t) = \hat{N} \left\{ A(z+h_-, t) \right\}, \quad (6)$$

де  $F\{\}$  та  $F_{-1}\{\}$  - оператори прямого та зворотного перетворення Фур'є;  $A(z+h_-, t)$  та  $A(z+h, t)$  - напруженість електричного поля оптичного сигналу до та після внесення нелінійних спотворень відповідно.

Вирази для лінійного та нелінійного операторів можна отримати шляхом вирішення рівняння Шредінгера (4) за умови ігнорування одним із ефектів спотворення сигналу, прирівнюючи  $\beta_2 = 0$  або  $\gamma = 0$ . Результатом розв'язку є диференціальні рівняння [1]:

$$A(z, t) = A(0, t) e^{j\gamma |A(0, t)|^2 z}. \quad (7)$$

$$A(z, \omega) = A(0, \omega) e^{j \frac{\beta_2}{2} \omega^2 z}. \quad (8)$$

З метою спрощення запису, у виразах (7) та (8) проігнорований коефіцієнт загасання ОВ  $e^{-\alpha z}$ .

В результаті, вирази для обробки сигналу на кожному сегменті приймають наступну форму:

$$A(z+h_-, t) = F_{-1} \left\{ \hat{D} \left\{ A(z, \omega) \right\} \right\} = F_{-1} \left\{ A(z, \omega) e^{j \frac{\beta_2}{2} \omega^2 h} \right\}, \quad (9)$$

$$A(z+h, t) = \hat{N} \left\{ A(z+h_-, t) \right\} = A(z+h_-, t) e^{j\gamma |A(z+h_-, t)|^2 z}, \quad (10)$$

Недоліком базового варіанту ФМРФФ є значний вплив довжини сегменту  $h$  на точність чисельного моделювання. Кращої точності можна досягти шляхом використання симетричної версії ФМРФФ [10], який передбачає внесення нелінійних спотворень посередині сегменту (рис. 2, б). Обробку сигналу на кожному з трьох кроків можна описати наступними виразами:

$$A(z+h_-/2, \omega) = \hat{D} \left\{ A(z, \omega) \right\} = A(z, \omega) e^{j \frac{\beta_2}{2} \omega^2 \frac{h}{2}}, \quad (11)$$

$$A(z+h/2, t) = \hat{N} \left\{ A(z+h_-/2, t) \right\} = A(z+h_-/2, t) e^{j\gamma |A(z+h_-/2, t)|^2 h}, \quad (12)$$

$$A(z+h, \omega) = \hat{D} \left\{ A(z+h/2, \omega) \right\} = A(z+h/2, \omega) e^{j \frac{\beta_2}{2} \omega^2 \frac{h}{2}}. \quad (13)$$

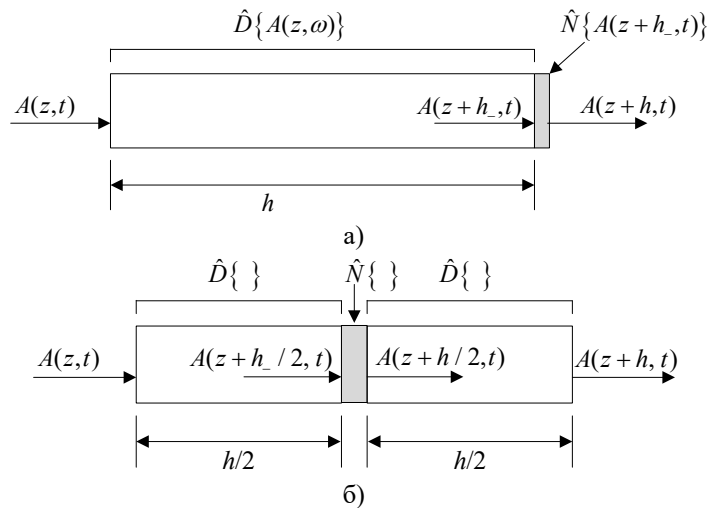


Рис. 2. Графічна інтерпретація варіантів методу ФМРФФ: а) базовий; б) симетричний

Наведений алгоритм симетричного ФМРФФ є досить точним і простим методом, внаслідок чого знайшов широке розповсюдження в імітаційному програмному забезпеченні для ВОСП. Для отримання ідеально достовірних результатів необхідно вибрати довжину елементарного сегменту  $h \rightarrow 0$ . Оскільки на кожному сегменті виконується дві операції перетворення Фур'є (пряме та зворотне), це призводить до значного росту розрахункових операцій та часу моделювання. Одним з варіантів зменшення кількості елементарних сегментів ОБ зі збереженням достатньої точності є використання методу нелінійного повороту фази [10].

Його суть полягає в тому, що в оптичному сигналі з потужністю  $P_c$ , який пройшов відрізок волокна довжиною  $h$  виникає зсув фази  $\varphi_{нл}$ , викликаний нелінійністю середовища розповсюдження:

$$\varphi_{нл} = \gamma \cdot P_c \cdot h. \tag{14}$$

Для ВОСП, критичних до нелінійних спотворень, можна зафіксувати максимально допустиме значення фазового зсуву значенням  $\varphi_{нл\max}$  і розрахувати відповідно йому довжину сегменту:

$$h = \frac{\varphi_{нл\max}}{\gamma P_c} \tag{15}$$

Для середовища з втратами слід виконувати перерахунок потужності сигналу на вході кожного послідовного сегменту. Блок-схема даного алгоритму наведена на рис. 3.

При аналізі спотворень сигналу в оптичних волокнах, окрім фактичної довжини оптичного волокна  $L_{об}$ , користуються поняттями дисперсійної  $L_d$  та нелінійної  $L_{нл}$  довжини, які розраховуються відповідно за виразами [1]:

$$L_d = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \tag{16}$$

та

$$L_{нл} = \frac{1}{\gamma P_0}, \tag{17}$$

де  $T_0$  - початкова тривалість імпульсу;  $P_0$  - потужність сигналу.

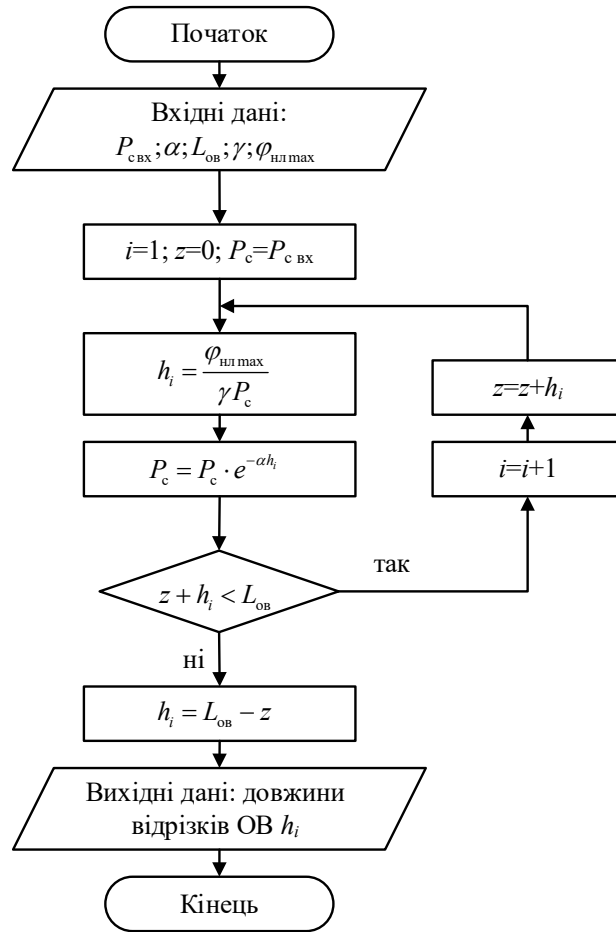


Рис. 3. Блок-схема алгоритму нелінійного повороту фази при моделюванні ОБ

В якості тестового сигналу при дослідженні математичної моделі ОБ доцільно використати гаусівський імпульс з напівшириною  $T_0$  :

$$A(0, t) = \sqrt{P_0} \exp\left[-\frac{t^2}{2T_0^2}\right]. \quad (18)$$

Виконаємо спочатку перевірку на достовірність внесення спотворень хроматичної дисперсії. Джерело [1] містить форму гаусівського імпульсу на виході дисперсійного середовища розповсюдження для трьох варіантів нормованої довжини лінії:  $L_{об} / L_d = 0$ ,  $L_{об} / L_d = 2$  та  $L_{об} / L_d = 4$ . Аналогічний графік, розрахований шляхом моделювання згідно вищевказаних виразів в середовищі MatLab, наведений на рис. 4. Він повністю співпадає з прототипом із вищевказаного джерела, що підтверджує точність внесення спотворень хроматичної дисперсії.

Остаточну відповідь на питання достовірності математичної моделі ОБ може дати моделювання процесу розповсюдження оптичних солітонів у середовищі з дисперсійними та нелінійними спотвореннями одночасно. В загальному випадку, вираз для форми оптичного солітону має вигляд [11]:

$$A(0, t) = \sqrt{P_0} \operatorname{sech}\left(\frac{t}{T_0}\right), \quad (19)$$

де  $T_0$  - тривалість імпульсу.

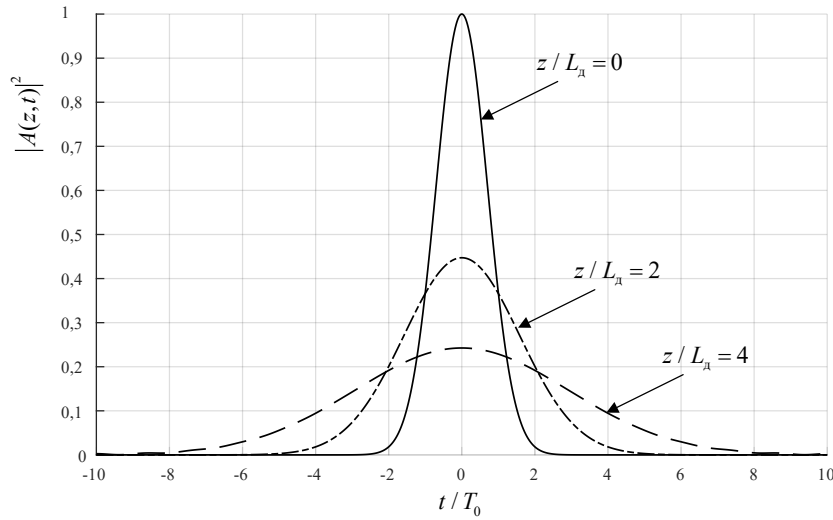


Рис. 4. Спотворення гаусівського імпульсу внаслідок хроматичної дисперсії ( $\beta_2 = -20 \cdot 10^{-24} \text{ c}^2/\text{км}$ ;  $T_0 = 1 \cdot 10^{-10} \text{ c}$ ;  $L_d = 500 \text{ км}$ ;  $N_c = 40$ )

Пікова потужність імпульсу, необхідна для розповсюдження солітона, розраховується за виразом:

$$P_0 = N^2 \frac{|\beta_2|}{\gamma T_0^2}, \tag{20}$$

де  $N$  – порядок солітону ( $N \geq 0, N \in \mathbb{Z}$ ).

При розповсюдженні солітона вищих порядків спостерігається зміна його часової форми, яка повторюється через певну відстань  $z_0$ , яка називається періодом солітона [1]:

$$z_0 = \frac{\pi}{2} L_d = \frac{\pi}{2} \frac{T_0^2}{|\beta_2|}. \tag{21}$$

Випадок  $N = 1$  відповідає основному солітону, який не змінює часової форми при розповсюдженні в просторі. Приклад розрахунку просторової форми солітонів першого та другого порядку в середовищі MatLab наведено на рис. 5. Отримана часово-просторова форма сигналу повністю відповідає поведінці оптичних солітонів, що підтверджує достовірність функціонування розробленого програмного коду до вище описаної математичної моделі ОВ на базі ФМРФФ.

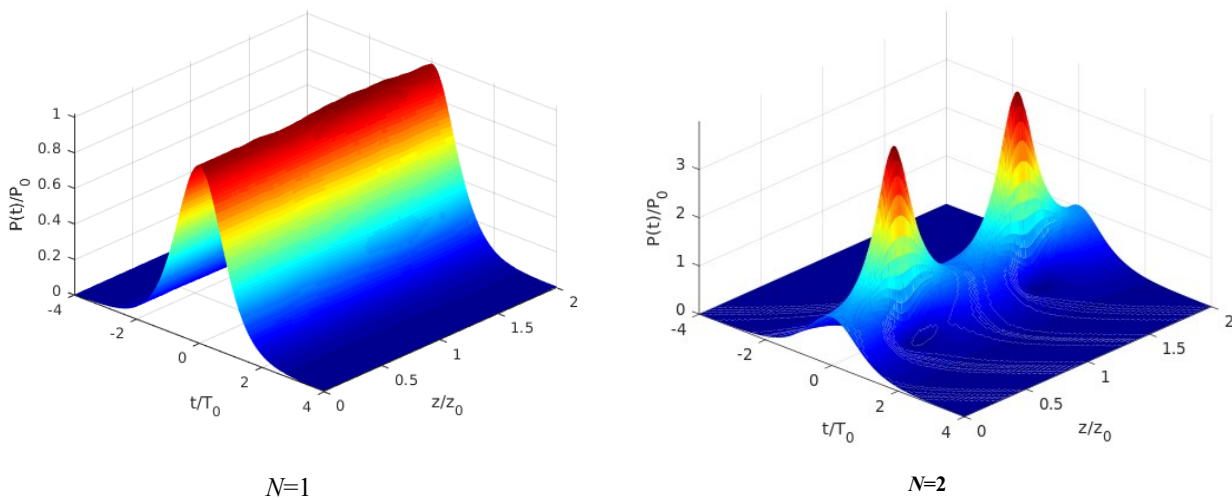


Рис. 5. Еволюція форми основного солітону та вищого порядку ( $\beta_2 = -20 \cdot 10^{-24} \text{ c}^2/\text{км}$ ;  $A_{\text{эф}} = 80 \text{ мкм}^2$ ;  $\gamma = 1,317 \text{ 1}/(\text{Вт} \cdot \text{км})$ ;  $T_0 = 7,09 \text{ пс}$ ;  $z_0 = 3,948 \text{ км}$ )

**Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі**

В статті виконано аналіз методів математичного моделювання оптичного волокна. Встановлено, що найбільш розповсюдженим є Фур'є метод з розщепленням по фізичним факторам, оскільки він дозволяє достовірно реалізувати внесення дисперсійних та нелінійних спотворень в оптичний сигнал. З метою зменшення обчислювальних ресурсів, довжини елементарних відрізків ОВ доцільно розраховувати за допомогою методу нелінійного повороту фази. Первинне тестування розробленої моделі ВОСП

пропонується проводити на прикладі аналізу розповсюдження сигналу з простою формою, наприклад, гаусового імпульсу. Більш глибоку перевірку доцільно виконувати з використанням імпульсів оптичних солітонів першого та вищих порядків.

В подальших дослідженнях слід виконати аналіз більш комплексних моделей оптичного середовища розповсюдження для поляризованих сигналів.

### Література

1. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics. New York: Academic Press, 2013. 631 p.
2. Shaw J.K. Mathematical principles of optical fiber communications. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2004. 93 p.
3. Педяш В.В. Влияние фазовой самомодуляции оптического сигнала на качество каналов ВОСП СРК / В.В. Педяш, О.С. Решетникова // Наукові праці УДАЗ ім. О.С. Попова. 2010.– № 1. – С. 109-114.
4. Педяш В.В. Влияние нелинейных искажений оптических волокон на качество каналов ВОСП СРК / В.В. Педяш // Наукові праці УДАЗ ім. О.С. Попова. – 2010. – № 2. – С. 70-74.
5. Peddanarappagari K.V., Brandt-Pearce M. Volterra Series Transfer Function of Single-Mode Fibers. Journal of Lightwave technology. 1997. Vol. 15, No 12. P. 2232-2241.
6. Anilionis R., Andriukaitis D., Anilioniene J. Modeling of Nonlinear Circuit using Volterra Series. Elektronika ir elektrotechnika. 2012. No 4(120). P. 43-46.
7. Brandt-Pearce M., Xu B. Comparison of FWM- and XPM-Induced Crosstalk Using the Volterra Series Transfer Function Method. Journal of Lightwave technology. 2003. Vol. 21, No 1. P. 40-53.
8. Brandt-Pearce M., Xu B. Modified Volterra Series Transfer Function Method. IEEE Photonics technology letters. 2002. Vol. 14, No 1. P. 47-49.
9. Педяш В.В. Усовершенствование модели распространения оптического сигнала на базе рядов Вольтерра / В.В. Педяш // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2015. – № 2. – С. 96-103.
10. Sinkin O.V., Holzlohner R., Zweck J., Menyuk C.R. Optimization of the split-step Fourier method in modeling optical-fiber communications systems. Journal of Lightwave Technology. 2003. T. 21, № 1. C. 61–68.
11. Mitschke F., Mahnke C. Soliton Content of Fiber-Optic Light Pulses. Applied Sciences. 7, no. 6: 635.

### References

1. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics. New York: Academic Press, 2013. 631 p.
2. Shaw J.K. Mathematical principles of optical fiber communications. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2004. 93 p.
3. Pedjash V.V. Vlijanie fazovoj samomoduljacji opticheskogo signala na kachestvo kanalov VOСП SRK / V.V. Pedjash, O.S. Reshetnikova // Naukovi praci UDAZ im. O.S. Popova. 2010.– № 1. – S. 109-114.
4. Pedjash V.V. Vlijanie nelinejnyh iskazhenij opticheskikh volokon na kachestvo kanalov VOСП SRK / V.V. Pedjash // Naukovi praci UDAZ im. O.S. Popova. – 2010. – № 2. – S. 70-74.
5. Peddanarappagari K.V., Brandt-Pearce M. Volterra Series Transfer Function of Single-Mode Fibers. Journal of Lightwave technology. 1997. Vol. 15, No 12. P. 2232-2241.
6. Anilionis R., Andriukaitis D., Anilioniene J. Modeling of Nonlinear Circuit using Volterra Series. Elektronika ir elektrotechnika. 2012. No 4(120). P. 43-46.
7. Brandt-Pearce M., Xu B. Comparison of FWM- and XPM-Induced Crosstalk Using the Volterra Series Transfer Function Method. Journal of Lightwave technology. 2003. Vol. 21, No 1. P. 40-53.
8. Brandt-Pearce M., Xu B. Modified Volterra Series Transfer Function Method. IEEE Photonics technology letters. 2002. Vol. 14, No 1. P. 47-49.
9. Pedjash V.V. Usovershenstvovanie modeli rasprostraneniya opticheskogo signala na baze rjadov Vol'terra / V.V. Pedjash // Naukovi praci ONAZ im. O.S. Popova. – 2015. – № 2. – S. 96-103.
10. Sinkin O.V., Holzlohner R., Zweck J., Menyuk C.R. Optimization of the split-step Fourier method in modeling optical-fiber communications systems. Journal of Lightwave Technology. 2003. T. 21, № 1. C. 61–68.
11. Mitschke F., Mahnke C. Soliton Content of Fiber-Optic Light Pulses. Applied Sciences. 7, no. 6: 635.

ПОТАПОВА Надія

Донецький національний університет імені Василя Стуса

<https://orcid.org/0000-0003-4566-4102>e-mail: [potapova.nadin@gmail.com](mailto:potapova.nadin@gmail.com)

ВОЛОНТИР Людмила

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0001-9022-9332>e-mail: [milavolontyr@ukr.net](mailto:milavolontyr@ukr.net)

## МЕТОД МОДЕЛЮВАННЯ В УПРАВЛІННІ ЗАПАСАМИ ІЄРАРХІЧНИХ ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМ

*В роботі висвітлено питання використання методу моделювання в управлінні запасами ієрархічних логістичних систем. Обґрунтовується питання необхідності моделювання управління запасами як одного з ключових параметрів логістики розподілу. Доведено, що ієрархічна логістична система може генерувати поточкові процеси за законом Пуассона, що робить можливим застосування теорії систем масового обслуговування при формалізації процесів надходжень поставок ресурсів для поповнення запасів логістичного центру з подальшим розподілом потоків по філіям регіонального типу.*

*Даний метод ґрунтується на отриманні оптимальних характеристик інтенсивності поставок ресурсів в розрізі конкретної номенклатури за умови обмежень на наявні обігові кошти та формування резервного запасу забезпечення ремонтних робіт.*

*Ключові слова: моделювання, теорія управління запасами, оптимізація, теорія масового обслуговування, ієрархічна логістична система, сервісні пункти.*

ПОТАПОВА Nadiia

Vasyl' Stus Donetsk National University

VOLONTYR Ludmila

Vinnytsia National Agrarian University

## MODELING METHOD IN STOCK MANAGEMENT HIERARCHICAL LOGISTICS SYSTEMS

*The work highlights the issue of using the modeling method in inventory management of hierarchical logistics systems. The issue of the necessity of inventory management modeling as one of the key parameters of distribution logistics is substantiated. It has been proven that the hierarchical logistics system can generate flow processes according to Poisson's law, which makes it possible to apply the theory of mass service systems in the formalization of the processes of incoming supplies of resources to replenish the stocks of the logistics center with further distribution of flows among regional branches. This method is based on obtaining optimal characteristics of the intensity of supply of resources in the section of a specific nomenclature, subject to restrictions on available working capital and the formation of a reserve stock for maintenance of repair works.*

*Keywords: modeling, inventory management theory, optimization, mass service theory, hierarchical logistics system, service points.*

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Методи обробки даних є одним із ключових елементів процесингу інформаційних систем. В логістичних інформаційних системах блок задач управління запасами направлений на вирішення питань обробки даних та прийняття рішень щодо управління закупками, класифікацій номенклатурних груп, розробки моделей прийняття рішень в системі планування витрат на процеси управління запасами тощо. Моделі управління запасами є не тільки інструментарієм вирішення ключових питань логістики запасів, а й засіб математичної формалізації та розв'язку прикладних задач логістики та менеджменту, що розвивається в напрямку дослідження операцій та аналізу даних. Більшість задач управління запасами мають на меті отримати математичний підхід до вирішення питань пошуку оптимальної кількості запасів або замовлень, які мають урівноважувати витрати, пов'язані з дефіцитом запасів або їх надлишками, отримавши при цьому оптимальну траєкторію змін сукупних витрат.

Проте, існує множина факторів, які прямо або приховано впливають на результативність процесів поповнення запасів, що відображують характеристики їхнього просування у часі, зокрема такими факторами можна визнати розподіл надходження замовлень у часі та інтенсивність їх обслуговування. Тоді виникає задача отримання оптимального рівня системи управління запасами з урахуванням інтенсивності потоків за визначений часовий період, розв'язок якої можливо отримати імплементацією положень теорії масового обслуговування в базис класичних моделей управління запасами.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Класичними є моделі управління запасами (з фіксованим рівнем запасів, з двома рівнями управління запасами, s-політики управління запасами, одноразових закупок, закупок партіями ресурсів), які докладно описав Таха Х.А. [15] визначивши основні риси процесів управління запасами та математичні ідентифікатори їх оцінювання. В своїх працях Вагнер Х.М. [16] досліджує математичні стохастичні моделі

управління запасами, зокрема модель економічно обґрунтованого розміру запасів. Теорія управління запасами набула свого подальшого розвитку в роботах науковців Гамалія В.Ф. [1], Лісовської В.П. [3], Пишнограєва І.О. [5] та ін. Ними проведено математичну формалізацію прикладних моделей управління запасами та приклади їх практичної реалізації для оптимізації управлінських рішень [7, 8]. Проте, залишається ряд невирішених питань, зокрема застосування методів та моделей управління запасів в логістичних системах у випадку інтегрованих потоків попиту багатонаменклатурних ресурсів.

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є визначення сутності методу моделювання в управлінні запасами ієрархічних логістичних систем на основі отримання оптимальних характеристик інтенсивності поставок ресурсів в розрізі конкретної номенклатури за умови обмежень на наявні обігові кошти та формування резервного запасу забезпечення ремонтних робіт.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Функціонування ієрархічної логістичної системи формалізується безліччю внутрішніх та зовнішніх зв'язків, що утворюються внаслідок фізичного просування матеріальних ресурсів. Ієрархії відповідає надходження замовлень від нижчого рівня системи до її верхнього виконавчого рівня. Поряд з цим генерується інформаційний потік замовлень, що містить категорійну сутність ресурсів і безпосередньо пов'язаний з матеріальними потоками. В такому випадку розглядається не тільки процес руху замовлення в логістичній системі з отриманням часових характеристик, а й інші процеси, що обумовлені економікою діяльності. Вони описуються: обсягом закуплених ресурсів; цінами виробників; витратами на зберігання; грошовими коштами, що вкладають у процес закупки; витрати, пов'язані з відсутністю замовлених ресурсів. Такі задачі відносяться до класу задач управління запасами. Основні питання, що вирішують математичні моделі таких задач: яку кількість ресурсу потрібно купувати та в який термін часу потрібно здійснювати поставки [15].

Слід зазначити, що дані моделі побудовані на основі твердження про отримання попиту від конкретного замовника, тоді сам процес представлений у вигляді ординарного потоку від одного джерела виникнення. Класична модель економічного розміру партії поставки ресурсу для утворення запасу передбачає попереднє визначення попиту і поповнення запасу за умови відсутності часу на доставку. Оптимальний розмір партії поставки визначається за формулою Уілсона [16]:

$$q_0 = \sqrt{2C_0S/C_u i},$$

де  $q_0$  – оптимальний розмір запасу;  
 $C_0$  – витрати на заключно-підготовчі операції;  
 $S$  – річний обсяг поставок;  
 $C_u$  – вартість ресурсу;  
 $i$  – розмір витрат на зберігання ресурсу.

Дана модель призначена для аналітичного оцінювання оптимального розміру обсягів поставок однономенклатурних ресурсів з фіксованою ціною, часового інтервалу між поставками, а також мінімальних витрат за рік. В цьому випадку неврахованими залишаються параметри невизначеності попиту, багатонаменклатурності продукції, штрафи внаслідок дефіциту продукції. Проте, одним із ключових факторів є фактор часу, з урахуванням якого відбувається налагодження процесу надходження ресурсів у часі. Тому, особливий інтерес викликають моделі, що розглядають поставки в динаміці [5, 7, 8]. Загальні витрати на поставки складаються із змінної і постійної частини. Метою застосування моделі є визначення мінімального рівня запасу. При такому моделюванні знаходять верхній рівень запасів і розробляється політика управління запасами однономенклатурної продукції. Тому, доцільним є зведення процесу моделювання не тільки до визначення окремої точки поповнення запасу, а й встановлення інтервалу оптимального рівня запасів. За межами даного інтервалу поповнення запасів не є ефективним. Тому доцільною є використання методики визначення інтервалу оптимального рівня запасів, з урахуванням економічної оцінки та інтенсивності проходження потоку за часовий період.

В багатьох випадках розглядаються задачі управління запасами з обмеженнями. Методами вирішення таких задач є оптимізація на основі показників Лагранжа. Тому, одним із таких обмежень можна визнати використання обігових коштів, від обороту яких залежить швидкість та оновленість потоків у часі. Тобто, формується політика управління запасами з урахуванням обмежень на обіговий капітал.

На обсяг ресурсів, що закуповується по різних джерелах, впливає організація процесу обслуговування замовлення, зокрема: часові затримки при оформленні замовлень, порядок їх розміщення в процесі обслуговування, можливість очікування для обслуговування тощо. Процес постачання ресурсів з множини декількох джерел може бути формалізованим у вигляді складної відкритої системи масового обслуговування. Опис процесів надходження та зберігання запасів на центральні координаційні склади системи застосовано методику вирішення задач управління запасами через характеристики системи масового обслуговування. В основі методики є використання моделей, оптимального розміру замовлення багатонаменклатурних поставок та формування резервного комплексу обслуговування.

Розглянемо задачу управління запасами при однономенклатурних і багатонаменклатурних

поставках ресурсів. Поставки ресурсів розподілені за законом Пуассона і мають інтенсивність  $\lambda$ . Попит на ресурси розподілений за законом Пуассона з інтенсивністю  $\mu$ . Імовірність наявності запасу ресурсів в центрі обслуговування замовлень вищого рівня позначимо  $P_n$ , а імовірність відсутності запасу  $P_0$ . Необхідним є визначення інтенсивності поставок ресурсів  $\lambda_{\text{опт}}$ .

В логістичній ієрархічній системі пріоритетними є вертикальні зв'язки постачання, які утворюються на рівні територіальних районів та області (центру). Інтенсивність попиту від генераторів замовлень нижчого рівня ієрархії системи визначена за формулою:

$$\mu_{\text{район}} = \sum_j^N \sum_i^M \mu_{ij},$$

де  $\mu_{\text{район}}$  – інтенсивність попиту в окремому територіальному районі;  
 $i$  – змінна, що визначає попит на конкретну номенклатуру ресурсів,  $i = 1, 2, 3 \dots M$ ;  
 $j$  – змінна, що визначає кількість замовників в даному ринковому сегменті,  $j = 1, 2, 3 \dots N$ ;  
 $\mu_{ij}$  – інтенсивність попиту  $j$ -го замовника на  $i$ -у номенклатуру ресурсів.  
 Тоді інтенсивність попиту від підприємств нижчого (територіального районного) рівня до центрального (обласного) буде

$$\mu_{\text{обл}} = \sum_j^R \sum_i^M \mu_{\text{район } ij},$$

де  $\mu_{\text{обл}}$  – інтенсивність попиту на ресурси, сформована на вищому (центральному) рівні;  
 $i$  – змінна, що визначає кількість номенклатур ресурсів,  $i = 1, 2, 3 \dots M$ ;  
 $j$  – змінна, що визначає кількість підприємств на нижчому (територіальному районному) рівні системи поставок ресурсів,  $j = 1, 2, 3 \dots R$ ;

$\mu_{\text{район } ij}$  – інтенсивність попиту  $j$ -го районного підприємства системи на  $i$ -у номенклатуру ресурсів.

Система постачання ресурсів приймає вид М/М/1 по класифікації Кендала [2, 4]. Чергою на центральному обласному рівні є кількість ресурсів, що необхідні на нижчому територіальному районному рівні системи. Чергою на територіальному районному рівні є кількість ресурсів необхідних замовникам зовнішнього попиту в конкретному сегменті ринку. Розв'язок для стаціонарного стану отримуємо на основі рівнянь Чепмена-Колмогорова [9, 12, 13, 14]:

$$\begin{cases} \rho_0 = 1 - \lambda/\mu = 1 - \rho \\ \rho_n = (\lambda/\mu)^n \rho_0 = \rho^n (1 - \rho) \end{cases}$$

де  $\rho_0$  – коефіцієнт завантаження системи в нульовому стані;  
 $\rho_n$  – коефіцієнт завантаження системи в  $n$ -му стані.  
 Величину середньої кількості запасів обчислено за формулою 1, а її середньоквадратичне відхилення за формулою 2:

$$\bar{n} = \frac{\rho}{\rho - 1}, \tag{1}$$

де  $\bar{n}$  – середня кількість запасів на складі;  
 $\rho$  – коефіцієнт завантаження системи.

$$\sigma_n^2 = \frac{\rho}{(1 - \rho)^2}, \tag{2}$$

де  $\delta_n^2$  – середньоквадратичне відхилення середньої кількості запасів;  
 $\rho$  – коефіцієнт завантаження системи.

Оптимальний коефіцієнт завантаження системи через витрати управління запасами приймає вигляд:

$$\rho_{\text{опт}} = 1 - \sqrt{C_u/C_z},$$

де  $\rho_{\text{опт}}$  – оптимальний коефіцієнт завантаження системи;  
 $C_u$  – витрати на зберігання ресурсів, грн.;  
 $C_z$  – втрати, які виникають внаслідок дефіциту ресурсів, грн.  
 Оптимальна інтенсивність поставок, виведена через економічні характеристики управління запасами дорівнюватиме:

$$\lambda_{\text{опт}} = \mu(1 - \sqrt{C_u/C_z}), \tag{3}$$

де  $\lambda_{\text{опт}}$  – оптимальна інтенсивність попиту;  
 $\mu$  – інтенсивність попиту;  
 $C_u$  – витрати на зберігання ресурсів, грн.;



$C_z$  – втрати, які виникають внаслідок дефіциту ресурсів, грн.

У випадку вирішення питань оптимізації поставок при однономенклатурних ресурсах задача багатноменклатурних поставок доповниться виразом:

$$C_{ui} = k_i C_i,$$

де  $C_{ui}$  – витрати на зберігання одиниці  $i$ -го ресурсу, грн.;  
 $k_i$  – коефіцієнт витрат управління запасами, прийнятий як доля ціни  $i$ -го ресурсу;  
 $C_i$  – ціна  $i$ -го ресурсу, грн.

Тоді загальні витрати управління запасами по  $M$ -номенклатурах складуть:

$$C_{zar} = \sum_{i=1}^M (C_i k_i \frac{\rho_i}{1-\rho_i} + C_{z_i} (1-\rho_i)),$$

де  $C_{zar}$  – загальні витрати управління запасами по  $M$ -номенклатурах;  
 $M$  – кількість номенклатур,  $i = 1, 2, \dots, M$ ;  
 $C_i$  – ціна  $i$ -го ресурсу, грн.;  
 $k_i$  – коефіцієнт витрат управління запасами, прийнятий як доля ціни  $i$ -го ресурсу;  
 $\rho_i$  – завантаження системи з  $i$ -м видом ресурсів;  
 $C_{z_i}$  – втрати внаслідок дефіциту  $i$ -го ресурсу, грн.

Кошти, які будуть витрачені на поповнення певної кількості одиниць ресурсів:

$$C_{пок} = T \sum_{i=1}^M \lambda_i C_i,$$

де  $C_{пок}$  – кошти, що будуть витрачені на поповнення конкретної кількості одиниць ресурсів, грн.;  
 $T$  – період часу проектування поставок, дні;  
 $M$  – кількість номенклатур,  $i = 1, 2, 3, \dots, M$ ;  
 $\lambda_i$  – інтенсивність поставок  $i$ -го ресурсу;  
 $C_i$  – ціна  $i$ -го ресурсу, грн.

Оптимальна інтенсивність поставок по конкретній номенклатурі ресурсів, за умови обмежень наявності вільних обігових коштів, може бути отриманою методом невизначених множників Лагранжа і дорівнюватиме:

$$\lambda_{i_{опт}} = \mu_i + \frac{C_o / T - \sum_{i=1}^M C_i \mu_i}{\sum_{i=1}^M C_i \sqrt{\frac{\mu_i T (C_{z_i} - C_i k_i)}{C_i}}} \sqrt{\frac{\mu_i T (C_{z_i} - k_i C_i)}{C_i}}, \quad (4)$$

де  $\lambda_{i_{опт}}$  – оптимальна інтенсивність поставок по  $i$ -й номенклатурі ресурсів;

$\mu_i$  – інтенсивність попиту на  $i$ -й вид ресурсу;  
 $C_o$  – кількість вільних обігових коштів, грн.;  
 $T$  – період часу проектування поставок по замовленнях, дні;  
 $M$  – кількість номенклатур,  $i = 1, 2, 3, \dots, M$ ;  
 $C_i$  – ціна  $i$ -го ресурсу, грн.;  
 $k_i$  – коефіцієнт витрат управління запасами, прийнятий як доля ціни  $i$ -го ресурсу.  
 $C_{z_i}$  – втрати, які виникають внаслідок дефіциту ресурсів, грн.

Таким чином, визначення оптимальної кількості поставок по  $M$ -номенклатурах залежить від величини  $\mu_i$ , тобто від розподілу попиту на ресурси, що дає змогу при певних співвідношеннях величин управління запасами прогнозувати обсяг поставлених ресурсів, а також обсяг запасу ресурсів з метою їх подальшого постачання у визначений інтервал часу.

Модель, яка оптимізує процес управління запасами для організаційної структури логістичної системи ієрархічного типу з урахуванням сервісних служб враховує їх ієрархічну територіальну підпорядкованість. Постановка задачі передбачає наявність в територіальному підпорядкуванні сервісні служби для технічного обслуговування;  $n$  одиниць однотипового технологічного обладнання (логістично обґрунтованого для взаємозаміни ремонтних частин),  $g$  одиниць запасного ремонтного комплекту. Елемент обладнання, що вийшов з ладу замінюється запасним і надходить в сервісну центральну службу. Після ремонту він поповнює запасний ремонтний комплект обладнання. В територіальному регіоні працює  $s$  сервісних обслуговуючих центрів. Чергою є непридатне обладнання, що очікує на ремонт. Наступні позначення:

а)  $\lambda$  – інтенсивність напрацювання на відмову одиниці обладнання, яка є випадковою величиною розподіленою по закону Пуассона;

б)  $\mu$  – параметр процесу відновлення одиниці обладнання, який розподілений по експоненціальному закону ( $1/\mu$  – середній час ремонту обладнання).

Метою використання моделі є визначення оптимального розміру комплекту запасного обладнання  $g$

і кількість сервісних пунктів  $s$ , які мінімізують загальні витрати на створення і утримання регіональної сервісної організації.

Цільова функція враховує витрати на функціонування сервісної служби:

$$\Pi(s, r) = C_p s + C_3 r + C_n \bar{U}(s, r), \tag{5}$$

де  $\Pi(s, r)$  – загальні витрати на утримання сервісної системи, грн.;

$r$  – комплект запасного обладнання, шт.;

$s$  – кількість сервісних пунктів, одиниць;

$C_p$  – вартість утримання одного сервісного пункту в одиницю часу, грн.;

$C_3$  – вартість одиниці запасного обладнання, грн.;

$C_n$  – вартість простою техніки в одиницю часу, грн.;

$\bar{U}(s, r)$  – середня кількість техніки в територіальному регіоні, яка не працює через відмову в сервісному обслуговуванні, шт.

Оптимальними значеннями  $s$  і  $r$  будуть такі значення, які мінімізуватимуть функцію (5). Визначимо складову  $\bar{U}(s, r)$ . Модель може бути описана марківським процесом з поглинаючим бар'єром в точці  $n+r$ .

[12] Для такого процесу система рівнянь Чепмена-Колмогорова матиме вигляд:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t).$$

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \lambda P_{i-1}(t) - (\lambda + i\mu)P_i(t) + (i+1)\mu P_{i+1}(t); i < s.$$

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \lambda P_{i-1}(t) - (\lambda + s\mu)P_i(t) + s\mu P_{i+1}(t); s \leq i \leq m,$$

де  $m = n+r$ .

Розв'язком даної системи рівнянь в стаціонарному стані є імовірності:

$$P_i = \frac{\rho^i}{i!} P_0, i < s,$$

$$P_i = \frac{(\rho/s)^i s^s}{s!} P_0, s \leq i \leq m, \tag{6}$$

де  $\rho = \lambda/\mu$ .

Імовірність  $P_0$  може бути визначена із умови нормування і матиме вигляд виразу:

$$P_0 = \left[ \sum_{i=0}^{s-1} \frac{\rho^i}{i!} + \frac{s^s}{s!} \sum_{i=s}^m \left( \frac{\rho}{s} \right)^i \right]^{-1}. \tag{7}$$

Якщо використати властивості кінцевих сум, тоді отримаємо вираз 8:

$$\sum_{i=0}^{s-1} \frac{\rho^i}{i!} = \frac{1}{(s-1)!} e^\rho \int_\rho^\infty t^{s-1} e^{-t} dt = \frac{e^\rho}{(s-1)!} \Gamma(s, \rho), \tag{8}$$

де  $\Gamma(s, \rho)$  – неповна гама-функція, значення якої табульовані.

Підставивши (8) в (7), отримуємо:

$$P_0 = \left\{ \frac{e^\rho}{(s-1)!} \Gamma(s, \rho) + \frac{\rho^s}{(1-\rho/s)s!} \left[ 1 - \left( \frac{\rho}{s} \right)^{m-s+1} \right] \right\}^{-1}.$$

Тоді  $\bar{U}(s, r)$  буде дорівнювати виразу 9:

$$\bar{U}(s, r) = \sum_{i=0}^m i P_i = P_0 \left\{ \sum_{i=0}^{s-1} i \frac{\rho^i}{i!} + \sum_{i=s}^m i \frac{(\rho/s)^i s^s}{s!} \right\}. \tag{9}$$

Підставивши значення  $\bar{U}(s, r)$  в цільову функцію  $\Pi(s, r)$  отримаємо остаточний вираз. При  $s=1, m \rightarrow \infty$  результати приводяться до виду системи масового обслуговування типу М/М/1 по класифікації Кендала. Запропонований підхід можна застосувати для децентралізованої організаційної сервісної структури з умови вибору в якості критерію конкретизоване значення коефіцієнту готовності техніки  $K_r^*$  та цільової функції вигляду:

$$K_r^* = \sum_{i=0}^r P_i,$$

де  $P_i$  – імовірність, яка визначається по формулам (6).

Відмітимо, що потреба у зверненні до сервісного центру визначається замовником самостійно, з урахуванням факторів наявності запасних частин у себе, рівень сервісного обслуговування, кваліфікацію спеціалістів, можливості оплатити обслуговування.

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Використання методу моделювання при вивченні функціонування логістичної ієрархічної системи дозволяє всебічно розглянути її роботу, внутрішні і зовнішні зв'язки, проаналізувати механізм потокового просування ресурсів, оцінити її поведінку.

Функціонування системи формалізується шляхом декомпозиції окремих процесів виконання замовлень, поставок ресурсів на центральні склади та їх розподілу залежно від попиту і пропозиції. Для опису даних процесів доцільно застосовувати методи математичної статистики, теорії масового обслуговування, теорії управління запасами.

Застосування подальшого об'єднання оптимальних моделей та методу імітаційного моделювання дозволить відобразити поведінку системи з урахуванням багатоваріантності початкових значень параметрів.

### Література

1. Гамалій В.Ф., Романчук С.А. Вибір базових даних для оптимального керування запасами в економіко-організаційних системах з використанням імітаційного моделювання. URL: [https://core.ac.uk/display/81587821?utm\\_source=pdf&utm\\_medium=banner&utm\\_campaign=pdf-decoration-v1/](https://core.ac.uk/display/81587821?utm_source=pdf&utm_medium=banner&utm_campaign=pdf-decoration-v1/)
2. Литвинов А. Л. Теорія систем масового обслуговування : навч. посібник. Харків : Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, 2018. 141 с.
3. Лісовська В.П., Манжос Т.В. Про ефект централізації управління запасами за нормально розподіленого попиту. Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Фізико-математичні науки : зб. наук. пр. Кам'янець-Подільський : Кам'янець-Подільськ. нац. ун-т, 2012. Вип. 7. С. 175-185.
4. Майстренко О.В., Бубенщиков Р.В., Карга О.В. Теорія масового обслуговування як засіб удосконалення моделі прийняття рішень. Військово-технічний збірник. 2019. № 20. С. 14-19.
5. Пишнограєв І.О., Омельченко Ю.В. Моделювання управління запасами підприємства в умовах невизначеності попиту. Актуальні проблеми економіки та управління : збірник наукових праць молодих вчених. 2020. Вип. 14. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37811/>
6. Степенко І.В. Моделювання систем : навч. посіб. Мін-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. Черкаси : ЧДТУ, 2010. 399 с.
7. Хоменко М.М. Динамічна модель управління запасами з обґрунтуванням величини партій присадок. Вісник Хмельницького національного університету. 2011. № 3. Т. 3. С. 12-18.
8. Цеслів О.В., Гришко М.П. Стохастичні моделі управління запасами поставок товару. Економічний вісник НТУУ «КПІ», 2019. С. 451–459.
9. Agboola S.O., Ojeniyi, A. (2018). The Chapman-Kolmogorov equations of solving weather condition in markov chain. URL: [https://www.researchgate.net/publication/330535754\\_the\\_Chapman\\_Kolmogorov\\_equations\\_of\\_solving\\_weather\\_condition\\_in\\_markov\\_chain](https://www.researchgate.net/publication/330535754_the_Chapman_Kolmogorov_equations_of_solving_weather_condition_in_markov_chain).
10. Chican A. Inventory models. Ed. by A. Chican. Akademiai kiado, Budapest, 1990. 419 p.
11. Mills Edwin S. The Theory of Inventory Decisions. Econometrica, vol. 25, no. 2, 1957, pp. 222-238. *JSTOR*, <https://doi.org/10.2307/1910251>. Accessed 18 Oct. 2022.
12. Dynkin E.B. (1989). Kolmogorov and the Theory of Markov Processes. The Annals of Probability. Vol. 17, No. 3 (Jul., 1989), pp. 822-832. <https://www.jstor.org/stable/2244385>.
13. Nicholas W. Barendregt, Krešimir Josić, and Zachary P. Kilpatrick Analyzing dynamic decision-making models using Chapman-Kolmogorov equations. J Comput Neurosci. 2019 Dec; 47(2-3): 205-222. doi: [10.1007/s10827-019-00733-5](https://doi.org/10.1007/s10827-019-00733-5).
14. Haken H., Mayer-Kress G. (1981). Chapman-Kolmogorov equation and path integrals for discrete chaos in presence of noise. Z. Physik B. Condensed Matter 43, 185–187. <https://doi.org/10.1007/bf01293609/>
15. Hamdy A. Taha. Operations Research An Introduction, seventh edition. Pearson Education, 2017. 848 pp.
16. Wagner Harvey M. Principles of operations research: with applications to managerial decisions. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1975. 1039 p.

### References

1. Hamalii V.F., Romanchuk S.A. Vybir bazovykh danykh dlia optymalnoho keruvannia zapasamy v ekonomiko-orhanizatsiinykh systemakh z vykorystanniam imitatsiinoho modeliuвання. URL: [https://core.ac.uk/display/81587821?utm\\_source=pdf&utm\\_medium=banner&utm\\_campaign=pdf-decoration-v1/](https://core.ac.uk/display/81587821?utm_source=pdf&utm_medium=banner&utm_campaign=pdf-decoration-v1/)
2. Lytvynov A. L. Teoriia system masovoho obsluhovuvannia : navch. posibnyk. Kharkiv : Kharkiv. nats. un-t misk. hosp-va im. O. M. Beketova, 2018. 141 s.
3. Lisovska V.P., Manzhos T.V. Pro efekht tsentralizatsii upravlinnia zapasamy za normalno rozpodilenooho popytu. Matematychna ta kompiuterne modeliuвання. Serii: Fyzyko-matematychni nauky : zb. nauk. pr. Kamianets-Podil'skyi : Kamianets-Podil'sk. nats. un-t, 2012. Vyp. 7. S. 175-185.

4. Maistrenko O.V., Bubenshchykov R.V., Karha O.V. Teoriia masovoho obsluhovuvannia yak zasib udoskonalennia modeli pryiniattia rishen. Viiskovo-tekhnichnyi zbirnyk. 2019. № 20. S. 14-19.
5. Pyshnohraiev I.O., Omelchenko Yu.V. Modeliuvannia upravlinnia zapasamy pidpriemstva v umovakh nevyznachenosti popytu. Aktualni problemy ekonomiky ta upravlinnia : zbirnyk naukovykh prats molodykh vchenykh. 2020. Vyp. 14. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37811/>
6. Stetsenko I.V. Modeliuvannia system : navch. posib. Min-vo osvity i nauky Ukrainy, Cherkas. derzh. tekhnol. un-t. Cherkasy : ChDTU, 2010. 399 s.
7. Khomenko M.M. Dynamichna model upravlinnia zapasamy z obgruntuvanniam velychyny partii prysadok. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. 2011. № 3. T. 3. S. 12-18.
8. Tsesliv O.V., Hryshko M.P. Stokhastychni modeli upravlinnia zapasamy postavok tovaru. Ekonomichni visnyk NTUU «KPI», 2019. S. 451–459.
9. Agboola S.O., Ojeniyi, A. (2018). The Chapman-Kolmogorov equations of solving weather condition in markov chain. URL: [https://www.researchgate.net/publication/330535754\\_the\\_Chapman\\_Kolmogorov\\_equations\\_of\\_solving\\_weather\\_condition\\_in\\_markov\\_chain](https://www.researchgate.net/publication/330535754_the_Chapman_Kolmogorov_equations_of_solving_weather_condition_in_markov_chain).
10. Chican A. Inventory models. Ed. by A. Chican. Akademiai kiado, Budapest, 1990. 419 p.
11. Mills Edwin S. The Theory of Inventory Decisions. *Econometrica*, vol. 25, no. 2, 1957, pp. 222-238. JSTOR, <https://doi.org/10.2307/1910251>. Accessed 18 Oct. 2022.
12. Dynkin E.B. (1989). Kolmogorov and the Theory of Markov Processes. *The Annals of Probability*. Vol. 17, No. 3 (Jul., 1989), pp. 822-832. <https://www.jstor.org/stable/2244385>.
13. Nicholas W. Barendregt, Krešimir Josić, and Zachary P. Kilpatrick Analyzing dynamic decision-making models using Chapman-Kolmogorov equations. *J Comput Neurosci*. 2019 Dec; 47(2-3): 205-222. doi: 10.1007/s10827-019-00733-5.
14. Haken H., Mayer-Kress G. (1981). Chapman-Kolmogorov equation and path integrals for discrete chaos in presence of noise. *Z. Physik B. Condensed Matter* 43, 185–187. <https://doi.org/10.1007/bf01293609/>
15. Hamdy A. Taha. *Operations Research An Introduction*, seventh edition. Pearson Education, 2017. 848 pp.
16. Wagner Harvey M. *Principles of operations research: with applications to managerial decisions*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1975. 1039 p.

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-181-185>

УДК 666:973.6.

РИМАР Тетяна

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

<https://orcid.org/0000-0001-9724-8640>

e-mail: [rymartatyana1975@gmail.com](mailto:rymartatyana1975@gmail.com)

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО РЕЖИМУ ПРОЦЕСУ ПОРИЗАЦІЇ РІДИННОСКЛЯНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ В УМОВАХ НВЧ ВИПРОМІНЮВАННЯ

В роботі наведено результати дослідження технологічного режиму процесу поризації рідинноскляних композицій під дією НВЧ випромінювання для досягнення ефективного видалення всіх видів води та отримання теплоізоляційних матеріалів з високими експлуатаційними властивостями. Було встановлено, що при потужності випромінювання 500 Вт у середовищі вакууму без обертання зразка не дивлячись на досягнуте високе значення температури 110-115 °С, інтенсивного спучення не спостерігалось. Зниження маси зразка обумовлено механізмом видалення води за допомогою вакууму, який зводиться до більш високої швидкості масопередачі без етапу пароутворення. У середовищі вакууму з обертанням зразка спостерігається інтенсивне спучення і утворення великої кількості «кратерів» на поверхні зразка і великих наскрізних пор в макроструктурі. При атмосферному тиску відбувається різке падіння температури на початку процесу, що свідчить про недостатню потужність НВЧ випромінювання для інтенсифікації процесу спучення через значну конденсацію вологи на поверхні зразка. При більш високій потужності випромінювання 650 Вт у середовищі вакууму відбувається різке зростання температури на початку процесу до 90-95 °С, що обумовлено початком інтенсивного пароутворення вільної та конституційної води та створенням градієнту тиску у зразку та поступове її зниження до 55-60 °С, що призводить до сушки матеріалу. Тобто, у середовищі вакууму недоцільно отримувати дані матеріали, оскільки протікають конкуруючі процеси масопередачі води з її випаровуванням. Найбільш оптимальними умовами для отримання композиційних ТІМ є вихідна потужність установки 650 Вт та атмосферний тиск. На першій же хвилині процесу відбувається різке підвищення температури до 85-90 °С, яка повільно збільшується до 115-120 °С і далі не змінюється. Цей період характеризується найбільш інтенсивним процесом спучення. Сам процес характеризувався легкістю регулювання, а отриманий зразок має привабливий зовнішній вигляд і низьку середню густину.

Ключові слова: технологічний режим, процес поризації, рідинноскляні композиції, НВЧ випромінювання, атмосферний тиск, вакуум.

RYMAR TATYANA

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

## RESEARCH OF THE TECHNOLOGICAL MODE OF THE PROCESS OF PORIZATION OF LIQUID GLASS COMPOSITE MATERIALS FOR THERMAL INSULATION IN THE CONDITIONS OF UHF RADIATION

The paper presents the results of research into the technological regime of the process of liquid-glass composition porization under the action of microwave radiation to achieve effective removal of all types of water and obtain heat-insulating materials with high operational properties. It was established that with a radiation power of 500 W in a vacuum environment without rotation of the sample, despite the achieved high temperature value of 110-115 °C, intense swelling was not observed. The decrease in the mass of the sample is due to the mechanism of water removal using a vacuum, which is reduced to a higher mass transfer rate without a vaporization stage. In a vacuum environment, with sample rotation, intense swelling and the formation of a large number of "craters" on the surface of the sample and large through pores in the macrostructure are observed. At atmospheric pressure, there is a sharp drop in temperature at the beginning of the process, which indicates insufficient power of microwave radiation to intensify the swelling process due to significant condensation of moisture on the surface of the sample. With a higher radiation power of 650 W in a vacuum environment, a sharp rise in temperature occurs at the beginning of the process to 90-95 °C, which is due to the beginning of intensive vaporization of free and constitutional water and the creation of a pressure gradient in the sample and its gradual decrease to 55-60 °C, which leads before drying the material. That is, it is impractical to obtain these materials in a vacuum environment, since there are competing processes of water mass transfer and its evaporation. The most optimal conditions for obtaining composite TIMs are the output power of the installation of 650 W and atmospheric pressure. At the very first minute of the process, the temperature rises sharply to 85-90 °C, which slowly increases to 115-120 °C and does not change further. This period is characterized by the most intensive swelling process. The process itself was characterized by ease of adjustment, and the obtained sample has an attractive appearance and a low average density.

Key words: technological regime, porization process, liquid-glass compositions, microwave radiation, atmospheric pressure, vacuum.

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

Для теплової ізоляції високотемпературного устаткування слід застосовувати матеріали на основі неорганічної сировини, які є термостійкими і при нагріванні не виділяють токсичних речовин в атмосферу. Таким вимогам задовольняють теплоізоляційні матеріали на основі неорганічного полімеру – рідинного скла. Головна перевага таких матеріалів – стабільність властивостей при високих температурах. Полімерна будова та властивості рідинного скла забезпечують високі міцнісні властивості матеріалів, але на відміну від органічних полімерів вони характеризуються високою екологічністю через відсутність деполімеризації матеріалу, негорючістю та біостійкістю при гарантованому терміні експлуатації – не менше 50 років.

Теплоізоляційні композиційні матеріали на основі рідинного скла залежно від способу затвердіння

(полімеризації) основного компоненту ділять на матеріали холодного і гарячого спучення. До основних недоліків матеріалів холодного спучення відносяться недостатня хімічна стійкість (водостійкість) кінцевого матеріалу, низька механічна міцність та схильність до усадкових деформацій. Тому більш доцільно отримувати теплоізоляційні матеріали гарячого спучення, перевагою яких є більш висока міцність при низькій середній густині і гігроскопічності [1, 2].

### Аналіз досліджень та публікацій

Існують різні технологічні підходи в отриманні таких матеріалів, що принципово відрізняються за процесом газовиділення безпосередньо в товщі сформованої композиції. Причому процес газовиділення при високих температурах може бути заснований як на реакціях спеціальних добавок, так і на виділенні парів кристалізаційної і хімічно зв'язаної води [3–7]. З недоліків матеріалів цього класу слід зазначити підвищену енергоємність процесів їх виробництва, оскільки всі вони протікають за температури 300-800 °С впродовж 1-3 год. Ще одним стримуючим фактором у виробництві даних матеріалів є складність отримання теплоізоляційних матеріалів в плитній формі, через труднощі рівномірного прогріву внутрішніх шарів великорозмірних зразків при використанні традиційного конвективного нагріву. Як альтернативне джерело термообробки при виробництві даних ТІМ можливо використовувати мікрохвильове (МХ) випромінювання, яке дозволить здійснити об'ємний прогрів всіх шарів РСК та отримати якісний ТІМ.

Істотну роль при мікрохвильовому нагріві грають теплофізичні властивості зразка, оскільки ефективність і однорідність мікрохвильового нагріву залежать не лише від діелектричних властивостей матеріалу, але і від його здатності розподіляти тепло, що виділилося, за об'ємом. Так, однією з головних причин неоднорідного нагріву зразків є різке збільшення із зростанням температури чинника діелектричних втрат. При цьому швидкість дисипації теплоти в об'ємі зразка виявляється недостатньою, і в ньому утворюються зони з більш високою температурою, в яких поглинання мікрохвильового випромінювання відбувається більш інтенсивно. Таким чином, незважаючи на широко поширену думку про рівномірність розподілу теплоти за об'ємом зразка при мікрохвильовому нагріві слід ретельно підбирати умови експерименту, щоб уникнути виникнення різких градієнтів температури в об'ємі зразка [7].

Таким чином, для отримання якісного композиційного матеріалу з низькою середньою густиною і теплопровідністю, високими показниками міцності необхідно не тільки правильно підібрати рецептурний склад вихідної рідинноскляної композиції (РСК), але й вірно визначити технологічні параметри її спучення в умовах НВЧ випромінювання та методи контролю за процесом поризації.

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є визначення оптимальних умов процесу поризації РСК під дією НВЧ випромінювання для досягнення ефективного видалення всіх видів води та отримання теплоізоляційних матеріалів з високими експлуатаційними властивостями.

### Виклад основного матеріалу

НВЧ-установка використовує електромагнітне поле, яке змушує молекули води, що містяться у рідинному склі, поглинати НВЧ енергію. Під дією НВЧ випромінювання відбувається об'ємний нагрів РСК, внаслідок чого вона переходить у в'язкопластичний і далі в піропластичний стан, коли при високій температурі утворюється рідка фаза, в результаті чого вона розм'якшується, набуває здатність до пластичної деформації і спучується газами, що виділяються. Тобто, головною рушійною силою при спученні рідинноскляних композицій є підвищення тиску пари води при підвищенні температури в об'ємі РСК. Цей ефект досягається дією інтенсивного електромагнітного поля надвисоких частот.

Спочатку дослідження процесу поризації композиційного матеріалу проводилося при потужності 500 Вт без обертання зразка у розрідженому середовищі (рис. 1). Створення вакууму проводилося з метою виключити вплив сконденсованої в камері вологи на тривалість процесу і властивості досліджуваних зразків (тиск процесу при пуску установки становив близько 10 кПа).



Рис. 1. Залежність температури процесу від його тривалості при потужності випромінювання 500 Вт в розрідженому середовищі

Щоб проаналізувати, чи є можливим спучення РСК тільки за рахунок структурно-зв'язаної води, яка випаровується, без додаткового газоутворення, зв'язуюче не містило газоутворюючого агента (рис. 1, кр. 1). Різкого стрибка температури не відбулося, поступове її зростання спостерігалось протягом усього процесу і зупинилося лише на 10-й хв. Не дивлячись на досягнуте високе значення температури процесу – 110-115 °С при низькому показнику тиску (не більше 10 кПа), інтенсивного спучення не спостерігалось, про що говорить і невисокий показник коефіцієнта спучення – 1,4-1,5. В результаті після закінчення процесу (через 10 хв) втрата маси зразка склала 25-27 %, а середня густина 470-490 кг/м<sup>3</sup>. Даний показник середньої густини є зависоким для теплоізоляційного матеріалу, тому доцільно використовувати газоутворюючий агент. Зниження маси зразка обумовлено механізмом видалення води за допомогою вакууму, який зводиться до більш високої швидкості масопередачі без етапу пароутворення. Фактично, вся вільна і адсорбційна вода з РСК була видалена у вигляді рідкої фази (туману), і спучення композиції відбувалося тільки за рахунок невеликої кількості зв'язаної води.

Подальше дослідження проводилося із застосуванням газоутворюючого агента (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) в умовах, аналогічних умовам попереднього дослідження, щоб простежити зміни в процесі у присутності пероксиду водню та поліпшити ефективність спучення зразка. Як видно з рис. 1 (кр. 2), до 3-ї хв процесу відбулося інтенсивне зростання температури до ~90 °С та була практично повністю видалена вільна вода, що міститься в рідинноскляній суміші, і спостерігалось інтенсивне спучення зв'язуючого за рахунок видалення адсорбційної води і газовиділення в результаті розкладання газоутворювача. Потім інтенсивність процесу впала, зростання температури сповільнилося, оскільки температура поетапно збільшилася з 90-95 до 100-110 °С і почалася сушка матеріалу. Присутність пероксиду водню зумовила більш низькі температури процесу спучення порівняно з показниками попереднього дослідження, оскільки зріс вміст води у зв'язуючому за рахунок розчину пероксиду водню та спучення відбувалось за рахунок адсорбційної води, яка входить і до зовнішньої і до внутрішньої координаційної сфери. Як видно, в середовищі низького тиску, процес спучення протікає рівномірно, без різких стрибків температури. Втрата маси зразка через 3 хв процесу склала 23-25 %, а по закінченні процесу через 10 хв – 28-30 %. Коефіцієнт спучення при цьому дорівнює 2,4-2,5; а середня густина – 410-430 кг/м<sup>3</sup>.

Якщо порівнювати з попереднім експериментом, застосуванням газоутворюючого агента вдалося домогтися лише збільшення коефіцієнту спучення і незначного зниження середньої густини матеріалу, однак цього недостатньо для використання отриманого матеріалу як теплоізоляційного. Крім того, поверхня готового спученого зразка мала неоднорідний, "хвилястий" вигляд унаслідок дії сконденсованої пари вологи на окремі ділянки зразка. Відсутність обертання зразка в процесі спучення призвела до нерівномірного прогріву шару РСК.

Виходячи з отриманих результатів, наступне дослідження проводили з обертанням форми з метою досягнення рівномірного нагріву і пороутворення за усім об'ємом зразка, залежність температури процесу від його тривалості зображена на рис. 2.

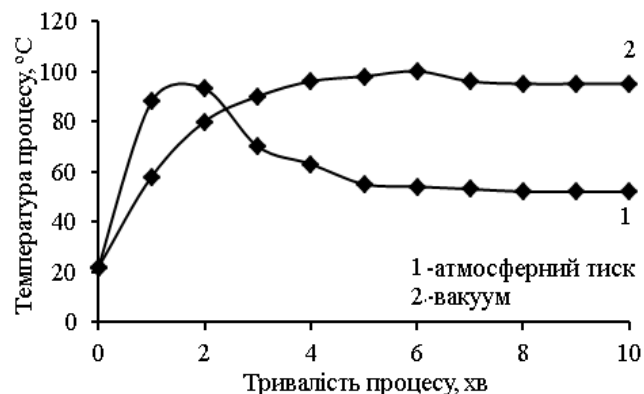


Рис. 2. Залежність температури процесу від тривалості спучення з обертанням зразка при потужності 500 Вт

При пуску установки при атмосферному тиску рис. 2 (кр. 1) в мікрохвильовій камері відбувалося різке падіння температури після 2 хв процесу, тобто даної потужності випромінювання не вистачило для інтенсифікації процесу спучення через значну конденсацію вологи на поверхні зразка. Втрата маси зразка при цьому склала 20-22 %, а середня густина – 400-420 кг/м<sup>3</sup>. Розріджене середовище всередині установки дозволило усунути цей недолік і спровокувати зростання температури процесу. Як видно з графіка, створення розрідженого середовища (кр. 2) в камері за допомогою відкачування повітря через вакуумний тракт зумовило рівномірне зростання і достатньо високі показники температури зразка (~100 °С) та плавний хід процесу спучення матеріалу. Постійна температура всередині камери була досягнута на 10-й хв і далі не змінювалась, втрата маси зразка при цьому склала 35-37%. Для отриманого зразка коефіцієнт спучення становить 2,6-2,8, а середня густина – 270-290 кг/м<sup>3</sup>. Однак, надто інтенсивне спучення зв'язуючого і низький тиск всередині камери призвели до появи великої кількості «кратерів» на поверхні зразка і великих наскрізних пор у внутрішній структурі матеріалу.

Для усунення цього ефекту наступний експеримент проводився при більш високій потужності випромінювання - 650 Вт. Пусковий тиск становив ~ 10 кПа і підтримувався на даному рівні під час всього процесу за допомогою постійного відкачування повітря через вакуумний тракт. Залежність температури матеріалу від тривалості процесу при потужності мікрохвильового випромінювання 650 Вт приведена на рис. 3.

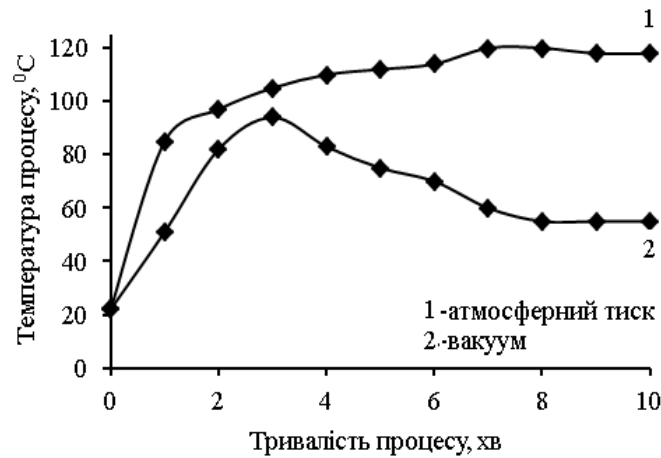


Рис. 3. Залежність температури від тривалості процесу при потужності 650 Вт з обертанням зразка

Як видно з рис. 3 (кр. 2), різке зростання температури до 3-ї хв процесу до 90-95 °С обумовлено початком інтенсивного пароутворення вільної та адсорбційної води та створення градієнту тиску у зразку. Оскільки РСК містить велику кількість рідкої фази, то через її відсмоктування за рахунок створення вакууму відбувається повільне зниження температури процесу до 55-60 °С та сушка матеріалу. Втрата маси зразка склала 42-44 % через 3 хв процесу та 45-47% – через 10 хв, коефіцієнт спучення – 2,2-2,3; середня густина – 330-350 кг/м<sup>3</sup>. Так як коефіцієнт спучення при даному режимі нижче показника попереднього дослідження, а втрата маси навпаки значно зросла, можна зробити висновок, що в середовищі вакууму недоцільно отримувати матеріал, оскільки в його структурі відбуваються конкуруючі процеси масопередачі води з її випаровуванням, що призводить до втрат зв'язаної води і зменшення здатності РСК до поризації, та у більшій мірі відбувається сушіння матеріалу ніж його спучення.

Наступний дослід проводили при атмосферному тиску (рис. 3, кр. 1). Пусковий тиск процесу склав 100 кПа, потужність 650 Вт. Так як при перевищенні тиску понад 100 кПа всередині установки при потужності 650 Вт магнітрон автоматично відключається, тиск тримається на рівні ~ 80 кПа. На першій же хвилині процесу відбувається різке підвищення температури до 85-90 °С, яка далі повільно збільшується до 115-120 °С до 7 хв процесу і далі не змінюється. Цей період характеризується найбільш інтенсивним процесом спучення. В результаті втрата маси зразка склала 50-52 %, коефіцієнт спучення – 2,8-3,0; середня густина – 220-240 кг/м<sup>3</sup>.

Виходячи з проведених досліджень можна зробити висновок, що для процесу спучення композиційних матеріалів при потужності 650 Вт, незалежно від тиску процесу, спучення характеризується двома яскраво вираженими періодами – періодом інтенсивного спучення і періодом сушки зразка. Перший період характеризується різким підвищенням температури (інтенсивний процес пароутворення вільної і адсорбційної води), а другий – або її виходом на постійне значення, або її поступовим зниженням і виходом на постійний рівень коли вся вода видалена.

Технологічні параметри процесу поризації композиційних матеріалів під дією НВЧ випромінювання зведені в таблицю 1

Таблиця 1

**Параметри процесів спучення і характеристика композиційних матеріалів**

Потужність НВЧ випромінювання, Вт	Тиск процесу, кПа	Кількість газоутворювача, мас/ч	Максимальна температура, °С	Час максимальної втрати маси, хв	Втрати маси, %	Середня густина, кг/м <sup>3</sup>	Коефіцієнт спучення
500	~10	0	110-115	10	25-27	470-490	1,4-1,5
500	~10	10	100-110	3	23-25	410-430	2,4-2,5
500	~10	10	90-100	10	35-37	270-290	2,6-2,8
500	~80	10	90-95	3	20-22	400-420	2,0-2,2
обертання зразка							
650	~10	10	90-95	3	42-44	330-350	2,2-2,3
650	~80	10	115-120	7	50-52	220-240	2,8-3,0
обертання зразка							



З даних таблиці видно, що оптимальними умовами для отримання композиційних ТІМ є: вихідна потужність НВЧ-установки 650 Вт, обертання зразка, пусковий тиск 100 кПа, тиск протягом процесу ~ 80 кПа.

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

На підставі проведених досліджень були визначені оптимальні технологічні параметри процесу поризації рідинноскляних композицій, а саме: вихідна потужність установки – 650 Вт, атмосферний тиск, температура при цьому тримається на рівні 115-120 °С, тривалість процесу 7–10 хв. Дана НВЧ-технологія дозволяє отримати композиційні теплоізоляційні матеріали при більш низьких енергетичних витратах на їх виробництво в порівнянні з конвективним нагрівом, оскільки температура є більш ніж вдвічі нижчою за відомі процеси, а тривалість майже вдесятеро менше.

### Література

1. Морозов А.П. Пенобетоны и другие теплоизоляционные материалы. Магнитогорск, 2008. 103 с.
2. Малявский Н.И. Щелочно-силикатные утеплители - химические основы производства. Российский химический журнал. 2003. № 4. С. 39-45.
3. Storozhenko D., Dryuchko O., Jesionowski T. Thermal Insulation Materials With High-Porous Structure Based on the Soluble Glass and Technogenic Mineral Fillers. International Journal of Engineering & Technology. (2018). № 7 (3.2). P. 692-697. URL: file:///C:/Users/NB/Downloads/Thermal\_Insulation\_Materials\_With\_High-Porous\_Stru.pdf
4. Isamu Iwami, Shingo Kimura, Toshio Iwasa. Foamable glass composition and glass foam. Pat. US 4347326A: МПК С03С 11/00; С03С 3/04; С03С 3/08; С03С 3/10. 31.08.1982, 10 р. URL: <https://patents.google.com/patent/US4347326A/en>.
5. Ayadi A., Stiti N., Benhaoua F., Boumchedda K., Lerari Y. Elaboration And Characterization Of Foam Glass Based On Cullet With Addition Of Soluble Silicates. AIP Conference Proceedings, Published Online: 27 January 2011. URL: <https://doi.org/10.1063/1.3552401>.
6. Ivanov K. S. Preparation and Properties of Foam Glass-ceramic from Diatomite. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. 2018, № 33. P. 273–277. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11595-018-1817-8>.
7. Пробоподготовка в микроволновых печах: Теория и практика. Под ред. Г.М. Кингстона, Л.Б. Джесси. М. : Мир, 1991. 336 с.

### References

1. Morozov A.P. Penobetonny i drugie teploizolyacionnyye materialy. Magnitogorsk, 2008. 103 s.
2. Malyavskij N.I. Shelochno-silikatnye utepliteli - himicheskie osnovy proizvodstva. Rossijskij himicheskij zhurnal. 2003. № 4. S. 39-45.
3. Storozhenko D., Dryuchko O., Jesionowski T. Thermal Insulation Materials With High-Porous Structure Based on the Soluble Glass and Technogenic Mineral Fillers. International Journal of Engineering & Technology. (2018). № 7 (3.2). R. 692-697. URL: file:///C:/Users/NB/Downloads/Thermal\_Insulation\_Materials\_With\_High-Porous\_Stru.pdf
4. Isamu Iwami, Shingo Kimura, Toshio Iwasa. Foamable glass composition and glass foam. Pat. US 4347326A: MPK C03C 11/00; C03C 3/04; C03C 3/08; C03C 3/10. 31.08.1982, 10 r. URL: <https://patents.google.com/patent/US4347326A/en>.
5. Ayadi A., Stiti N., Benhaoua F., Boumchedda K., Lerari Y. Elaboration And Characterization Of Foam Glass Based On Cullet With Addition Of Soluble Silicates. AIP Conference Proceedings, Published Online: 27 January 2011. URL: <https://doi.org/10.1063/1.3552401>.
6. Ivanov K. S. Preparation and Properties of Foam Glass-ceramic from Diatomite. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. 2018. № 33. R. 273–277. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11595-018-1817-8>.
7. Probopodgotovka v mikrovolnovyh pechah: Teoriya i praktika. Pod red. G.M. Kingstona, L.B. Dzhessi. M. : Mir, 1991. 336 s.

СИНЮК Олег

Хмельницький національний університет

КРАВЧУК Ольга

Хмельницький національний університет

КРАВЧУК Андрій

Хмельницький національний університет

МАГДІН Віктор

Хмельницький національний університет

ЗОЛОТЕНКО Іван

Хмельницький національний університет

## МОДЕЛЬ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ПОЛІМЕРНОГО МАТЕРІАЛУ

В статті розглядається модель пластичної деформації полімерного матеріалу в міжвалковому просторі перероблювального обладнання в умовах стиску і зсуву, на основі якої встановлено, що всебічний тиск, який створюється в полімері робочими органами перероблювального обладнання, викликає лише в'язкопружну деформацію, а тому пластичного ущільнення матеріалу в процесі його руйнування не відбувається.

Числове моделювання пластичної деформації полімерних відходів між валками профілю Рело дозволило отримати розподіл дотичних напружень по площині полімерного матеріалу, за яким побудовано графічні залежності напруження від швидкості деформації, яка визначається коловими швидкостями та радіусами валків.

Ключові слова: полімерний матеріал, напружено-деформований стан, пластична, в'язкопружна деформація, руйнування, напруження, валки.

SYNYUK Oleg, KRAVCHUK Olga, KRAVCHUK Andrii, MAGDIN Victor, ZOLOTENKO Ivan  
Khmelnitskyi National University

### MODEL OF PLASTIC DEFORMATION OF POLYMER MATERIAL

The article considers a model of plastic deformation of polymer material in the inter-roll space of the processing equipment under conditions of compression and shear, based on which it is established that the all-round pressure created in the polymer by the working bodies of the processing equipment causes only viscoelastic deformation, and therefore plastic compaction of the material in the process of its destruction does not occur.

Numerical modeling of the plastic deformation of polymer waste between the rolls of the Relo profile made it possible to obtain the distribution of tangential stresses on the plane of the polymer material, based on which graphical dependences of the stress on the rate of deformation, which is determined by the circular speeds and radii of the rolls, are constructed.

**Key words:** polymer material, stress-strain state, plastic, viscoelastic deformation, failure, stress, rolls.

#### Постановка проблеми у загальному вигляді

##### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Запропонувати модель пластичної деформації полімерного матеріалу в міжвалковому просторі перероблювального обладнання в умовах стиску і зсуву, на основі якої встановити, що всебічний тиск, який створюється в полімері робочими органами перероблювального обладнання, викликає лише в'язкопружну деформацію, а тому пластичного ущільнення матеріалу в процесі його руйнування не відбувається.

При моделюванні процесу деформації полімерного матеріалу між валками в умовах стиску і зсуву будемо рахувати, що тіло однорідне та трансверсально ізотропне (рис. 1). В будь-якому перерізі  $y = const$  буде мати місце однаковий напружено-деформований стан. Компоненти напруження будуть залежати від  $x$  та  $z$ , причому  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{zy}$  дорівнюють нулю через відсутність в тих площинах деформацій зсуву.

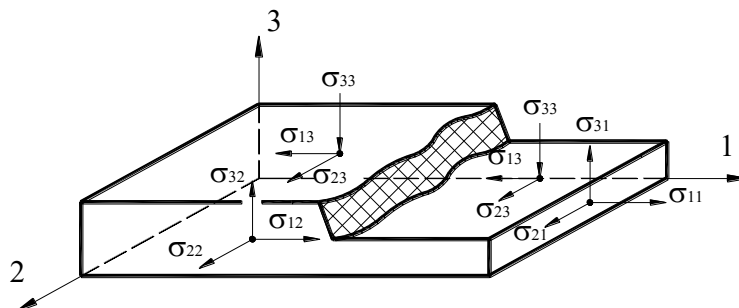


Рис. 1. Пластична деформація нескінченно малого об'єму полімеру

На відміну від теорії пружності, де наведені достатні умови для вирішення плоских задач, в теорії пластичності необхідно вводити додаткові спрощення.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Перше спрощення – будемо використовувати схему тільки пластичного тіла. Звичайно, дане припущення вносить певну похибку, але вирішення пружно-пластичної задачі є досить складним завданням і для нашого випадку, де мають місце пластичні деформації, достатньо концепції пластичного тіла.

Задача деформації полімерного матеріалу між валками профілю Рело передбачає, що пластична деформація локалізована поблизу контактних площин. Технологічні задачі такого типу відносяться до задач пластичного усталеного руху з великими деформаціями [1]. Крім того, мета наших досліджень передбачає знаходження граничних напружень зсуву, що, в свою чергу, дозволяє використовувати вибрану раніше концепцію пластичного тіла.

Для моделювання процесу пластичної деформації полімерного матеріалу скористаємося відомими з теорії пружності формулами [1]. Рівняння руху матеріалу під впливом напружено-деформованого стану в тензорній формі запишемо таким чином:

$$\sigma_{nm} + \rho \cdot F_n = \rho \cdot \frac{\partial u_n}{\partial t}, \quad (1)$$

з якого отримаємо рівняння рівноваги:

$$\sigma_{nm} + \rho \cdot F_n = 0, \quad (2)$$

де  $\sigma_{nm}$  – компоненти тензора напруження, Па;  $u_n$  – компоненти вектора швидкості, м/с, які розраховуються за таким рівнянням:  $u_n = \frac{dx_n}{dt}$ ;  $\rho$  – щільність полімерного матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;  $F$  – масові сили, Н.

Додамо умову нерозривності:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \cdot u_n = 0. \quad (3)$$

Припустимо, що полімерний матеріал, який оброблюється між валками, є симетричним стосовно парності тангенціальних напружень:  $\sigma_{nm} = \sigma_{mn}$ .

Задамо також деформації та швидкості їх зміни співвідношеннями Коши:

$$\varepsilon_{nm} = \frac{1}{2}(x_n + x_m), \quad (4)$$

$$d\varepsilon_{nm} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial}{\partial x_m} dx_n + \frac{\partial}{\partial x_n} dx_m \right). \quad (5)$$

Для дослідження чисто пластичної деформації полімерного матеріалу між валками в умовах стиску і зсуву будемо використовувати моделі пластичності, відповідно до яких швидкість деформації в процесі обробки матеріалу будемо знаходити як суму швидкостей високоеластичної та пластичної деформацій:

$$d\varepsilon_{nm} = d\varepsilon_{nm}^e + d\varepsilon_{nm}^{nl}. \quad (6)$$

Будь-яку непружну і невисокоеластичну деформацію будемо вважати пластичною незалежно від виникнення.

В процесі пластичної деформації напружено-деформований стан, що виникає в полімерному матеріалі, представимо у такому вигляді:

$$\sigma_{nm} = (\lambda \cdot \xi \cdot \delta_{nm} + 2\mu \cdot e_{nm}^{nl}) \cdot t, \quad (3.57)$$

де  $\lambda$ ,  $\mu$  – коефіцієнти Ламе, Па;  $\sigma_{nm}$  та  $e_{nm}$  – компоненти тензора напружень та тензора швидкості деформацій, с<sup>-1</sup>;  $\delta_{nm}$  – символ Кронекера;  $\xi$  – швидкість зміни відносної об'ємної деформації, с<sup>-1</sup>;  $t$  – час дії валків на полімерний матеріал, с.

Як відомо з [1], добуток коефіцієнтів Ламе на час деформування полімерного матеріалу дорівнює в'язкості:  $\eta_{zc} = \mu \cdot t$ ,  $\eta_{cm} = \lambda \cdot t$ .

Вплив температури на активність руху сегментів ланцюгів макромолекул, а отже на напружено-деформований стан в полімерному матеріалі врахуємо за допомогою рівняння Арреніуса:

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{\frac{U}{RT}}, \quad (8)$$

де  $U$  – енергія активації в'язкої течії, Дж;  $\eta_0$  – постійна, яка може бути визначена з умови  $T > T_{nl}$ , де  $T_{nl}$  – температура плавлення полімеру, °С.

Запишемо рівняння (7) таким чином:

$$\sigma_{nm} = \sigma \cdot \delta_{nm} + s_{nm}, \quad (9)$$

де  $\sigma \cdot \delta_{nm}$  – компоненти кульового тензора напружень, що описують зміну об’єму без зміни форми, тобто ущільнення матеріалу, Па;  $S_{nm}$  – компоненти девіатора тензора напружень, що описують зміну форми тіла без зміни його об’єму, Па;  $\sigma$  – гідростатичний тиск, Па;  $\delta_{nm}$  – символ Кронекера.

Таким чином, будемо вважати, що в процесі пластичної деформації полімерного матеріалу між валками відбувається деформація елементарного об’єму матеріалу, на який діє гідростатичний тиск, і деформація зсуву. Згідно з [1], запишемо рівняння, яке пов’язує зміну девіатора напружень і швидкості деформацій в такому вигляді:

$$ds_{nm} = G \cdot (2e_{nm} - 3 \cdot \xi \cdot \delta_{nm}), \quad (10)$$

де  $G$  – вязкопружний модуль зсуву, Па.

Можливість обертання елементів середовища як цілого будемо враховувати виразом Яумана [1]:

$$ds_{nm} = s_{nm} - s_{np} \cdot \omega_{mp} - s_{mp} \cdot \omega_{np}, \quad (11)$$

де  $\omega_{mp}$  – компоненти тензора відносних швидкостей обертання.

Швидкість зміни всебічного тиску на матеріал визначимо з такого рівняння:

$$d\sigma = -K \frac{\Delta V}{V_0}, \quad (12)$$

де  $V_0$  – об’єм полімерного матеріалу до деформації, м<sup>3</sup>;  $\Delta V$  – зміна об’єму полімеру, м<sup>3</sup>;  $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$  –

модуль об’ємного розширення (стиснення), Па;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона (для нестисливих матеріалів  $\nu = 0,5$ ).

Перепишемо рівняння (12) з урахуванням впливу зміни температури:

$$d\sigma = -K \frac{\Delta V}{V_0} + \alpha \cdot K \cdot dT, \quad (13)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт теплового розширення, °C<sup>-1</sup>;  $dT$  – зміна температури матеріалу, °C.

Визначимо компоненти тензорів швидкостей відносної деформації та обертання з таких рівнянь:

$$e_{nm} = \frac{1}{2}(u_n + u_m), \quad (14)$$

$$\omega_{nm} = \frac{1}{2}(u_n - u_m). \quad (15)$$

Розглянемо окремо всебічне стискування полімеру, що приводить до зміни його об’єму (ущільнення), а отже й зміцнення, і пластичну деформацію зсуву при постійному об’ємі (вважаємо, що матеріал нестисливий). Спочатку змодельємо процес зміцнення полімеру, що можливий при дії лише гідростатичного тиску на полімер.

Стан середовища, що відповідає пружним напруженням, обмежений поверхнею, при досягненні якої починається пластичне деформування та руйнування полімерного матеріалу. Рівняння поверхні граничного стану запишемо в такий спосіб:

$$f(\sigma_{nm}) = 0. \quad (16)$$

Граничну поверхню зручно представляти в системі координат інваріантів тензора напруження – по вісі  $x$  будемо відкладати гідростатичний тиск, а по вісі  $y$  будемо відкладати інтенсивність дотичних напружень, що з’являються в результаті всебічного стиснення елементарного об’єму полімерного матеріалу. З урахуванням сказаного вище та рівняння (9), перепишемо вираз (16) таким чином:

$$f(\sigma, \tau) = 0, \quad (17)$$

де  $\sigma$  – гідростатичний тиск на елементарний об’єм полімерного матеріалу, Па;

$\tau$  – інтенсивність дотичних напружень, Па.

Згідно теорії пластичної течії [1, 2, 3], пластична деформація визначається так (цей зв’язок встановлює теорема Мізеса):

$$d\varepsilon_{nm}^{pl} = d\lambda \frac{\partial g(\sigma_{nm})}{\partial \sigma_{nm}}, \quad (18)$$

де  $d\lambda$  – деякий множник;  $\partial g(\sigma_{nm})$  – пластичний потенціал, який можна визначити з такого рівняння [4, 5]:

$$\partial g(\sigma_{nm}) = -\beta_1 \sigma + \kappa \tau, \quad (19)$$

де  $\beta_1 = \sin \psi$ ,  $\kappa = \cos \psi$  – параметри;  $\psi$  – кут нахилу поверхні пластичного потенціалу.

Граничну поверхню в області зсувних деформацій на інтервалі тисків  $\sigma_h \leq \sigma \leq \sigma_0$ , згідно з [1], опишемо таким рівнянням:

$$f_1(\sigma, \tau) = \tau - \alpha \cdot \sigma - \beta = 0, \quad (20)$$

де  $\tau = \sqrt{0,5 \cdot s_{nm} s_{nm}}$  – інтенсивність тангенціальних напружень, Па;  $\sigma_h$  – тиск, при якому відбувається крихке руйнування (знаходимо з експерименту, шляхом визначення допустимого напруження під час стиску полімеру при температурі склування), Па;  $\sigma_0$  – тиск, при якому починається ущільнення матеріалу, Па;  $\alpha$ ,  $\beta$  – параметри, які описують поверхню текучості Друкера-Прагера і можуть бути визначені з рівнянь, що наведені нижче.

Якщо конус Друкера-Прагера вписаний в поверхню Кулона-Мора, то:

$$\alpha = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}, \quad \beta = \frac{6 \cdot c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}, \quad (21)$$

де  $C$  – перетин кривої критерію Кулона-Мора з віссю  $\tau$ , а  $\varphi$  – кут нахилу кривої критерію міцності Кулона-Мора.

Якщо конус Друкера-Прагера описує поверхню Кулона-Мора, то:

$$\alpha = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin \varphi)}, \quad \beta = \frac{6 \cdot c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin \varphi)}. \quad (22)$$

Граничну поверхню в області зсувних деформацій на інтервалі тисків  $\sigma > \sigma_0$ , згідно до [4], опишемо таким рівнянням:

$$f_2(\sigma, \tau) = \frac{(\sigma - \sigma_0)^2}{A^2} + \frac{\tau^2}{B^2} - 1 = 0, \quad (23)$$

де  $A = \sigma_1 - \sigma_0$ ,  $B = c + \alpha \cdot \sigma_0$  – коефіцієнти внутрішнього тертя полімерного матеріалу.

Так як ми описуємо полімерний матеріал під впливом напружень стиску і зсуву, то можна говорити про в'язке середовище, тоді  $\varphi = \pi/2$  і модель Кулона-Мора перетворюється на модель в'язкого середовища Ренкіна:

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{3}}, \quad \beta = 0, \quad A = \sigma_1 - \sigma_0, \quad B = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \quad (24)$$

Тоді рівняння (20) та (23), з урахуванням виразів (24), переписуться таким чином:

$$f_1(\sigma, \tau) = \tau - \frac{\sigma}{\sqrt{3}} = 0. \quad (25)$$

$$f_2(\sigma, \tau) = \frac{(\sigma - \sigma_0)^2}{(\sigma_1 - \sigma_0)^2} + 3 \frac{\tau^2}{\sigma_0^2} - 1 = 0. \quad (26)$$

Складність моделювання деформації полімерних матеріалів за межами пружності полягає у тому, що поверхні (25) або (26), при досягненні яких починається розвиватися пластична деформація, змінюються в процесі цієї деформації. Крім того, під час пластичної деформації змінюється не тільки гранична поверхня, але й співвідношення між приростом зсувної і об'ємної частинами пластичної деформації. Через це моделювання пластичної деформації має передбачати визначення параметрів, які є функціями від накопиченої повної пластичної деформації (об'ємного стискання та зсувного руйнування).

В процесі пластичної деформації відбувається зміцнення полімерного матеріалу в результаті всебічного стиску. Згідно до [5] рівняння, які дозволяють описати зміну поверхні під час пластичної деформації, можна представити таким чином:

$$y(\gamma^{nl}) = y_0 \left[ 1 + h \cdot \left( \frac{2\gamma^{nl}}{\gamma^g} - \left( \frac{\gamma^{nl}}{\gamma^g} \right)^2 \right) \right], \quad (27)$$

де  $h = \sigma/(\sigma_1 - \sigma_0)$  – коефіцієнт зміцнення матеріалу;  $2 \cdot \gamma^{nl}/\gamma^g$  – параметр, що враховує зміцнення матеріалу;  $(\gamma^{nl}/\gamma^g)^2$  – параметр, що враховує послаблення матеріалу;  $y(\gamma^{nl})$  – функція, що визначає зміну граничної поверхні в залежності від пластичної деформації зсуву  $\gamma^{nl}$ ;  $y_0$  – значення цієї функції на граничній поверхні, яка відповідає пружним напруженням;  $\gamma^g$  – критична пластична деформація, після досягнення якої починається послаблення матеріалу.

Кожного разу після досягнення критичної деформації необхідно змінювати параметри залежності (27), враховуючи той факт, що послаблення відбувається повільніше, чим зміцнення.

Вплив тиску на граничну пластичну деформацію полімерного матеріалу, який матеріал витримує до початку послаблення структури полімерного матеріалу, згідно з [1], визначається з такого рівняння:

$$\gamma^g = \gamma_0^g \cdot \left( 1 + w \frac{\sigma}{\sigma^g} \right), \quad (28)$$

де  $\gamma_0^g$  – пластична деформація початку пластичного руйнування полімеру при відсутності ущільнення (гідростатичний тиск відсутній, тобто  $\sigma = 0$ );  $w$  та  $\sigma^g$  – критичне дотичне напруження, при якому матеріал починає руйнуватися, Па;  $w$  – параметр, який приймається рівним в межах діапазону від 0,5 до 1,5.

Рівняння (28) дозволяє описати перехід від в'язкопружної до пластичної деформації без ущільнення полімерного матеріалу (або у випадку, коли полімер був вже ущільнений, тобто орієнтований).

У зв'язку із низькою міцністю орієнтованих полімерів на розрив  $\sigma_h$  у поперечному до орієнтації напрямку, обмежимо граничну поверхню областю в'язкопружної деформації (27). Обмеження граничної поверхні дії руйнівних зсувних напружень згідно з [6, 7] визначимо з такого рівняння:

$$\sigma^g = \frac{\sigma^0}{3} \cdot \left[ \left( \gamma^{nn} / \gamma^g \right)^2 - 1 \right], \quad (29)$$

Зміну міцності навантаженого протягом певного часу полімерного тіла визначимо за допомогою функції накопичення пошкоджень [8]

$$P(\sigma_{nm}, t) = \int \frac{(s - s_0)^2}{(s^h)^2 t} dt \quad \text{для } s > s_0, \quad (30)$$

де  $S$  – максимальне значення зі всіх компонентів девіатора тензора напружень  $S_{nm}$ ;  $S_0$  – значення напруження, при якому починається зміна форми полімерного тіла;  $t$  – час деформації полімеру.

З рівняння (27), використовуючи вираз (30), отримаємо рівняння, що описує зміцнення та послаблення полімеру, з врахуванням часу його обробки у валковому пристрої:

$$y(\gamma^{nn}) = y_0 \left[ 1 + h \cdot \left( \frac{2\gamma^{nn}}{\gamma^g} - \left( \frac{\gamma^{nn}}{\gamma^g} \right)^2 \right) \right] \cdot \left[ 1 - \int \frac{(s - s_0)^2}{(s^h)^2 t} dt \right]. \quad (31)$$

Застосування отриманих вище співвідношень дозволяє розв'язувати задачі, що описують складний напружено-деформований стан, та досліджувати розвиток деформації і процесів руйнування за рахунок зниження міцності протягом певного періоду часу при постійному зовнішньому навантаженні.

Слід зауважити, що ущільнення, яке відбувається під час пластичної деформації, впливає на орієнтацію або переорієнтацію надмолекулярної структури полімерного матеріалу, але, в цьому випадку, матеріал буде послаблятися в поперечному до орієнтації напрямку. Вид функцій, що описують зміцнення і руйнування полімерного матеріалу, підбирається, виходячи із даних відповідних експериментальних досліджень.

Згідно теорії течії матеріалів під дією навантажень [1] пластична деформація розвивається по нормалі до поверхні пластичного потенціалу. У випадку, якщо в рівняння пластичного потенціалу входить перший інваріант напружень (або гідростатичний тиск), то пластична деформація супроводжується зміною об'єму, якщо другий інваріант, то деформація супроводжується зміною форми полімерного тіла при зсуві.

Наведена вище математична модель процесу пластичної деформації полімерного матеріалу між валками перероблювального пристрою була розрахована за допомогою скінченнорізницевого методу [9]. Числове моделювання напружено-деформованого стану здійснювалося послідовними кроками протягом певного періоду часу при зміні навантаження. Для розрахунку навантаження за межами в'язкопружності була застосована процедура миттєвого приведення напружень до поверхні текучості [7, 8]. Приведення напружень здійснювалося з врахуванням часу релаксації.

Згідно схем розрахунків з використанням скінченнорізницевого методу, що наведені в роботах [9], всі диференціальні рівняння та граничні умови записуються у скінченних різницях на сітці фіксованих комірок, що покриває область полімерного матеріалу. Час також розбивається на скінченне число інтервалів.

Через громіздкість наведемо тільки основні рівняння, що описують напружено-деформований стан в полімерному матеріалі. Перший етап розрахунків після визначення нових координат точок розрахункової схеми і знаходження повних приростів деформації полягає у попередньому розрахунку напружень за рівняннями теорії пружності. На кожному розрахунковому кроці приріст пластичної деформації буде пропорційним різниці між напруженнями, визначеними за рівняннями теорії пружності, і напруженнями, що відповідають граничній поверхні текучості. Позначимо попередньо розраховані напруження штрихом.

$$\begin{aligned} s_{nm}^{(k+1)'} &= s_{nm}^{(k)} + \Delta s_{nm}^{(k+1)'}, \\ \sigma^{(k+1)'} &= \sigma^{(k)} + \Delta \sigma^{(k+1)'}. \end{aligned} \quad (32)$$

В просторі напружень напружений стан буде представлено у вигляді певної  $A$  точки з координатами  $(\sigma^{(k+1)'}, \tau^{(k+1)'})$ , де  $\tau^{(k+1)'}$  – інтенсивність дотичних напружень (рис. 6). Після цього перевіряємо, знаходиться ця точка  $A$  в середині граничної поверхні чи вийшла за її межі. Цим ми визначаємо, чи почав полімерний матеріал під впливом напружено-деформованого стану пластично деформуватися. Перевірка здійснюється підстановкою розрахованих за допомогою рівняння (32) значень напружень у вираз (20), що визначає граничну поверхню пружної деформації. У випадку, якщо вираз (20) після підстановки в нього значень напружень дасть результат, що менший або дорівнює нулю, то можна говорити, що полімерне тіло знаходиться в пружному стані і слід використовувати для розрахунку залежності, що описують пружну деформацію. Після чого знову визначаємо напруження, але вже на іншому інтервалі часу. У випадку, якщо результат, отриманий за рівнянням (14) буде більшим за нуль, то це означає, що точка  $A$  знаходиться за межами поверхні, що відповідає пружним деформаціям, а це означає, що полімер перебуває в пластичному стані і відбувається його зміцнення. У цьому випадку використовуємо залежності, що описують пластичне ущільнення полімеру.

Змоделюємо ущільнення полімеру в результаті його деформації в перероблювальному обладнанні.

Розміри полімерних відходів, що деформуються між валками перероблювального обладнання (рис. 2), та їх зміна залежать від конструктивних параметрів цього обладнання. Враховуючи рівняння (31), при деформації полімеру у валкових пристроях, що розглядаються, запишемо:

$$\xi = 1 - \frac{l_2 h_2}{l_1 h_1}, \quad (33)$$

де  $l_1, l_2$  – довжина, відповідно, до і після деформації полімеру, м;  $h_1, h_2$  – товщина, відповідно, до і після деформації полімеру, м.

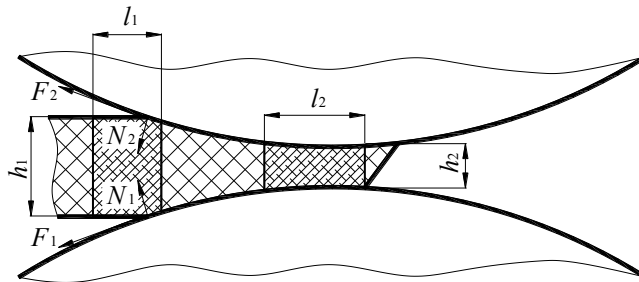


Рис. 2. Деформація полімерного матеріалу між валками обладнання

Виразивши відносну зміну розмірів певного об'єму полімеру через відносну деформацію стиску, що створюється робочими органами перероблювального обладнання, та підставивши ці вирази в рівняння (12) з урахуванням формули (33), отримаємо:

$$d\sigma = -K \cdot (1 - (1 + d\varepsilon_2) \cdot (1 - \nu \cdot d\varepsilon_2)), \quad (34)$$

де  $\varepsilon_2$  – деформація стиску;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона для певного полімеру.

Враховуючи рівняння (32), запишемо рівняння (34) в такому вигляді:

$$\sigma^{(k+1)} = -K \cdot (1 - (1 + \varepsilon_2^{(k+1)}) \cdot (1 - \nu \cdot \varepsilon_2^{(k+1)})) + \Delta\sigma^{(k+1)}, \quad (35)$$

де  $k$  – номер часового інтервалу, на які, згідно до гіпотези квазістаціонарності, розбивається весь процес деформації полімерного матеріалу [6, 9].

Граничні значення деформації стиску  $\varepsilon_2$  залежать від конструктивних параметрів робочих органів перероблювального обладнання та технологічних режимів процесу переробки полімерних відходів. При моделюванні пластичного ущільнення полімерних відходів для отримання певного діапазону значень максимального тиску, що створюється робочими органами в полімері, приймалися різні граничні значення деформації стиску. Для цього параметри обладнання варіювалися в таких межах: міжвалковий простір – від  $0,1 \cdot 10^{-3}$  м до  $1,0 \cdot 10^{-3}$  м; діаметр зубчастих валків та базовий діаметр валків профілю Рело – від 0,05 м до 0,2 м; ексцентриситет валків Рело приймався рівним  $(0,2 \dots 0,5) \cdot R_0$ , де  $R_0$  – базовий радіус валків; швидкість обертання валків – від  $0,001$  с<sup>-1</sup> до  $0,01$  с<sup>-1</sup>. Товщина полімерних відходів приймалася рівною від 0,001 м до 0,005 м (рис. 3).

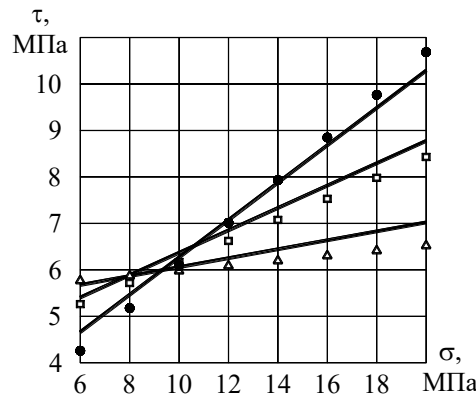


Рис. 3. Залежність інтенсивності дотичних напружень від тиску, що створюється робочим органом в полімері; 1, 2, 3 – граничні поверхні, відповідно, для ПВХ, ПП та ПЕ; Δ, □, ● – точки з координатами  $(\sigma^{(k+1)}, \tau^{(k+1)})$ , визначеними числовим методом, відповідно, для ПЕ, ПП та ПВХ

З рис. 3 видно, що для різних полімерних матеріалів інтенсивність дотичних напружень різна і залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу. При цьому для поліпропілену (ПП) і поліетилену (ПЕ) координати точок не виходять за межі граничної поверхні в'язкопружної деформації, для полівінілхлориду (ПВХ) координати точок лежать на межі або трохи перевищують її, що не є значущим фактором. Отже, всебічний тиск, що створюються в полімері робочими органами перероблювального обладнання, викликає лише в'язкопружну деформацію, тому ущільнення не відбувається. У зв'язку з цим в дисертаційній роботі моделюється вплив на полімерний матеріал лише напружень зсуву, що створюються валками профілю Рело, як наслідок форма полімеру змінюється аж до його руйнування, при цьому об'єм лишається незмінним.

Відповідно до інкрементальної теорії пластичності, швидкість пластичної деформації пропорційна девіатору напружень, який є постійним:

$$e_{nm} = d\lambda \cdot s_{nm}, \tag{36}$$

де  $d\lambda$  – множник пропорційності в диференціальній формі.

Запишемо рівняння Ламе для плоского в'язкого середовища таким чином:

$$\partial\tau/\partial x = \mu \cdot \nabla^2 u; \quad \partial\tau/\partial y = \mu \cdot \nabla^2 v, \tag{37}$$

де  $\mu$  – коефіцієнт Ламе при чистому зсуві;  $u, v$  – компоненти вектора швидкості пластичної деформації, м/с;  $\tau$  – дотичні напруження, що викликають пластичну деформацію, Па.

Враховуючи модель Кельвіна для в'язкопружних деформацій полімеру  $\tau = \mu \cdot t \cdot \partial\varepsilon/\partial t$  ( $\varepsilon$  – деформація полімеру), умову незмінності об'єму:

$$D = \partial u/\partial x + \partial v/\partial y = 0, \tag{38}$$

де  $D$  – дивергенція швидкості пластичної деформації, та використовуючи гіпотезу квазістаціонарності, перепишемо рівняння (3.87) таким чином:

$$\begin{aligned} \partial\tau/\partial x &= \eta \cdot \left[ \partial^2 u/\partial x^2 + \partial^2 u/\partial y^2 \right], \\ \partial\tau/\partial y &= \eta \cdot \left[ \partial^2 v/\partial x^2 + \partial^2 v/\partial y^2 \right], \end{aligned} \tag{39}$$

де  $\eta = \mu \cdot t$  – динамічна в'язкість полімерного матеріалу, Па·с.

Для визначення напруження зсуву  $\tau$  скористаємося рівнянням Пуассона:

$$\nabla^2 \tau = \partial^2 \tau/\partial x^2 + \partial^2 \tau/\partial y^2. \tag{40}$$

Диференціюючи перше і друге рівняння системи (3.89), відповідно, по  $x$  і  $y$  та підставляючи їх у рівняння (40), враховуючи рівняння (38), отримаємо рівняння Лапласа для напруження зсуву:

$$\nabla^2 \tau = -u \cdot \partial D/\partial x - v \cdot \partial D/\partial y + \eta \cdot \nabla^2 D = 0. \tag{41}$$

Отже, система рівнянь (39), рівняння (41) є основними рівняннями для визначення полів швидкості деформації та напружень зсуву. Додамо до них граничні умови в точках дотику полімеру з валками та умову нестисливості (38).

Наведена вище математична модель процесу пластичної деформації полімеру між валками перероблювального пристрою була розрахована за допомогою скінченнорізницевого методу, згідно з яким всі диференціальні рівняння та граничні умови записуються у скінченних різницях на сітці фіксованих комірок (рис. 4), що покриває область деформованого полімерного матеріалу. У результаті отримали таку систему рівнянь:



$$\left. \begin{aligned} u_{i,j} &= 0,25 \cdot \left[ u_{i+1,j} + u_{i-1,j} + u_{i,j+1} + u_{i,j-1} - (\tau_{i+1,j} - \tau_{i,j}) \cdot h_g / \eta_{ij} \right] \\ v_{i,j} &= 0,25 \cdot \left[ v_{i+1,j} + v_{i-1,j} + v_{i,j+1} + v_{i,j-1} - (\tau_{i,j+1} - \tau_{i,j}) \cdot h_v / \eta_{ij} \right] \\ \tau_{i,j} &= 0,25 \cdot (\tau_{i+1,j} + \tau_{i-1,j} + \tau_{i,j+1} + \tau_{i,j-1}) \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

де  $h$  – розмір комірки, м.

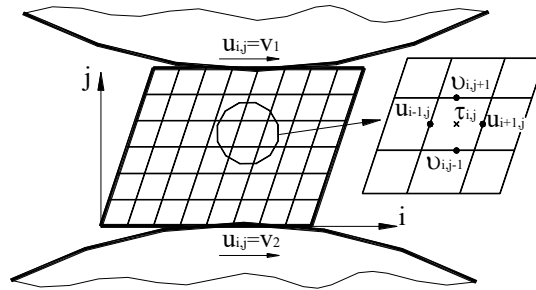


Рис. 4. Сітка фіксованих комірок, що покриває область деформації полімеру між валками перероблювального обладнання

З рис. 4 видно, що з часом горизонтальний розмір комірки  $h_g$  лишається постійним, а вертикальний розмір комірки  $h_v$  змінюється після кожного визначення полів швидкостей деформацій та напружень зсуву. Цю зміну можна врахувати таким чином:

$$h_v = h_g / [\cos(k \cdot \arctg[(v_1 - v_2) / h_2])], \quad (43)$$

де  $h_2$  – товщина затиснутого між валками полімерного матеріалу, м.

Вплив температури полімерного матеріалу на напружено-деформований стан, що створюється в ньому перероблювальним обладнанням, враховується рівнянням (8). Для визначення розповсюдження тепла в полімерному матеріалі, що передається від валків пристрою, скористаємося виразом, який описує зміну температури в деякому двовимірному просторі, тобто рівнянням теплопровідності [9]:

$$\partial T / \partial t = a^2 \cdot (\partial^2 T / \partial x^2 + \partial^2 T / \partial y^2), \quad (44)$$

де  $a$  – коефіцієнт температуропроводності,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $T$  – температура досліджуваного середовища,  $^{\circ}\text{C}$ .

Запишемо рівняння (8) та (44) у формі скінченних різниць в такий спосіб:

$$\left. \begin{aligned} T_{i,j} &= 0,25 \cdot (T_{i+1,j} + T_{i-1,j} + T_{i,j+1} + T_{i,j-1}) \\ \eta_{ij} &= \eta_0 \cdot \exp(U / RT_{ij}). \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

Отже, наведені вище вирази в скінченнорізницькій постановці утворюють повну систему лінійних алгебраїчних рівнянь для визначення всіх невідомих компонентів тензора напружень та деформацій. Для розв'язку таких систем доцільно використовувати ітераційні методи рішення, що враховують спеціальний вигляд таких систем і є зручними для реалізації на ЕОМ [9]. У цій роботі використовується ітераційний метод Лібмана [6, 9] з проведенням послідовних релаксацій.

В результаті числового моделювання отримано розподіл дотичних напружень по площині поліпропіленового зразка внаслідок його деформації між валками профілю Рело.

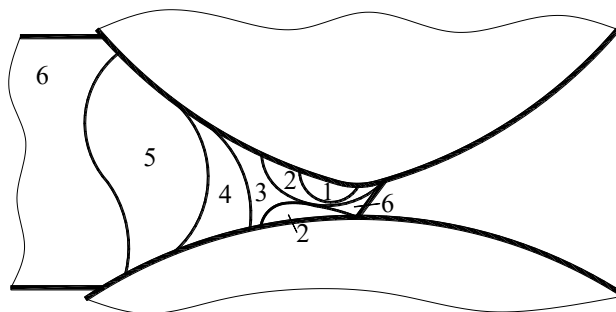


Рис. 4. Розподіл дотичних напружень по площині поліпропіленового зразка внаслідок його деформації між валками профілю Рело:  
 1 – напруження зсуву  $\tau = 1,25$  МПа; 2 –  $\tau = 1,10$  МПа; 3 –  $\tau = 0,86$  МПа;  
 4 –  $\tau = 0,62$  МПа; 5 –  $\tau = 0,50$  МПа; 6 –  $\tau = 0,35$  МПа

З рис. 4 видно, що максимальні напруження зсуву виникають в області 1, яка граничить з верхнім валком. Це пояснюється тим, що в зазначеній області створюються максимальні швидкості деформацій. Отже, варіюючи конструктивними параметрами валків та технологічними параметрами перероблювального

обладнання можна визначити раціональну конструкцію робочих органів обладнання та ефективні режими їх взаємодії із полімерними відходами.

За результатами числового моделювання отримано графіки, що пов'язують швидкість зсувних деформацій, створених робочими органами перероблювального обладнання, з дотичними напруженнями, що виникають в полімерному матеріалі (рис. 5, 6).

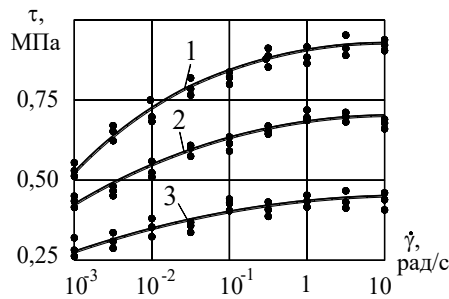


Рис. 5. Залежність зсувного напруження від швидкості деформації поліетилену: 1 – при температурі  $T=20$  °C; 2 –  $T=50$  °C; 3 –  $T=80$  °C

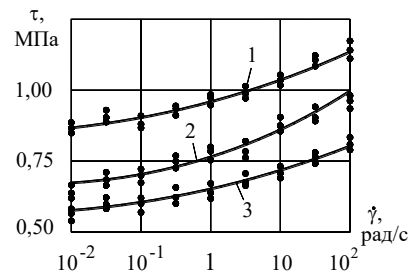


Рис. 6. Залежність зсувного напруження від швидкості деформації поліпропілену: 1 – при тиску, що створюється валками,  $\sigma=5$  МПа; 2 –  $\sigma=3,5$  МПа; 3 –  $\sigma=2$  МПа

З рис. 5, 6 видно, що в результаті збільшення швидкості деформації, яка визначається коловими швидкостями та радіусами валків, збільшується значення максимальних дотичних напружень в матеріалі. Водночас спостерігається суттєвий вплив на величину цих напружень температури матеріалу і тиску, що створюється валками.

#### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Запропоновано модель пластичної деформації полімерного матеріалу в міжвалковому просторі перероблювального обладнання в умовах стиску і зсуву, на основі якої встановлено, що всебічний тиск, який створюється в полімері робочими органами перероблювального обладнання, викликає лише в'язкопружну деформацію, а тому пластичного ущільнення матеріалу в процесі його руйнування не відбувається.

В результаті числового моделювання пластичної деформації полімерних відходів між валками профілю Рело отримано розподіл дотичних напружень по площині полімерного матеріалу, за яким побудовано графічні залежності напруження від швидкості деформації, яка визначається коловими швидкостями та радіусами валків.

#### Література

1. Kachanov L. M. Fundamentals of the Theory of Plasticity (Dover Civil and Mechanical Engineering) / L. M. Kachanov – Dover Publications; Illustrated edition, 2004, – 513 p. (ISBN-13: 978-0486435831).
2. Lurie A. I. Theory of Elasticity (Foundations of Engineering Mechanics) / A. I. Lurie, Alexander Belyaev (Translator) – Springer; 2005th edition, – 1050 p. (ISBN-13: 978-3540245568).
3. Синюк О.М. Експериментальні дослідження руйнування поліетиленових та поліпропіленових плівок / О.М. Синюк // Міжнародний науковий журнал «Проблеми трибології». – Хмельницький : ХНУ, 2017. – № 4 (86). – С. 51-59.
4. Makarov P.V., Stefanov Yu.P., Smolin I.Yu., Cherepanov O.I. Modeling of mechanical behavior of geomaterials on the mesoscale // Int. J. Multiscale Comput. Eng. - 2005. - V. 3. - Iss. 2. - P. 135-148.
5. Stefanov Yu.P. Numerical investigation of deformation localization and crack formation in elastic brittle-plastic materials // Int. J. Fract. - 2004. - V. 128(1). - P. 345-352.
6. Бурмістенков О.П. Числові методи математичного моделювання в створенні технологічної оснастки для лиття виробів з полімерних матеріалів: монографія / О.П. Бурмістенков, Б.М. Злотенко, М.Є. Скиба, О.М. Синюк. – Хмельницький : ПП Ковальський В.В, 2002. – 148 с.10.
7. Eremin Mikhail. Numerical simulation of failure of sandstone specimens utilizing the finite-difference continuous damage mechanics approach / Mikhail Eremin // Procedia Structural Integrity. – 2019. – V. 18. – P. 135-141. (<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.148>).
8. Davoli Elisa. Dynamic perfect plasticity and damage in viscoelastic solids / Elisa Davoli, Tomas Roubicek, Ulisse Stefanelli // ZAMM Journal of applied mathematics and mechanics. – 2019. – V. 99 (7). – 30 p. (DOI: 10.1002/zamm.201800161).
9. Synyuk O. Improvement of Footwear Moulding Machines for the Production of the Advanced Reliability Items / O. Synyuk, M. Skyba // The eleventh world congress in Mechanism and Machine Science (1-4 April 2004). – Tianjin (China) : Editor Tian Huang School of Mechanical Engineering Tianjin University, 2004. – V. 5. – P. 2212-2216.

## References

1. Kachanov L. M. Fundamentals of the Theory of Plasticity (Dover Civil and Mechanical Engineering) / L. M. Kachanov – Dover Publications; Illustrated edition, 2004, – 513 p. (ISBN-13: 978-0486435831).
2. Lurie A. I. Theory of Elasticity (Foundations of Engineering Mechanics) / A. I. Lurie, Alexander Belyaev (Translator) – Springer; 2005th edition, – 1050 p. (ISBN-13: 978-3540245568).
3. Sinyuk O.M. Experimental studies of the destruction of polyethylene and polypropylene films / O.M. Sinyuk // International Scientific Journal "Problems of Tribology". - Khmelnytskyi: KhNU, 2017. - No. 4 (86). - P. 51-59.
4. Makarov P.V., Stefanov Yu.P., Smolin I.Yu., Cherepanov O.I. Modeling of mechanical behavior of geomaterials on the mesoscale // Int. J. Multiscale Comput. Eng. - 2005. - V. 3. - Iss. 2. - P. 135-148.
5. Stefanov Yu.P. Numerical investigation of deformation localization and crack formation in elastic brittle-plastic materials // Int. J. Fract. - 2004. - V. 128(1). - P. 345-352.
6. Burmistenkov O.P. Numerical methods of mathematical modeling in the creation of technological equipment for casting products from polymer materials: monograph / O.P. Burmistenkov, B.M. Zlotenko, M.E. Skiba, O.M. Son of a bitch - Khmelnytskyi: PP Kovalskyi VV, 2002. - 148 p. 10.
7. Eremin Mikhail. Numerical simulation of failure of sandstone specimens utilizing the finite-difference continuous damage mechanics approach / Mikhail Eremin // Procedia Structural Integrity. – 2019. – V. 18. – P. 135-141. (<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.148>).
8. Davoli Elisa. Dynamic perfect plasticity and damage in viscoelastic solids / Elisa Davoli, Tomas Roubicek, Ulisse Stefanelli // ZAMM Journal of applied mathematics and mechanics. – 2019. – V. 99 (7). – 30 p. (DOI: 10.1002/zamm.201800161).
9. Sinyuk O. Improvement of Footwear Moulding Machines for the Production of the Advanced Reliability Items / O. Sinyuk, M. Skyba // The eleventh world congress in Mechanism and Machine Science (1-4 April 2004). – Tianjin (China) : Editor Tian Huang School of Mechanical Engineering Tianjin University, 2004. – V. 5. – P. 2212-2216.

СЛАВІНСЬКА Алла

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0663-9422>e-mail: [tksv@khnu.km.ua](mailto:tksv@khnu.km.ua)

СИРОТЕНКО Оксана

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-6816-6467>e-mail: [syrotenko@email.ua](mailto:syrotenko@email.ua)

## АНАЛІЗ СУЧАСНОГО НАСТИЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ, ЩО ЗАСТОСОВУЄТЬСЯ У ШВЕЙНІЙ ГАЛУЗІ

Розглянуто перелік сучасного настильного обладнання. Наведена порівняльна характеристика його технічних параметрів. Рекомендовані найбільш рентабельні види обладнання для підприємств різної потужності.

Ключові слова: розкрійний цех, розкрійні столи, відрізи лінійки, розмотувачі для рулонів, настільні комплекси.

SLAVINSKA Alla, SYROTENKO Oksana  
Khmelnitskyi National University

### ANALYSIS OF MODERN SPREADING EQUIPMENT APPLIED IN THE SEWING INDUSTRY

The productivity and efficiency of cutting and sewing production is impossible without the use of the latest and most reliable equipment. Ensuring their smooth operation requires the use of high-quality main and supporting equipment. Due to factors such as complex typesetting of skilled workers, high labor costs and the complexity of clothing production, layout and cutting play a critical role. It is the foundation and key that cannot be ignored in the sewing industry. The spreading and cutting department has special importance in garment manufacturing, it is not possible to make a garment in large quantities without a cutting room. The article considers the list of basic and additional spreading equipment for the cutting room. The most common manufacturer brands and companies supplying this equipment on the Ukrainian market are analyzed.

The specified descriptive characteristics of the features of the spreading equipment are given and their latest technological solutions are indicated. The comparative characteristics of the technical parameters of the equipment of various models and manufacturers are given. The cost characteristics of equipment of different price groups (low, medium and high) are presented. The most cost-effective types of equipment are recommended for enterprises of different capacities and types of activity. The expediency of ensuring the consistency of spreading and cutting equipment of the same manufacturer brand at the same enterprise is indicated. The conducted analysis indicates a wide market of modern spreading equipment for cutting department of sewing enterprises, which allows you to freely choose the desired option. The primary factor in this case is the manufacturer's brand and equipment model, and its cost is an equally important factor. They must provide the desired capacity of the enterprise and should be profitable.

Keywords: cutting room, cutting tables, cutting lines, unwinders for rolls, spreading complexes.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Продуктивність та ефективність роботи розкрійного та швейного виробництва неможлива без використання новітнього, якісного та надійного обладнання. Забезпечення безперебійної роботи розкрійного цеху вимагає використання якісного основного та супровідного устаткування. Основне обладнання є базовою складовою виробничого процесу, тому його продуктивність та вартість прямо впливають на рентабельність виробництва. Допоміжне обладнання не бере безпосередньої участі у виробництві, але допомагає забезпечити злагоду організації роботи, тому воно також є його необхідною складовою [1].

Залежно від потужності підприємства процес настилення матеріалів в розкрійному цеху може проводитися вручну та з використанням настільних машин або комплексів. Відповідно для забезпечення ручного розкрою використовують наступне устаткування: розкрійні столи, кінцеві відрізи лінійки, розмотувачі для рулонів. При впровадженні автоматизованого розкрою використовують автоматизовані настільно-розкрійні комплекси (АНРК), до складу яких входять настільні машини та автоматизовані розкрійні агрегати з числовим програмним керуванням (ЧПК) [2].

Широкий перелік сучасного розкрійного обладнання та пристроїв значно полегшують працю і прискорюють технологічний процес. Наявність моделей різної функціональності (а значить і ціни) дозволяє виробникам пропонувати подібне обладнання для швейних підприємств різної потужності [3].

Вивчення асортименту сучасного настильного обладнання на ринку України, аналіз його технічних характеристик та врахування його вартості дозволить визначити та рекомендувати більш рентабельні пропозиції для підприємств різної потужності та виду діяльності.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

У світі величезної кількості новітньої швейної техніки, раціонально використовувати матеріал і здійснювати якісний крій, допомагає настільно-розкрійне устаткування. Воно виконує два основні завдання: здійснюється якісне укладання полотен в настіль, що дозволяє надалі його економічно розкромати; розкромлює матеріал.

Робочий процес розпочинається з укладання полотен заданої величини в готовий настил. Він забезпечується устаткуванням для формування настилу, яке здатне укласти полотна з будь-якого матеріалу і будь-яким способом, надійно фіксувати його і відрізати непотрібні кінцеві залишки [4, 5].

На підприємствах малої потужності, для настилання невеликої кількості полотен застосовують ручне настилання. Його здійснюють на настільно-розкрійних столах, що оснащені кінцевими відрізними та обмежувальними лінійками, затискачами та пристроями для розмотування сувоїв тканини. Великий плюс відрізними лінійками – облік відрізнених шарів тканини для створення настилу потрібної висоти. У середньому, така лінійка збільшує продуктивність праці на 15-20% [6].

На підприємствах середньої потужності застосовують механізоване настилання полотен. Для цього використовують ручні (РНК) або напівавтоматичні (ННК) настільні комплекси [7]. До складу РНК входять розкрійні столи, оснащені поздовжніми бічними рейками для переміщення каретки з рулоном та кінцевими відрізними лінійками з автоматизованим різальним ножом. Довжина настилу і кількість шарів може програмуватися, переміщення каретки відбувається ручним способом, відрізнання полотна та підрахунок кількості шарів матеріалу здійснюється автоматично. Ручні настільні комплекси поєднують в собі доступну ціну, простоту обслуговування та ремонту і тому користуються великим попитом на ринку. Однак, вони поступаються автоматичним і напівавтоматичним моделям за продуктивністю [8].

В напівавтоматичних настільних комплексах довжина настилу і кількість шарів програмується, переміщення каретки здійснюється автоматично, подача і натяг тканини контролюється механічним варіатором, відрізнання полотна здійснюється автоматично. Вони не мають функції автоматичної зупинки при досягненні укладання необхідної кількості шарів, як в автоматичних моделях, але мають лічильник шарів матеріалу. Напівавтоматичний настільний комплекс передбачає, що всі операції з укладання шарів матеріалу на розкрійний стіл і його відрізнання здійснюється за допомогою виконавчих механізмів під контролем людини. Тобто техніка в змозі настелити необхідну кількість шарів матеріалу, але зупинити роботу і увімкнути ніж для відрізнання полотна повинен оператор [9].

На швейних підприємствах великої потужності застосовують автоматизоване настилання полотен за допомогою автоматизованих настільних комплексів (АНК) з мікропроцесорним управлінням для програмування та контролю процесу настилання [7]. Автоматизовані настільні комплекси складаються з ряду агрегованих модулів (машин): модуля завантаження рулонними матеріалами; модуля автоматизованого розрізання тканин на полотна потрібної довжини і їх настилання [3].

Автоматичні настільні комплекси працюють повністю в автоматичному режимі. Вони дають можливість задати: кількість шарів полотен у настилі; потрібну довжину настилу; вид настилання – прямий, зигзагом. Переваги автоматичних моделей: висока продуктивність; велика функціональність; контроль натягу полотна і автоматична зупинка в момент закінчення тканини в рулоні.

Перераховане обладнання має різну конструкцію, види, особливості експлуатації і випускається багатьма іноземними компаніями. Однак, рекомендації щодо доцільності їх використання для підприємств різної потужності та форми власності мало відомі. Швидкість їх роботи та ціновий діапазон є головними факторами, що впливають на рентабельність виробництва і відповідно є ключовими при виборі даного обладнання.

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є вивчення переліку сучасного настільного обладнання та здійснення аналізу його технічних характеристик, надання рекомендацій щодо вибору більш рентабельних пропозицій для швейних підприємств різної потужності.

### Виклад основного матеріалу

#### Характеристика допоміжного устаткування для настилання полотен

**Характеристика розкрійних столів.** Розкрійні столи призначені для виконання настилання та розкрою різних видів матеріалів. Як правило, вони мають конструкцію, яка представлена каркасом та стільницею (рис. 1). Каркас розкрійного столу може складатися із рам, які з'єднані між собою прогонами. Стільниця ж прикріплюється до прогонів за допомогою шурупів. Для забезпечення тривалості експлуатації столу і, зокрема, цілісності робочої поверхні торці стільниці облицьовують рейкою [10]. Настилання здійснюється на настільних столах шириною 1,8...2,2 м, завдовжки 6...20 м і висотою 0,8-0,9 м. Більшість розкрійних столів мають доповнення у вигляді ящиків та полиць у нижній частині – для зручності зберігання крою, кінцевих відходів тощо.

Сучасні розкрійні столи виготовляють за принципом модульної системи (рис. 2), що дає можливість швидко і легко скласти кілька секцій в одну і при необхідності здійснити подовження столу. В таких моделях довжина столу кратна довжині однієї секції [10]. До того ж розбірна конструкція столу є мобільною, що вкрай важливо для підприємств, які орендують приміщення і змушені час від часу переїжджати.



Рис. 1. Розкрійний стіл для майстерень та ательє



Рис. 2. Промисловий розкрійний стіл модульного типу для швейних підприємств

Каркас зроблений з металевих профілів гарантує всій конструкції міцність, довговічність і простий монтаж. Тому виробники рекомендують використовувати металевий профіль розміром 40×40×2,0 мм [11], адже стіл повинен витримати вагу тканини, розкрійного обладнання, а іноді й самого закрійника.

Матеріал стільниці повинен бути стійким до механічних пошкоджень, гладким, щоб не пошкоджувати тканину і не заважати роботі ножиць і розкрійних ножів. Однак для крою деяких видів тканин типу шифону або струмуючих трикотажів поверхня повинна мати легку шорсткість. Для швейних майстерень, ательє, найпростіший варіант стільниць виготовляють з ламінованого ДСП, яке при інтенсивному використанні швидко стирається та псується. Для підприємств малої та середньої потужності використовують стільниці вітчизняного виробництва з зносостійким полімерним покриття типу «штучний камінь» [11].

Для підприємств середньої та великої потужності використовують професійні розкрійні столи (рис. 3) з суцільним або перфорованим покриттям поверхні. Столи з перфорованим покриттям оснащені вентиляційними пристроями, що працюють в реверсному режимі. Це дозволяє утворювати надлишковий тиск повітря під настилом при переміщенні його в зону розрізання, або навпаки притиснути настил до столу для його фіксації при розкроюванні за допомогою комп'ютерних розкрійних агрегатів з ЧПК [3].

Найбільшим виробником розкрійних столів в Україні є вітчизняна фірма СПЕЦТЕХПРОМ СІГ. Постачальниками розкрійних столів такого ж зразка є фірми АМТЕХ, ШВЕЙМАШ, Angeli, Лег Пром. Фірма Shvejnik є офіційним дистриб'ютором професійних розкрійних столів марки KURIS (Німеччина) (рис. 3, а-в), а фірма SEWTECH – столів марки Rexel (Польща) (рис. 3, г). Технічні характеристики окремих видів обладнання цих фірм представлені в таблиці 1.



Рис. 3. Професійні настільно-розкрійні столи

Таблиця 1

**Технічні характеристики настільних столів**

Модель столу	Ширина, м	Довжина, м	Висота, м	Матеріал стільниці	Товщина стільниці, мм	Напруга, Вт
<b>KURIS</b>						
STANDART	1,1-2,45	2-10	0,85-0,9	МДФ	30	
CONVEYOR BELT	1,1-2,45	2-10	0,85-0,9	ПВХ	30	
AIR CUSHION	1,1-2,45	2-10	0,85-0,9	МДФ	30	380
<b>REXEL</b>						
SK-3	1,83; 2,07	2,8; 3,9...16,0	0,9	МДФ	25	
SK-3/AIR	1,83; 2,07	2,6; 3,2...16,0	0,9	МДФ	25	

Для виконання підгонки деталей крою у виробках з рисунком (велика клітинка, широка смужка) настилання виконують на спеціальних столах з висувними голками (рис. 4). Після настилання голки прибирають [12].

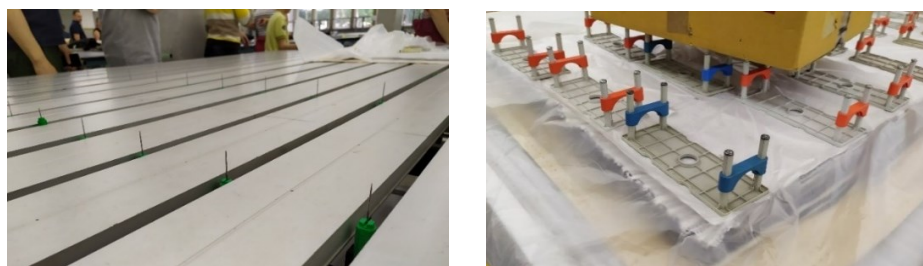


Рис. 4. Розкрійний стіл із висувними голками

Характеристика розмотувачів для рулонів. Невід'ємними пристроями, що підвищують продуктивність настилання і значно полегшують його є розмотувачі для рулонів. Розробники пропонують два типи такого обладнання: 1) настільні – такі, що закріплюються на розкрійному столі; 2) підлогові – такі, що встановлюються поруч з розкрійним столом.

Настільні розмотувачі є найбільш компактними і використовуються для дрібносерійного

виробництва, що характеризується невеликими об'ємами розкрою. Вони можуть бути знімні та стаціонарні, оснащені притискною штангою (рис. 5). Їх конструкція передбачає закріплення двох опор на протилежних сторонах розкрійного столу, на які встановлюється штанга. В окремих моделях опори можуть кріпитися на одній із торцевих сторін столу. Для легкості прокручування рулону, штанга ставиться на поворотні підшипники. Це рішення в разі полегшує використання конструкції і продовжує її експлуатаційний період за рахунок запобігання тертя механізмів. На штангу встановлюються обмежувачі ширини рулонів для запобігання ковзання рулону по діаметральній площині штанги. Даний вид розмотувачів не передбачає їх застосування для габаритних та важких рулонів [13].



Рис. 5. Настільні розмотувачі для рулонів: а) стаціонарні; б) знімні

Підлогові розмотувачі використовуються на більш потужних підприємствах. Вони бувають різних конструкцій (стійки, люльки, карусельного типу) і розраховані на одночасне кріплення від 1 до 10 рулонів. Підлогові розмотувачі можуть нести значно більше навантаження ніж настільні. Вага конструкції і рулону при використанні підлогового розмотувача зі столу переноситься на підлогу, що дозволяє використовувати рулони більшого діаметру і більшої ваги. Підлоговий розмотувач-стійка являє собою дві опори розташовані поруч з розкрійним столом, які кріпляться до столу затискачами і може нести на собі 2 рулони і більше (рис. 6, а).

Розмотувач люлька – конструкція з декількох або більше несучих поворотних рейок, на які укладається рулон (рис. 6, б). Розмотувачі люлькового типу призначені для розмотування габаритних рулонів або м'яких рулонів без картонної втулки всередині. Особливість конструкції полягає в тому, що вага рулону рівномірно розподіляється на безлічі рейок, на відміну від інших розмотувачів, де рулон кріпиться на штангу.

Розмотувачі візки це серйозне обладнання здатне нести на собі досить велику вагу. Даний вид розмотувачів (рис. 6, в) відрізняються по конструкції тим, що часто містять на собі більше двох рулонів, можуть базуватися на колісній базі, мають більш масивні профілі. Штанги з більш товстого металу, на поворотних підшипниках. Наявність колішат по низу конструкції робить цей пристрій максимально мобільним і дозволяє вільно переміщувати рулони по території розкрійного цеху [13].

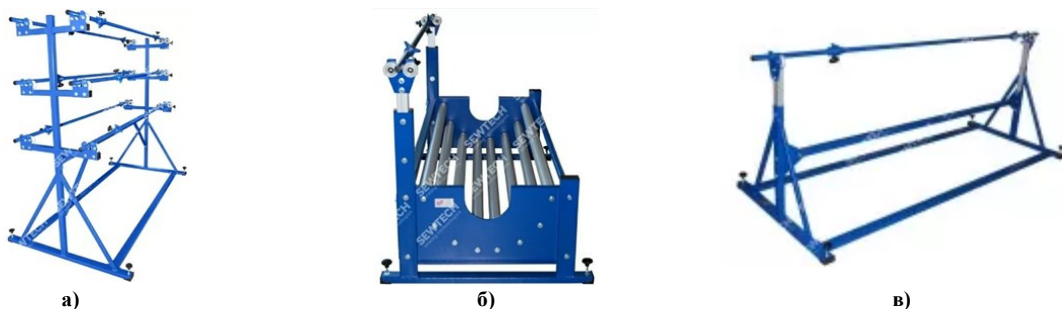


Рис. 6. Підлогові розмотувачі: а) багаторусні стійки Rexel LS-6; б) люльки Rexel LS-1/K; в) однорусні стійки для важких рулонів PP-5

Рулонні розмотувачі (накопичувачі) карусельного типу на 5...12 рулонів (рис. 7) використовуються як для тимчасового зберігання матеріалів, так і як транспортний засіб для подачі матеріалу до настільного комплексу, що скорочує кількість перевантажень матеріалу. Перевага їх використання полягає в компактності і зручності розміщення рулонів. До того ж вони дозволяють компонувати повний пакет матеріалів (верх, підкладку, приклад, оздоблювальну тканину), що необхідні для розкрою одного виробу. Відомим виробником розмотувачів є фірма Rexel (Польща) та Спецтехпром (Україна) [13, 14]. Технічна характеристика розмотувачів наведені в таблиці 2.



Рис. 7. Розмотувач карусельного типу

Таблиця 2

**Технічні характеристики рулонних розмотувачів**

Модель пристрою	Вид пристрою	Кількість рулонів	Максимальна ширина рулону, см	Максимальний діаметр рулону, см	Максимальна вага рулону, кг
настільний					
PPC-1П	знімний	1	180	70	50
	знімний	1	180	60	60
підлоговий					
Rexel LS-6	стелаж	6	180	40	40
Rexel LS-1/K	люлька	1	190	50	80
Rexel LS-1/W	візок	1	190	50	80

При виборі промислового обладнання одними з вагомих факторів є не лише їх технічні характеристики, але й вартість. Вона залежить від потужності та якості обладнання, від фірми-виробника, країни-виробника та дистриб'ютора, що розповсюджує його на ринку України. Вартість розкрійних столів, розмотувачів для рулонів окремих марок та моделей вітчизняних виробників представлена в таблиці 3.

Таблиця 3

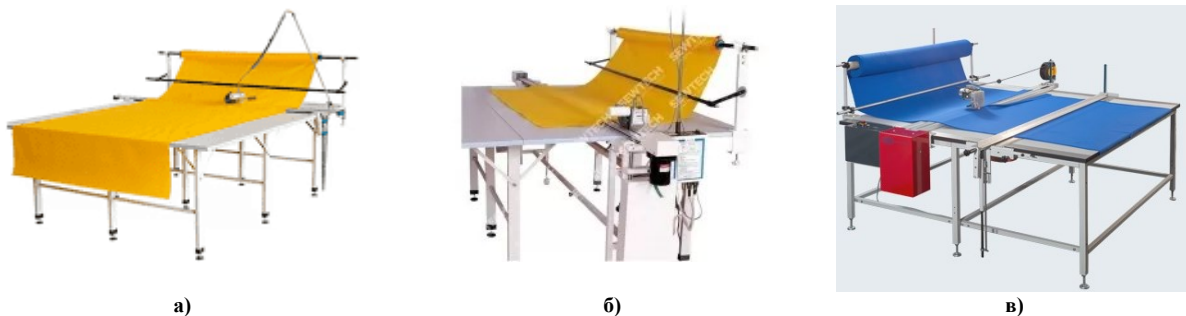
**Вартісні характеристики допоміжного обладнання розкрійного цеху**

Розкрійні столи			Розмотувачі для рулонів		
модель	вартість		модель	вартість	
	грн	доларів США		грн	доларів США
Стіл з ДСП-16 мм (3 м × 1,8 м)	12960	325	PPC-1П	3696	95
Стіл з ДСП-32 мм (3 м × 2,0 м)	20730	520	РРП-2	5544	140
Стіл з ДСП-32 мм (3 м × 1,8 м) з подвійною полицею	24480	610	РРЛ-3	13176	330
Стіл з ДСП 18+18 мм (3 м × 2,0 м)	20475	510	РР-1	11646	290
Стіл з ДСП 18+18 мм (3 м × 1,8 м)	18528	460	РР-2	11088	280
Стіл з ДСП 18+18 мм (3 м × 2,2 м)	35424	885	НН-3	6894	175

**Характеристика основного обладнання для настилення полотен  
Характеристика кінцевих відрізних лінійок**

Операція настилення полотен у розкрійних цехах пов'язана з операцією розрізання сувою тканини на полотна потрібної довжини. Для цього використовують ручні, механізовані та автоматизовані способи, в основі яких лежить відрізкавання дисковим ножом, розмотаної з рулону тканини, і притискання її до столу в процесі формування настилу за допомогою кінцевих відрізних лінійок [12]. Лінійки мають стандартну довжину 2,5..3,5 м, завдяки чому їх можна монтувати на розкрійних столах максимальною шириною 2,2-3,0 м.

Відрізні лінійки можуть бути встановлені як доповнення до розкрійного столу, або як окремі частини настільного комплексу. Залежно від способу дії вони бувають наступних різновидів: 1) на ручному управлінні - ідеальний варіант для невеликого виробництва, де робітник сам розмотує рулон, вмикає, вимикає, переміщає дисковий ніж, піднімає, опускає відрізну лінійку; 2) напівавтоматичного типу – для малого та серійного виробництва, де матеріал подається вручну, лінійка переміщується також вручну, а дисковий ніж рухається автоматично; 3) автоматичного типу – для підприємств великої потужності, де фахівець тільки включає систему та контролює подачу рулону, решту апарат виконує самостійно: підйом лінійки, хід дискового ножа, його заточування, облік відрізаних шматків [15].



**Рис. 8. Відрізні лінійки: а) ручна Dison DS-B-1; б) напівавтоматична Dayang DYDB-2; в) автоматична Kuris Crosscutter C3 Automatic**

Найбільш прогресивними є напівавтоматичні та автоматичні відрізні лінійки (рис. 8) з електронним блоком управління, що значно заощаджують час у порівнянні з ручним розкромом. Все завдяки механізації та автоматизації процесу різання тканини, який залежить від виду обладнання - напівавтоматичне або автоматичне.



Наприклад, автоматична відрізна лінійка Dayang DYDB-2 (рис. 8, б), обслуговується одним оператором, точно відрізає і якісно притискає матеріал. Ширина відрізання і висота підйому передньої притискної лінійки може регулюватися. Підйом передньої лінійки автоматичний або ручний. Відрізна лінійка підвищує продуктивність, заощаджує матеріал. Довжина притискних лінійок 250 см; максимальна ширина столу 220 см; потужність двигуна 220 Вт; швидкість 12000 об/хв; автоматичний тип відрізного ножа; напруга 220 В.

Найбільш відомими виробниками відрізними лінійок, що пропонують свою продукцію на ринку України є фірми ANYSEW, BRITEX, DAYANG, DISON, GOLDEN EAGLE, GEMSY, HOFFMAN, JACK, JUCK, KAISIMAN, KURIS, LEJIANG, MINERVA, OSHIMA, REXEL, SANTIAN, STRONG H, SU LEE, TYPE SPECIAL, WORLDEN, ZOJE. Технічні характеристики окремих видів цього обладнання наведені в таблиці 4.

Таблиця 4

**Технічні характеристики відрізними лінійок**

№ з/п	Тип, марка пристрою	Довжина лінійки, см	Довжина стола, см	Частота обертання ножа, об/хв	Потужність електродвигуна Вт	Напруга, В	Висота настилу, мм	№ з/п	Тип, марка пристрою	Довжина лінійки, см	Довжина стола, см	Частота обертання ножа, об/хв	Потужність електродвигуна Вт	Напруга, В	Висота настилу, мм
Dison								Dayang							
1	DS-B-1	250	200	12000	200	220	300	3	DYDB-2	210	300	12000	200	230	240
Rexel								Kuris							
2	OT-1/A	250	220	2200	120	230	240	4	Crosscutter C3 Automatic	250	300	750	500	230	200

Вартість ручних, напівавтоматичних та автоматичних відрізними лінійок окремих марок та моделей закордонних виробників представлена в таблиці 5.

Таблиця 5

**Вартісні характеристики відрізними лінійок**

Вид відрізними лінійок								
ручні			напівавтоматичні			автоматичні		
модель	вартість		модель	вартість		модель	вартість	
	грн	доларів США		грн	доларів США		грн	доларів США
Dayang DYDB-1	14 874	370	Anysew ASDB-2	32400	810	Dayang DYDB-2	36 180	904
Minerva MRDB-1	13668	340	Jack JK-T2	33348	835	Type Special C-E1	46 688	1165
Anysew ASDB-1	12960	325	Rexel OT-1/A	54 825	1370	Hoffman HLO-2A	108000	2700
Hoffman HLO-1A	18 282	460	Dison DS-B-2	43092	1080	Oshima 510AH	58919	1470

**Характеристика ручних настільних комплексів.** Ручні настільні комплекси призначені для настилення, обрізання та закріплення шарів тканини у настилі. Вони являють високоефективну і просту у використанні систему, що може обслуговуватися одним або двома операторами.

У склад комплексу входить: 1) розкрійний стіл з монолітною або перфорованою стільницею; 2) каретка з рулоном, яка переміщується вздовж столу і забезпечує настилення тканини рівномірними шарами; 3) притискна лінійка, що закріплює передній кінець настилу; 4) автоматична відрізна лінійка з лічильником шарів, що закріплюється на каретці і рухається разом з нею [8, 16].

Для полегшення переміщення важких настилів в зону розкрою використовують перфоровані столи, які оснащені системою повітряного піддуву. Їх виготовляють з окремих модулів, довжиною до 2-2,5 м, кожен з яких укомплектовується нагнітачем повітря з окремим блоком керування. Іноді нагнітачі можуть забезпечувати не одну, а декілька секцій.

Настільні каретки переміщують вздовж столу по направляючих рейках і управляються одним або двома операторами. Вони оснащені механічним або електронним датчиком вирівнювання кромки, сигнали від яких передаються механізму переміщення каретки.

Притискні кінцеві лінійки є пересувними і оператори змінюють місце їх розташування в залежності від довжин настилу. Підйом, опускання і притискання лінійки до столу здійснюється вручну або механічним способом.

Основним ріжучим механізмом відрізної лінійки є дисковий ніж, який рухається вздовж лінійки і відрізає кінці настилу. Повернення ножа на початкову позицію здійснюється автоматично і фіксується датчиком обліку кількості полотен у настилі.

Відомим виробником ручних настільних комплексів (рис. 9) є фірма Rexel [8, 14, 16–19]. Технічна характеристика окремих видів її обладнання наведена в таблиці 6.

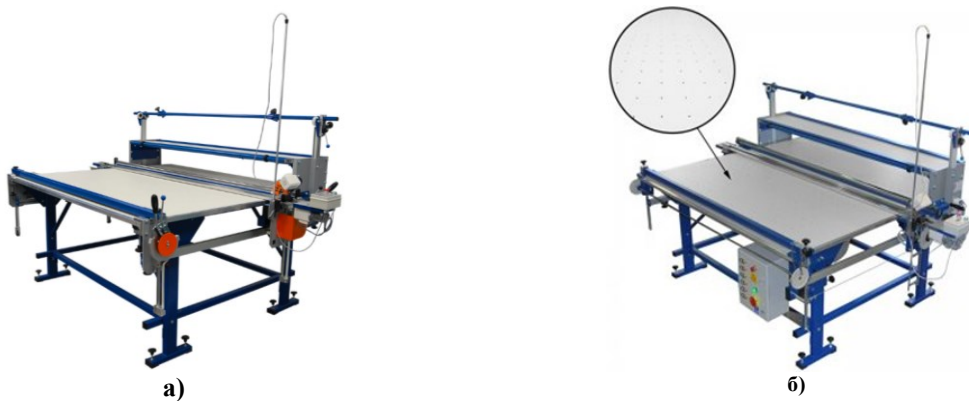


Рис. 9. Ручні настільні комплекси: а) Rexel UL-3; б) Rexel UL-3/AIR

Таблиця 6

**Технічні характеристики ручних настільних комплексів**

№ з/п	Характеристики	Марка та модель обладнання	
		Rexel UL-3	Rexel UL-3/AIR
1	Довжина столу, м	2,8-16,0	2,8-16,0
2	Ширина столу, см	1,83 або 2,07	1,83 або 2,07
3	Діаметр рулону, мм	50	50
4	Вага рулону, кг	60	60
5	Напруга, В	220	220
6	Повітряний піддув	-	наявна

**Характеристика напівавтоматичних та автоматичних настільних комплексів**

Найбільш прогресивним настільним обладнанням для підприємств середньої та великої потужності є напівавтоматичні (ННК) та автоматичні настільних комплексів (АНК) [17]. ННК оснащені відкидною системою рухомої каретки, рухомою кареткою, автоматичним поворотом каретки, напрямними штативами, регулятором подачі рулону, повністю автоматичними є скручування та розкручування матеріалу, а також присутні динамічний контроль швидкості та контроль розташування кромки [18, 19]. Каретка переміщується вздовж столу разом із рулоном матеріалу та працює від електродвигуна. Точність вирівнювання пружка – 1-2 мм, контролюється фотодатчиком. Продуктивність настилання при відрізання кінців полотен – 450 м/год. Швидкість настилання – до 80–140 м/хв. На ННК рекомендують настилати тканину верху та підкладки, синтетичні тканини, які в подальшому будуть розкроєні на стрічкових розкрійних машинах [12].

АНК управляються за допомогою комп'ютера (із сенсорним LED-екраном) з контролером, на якому програмується алгоритм дій і параметри процесу настилання. Оператор задає положення нульової точки, з якої починається настилання полотна, довжину настилу, кількість полотен, спосіб настилання [12, 17]. Настільна каретка переміщується за заданою програмою, відповідно до довжини настилу і відрізає полотно дисковим ножом. Настилання виконується трьома різними способами: "лицем вниз", "лицем до лица" та безперервним ("книжка" або "зиг-заг"), що є максимально продуктивним [5, 17].

АНК використовують для настилання матеріалів верху, які в подальшому будуть розкроєні на автоматизованому розкрійному комплексі (АРК). Завантаження рулону в настільний пристрій виконується автоматично. Час зміни рулону – 8-10 с. Полотно шириною 1,5 м відрізається за 1,5 с. На настільному столі є оптична система, яка переміщується разом з рулоном матеріалу при настиланні. На моніторі відображена розкладка, по якій буде виконуватись в подальшому розкрій полотен. Побачивши текстильний дефект, оператор відмічає його оптичною мишкою, після чого дефект відображається на екрані монітора на розкладці. Оператор приймає рішення: розрізати та змістити полотна по довжині, розкроїти деталі з дефектом чи накласти відріз на настил [12].

Іноді настилання матеріалів виконується швидше, ніж розкрій, і автоматичний настільний комплекс може простоювати. Для уникнення цього настил скріплюють затискачами та пересовують вздовж столу. На звільненому місці виконують наступний настил. Якщо площа розкрійного цеху не дозволяє ставити довгі настільні поверхні, то ставлять два настільні столи паралельно та одну настільну голівку, яка переміщується по рейсах між ними. Для кращого пересування настилів по столу використовують столи з повітряною подушкою, транспортні стрічки (конвеєри) [12].

Найбільш відомими виробниками напівавтоматичних та автоматичних настільних комплексів (рис. 10) є фірми BULLMER, KURIS, HOFFMAN, OSHIMA, REXEL, MASTER, RICHPEACE, SERKON. Їх технічна характеристика наведена в таблиці 7.



Рис. 10. Настильні комплекси: а) автоматичний Dr.Bang Spreading Cloth Machine P26; б) автоматичний Hoffman HF-P4ADD; в) автоматичний KURIS A55

Таблиця 7

#### Технічні характеристики автоматичних настильних комплексів

№ з/п	Характеристики	Марка та модель обладнання				
		Dr.Bang Spreading Cloth Machine	RICHPEACE RPCP-1018-IV-G	OSHIMA + TABLE 12M J3-190 + R6-190	HOFFMAN HF-P4ADD	KURIS A55
1	Максимальна швидкість настилення, м/хв	86	80	95	100	140
2	Довжина робочої зони, м	2-10	2,3	12	12	2-12
3	Ширина робочої зони, см	260	135	200	250	168-228
4	Висота настилу, мм	150-220	180-220	160	250	150
5	Діаметр рулону, мм	550	600	800	600	600
6	Вага рулону, кг	530	100	200	120	60
7	Напруга, В	220	220	220	220	400
8	Потужність, Вт	1000	1200	2000	3000	2000

Вартість ручних та автоматичних настильних комплексів відомих моделей закордонних виробників представлена в табл. 8.

Таблиця 8

#### Вартісні характеристики настильних комплексів

модель	ручний		автоматичний		
	вартість		модель	вартість	
	грн	доларів США		грн	доларів США
Rexel UL-3 5×1.83	176 300	4400	KURIS SHUTTLE	1 014 833	25370
Rexel UL-3 16×1.83	305 300	7630	Zillion ZL HY-HC		

Проведений аналіз свідчить про широкий ринок сучасного настильного обладнання, що дозволяє вільно підбирати бажаний варіант. Першочерговим фактором при цьому є врахування марки та моделі обладнання, не менш вагомим фактором є його вартість. Вони повинні забезпечувати бажану потужність підприємства і бути рентабельними за вартістю.

Наслідуваність настильного і розкрійного обладнання однієї марки-виробника дозволяє забезпечувати чітку злагодженість їхніх дій без необхідності переналаштування. Тому при виборі настильного обладнання доцільно враховувати марку розкрійного обладнання, що існує на підприємстві.

#### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Перераховані види обладнання є перспективними для застосування на сучасних швейних підприємствах України. Вибір марки та моделі обладнання залежить від умов виробництва конкретного підприємства і від його купівельної спроможності. При цьому завжди потрібно пам'ятати про технічну сумісність усіх видів використовуваного обладнання. Найкращим варіантом при цьому буде застосування обладнання, виготовленого однією маркою. Це дозволить скоротити час на узгодженість дій між різними видами обладнання, на його технічне обслуговування та ремонт.

#### Література

1. Додаткове обладнання і промислові меблі. URL: <https://stp-sig.com.ua/ua/> – (Дата звернення 10.01.2023).
2. Орловський Б.В. Технологічне обладнання галузі (швейне виробництво) : навчальний посібник / Б. В. Орловський, Н. С. Абрінова. – Київ : КНУТД, 2013. – 285 с.

3. Настилочні комплекси. URL: <https://sewtech.com.ua/uk/rozkrijne-obladnannya/nastilochni-kompleksi/> – (Дата звернення 12.01.2023).
4. Розкрійне обладнання. URL: <https://tex-prom.com.ua/ua/raskrojnoe-oborudovanie/> – (Дата звернення 15.01.2023).
5. Spreading – laying the fabrics for cutting. URL: <https://www.textileschool.com/336/spreading-layering-the-fabrics/> - (Access date 20.02.2023).
6. Підвищення продуктивності швейного обладнання. URL: <https://sewtech.com.ua/uk/jak-pidvischiti-produktivnist-shvejnogo-obladnannya/> – (Дата звернення 17.01.2023).
7. The Spreading And Cutting Department In Garment Industry. URL: <https://cosmatechnology.com/news/the-spreading-and-cutting-department-in-garment-industry-48/>. - (Access date 22.02.2023).
8. Ручні настилочні комплекси. URL: <https://sewtech.com.ua/uk/rozkrijne-obladnannya/nastilochni-kompleksi/ruchni-nastilochni-kompleksi/> – (Дата звернення 18.01.2023).
9. Напівавтоматичні настилочні комплекси. URL: <https://sewtech.com.ua/uk/rozkrijne-obladnannya/nastilochni-kompleksi/poluaavtomachiskie-nastilochni-kompleksi/> – (Дата звернення 21.01.2023).
10. Розкрійні столи. URL: <https://angeli.net.ua/uk/raskrojnoe-oborudovanie/raskrojnye-stoly/> – (Дата звернення 25.01.2023).
11. Столи розкрійні, міжстілля, столи. URL: <https://stp-sig.com.ua/ua/product/t09.htm> – (Дата звернення 28.01.2023).
12. Березненко С.М. Основи технологій експериментального та підготовчо-розкрійного виробництва : навч. посіб. / С. М. Березненко, О. І. Водзінська, Л. Б. Білоцька та ін. – Київ : КНУТД, 2017. – 171 с.
13. Розмотувальники і візки для ролонів тканини. URL: <https://stp-sig.com.ua/ua/product/t17.htm> – (Дата звернення 01.02.2023).
14. Wyposazenie krojowni. URL: <https://www.rexelpoland.com/#category-25> – (Дата звернення 05.02.2023).
15. Кінцеві відрізи лінійки. URL: <https://sm-ua.com/kncev-vdrzn-lnyki> – (Дата звернення 30.03.2015).
16. Розкрійне обладнання. URL: <https://rotondi.com.ua/rexel-ul-3-ruchnoy-nastilochnyy-kompleks-28-183-m/> – (Дата звернення 07.02.2023).
17. Spreading Cloth Machine [Electronic resource]. URL: [http://cncsch.com/spreading-machine/?gclid=Cj0KCQiAutyfBhCMARIsAMgcRJS9UPe4nVYRIId39q8HwH214XgMZ3wWYadPfkMr4BaqNGY0shA17FjUaAg87EALw\\_wcB](http://cncsch.com/spreading-machine/?gclid=Cj0KCQiAutyfBhCMARIsAMgcRJS9UPe4nVYRIId39q8HwH214XgMZ3wWYadPfkMr4BaqNGY0shA17FjUaAg87EALw_wcB). - (Access date 21.02.2023).
18. Настилочні машини та столи. URL: <https://shvejnik.com.ua/ua/nastilochni-mashini-ta-stoli> – (Дата звернення 12.02.2023).
19. Настилочні комплекси. URL: <https://angeli.net.ua/rexel-ul-3-ruchnoi-nastilochnii-kompleks> – (Дата звернення 14.02.2023).

#### References

1. Dodatkovе obladnannya i promyslovi mebli. URL: <https://stp-sig.com.ua/ua/> – (Data zvernennia 10.01.2023).
2. Orlovskiy B.V. Tekhnologichne obladnannya haluzi (shveine vyrobnytstvo) : navchalnyi posibnyk / B. V. Orlovskiy, N. S. Abrinova. – Kyiv : KNUITD, 2013. – 285 s.
3. Nastylочni komplekсы. URL: <https://sewtech.com.ua/uk/rozkrijne-obladnannya/nastilochni-kompleksi/> – (Data zvernennia 12.01.2023).
4. Rozkriine obladnannya. URL: <https://tex-prom.com.ua/ua/raskrojnoe-oborudovanie/> – (Data zvernennia 15.01.2023).
5. Spreading – laying the fabrics for cutting. URL: <https://www.textileschool.com/336/spreading-layering-the-fabrics/> - (Access date 20.02.2023).
6. Pidvyshchennia produktyvnosti shveinoho obladnannya. URL: <https://sewtech.com.ua/uk/jak-pidvischiti-produktivnist-shvejnogo-obladnannya/> – (Data zvernennia 17.01.2023).
7. The Spreading And Cutting Department In Garment Industry. URL: <https://cosmatechnology.com/news/the-spreading-and-cutting-department-in-garment-industry-48/>. - (Access date 22.02.2023).
8. Ruchni nastylочni komplekсы. URL: <https://sewtech.com.ua/uk/rozkrijne-obladnannya/nastilochni-kompleksi/ruchni-nastilochni-kompleksi/> – (Data zvernennia 18.01.2023).
9. Napivavtomatychni nastylочni komplekсы. URL: <https://sewtech.com.ua/uk/rozkrijne-obladnannya/nastilochni-kompleksi/poluaavtomachiskie-nastilochni-kompleksi/> – (Data zvernennia 21.01.2023).
10. Rozkriini stoly. URL: <https://angeli.net.ua/uk/raskrojnoe-oborudovanie/raskrojnye-stoly/> – (Data zvernennia 25.01.2023).
11. Stoly rozkriini, mizhstilla, stoly. URL: <https://stp-sig.com.ua/ua/product/t09.htm> – (Data zvernennia 28.01.2023).
12. Bereznenko S.M. Osnovy tekhnologii eksperymentalnoho ta pidhotovcho-rozkriinoho vyrobnytstv : navch. posib. / S. M. Bereznenko, O. I. Vodzinska, L. B. Bilotska ta in. – Kyiv : KNUITD, 2017. – 171 s.
13. Rozmotuvalnyky i vizky dla ruloniv tkanyny. URL: <https://stp-sig.com.ua/ua/product/t17.htm> – (Data zvernennia 01.02.2023).
14. Wyposazenie krojowni. URL: <https://www.rexelpoland.com/#category-25> – (Data zvernennia 05.02.2023).
15. Kintsevi vidrizni liniiky. URL: <https://sm-ua.com/kncev-vdrzn-lnyki> – (Data zvernennia 30.03.2015).
16. Rozkriine obladnannya. URL: <https://rotondi.com.ua/rexel-ul-3-ruchnoy-nastilochnyy-kompleks-28-183-m/> – (Data zvernennia 07.02.2023).
17. Spreading Cloth Machine [Electronic resource]. URL: [http://cncsch.com/spreading-machine/?gclid=Cj0KCQiAutyfBhCMARIsAMgcRJS9UPe4nVYRIId39q8HwH214XgMZ3wWYadPfkMr4BaqNGY0shA17FjUaAg87EALw\\_wcB](http://cncsch.com/spreading-machine/?gclid=Cj0KCQiAutyfBhCMARIsAMgcRJS9UPe4nVYRIId39q8HwH214XgMZ3wWYadPfkMr4BaqNGY0shA17FjUaAg87EALw_wcB). - (Access date 21.02.2023).
18. Nastylочni mashyny ta stoly. URL: <https://shvejnik.com.ua/ua/nastilochni-mashini-ta-stoli> – (Data zvernennia 12.02.2023).
19. Nastylочni komplekсы. URL: <https://angeli.net.ua/rexel-ul-3-ruchnoi-nastilochnii-kompleks> – (Data zvernennia 14.02.2023).

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-205-209>

УДК 62

СОКІЛ Марія

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0003-3352-2131>e-mail: [maria.b.sokil@lpnu.ua](mailto:maria.b.sokil@lpnu.ua)

ЗВОРСЬКИЙ Андрій

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0003-3530-7726>e-mail: [andrii.p.zvorskyi@gmail.com](mailto:andrii.p.zvorskyi@gmail.com)

## СУЧАСНІ ЕЛЕКТРОННІ ПОСЛУГИ БІБЛІОТЕКИ ДЛЯ ПІДТРИМКИ НАВЧАЛЬНОГО ТА НАУКОВОГО ПРОЦЕСІВ ЗВО В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

У роботі розглядається вплив впровадження нових електронних послуг в Науково-технічній бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (НТБ) як альтернативний спосіб задоволення інформаційних потреб користувачів, за умов обмеженого фізичного доступу до її ресурсів. Під час пандемії 2020-2021 років, а також через воєнну агресію постало питання спроможності бібліотеки у задоволенні інформаційних потреб користувачів, адже процеси у ЗВО зупинені не були. Для задоволення інформаційних потреб своєї читачької аудиторії в НТБ були здійснені підготовчі заходи та запроваджено сервіси, які дозволили бібліотеці не втратити своїх користувачів, а також вивести саму установу на новий рівень взаємодії з користувачами. У роботі представлено позитивні тенденції, які отримав заклад від запровадження нових сервісів, на основі аналізу кількісних та якісних показників.

Ключові слова: інтернет-ресурси, інформаційні ресурси, популяризація, електронні послуги, бібліотечні ресурси.

SOKIL Mariia, ZVORSKYI Andrii

Lviv Polytechnic National University

### MODERN ELECTRONIC SERVICES OF THE LIBRARY TO SUPPORT EDUCATIONAL AND SCIENTIFIC

University libraries have undergone significant changes in recent years, with the advent of new technologies and the increased use of electronic services. These services have revolutionized the way libraries support educational and scientific processes in universities. One of the most important electronic services offered by modern libraries is online access to a wide range of academic journals, books, and other scholarly materials. This allows students and faculty members to access the latest research and information in their fields, regardless of their physical location.

Another important electronic service is the use of digital databases, which allow users to search for and access a wide range of information on a variety of topics. These databases can be used for research, writing papers, and other academic projects.

In addition to providing access to electronic resources, libraries also offer a wide range of services to support the use of these resources. For example, many libraries have reference librarians who can help users navigate the digital resources and find the information they need. Libraries play an essential role in supporting educational and scientific processes in universities by providing access to a wide range of electronic resources and services. These resources and services include online access to academic journals and books, digital databases, reference assistance. With the evolution of technology, libraries are also adapting and providing services such as e-books, digital library cards, and online library account management. In this article we describe and analyze new digital services which was implemented in Scientific Library of Lviv Polytechnic National University.

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 тотальної інформатизації всіх сфер та послуг, одним з найцінніших ресурсів є інформація. В ситуації практично безперешкодного доступу до інформаційних ресурсів мережі Інтернет отримати інформацію на довільну тематику не є проблемою. Існує достатньо багато сервісів, електронних бібліотек, які розміщують на своїх ресурсах різноманітну інформацію, якою можна скористатися на безкоштовній чи платній основі. Але попри всі позитивні аспекти в даному випадку є проблема: не завжди є гарантія правдивості та достовірності даних, отриманих з неперевіраних неавторитетних джерел. Також бібліотека володіє унікальним джерелом інформації (у вигляді книжкового ресурсу) або ж передплаченими вузькоспеціалізованими базами даних. Така ситуація надала поштовх для нового етапу розвитку в академічних бібліотеках – впровадженню нових послуг для користувачів.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Обґрунтуванням технічних та теоретичних аспектів підтримки користувачів академічних бібліотек шляхом впровадження різноманітних віртуальних сервісів займалися Андрухів А. [1, 2], Влащенко Л. [3], Порхун О. [5].

В період стрімкого розвитку інтернет-технологій та практично безперешкодного доступу до будь-якої інформації актуальним залишається питання ефективного використання часу науковців та студентів [7]. Перенесення ряду послуг бібліотеки у віртуальну площину дає можливість не лише легко отримати потрібну інформацію, а й ефективніше використовувати свій час як працівникам бібліотеки, так і її користувачам [4].

### Формулювання мети статті

Метою роботи є дослідження впливу нових електронних послуг в Науково-технічній бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» на кількісні та якісні показники її роботи.

### Виклад основного матеріалу

Кожна бібліотека ЗВО в тій чи іншій мірі знайома з системою менеджменту якості. НТБ проходить перевірку на відповідність цьому стандарту щороку. Одним з етапів оцінки якості є аналіз статистичних даних, що відображені у звіті та стосуються процесу обслуговування користувачів [3] та задоволення їх інформаційних запитів. Під час пандемії корона вірусу 2020-2022 року та підчас військового вторгнення 2022 р. академічні бібліотеки зіткнулися з рядом проблем:

- Обмеження фізичного доступу:

- А) коронавірусні обмеження – не тільки на книговидачу, а й роботу у читальному залі;
- Б) безпекові обмеження – на початку воєнної агресії бібліотеки дуже обмежено пускали користувачів до своїх приміщень, щоб уникнути диверсій;
- В) інфраструктурні обмеження – при вимкненнях електроенергії неможливо скористатись електронним каталогом, освітити книгосховища та читальні зали тощо.

- Обмеження кадрового потенціалу.

А) під час коронавірусної пандемії багато працівників хворіло, тому частина з них не могла повноцінно виконувати свої обов'язки;

Б) під час воєнних дій відбулась міграція працівників;

В) частина студентів виїхали з міста чи країни, тому не могли користуватися фізичними послугами бібліотеки.

Якщо мова йде про користувачів НТБ, в переважній більшості випадків вони шукають специфічну технічну інформацію, яка є додатковою для супроводу навчального процесу, написання індивідуальних завдань чи проведення наукових досліджень. Електронних ресурсів та доступу чи аналізу цих ресурсів недостатньо. Тоді було прийнято рішення провести моніторинг послуг, які надає бібліотека і визначити, які з них можна перевести у віртуальну площину та які будуть мати попит серед користувачів.

Для покращення якості обслуговування користувачів та забезпечення супроводу наукових досліджень НТБ впроваджено такі *електронні ресурси*:

- Сайт бібліотеки (<https://library.lpnu.ua>);
- Електронний науковий архів (<https://ena.lpnu.ua>);
- Електронний каталог (<https://opac.lpnu.ua/>);
- Віртуальна бібліотека «LibraryGO» (<https://librarygo.lpnu.ua>);

*послуги та сервіси*:

- Сервіс «Електронний формуляр»;
- Послуга «Інформаційний супровід дослідження»;
- Послуга «Тематичний підбір літератури»;
- Послуга «Формування публікаційної стратегії науковця»;
- Послуга «Визначення УДК та авторського знаку»;
- Повний спектр послуг, пов'язаних із наукометриєю.

Основною перевагою описаних вище сервісів, послуг та ресурсів є те, що ними можуть скористатися читачі не виходячи з дому. Оскільки сайт бібліотеки, електронний каталог та науковий електронний архів працюють достатньо давно, нема потреби на них зосереджувати увагу. Послуги по тематичному підбору літератури, інформаційному супроводу дослідження, визначенню УДК – є типовими для бібліотеки. Тільки надання цих послуг переведено у електронний вигляд. Натомість Електронний формуляр та Віртуальна бібліотека – достатньо сучасні сервіси для українських бібліотек, тому розглянемо їх докладніше.

### **Віртуальна бібліотека LibraryGO.**

Основне завдання цього ресурсу це надання користувачеві доступ до електронних версій оцифрованих видань, що знаходяться у фондї НТБ. Зареєстрований користувач НТБ може читати книгу чи наукову статтю з екрану свого гаджету без можливості її завантаження. Слід зауважити, що на даний момент в розпорядженні читачів є обмежена кількість книг, що розміщені на ресурсі – понад 200. Проте їх кількість поступово збільшується пропорційно до темпів оцифрування. Для сканування обирають ту літературу, яка була найбільш затребуваною в попередні роки, або якщо є недостатня кількість друкованих примірників. Важливим ж те, що даний сервіс набув широкої популярності серед студентів та науковців, адже дає можливість отримати необхідну інформацію для виконання індивідуальних завдань чи написання наукових досліджень не виходячи з дому. Це дуже зручно адже сервіс працює незалежно від погодних, політичних, енергетичних та інших умов. Нижче, на рис. 1, представлена структурна схема віртуальної бібліотеки. На рис. 2 можна побачити як виглядає сторінка з метаданими про вибрану книгу, та сам текст книги у вікні бібліотеки.



Рис. 1. Структура ресурсу Електронна бібліотека

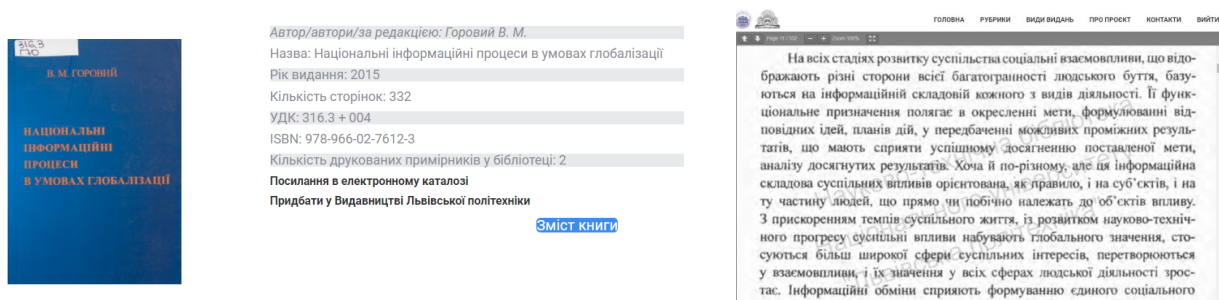


Рис. 2. Інформаційна сторінка вибраної книжки та її вигляд у вікні Віртуальної бібліотеки

Переваги сервісу LibraryGO:

- Доступність з будь-якого місця (де є доступ до Інтернет);
- Доступність в будь-який час;
- Не потрібно витрачати час на фізичний доступ до бібліотеки;
- Не потрібно перейматися питанням достатності примірників потрібного видання;
- Цифрові копії неможливо зіпсувати, розмалювати, вирвати сторінки.

Недоліки:

- Наразі невелика кількість книг;
- Неможна скопіювати фрагменти тексту чи завантажити книгу;
- Доступний лише для працівників та студентів Львівської політехніки.

Варто зауважити, що для забезпечення навчального процесу в НУ Львівська політехніка вже давно функціонує Віртуальне навчальне середовище (<https://vns.lpnu.ua>), в якому викладачі розміщують всі потрібні для студентів навчальні матеріали: конспекти лекцій, посібники, методичні вказівки, інструкції до виконання індивідуальних завдань, тощо. Що стосується Віртуальної бібліотеки – це не є дублюючий ресурс. В них різні завдання та функціональні можливості. Це допоміжний ресурс до Віртуального навчального середовища, як віртуальний аналог читального залу бібліотеки.

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.

### Електронний формуляр.

Слід зауважити, що НТБ завжди займала ключові позиції із запровадження різноманітних електронних сервісів серед українських бібліотек. В 2019 році в цьому закладі була успішно впроваджена власними силами автоматизована бібліотечна інформаційна система Koha. Із впровадженням нової системи були автоматизовані нові ділянки бібліотечної діяльності. Окрім традиційних можливостей на основі цієї системи був впроваджений модуль Електронний формуляр. З його допомогою користувачі можуть, переглянувши електронний каталог, заповнити формуляр читацького замовлення у електронному вигляді

(інакше кажучи – замовити онлайн книгу). Після цього він потрапляє на опрацювання до працівників бібліотеки, які знаходять замовлену книгу і повідомляють читача коли і де він її може забрати. Цей сервіс набув широкої популярності серед користувачів, адже дає можливість зекономити час, оскільки не потрібно стояти в черзі та додатково чекати поки принесуть замовлення. Деякі бібліотеки України пішли ще далі – надсилають книгу Новою Поштою за кошти отримувача. Проте, після аналізу, у НТБ послуга відправки не була впроваджена через відносно невисокий рівень затребуваності друкованого примірника книги. Більшість студентів таки орієнтуються на електронний варіант.

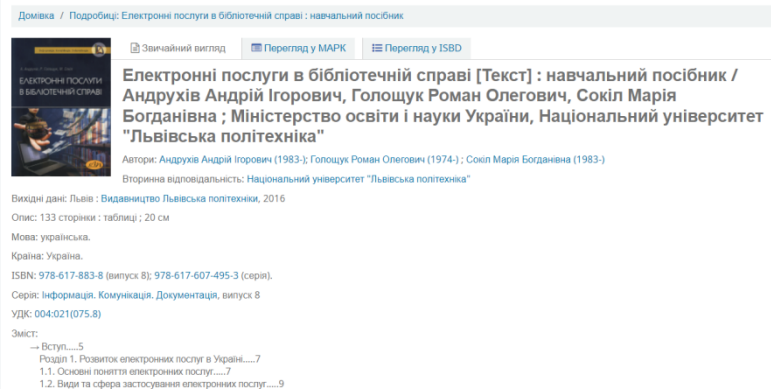


Рис. 3. Сторінка з описом замовлення користувача

Для того щоб оцінити успішність впровадження нових сервісів та послуг потрібно опрацювали статистичні дані, які мають відношення саме до книговидачі (як класичної так і електронної): кількість замовлених книг фізично, кількість замовлених книг через електронний формуляр та кількість переглядів книг через електронну читальню. Відносний показник обслуговування на одного користувача обрахували за формулою:

$$K_i = \begin{cases} \frac{K_{Zi} + K_{Fi} + K_{Ci}}{N_i}, & \text{якщо } i \geq 2022 \\ \frac{K_{Zi}}{N_i}, & \text{якщо } i < 2022 \end{cases}$$

тут  $i$  вказує на рік, для котрого обраховується відносний показник обслуговування на одного користувача. Для попередніх років (до 2022р.) він враховує лише замовлені та видані фізично екземпляри книжок абонементним відділом НТБ, оскільки додаткові електронні послуги ще не були впроваджені;

$K_{Zi}$  – кількість замовлених та виданих книг фізично в  $i$ -му році;

$K_{Fi}$  – кількість замовлених книг через електронний формуляр в  $i$ -му році;

$K_{Ci}$  – кількість переглядів книг через електронну читальню в  $i$ -му році;

$N_i$  – загальна кількість користувачів (викладачів та працівників) в  $i$ -му році

На рис. 4 зображено позитивні тенденції зміни кількості опрацьованих запитів користувачів після запровадження нових сервісів.



Рис. 4. Динаміка змін в НТБ НУЛП за період 2018-2022 рр.: а) кількості користувачів; б) відносного показника обслуговування на одного користувача

**Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі**  
В результаті проведеного аналізу було встановлено, що кількість звернень за рік збільшилася на 8 %



порівняно із минулим роком. Це достатньо хороший показник, враховуючи спад фізичної відвідуваності бібліотеки в попередні роки, а також обмеження та негативні наслідки які спричинені пандемією коронавірусу, військовими діями та іншими проблемами.

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Отже, варто підкреслити, що перенесення ряду послуг для користувачів академічних бібліотек у віртуальну площину в сучасних реаліях є вигідним рішенням для підвищення ефективності її діяльності. Для того, щоб іти в ногу з часом, а також не втратити позицію осередку задоволення інформаційних потреб користувачів, потрібно постійно аналізувати ринок подібних послуг і переглядати та інтерпретувати вже існуючі до вимог сучасності. В свою чергу, запровадження електронних послуг має переваги як для користувачів, так і для бібліотеки, оскільки дозволяє провести ефективний менеджмент робочого часу та ефективніше спланувати свою роботу в обох випадках.

Аналізуючи тримані статистичні показники роботи бібліотеки, очевидним є, що віртуальні сервіси доповнюють і розширюють можливості інформаційного обслуговування користувачів, відповідають сучасним тенденціям у бібліотечному обслуговуванні а також позитивно впливають на кількісні та якісні показники самого закладу.

### Література

1. Андрухів А. І. Адаптивне забезпечення навчального процесу університету інформаційними матеріалами бібліотеки / А. Андрухія // Науковий вісник НЛТУ України. – 2015. – Вип. 25(3). – С. 406–411.
2. Andrukhiv A., Fedushko S., Sokil M., Shvorob I., Markovets O. Implementing web-oriented services at the university library. CEUR Workshop Proceedings. 2021. P. 87-99.
3. Влащенко Л.Г. Ефективність функціонування віртуальних сервісів наукової бібліотеки з во: системний підхід та досвід використання / Влащенко Л.Г. Нікітенко О.М. // Бібліотечний меркурій. – 2019. – Вип. 2(22). – С. 137–153.
4. Винокурова С. Г. Менеджмент якості в діяльності бібліотек вищих навчальних закладів / С. Г. Винокурова // Бібліотека університету на новому етапі розвитку соціальних комунікацій : матеріали 3-ї Міжнар. наук.-практ. конф. (Дніпро, 1–2 груд. 2016 р.). – Дніпро : ДНУЗТ, 2016. – С. 25–28.
5. Порхун, О. Організація баз даних для комплексної автоматизованої обробки інформації в інформаційно-аналітичних підрозділах бібліотек / О. Порхун // Наук. праці Нац. б-ки України ім. В. І. Вернадського. – К., 2009. – Вип. 25. – С. 285–291.
6. Університетська бібліотека: нова сфера інформаційної взаємодії : монографія / за ред. В. О. Ільганаєвої, Т. О. Колесникової. – 2016. – 204 с.
7. Федушко С.С. Аналіз ефективних інтернет-сервісів для управління часом студентів вищих навчальних закладів / С. Федушко, С. Садова, І. Скірка // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Серія: інформатизація вищого навчального закладу. – 2017. – № 879. – С. 121–128.

### References

1. Andrukhiv A. I. Adaptivne zabezpechennia navchalnoho protsesu universytetu informatsiinymy materialamy biblioteky / A. Andrukhia // Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy. – 2015. – Vyp. 25(3). – S. 406–411.
2. Andrukhiv A., Fedushko S., Sokil M., Shvorob I., Markovets O. Implementing web-oriented services at the university library. CEUR Workshop Proceedings. 2021. R. 87-99.
3. Vlashchenko L.H. Efektyvnist funktsionuvannia virtualnykh servisiv naukovoï biblioteky z vo: systemnyi pidkhid ta dosvid vykorystannia / Vlashchenko L.H. Nikitenko O.M. // Bibliotichni merkurii. – 2019. – Vyp. 2(22). – S. 137–153.
4. Vynokurova S. H. Menedzhment yakosti v diialnosti bibliotek vyshchykh navchalnykh zakladiv / S. H. Vynokurova // Biblioteka universytetu na novomu etapi rozvytku sotsialnykh komunikatsii : materialy 3-yi Mizhnar. nauk.-prakt. konf. (Dnipro, 1–2 hrud. 2016 r.). – Dnipro : DNUZT, 2016. – S. 25–28.
5. Porkhun, O. Orhanizatsiia baz danykh dlia kompleksnoi avtomatyzovanoi obrobky informatsii v informatsiino-analitychnykh pidrozdilakh bibliotek / O. Porkhun // Nauk. pratsi Nats. b-ky Ukrainy im. V. I. Vernadskoho. – K., 2009. – Vyp. 25. – S. 285–291.
6. Universytetska biblioteka: nova sfera informatsiinoï vzaiemodii : monohrafiia / za red. V. O. Ilhanaievoi, T. O. Kolesnykovoï. – 2016. – 204 s.
7. Fedushko S.S. Analiz efektyvnykh internet-servisiv dlia upravlinnia chasom studentiv vyshchykh navchalnykh zakladiv / S. Fedushko, S. Sadova, I. Skirka // Visnyk Natsionalnoho universytetu “Lvivska politekhnika”. Serii: informatyzatsiia vyshchoho navchalnoho zakladu. – 2017. – № 879. – S. 121–128.

СТРЕЛЬБИЦЬКИЙ Віктор

Одеський національний морський університет

<https://orcid.org/0000-0001-7027-9498>e-mail: [vict141174@gmail.com](mailto:vict141174@gmail.com)

## ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ МЕХАНІЗМІВ ПОРТАЛЬНИХ КРАНІВ «ГАНЦ»

У роботі проведено аналіз відмов механізмів порталних кранів «ГАНЦ», які виникають у процесі понаднормової експлуатації, за отриманими даними розраховано коефіцієнти готовності, відмов та відновлення. Аналіз отриманих результатів показав, що найбільша кількість відмов виявлена у механізмах переміщення, підйому, зміни вильоту стріли та металоконструкція крану. Основними причинами виходу з ладу механізмів переміщення є знос зубчастих коліс та валів-шестерен редукторів, руйнування та знос підшипників у редукторах, утворення тріщин у корпусах редукторів. Вихід з ладу механізмів підйому пов'язаний зі зносом канатів, канатних блоків та баранів, а також гальмівних накладок. Відмови механізмів зміни вильоту стріли викликані зносом зубців рейок та зубчастих коліс, підшипників та корпусів редуктора механізму.

Ключові слова: порталний кран, Ганц, механізм, відмова, надійність.

STRELBITSKIY Victor  
Odessa National Maritime University

## EVALUATION OF THE RELIABILITY OF «GANZ» PORTAL CRANE MECHANISMS

Portal cranes are widely used in various ports for transshipment operations. However, today in the river and sea ports of Ukraine, more than 88% of cranes have fulfilled the standard service life and continue to be operated. Since portal cranes are the main link in the technological process, therefore, the productivity of Port lines depends on their reliable and trouble-free operation. The analysis of statistical data shows that the processing and long-term operation of portal cranes in the mode of intense cyclic loading leads to the formation of fatigue defects and the subsequent failure of their components and accidents [1-9]. Therefore, ensuring safe and reliable operation is one of the main tasks in the design, modernization and operation of cranes. The analysis of works showed that the reliability of portal crane mechanisms that have been soldered for more than 35 years in sea and river ports has not been sufficiently studied. For research, 24 identical Ganz cranes with a lifting capacity of 16 tons were selected, which operate in clamshell mode in sea and river ports. The analysis uses information contained in the respective maintenance and repair logs of the respective cranes from 2008 to 2021.

Data analysis shows that the greatest number of failures is observed in the mechanisms of movement, lifting, changing the boom departure and metal structures of cranes. It should be noted that up to 75% of all time is spent on restoring the operation of reducers. The reasons for the failure of movement mechanisms are: wear of gears and shafts of gearboxes, destruction and wear of bearings in gearboxes, cracks in gearbox housings. The failures of the mechanisms for changing the reach of the boom are caused by wear of the teeth of the racks and gears, bearings and gear housings of the mechanism.

Keywords: portal crane, Ganz, mechanism, failure, reliability.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Портальні крани широко використовують у різних портах для виконання перевантажувальних робіт [1–6]. Проте на сьогодні в Україні більше 88% кранів відпрацювали свій нормативний термін служби та продовжують інтенсивно експлуатуватися [1–7].

Оскільки порталні крани є основною ланкою технологічного процесу, тому від їх надійної та безперервної роботи залежить продуктивність портових ліній.

Аналіз статистичних даних свідчить, що понаднормова та тривала експлуатація порталних кранів в режимі інтенсивного циклічного навантаження призводить до утворення втомних дефектів та подальшої відмови вузлів та аварій [1–9]. Тому, забезпечення безпечної та надійної роботи є одним з головних завдань при проектуванні, модернізації та експлуатації кранів.

### Аналіз останніх джерел

Аналіз робіт [1–11] показав що питання надійності механізмів порталних кранів, які працювали більше 35 років у морських та річкових портах вивчені недостатню.

### Формулювання цілей статті

Метою дослідження є аналіз відмов механізмів порталних кранів «ГАНЦ» з понаднормовими термінами експлуатації визначити, визначення показників надійності їх вузлів.

### Виклад основного матеріалу

Для досліджень було обрано 24 ідентичні крани «ГАНЦ», вантажопідйомністю 16 тонн, які працюють в рейферному режимі у морських та річкових портах.

Крани розподілені на 3 групи за роками випуску:

- 1) 1977...1979 рр.;
- 2) 1980...1982 рр.;
- 3) 1982...1985 рр.

Для аналізу використано інформацію яка міститься у відповідних журналах технічного обслуговування та ремонту відповідних кранів з 2008 по 2021 роки.

Типові поломки вузлів, котрі були виявлені при огляді кранів наведені на рис. 1.

Оцінку надійності кранів проводили за комплексним показником – коефіцієнтами готовності (К<sub>гот</sub>), вузлів та механізмів – за коефіцієнтами відмов (К<sub>відм</sub>) та відновлення (К<sub>відн</sub>), які розраховували за формулами (1)..(3) для кожної групи.

$$K_{\text{гот}} = \frac{T_{\text{м}}}{T_{\text{м}} + T_{\text{в}}} \quad (1)$$

де  $T_{\text{м}}$  – середній час роботи між відмовами крану за встановлений період часу;

$T_{\text{в}}$  – середній час відновлення роботи крану за встановлений період часу.

$$K_{\text{гот}} = \frac{n_1}{n_o} \cdot 100\% \quad (2)$$

де  $n_1$  – кількість відмов вузла за встановлений період часу;

$n_o$  – загальна кількість відмов крана за встановлений період часу.

$$K_{\text{гот}} = \frac{t_1}{t_o} \cdot 100\% \quad (3)$$

де  $t_1$  – тривалість часу відновлення вузла за встановлений період часу;

$t_o$  – загальний час відновлення крана за встановлений період часу.



Рис. 1. Виявлені дефекти у механізмах кранів: тріщини у металоконструкціях (а), знос та руйнування рейки зміни вильоту (б), руйнування зубчастих передач (в)

Результати розрахунків коефіцієнтів для кожної групи наведені на рис. 2, 3.

Розрахункове значення середнього коефіцієнту готовності (складає 0,82) дорівнює граничному [5, 6, 9]. Проте для кранів 1977...1979 рр. побудови значення коефіцієнту готовності нижче рівня надійності встановленого стандартом [5, 6, 9].

Аналіз даних вказує на те, що найбільша кількість відмов спостерігається у механізмах переміщення, підйому, зміни вильоту стріли та металоконструкціях кранів (рис. 2, 3). Основними елементами що відмовили є: вали-шестерні та зубчасті колеса редукторів, зубчасті рейки механізмів зміни вильоту, вали, підшипники, зубчасті колеса редукторів та відкриті зубчасті передачі та колеса механізму переміщення, металоконструкції кранів. Слід відмітити, що до 75% усього часу витрачають на відновлення роботи редукторів.

Крім того, чимало часу витрачено на відновлення працездатності металоконструкцій колон, платформ машинного відділення, важелів противаг, елементів стріл. Майже у всіх кранах спостерігались відмови заклепкових та різьбових з'єднань стрілових пристроїв, також знос елементів демпферів. Заміна останніх не викликає особливих складнощів.

У деяких порожнинах металоконструкцій коробчастих елементах спостерігалось накопичення вологи на стінках.

Виявлені тріщини у металевих конструкціях механізмів викликані порушення умов експлуатації, дією вібраційних навантажень які виникають у процесі роботи та призводять до зміни напружено-деформованого стану елементів крана [1–4].

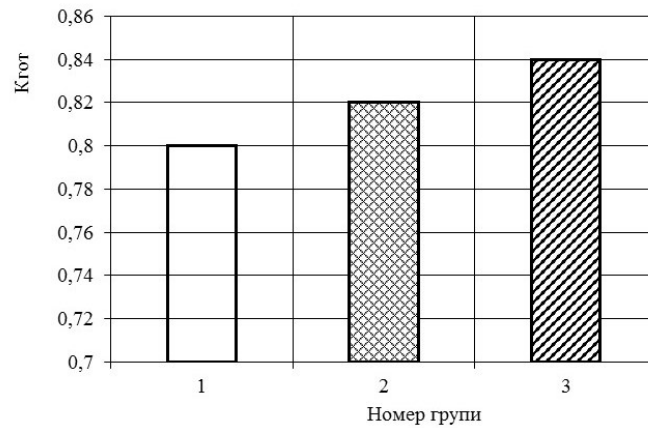
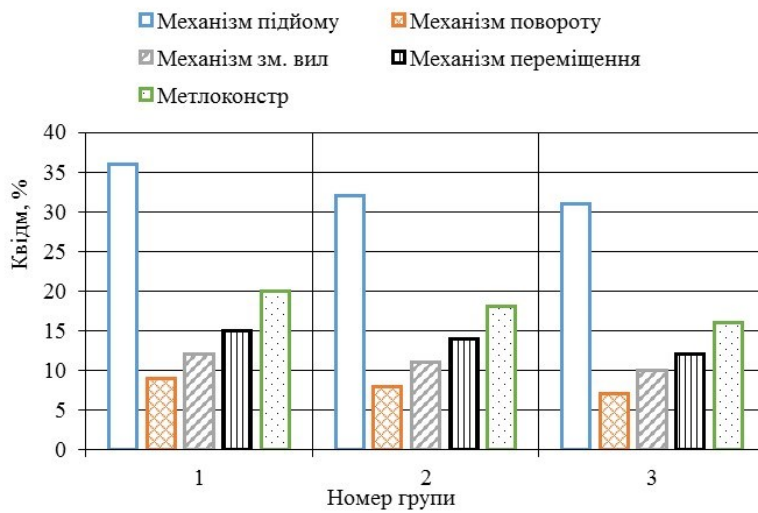
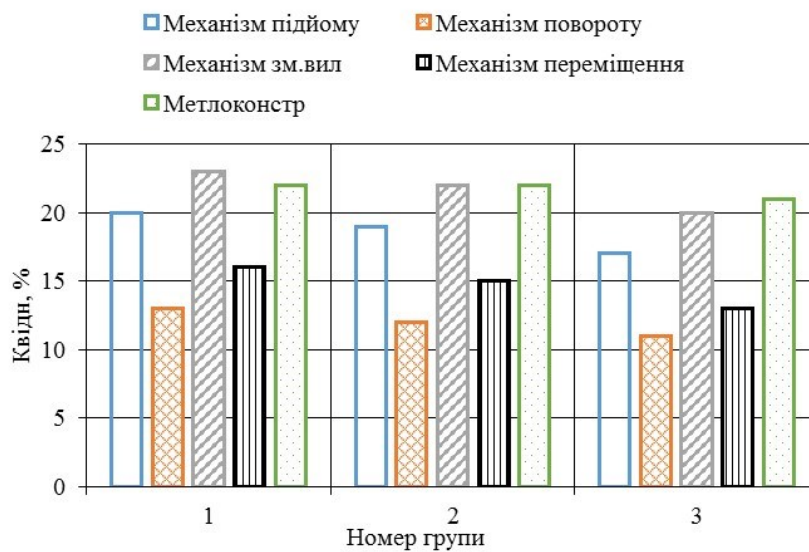


Рис. 2. Коефіцієнти готовності порталних кранів «Ганц»



а)



б)

Рис. 3. Розподіл коефіцієнтів відмов Квідм (а) та часу відновлення Квідн (б) вузлів порталних кранів «Ганц»

Знос канатів, канатних блоків та баранів, знос зубців та поламка підшипників редакторів, а також гальмівних накладок є основні причини виходу з ладу механізму підйому.

У механізмах переміщення відмови пов'язані зі зносом зубчастих коліс та валів-шестерен

редукторів, руйнуванням та зносом підшипників у редукторах, утворенням тріщини у корпусах редукторів,

Причинами виходу з ладу механізмів зміни вильоту стріли є: знос зубців рейок та зубчастих коліс, підшипників редуктора механізму. У 3-х кранах було виявлено дефекти у вигляді вибоїни зубців та мікротріщини у рейці механізму вильоту стріли, які не вимагають її заміни. Виявлені дефекти виникли внаслідок порушення умов експлуатації та технології їх ремонту.

Відмови механізму повороту переважно пов'язані з виходом з ладу опорної колони, валів редукторів механізму.

#### **Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі**

Аналіз отриманих результатів експлуатаційної надійності порталних кранів Ганц показав наступне:

1) значення середнього коефіцієнту готовності (складає 0,82) дорівнює граничному. Проте для кранів 1977...1979 рр. побудови значення коефіцієнту готовності нижче норми;

2) найбільшу кількість відмов виявлено у механізмах переміщення, підйому, зміни вильоту стріли та металокопункціях кранів;

3) основні причинами виходу з ладу механізму підйому – знос канатів, канатних блоків та баранів, знос зубців та поламак підшипників редукторів, а також гальмівних накладок;

4) причинами виходу з ладу механізмів переміщення є знос зубчастих коліс та валів-шестерен редукторів, руйнуванням та зносом підшипників у редукторах, тріщини у корпусах редукторів;

5) вихід з ладу металокопункції пов'язаний з утворенням тріщин у колонах, тягах, платформах, важелях, елементах стріл;

6) відмови механізмів зміни вильоту стріли викликані зносом зубців рейок та зубчастих коліс, підшипників та корпусів редуктора механізму.

Виявлені дефекти механізмів виникли внаслідок порушення умов експлуатації та технології їх ремонту.

#### **Література**

1. Григоров О. В. Вантажопідйомні машини : навч. посібник / Григоров О. В., Петренко Н. О. – Харків : НТУ «ХПІ», 2005. – 304 с.

2. Стрельбіцький В.В. Оцінка надійності механізмів порталних кранів Альбатрос / В.В. Стрельбіцький // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2022. – № 5. – С. 196–199.

3. Стрельбіцький В.В. Експериментальне дослідження впливу напрацювання та асиметрії циклу на тріщиностійкість сталей порталних кранів / В.В. Стрельбіцький, О.О. Немчук // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2020. – № 1. – С. 245–248.

4. Немчук О.О. Експериментальне дослідження впливу напрацювання на тріщиностійкість сталей порталних кранів / О.О. Немчук, В.В. Стрельбіцький // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2019. – № 1. – С. 17–20.

5. Брауде В.И. Надежность подъемно-транспортных машин / Брауде В.И., Семенов Л.Н. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. – 183 с.

6. Зубко Н.Ф. Проблема определения эксплуатационной надежности портовых перегрузочных комплексов / Н.Ф. Зубко, М.Я. Постан, Т.Е. Корниец // Вісник ОДМУ. – 2001. – № 6. – С. 81–89.

7. Qin, Li & Zhang, Bin & Li, Xinren & Huang, Zheng-qiu. The Application Research on Safety performance Evaluation of Portal Crane based on Reliability Evaluation and risk Assessment. E3S Web of Conferences. Volume 257. 2021. p. 1-4.

8. Huang Hai. Study on the Safety Performance Assessment Method for Metal Structures of PortCranes: Doctoral Dissertation; 2008.

9. A Report of the Crane Unit of the Division of Occupational Safety and Health. Philip Yow, 2000.

10. Luo Shengnan. Study on the Safety Assessment Method of Portal Cranes. 2015.

#### **References**

1. Hryhorov O. V. Vantazhopidiomni mashyny : navch. posibnyk / Hryhorov O. V., Petrenko N. O. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2005. – 304 s.

2. Strelbitskyi V.V. Otsinka nadiinosti mekhanizmiv portalnykh kraniv Albatros / V.V. Strelbitskyi // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2022. – № 5. – S. 196–199.

3. Strelbitskyi V.V. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu napratsiuвання ta asymetrii tsykladu na trishchynostiikist stalei portalnykh kraniv / V.V. Strelbitskyi, O.O. Nemchuk // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2020. – № 1. – S. 245–248.

4. Nemchuk O.O. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu napratsiuвання na trishchynostiikist stalei portalnykh kraniv / O.O. Nemchuk, V.V. Strelbitskyi // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2019. – № 1. – S. 17–20.

5. Braude V.I. Nadezhnost podemno-transportnykh mashin / Braude V.I., Semenov L.N. – L. : Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1986. – 183 s.

6. Zubko N.F. Problema opredeleniya ekspluatatsionnoy nadezhnosti portovykh peregruzochnykh kompleksov / N.F. Zubko, M.Ya. Postan, T.E. Korniec // Visnyk ODMU. – 2001. – № 6. – S. 81–89.

7. Qin, Li & Zhang, Bin & Li, Xinren & Huang, Zheng-qiu. The Application Research on Safety performance Evaluation of Portal Crane based on Reliability Evaluation and risk Assessment. E3S Web of Conferences. Volume 257. 2021. p. 1-4.

8. Huang Hai. Study on the Safety Performance Assessment Method for Metal Structures of PortCranes: Doctoral Dissertation; 2008.

9. A Report of the Crane Unit of the Division of Occupational Safety and Health. Philip Yow, 2000.

10. Luo Shengnan. Study on the Safety Assessment Method of Portal Cranes. 2015.

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-214-219>

УДК 621.396: 551.508

**ЧИГІНЬ Василь**

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0003-1593-6832>

e-mail: [vchygin@gmail.com](mailto:vchygin@gmail.com)

**ПАЗИНЮК Михайло**

Національний університет «Львівська політехніка»

e-mail: [pazyniuk.m@gmail.com](mailto:pazyniuk.m@gmail.com)

**ТЕРЕНДІЙ Ольга**

Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0001-9429-852X>

e-mail: [ovterendiy@gmail.com](mailto:ovterendiy@gmail.com)

**МЕНШИКОВ Олексій**

Національний університет «Львівська політехніка»

e-mail: [oleksii.menshykov.ki.2022@lpnu.ua](mailto:oleksii.menshykov.ki.2022@lpnu.ua)

## КЕРУВАННЯ РОБОТОЮ ВІДДАЛЕНОГО ПРИСТРОЮ З ВИКОРИСТАННЯМ PYTHON-СЕРВЕРА FLASK

Досліджена комп'ютерна модель керування віддаленим пристроєм з застосуванням дистанційних хмарних технологій за заздалегідь заданими сценаріями з робочого стола користувача. Для цього створена експериментальна установка, яка включає віддалений пристрій типу коптер, персональний комп'ютер з операційною системою Windows, бортовий комп'ютер Raspberry Pi 3 з операційною системою Raspbian Linux, відеокамеру Pi Camera V2, авіопілот Pixhawk. Опрацьована послідовність з'єднання між клієнтом (користувачем веб-браузера) та сервером (Raspberry Pi 3 із Flask-системою) та виконання віддалених команд за допомогою HTTP-запитів. У ролі фреймворку обрано систему Flask, яка є однією з найпростіших і має вичерпну, незначного об'єму документацію. За отриманими результатами досліджень запропоновано модель керування віддаленим пристроєм з робочого стола персонального комп'ютера користувача через бортовий комп'ютер без використання стандартного пульта керування та оператора.

Ключові слова: комп'ютерна модель керування, фреймворк Flask, віддалений пристрій, бортовий комп'ютер, робочий стіл користувача.

CHYHIN Vasyl, PAZYNIUK Mykhailo

Lviv Polytechnic National University

TERENDII Olha

Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics

National Academy of Sciences of Ukraine

Lviv Polytechnic National University

MENSHIKOV Oleksii

Lviv Polytechnic National University

## CONTROLLING THE OPERATION OF THE REMOTE DEVICE USING FLASK PYTHON SERVER

A computer model of controlling an unmanned aerial vehicle (UAV) using remote cloud technologies according to predetermined scenarios from the user's desktop was studied. For this, an experimental setup was created, which includes an unmanned aerial vehicle of the quadcopter type, a personal computer with the Windows operating system, a Raspberry Pi 3 on-board computer with the Raspbian Linux operating system, a Pi Camera V2 video camera, and a Pixhawk autopilot. Worked out connection sequence between client (web browser user) and server (Raspberry Pi 3 with Flask system) and execution of remote commands using HTTP requests. As a framework, the Flask system was chosen, which is one of the simplest and has comprehensive, small-volume documentation. According to the obtained research results, a model of controlling the UAV from the desktop of the user's personal computer through the on-board computer without using a standard control panel and operator is proposed. According to the obtained research results, a model of remote control of an unmanned aerial vehicle with an on-board computer of the Raspberry Pi type using remote cloud technologies and a control program according to predetermined scenarios is proposed. At the same time, the user works only with the desktop of a personal computer, and accesses through an external or internal network and a Flask-type server to the on-board computer of the UAV without using a standard control panel and operator.

The proposed experimental setup includes an unmanned aerial vehicle of the quadcopter type with a Q450 frame and D2212-920 kv engines, a personal computer with a Windows operating system, a Raspberry Pi 3 on-board computer with a Raspbian Linux operating system. It made it possible to realize the set goal of researching the process of controlling an unmanned aerial vehicle using a Flask-type server. It was found that the full time of passing the HTTP request through the browser window and receiving a response from the server about the successful completion of the task does not exceed one second.

In the future, it is planned to work out more complex processes of launching and controlling an unmanned aerial vehicle in flights according to predetermined scenarios, including the performance of a task such as neutralizing unauthorized aerial vehicles, as well as returning one's own UAV to the place of deployment. The proposed system of remote control with the Flask server can also be useful for receiving an immediate notification when detecting certain sounds from foreign unmanned aerial vehicles, detecting and measuring their flight parameters.

Keywords: computer control model, Flask framework, unmanned aerial vehicle, quadcopter, on-board computer, user desktop.

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

Актуальність виконання даної роботи виникла через необхідність створення інтуїтивно зрозумілої процедури керування віддаленим пристроєм для користувача за допомогою його веб-браузера та іншого допоміжного програмного забезпечення. Для виконання цієї задачі обрано мову програмування Python як одну з найбільш пристосованих для подібних завдань через великий набір додаткових фреймворків (інфраструктур програмних рішень) та бібліотек, процес встановлення яких є зрозумілим та не викликає надмірної складності у користувачів. Цей набір компонент мови Python дозволяє нескладну підтримку при використанні, адже їх оновлення забезпечується авторами програмного забезпечення, а від користувачів вимагається лише коректувати відповідний файл із необхідними версіями та запускати відповідну команду.

Із відомих в літературі програмних веб-середовищ обрано фреймворк Flask, він є одним з найпростіших при написанні програмного забезпечення. Альтернативою є фреймворк Django, проте при виконанні даного завдання його функціонал та розмір виявились надто громіздкими. Фреймворк Flask має вичерпну, невеликого об'єму документацію, яка включає у себе інструкції для швидкого початку роботи, модифікуючи які можна отримати повністю працюючу програму за мінімальний період часу. Таким чином, цей фреймворк дозволяє спростити і пришвидшити процедуру керування віддаленим пристроєм.

## **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

У попередніх працях одного з авторів [1–5] досліджувалися процеси виявлення і вимірювання параметрів польоту віддалених пристроїв за допомогою наземних установок із звуковими і фото-приймачами. Проте запропоновані системи у вказаних роботах дозволяли виконувати лише польоти за наперед заданими GPS-координатами, але не дозволяли виконувати команди віддалено за допомогою взаємодії користувача і бортового мікрокомп'ютера. У праці [6] розглядається можливість побудови так званого “помічника фермера” на основі створення комп'ютерних засобів керування віддаленим пристроєм із застосуванням дистанційних хмарних обчислень. За отриманими результатами запропоновано модель керування віддаленим пристроєм з робочого стола персонального комп'ютера користувача через бортовий комп'ютер без використання стандартного пульта керування та оператора. Для моделювання дистанційного керування процесами використано командний бат-файл і типову програму зв'язку двох комп'ютерів типу VNC (Virtual Network Computing). В роботах [1–6] не розглядалася можливість взаємодії між клієнтом та сервером на основі веб-фреймворків. Враховуючи результати досліджень [4–6], у даній роботі використали досвід встановлення на віддаленій пристрій додаткової техніки, у тому числі мікрокомп'ютера Raspberry Pi 3, а також камери Raspberry Pi V2.

У доступних українських публікаціях [7,8] не виявлено робіт, зв'язаних із використанням бортового комп'ютера для виконання запрограмованих команд віддаленим пристроєм, відпрацювання одного з обраних сценаріїв польоту чи інших дій типу знешкодження несанкціонованого віддаленого пристрою і т.п. В окремих зарубіжних роботах [9,10] висвітлено виконання окремих команд наперед запрограмованими системами, зокрема, при фотозахопленні об'єктів.

В інтернет виданнях [11, 12] виявлено ряд закритих програмних забезпечень, зв'язаних з відлагодженням передполітних режимів та автоматичним керуванням польотів за наперед заданою схемою. Однак, аналогів з використанням взаємодії між клієнтом та сервером на основі веб-фреймворків серед них не встановлено. Типові програми керування віддаленим пристроєм типу Mission Planner [13] і Q-GroundControl [14] призначені для виконання ряду строго визначених дій, зокрема, перевірки всіх сенсорів віддаленого пристрою перед пуском, заведення моторів, вильоту у вертикальному напрямку на певну задану висоту і виконання самого польоту у певному режимі (Gaided, Loiter тощо). Недоліком цих програм є обмежена кількість можливих сценаріїв, які можна відпрацювати на сервері, а також неможливість модифікувати програмне забезпечення через його закриту структуру. Не розглядається також можливість виконання команд віддалено при взаємодії сервера з користувачем.

У даній роботі у ролі бортового комп'ютера обрано Raspberry Pi 3 через сукупність таких задовільних характеристик, як потужність процесора, об'єм оперативної пам'яті, ціна за готовий виріб, розмір та наявність необхідних інтерфейсів під'єднання [15]. У моделі комп'ютера Broadcom BCM2837B0 SoC встановлено процесор ARMv8 Cortex-A53 з тактовою частотою 1.4 ГГц, графічний процесор Video Core IV® Multimedia з двома графічними ядрами, 1ГБ LPDDR2 SDRAM оперативної пам'яті та Wi-Fi модуль на 2.4 ГГц і 5 ГГц IEEE 802.11. Найближчими аналогами, які розглянуті у праці [16], є Raspberry Pi Zero W та Raspberry Pi 4. Перший характеризується значно меншим розміром та легшим встановленням на віддалений пристрій, проте менший об'єм ресурсів не дозволяє йому стабільно працювати з поставленими політними задачами. Новіша модель Raspberry Pi 4 надає значно більше потужності при майже такому ж форм-факторі та розмірах корпусу, але має вищу ціну та надлишкові ресурси, які не знадобляться для виконання поточних завдань для віддаленого пристрою.

Серед програмного забезпечення, яке може виконувати роль керування сервером, розглянули такі аналоги фреймворку Flask, як Django та NodeJS, кожен з яких має свої переваги та недоліки [17]. Оскільки головною метою створеної програми є швидке виконання невеликих команд чи їх комбінацій, перш за все до уваги бралась можливість фреймворку надавати інтерфейс взаємодії між ним та операційною системою, а також його простота та легкість встановлення й відлагодження у разі виникнення помилок. Перший аналог,

Django, як описано у статті [17], серед основних недоліків має більші системні вимоги для пуску та вищий рівень споживання ресурсів при роботі веб-сервера, що є критичним для мікрокомп'ютера Raspberry Pi 3. Аналог NodeJS також забезпечує подібний інтерфейс взаємодії користувача з системою, проте має меншу інтегрованість з портативною ОС Raspbian Linux, яка найкраще працює з Python-додатками та має завчасно налаштовані системні змінні для таких задач.

Серед подібних за призначенням веб-серверів також виділили фреймворк TurboGears [18]. Відмінною особливістю його є розширюваність – його можна розширити за допомогою всіх видів простих плагінів типу WSGI. Крім того, він підтримує горизонтальне розділення даних (шардінг) і його більше зосереджують на об'єктно-орієнтованій парадигмі, яка є суттєво іншим підходом до більшості фреймворків. У зв'язку з цим TurboGears також не розглядався у ролі фреймворка для керування польотами віддаленого пристрою, оскільки для завдань цієї роботи не було необхідності у створенні окремих класів та об'єктів, достатньо викликати потрібні функції та отримувати відповідь від сервера. Розглянуто також фреймворк Web2py [18], який зосереджений на забезпеченні повного стеку функцій та роботи з клієнтськими запитами. Головною перевагою Web2py є його повнофункціональна IDE (Integrated development environment), яка дозволяє змінювати веб-сайт з будь-якого веб-браузера після його розгортання. І хоча він здатний забезпечити досягання поставлених у наших дослідженнях цілей, рішення про відмову від роботи з Web2py виникло через дещо застарілий код та методи, на заміну яких із оновленням мови Python прийшли більш сучасні аналоги.

Обраний фреймворк Flask [19] є невеликим і доступним для користування, він написаний мовою Python, що пропонує корисні інструменти та функції для полегшення процесу створення веб-застосунків. Як вказано його творцями [19], він забезпечує гнучкість і є більш доступним фреймворком для нових дослідників, оскільки дозволяє створити веб-програму швидко, використовуючи лише один файл. Flask-застосунок використовує механізм шаблонів Jinja для динамічного створення HTML-сторінок з використанням знайомих понять у Python, таких як змінні, цикли, списки тощо. Дані шаблони дозволяють спрощено продемонструвати користувачеві результат виконання програми, адже автоматично генеруються на основі переданого з програми тексту.

Попри те, що Flask є власне веб-фреймворком, саме такий вид взаємодії з користувачем є найбільш спрощеним та не вимагає встановлення додаткових компонент, як це може бути у випадку із окремою віконною програмою [20]. Таку програму можна було би створити за допомогою додаткових бібліотек мови програмування Python, як-от Tkinter чи PyGame, проте, для їхнього пуску вимагалось би встановлення додаткових залежностей, чого не вимагається від стандартних браузерів. Через незалежність більшості сучасних браузерів від сімейства операційних систем, на які вони встановлюються, для даної роботи прийнято рішення користуватись веб-браузером Google Chrome та операційною системою Windows 10, які, згідно зі статистикою, користуються найбільшою популярністю. Аналогічними варіантами могли б стати ОС GNU/Linux або Apple macOS, які дозволяють користувачам виходити у глобальну мережу Інтернет або у локальну мережу зв'язаних між собою пристроїв.

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є відлагодження і дослідження системи, що включає бортовий мікрокомп'ютер у парі з віддаленим пристроєм, а також персональний комп'ютер з браузером Google Chrome для оптимізації взаємодії між клієнтом та сервером на основі веб-фреймворку. При цьому слід описати структуру системи та алгоритм віддаленого керування пристроями. Основними вимогами до програми є простота встановлення та можливість легкого використання кінцевими користувачами, а також невимогливість до ресурсів через специфіку обраного мікрокомп'ютера Raspberry Pi.

### Методика дослідження і програма керування віддаленим пристроєм

Процес виконання програми керування віддаленим пристроєм задається користувачем з власного веб-клієнта (браузера) та не вимагає встановлення на власний комп'ютер додаткових компонент. У користувача є можливість обрати серед кількох доступних команд, що він планує виконати. Для прикладу розглянемо одну з команд програми керування `call()`, яка викликає розміщений на Raspberry Pi сервері Python-скрипт. Користувач робить запит із веб-клієнта на адресу `http://<адреса>:<порт>/call` та очікує на відповідь від сервера про результат роботи. При цьому відправляється запит типу HTTP GET, який проходить відповідну перевірку на сервері та повертає статус-код 200 із додатковим повідомленням.

Основна робота функції `call()`, написаної у Flask-застосунку, полягає у виклику вбудованим Python-модулем `subprocess` методу `subprocess.call()`, аргументами до якого передаються шлях до бінарного файлу та шлях до програми керування віддаленим пристроєм, яку обрано для подальшого відпрацювання. Після успішного завершення викликаного методом `subprocess.call()` програми Flask-застосунок завершує виконання функції `call()` та за допомогою ключового слова `return` повертає відповідь користувачеві у вигляді HTTP Response. Останню користувач може спостерігати у вікні свого браузера. У ході виконання роботи використали частини зразків програм з веб-ресурсів DigitalOcean щодо Flask та DigitalOcean щодо модуля `subprocess`.

На рис. 1 зображена блок-схема запропонованої комп'ютерної моделі керування віддаленим пристроєм з використанням фреймворку Flask і сервера. Тут цифрами позначені наступні елементи



програми: 1 – Web-клієнт, тобто браузер, через який користувач керує пуском віддаленого пристрою, у нашому випадку використовувався Google Chrome версії 108.0.5359.125, 2 – HTTP-запит, який передається через інтернет-мережу до сервера та використовується для передавання команди пуску віддаленого пристрою, 3 – сервер на основі Raspberry Pi, 4 – опрацювання HTTP-запиту фреймворком Flask на сервері, тобто перевірка запиту на його коректність та вміст і, як наслідок, виконання відповідних до запиту команд, 5 – пуск однієї з обраних програм керування віддаленим пристроєм (пуск моторів, виліт на задану висоту і т.п.), 6 – повернення статус-коду та повідомлення користувачеві (наприклад, "200, Executed successfully") про результат виконання програми керування віддаленим пристроєм (успішний пуск, помилка сервера і т.п.), HTTP-відгук, передається інтернет мережею назад до клієнта, 7 – очікування Web-клієнтом (браузером) на відповідь від сервера.

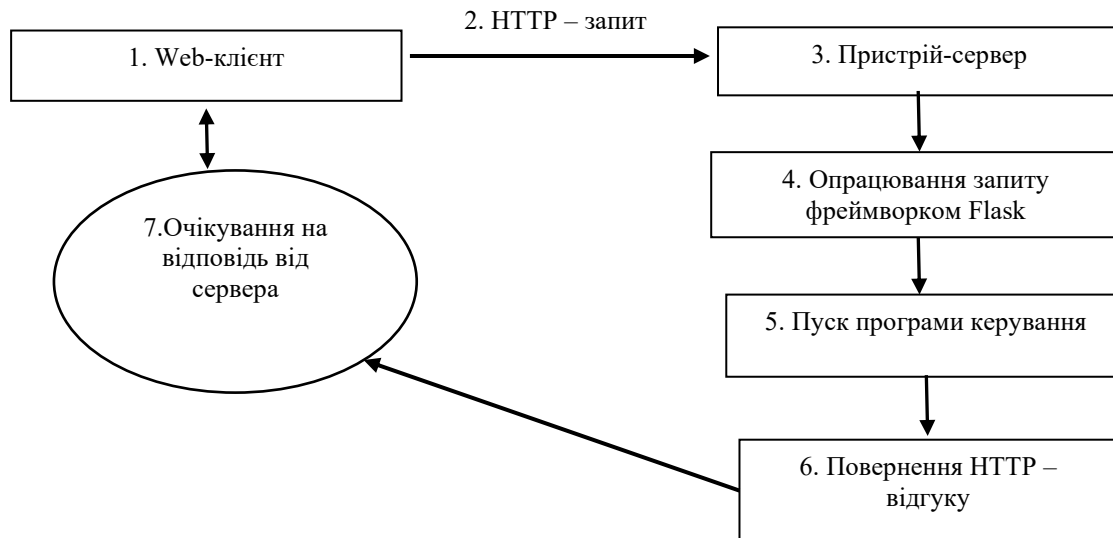


Рис. 1. Блок-схема комп'ютерної моделі керування пристроєм

Для дослідження роботи системи і програми керування віддаленим пристроєм створили експериментальну установку, яка включає пристрій типу квадрокоптер з рамою Q450 і двигунами D2212-920 kv, персональний комп'ютер з операційною системою Windows, бортовий комп'ютер Raspberry Pi 3 з операційною системою Raspbian Linux, відеокамеру Pi Camera V2, автопілот Pixhawk. Опрацьована послідовність з'єднання між клієнтом (користувачем веб-браузера) та сервером (Raspberry Pi 3 із Flask-системою) та виконання віддалених команд за допомогою HTTP-запитів.

У ролі Web-клієнта (користувача) служив браузер Google Chrome, встановлений на ноутбучі із операційною системою Windows 10, який розмістили на віддалі 100 метрів від стартової площадки віддаленого пристрою. Останній міг виконувати пуск моторів і польоти за заздалегідь заданими сценаріями [5]. У даній роботі виконували тільки пуск і зупинку моторів за допомогою з'єднання між клієнтом (користувачем веб-браузера) з робочого стола користувача та сервером (Raspberry Pi 3 із Flask-системою). При цьому HTTP-запити сформували у bat-файлі, вписуючи туди команди типу `start C:"\program files\Google\Chrome\Application\chrome.exe" http://192.168.0.178:5000/call`. У даному випадку використали внутрішню мережу для зв'язку (192.168.0.178 – IP-адреса внутрішньої мережі).

Сервер складений мовою Python і включає Flask-систему із директивами типу наступних:

```

from flask import Flask – імпорт бібліотеки Flask,
import subprocess – імпорт бібліотеки subprocess,
app = Flask(__name__) – ініціалізація сервера,
@app.route('/call') – декоратор функції call,
subprocess.call(["/bin/bash", "Drone.sh"], stdout=output) – команда на пуск файлу Drone.sh,
return 'Executed successfully' – повертання користувачеві повідомлення, яке появляється на робочому столі у вікні браузера Google Chrome.
  
```

#### Аналіз результатів дослідження

При дослідженні процес керування віддаленим пристроєм – коптером з рамою Q450 проходив наступним чином. Після пуску bat-файлу з командою типу `start C:"\program files\Google\Chrome\Application\chrome.exe" http://192.168.0.178:5000/call` відкривається вікно браузера і надсилається HTTP-запит на внутрішню IP-адресу 192.168.0.178 бортового комп'ютера і на порт 5000. Функція call активізує команду на відкриття файлу `drone.sh`. При цьому пускаються мотори коптера і через деякий час вимикаються.

Користувач очікує не більше 1 секунди на відповідь із сервера. При успішному виконанні сервером команди пуску моторів, сповіщення типу 'Executed successfully' появляється у вікні браузера.

**Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі**

За отриманими результатами досліджень запропоновано модель керування віддаленим пристроєм з бортовим комп'ютером типу Raspberry Pi з використанням дистанційних хмарних технологій і програми керування за задалегідь заданими сценаріями. При цьому користувач працює тільки з робочим столом персонального комп'ютера і виходить через зовнішню чи внутрішню мережу та сервер типу Flask на бортовий комп'ютер віддаленого пристрою без використання стандартного пульта керування та оператора.

Запропонована експериментальна установка включає пристрій типу коптер з рамою Q450 і двигунами D2212-920 kv, персональний комп'ютер з операційною системою Windows, бортовий комп'ютер Raspberry Pi 3 з операційною системою Raspbian Linux. Вона дозволила реалізувати поставлену мету дослідження процесу керування віддаленим пристроєм за допомогою сервера типу Flask. Виявлено, що повний час проходження HTTP-запиту через вікно браузера і отримання відповіді від сервера про успішне виконання завдання не перевищує однієї секунди.

У перспективі планується опрацювати складніші процеси пуску і керування віддаленим пристроєм у польотах за наперед заданими сценаріями, в тому числі виконання завдання типу знешкодження несанкціонованих літальних апаратів, а також повертання власного віддаленого пристрою на місце дислокації. Запропонована система віддаленого керування з Flask-сервером може бути корисною також для отримання негайного сповіщення при виявленні певних звуків від чужих безпілотних літальних апаратів, виявленні і вимірюванні параметрів їх польоту.

**Література**

1. Чигінь В.І. Вдосконалення способу виявлення безпілотних літальних апаратів за результатами спектрального аналізу акустичних сигналів / В.І. Чигінь, М.М. Проценко, Ю.В. Шабатура, М.В. Бугайов // Військово-технічний збірник АСВ. – 2019. – № 20. – С. 58–63. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.20.2019.58-63>
2. Чигінь В.І. Вимірювання координат безпілотних літальних об'єктів з використанням звукової і відеоапаратури / В.І. Чигінь, П.Я. Михайлишин // V Всеукраїнська наук.-техн. конф. у царині метрології «Technical Using of Measurement – 2019», м. Славське, 29 січ. – 2 лют. 2019 р. – С. 10–12.
3. Федішин Н. Дослідження звукової системи виявлення літальних об'єктів з використанням гармонік в акустичному сигналі / Н. Федішин, В.І. Чигінь // Міжнар. конф. молодих вчених та аспірантів "ІЕФ-2017. Інститут електронної фізики НАН України", м. Ужгород, 23–26 трав. 2017. – С. 13–15.
4. Чигінь В. Експериментальний безпілотний авіаційний комплекс для фотозахоплення / В.І. Чигінь, П.Я. Михайлишин // Вісник Хмельницького Національного університету. Технічні науки. – 2019. – № 2 (271). – С. 202–205.
5. Чигінь В. Експериментальні дослідження безпілотного авіаційного комплексу при фото захопленні / В. Чигінь, П. Михайлишин // Вісник Хмельницького Національного університету. – 2020. – № 3(285). – Р. 170–174.
6. Чигінь В. Створення комп'ютерних засобів керування автономним літальним апаратом з застосуванням дистанційних хмарних обчислень / Василь Чигінь // Комп'ютерні системи та мережі. Кафедра ЕОМ НУЛП. – 2021. – № 3. – С. 106–113.
7. Salnik Yu.P., Matala I.V., Onishchenko V.A. The current state of equipping the Armed Forces of Ukraine with unmanned aviation complexes. The team sciences works of Kharkiv University. Air Forces, 2011, Issue 2 (28). P. 46–51.
8. Glotov V., Gunina A., Teleshchuk Yu. Analysis of the possibilities of using unmanned aerial vehicles for military purposes. Photogrammetry, geoinformation systems and cartography. 2017. V. 1 (33). P. 139–146.
9. Автоматичне відстеження об'єкта на Python. URL: <https://robotos.in/uroki/avtomaticheskoe-otslezhivanie-ob-ekta-na-python>
10. Ballon Finder. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=yRmXwRqPesY&feature=youtu.be>.
11. DJI Mavic 2 pro active track 2.0 mode. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=qEmd5g2fMcE&feature=youtu.be>
12. Experimental DJI system. URL: <https://vido.com.ua/article/12354/ekspierimentalnaia-sistiema-dji-pomoghayet-priedotvrashchat-stolknovienii-a-dronov-zalogh-biezopasnogho-vozdushnogho-dvizhienii-a>
13. Mission-planner. URL: <http://www.ardupilot.org/wiki/arducopter/install-mission-planner.html> (Accessed: 05 December 2021)
14. QGroundControl. URL: <http://qgroundcontrol.com> (Accessed: 05 December 2021)
15. Raspberry Pi Documentation. URL: <https://www.raspberrypi.com/documentation/>
16. Raspberry Pi Models Comparison. URL: <https://socialcompare.com/en/comparison/raspberrypi-models-comparison>
17. Flask vs Django vs NodeJS. URL: <https://www.softwaretestinghelp.com/django-vs-flask-vs-node/>
18. 5 Cool Alternatives To Django and Flask For Deploying Endpoints And FullStack. URL: <https://towardsdatascience.com/5-cool-alternatives-to-django-and-flask-for-deploying-endpoints-5c99a066696>
19. Flask documentation. URL: <https://flask.palletsprojects.com/en/2.0.x/>
20. Python GUI Programming with Tkinter. URL: <https://realpython.com/python-gui-tkinter/>

## References

1. Chyhin V.I. Vdoskonalennia sposobu vyivlennia bezpilotnykh litalnykh aparativ za rezultatamy spektralnogo analizu akustychnykh syhnaliv / V.I. Chyhin, M.M. Protsenko, Yu.V. Shabatara, M.V. Buhaiiov // *Viiskovo-tekhnichnyi zbirnyk ASV*. – 2019. – № 20. – S. 58–63. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.20.2019.58-63>
2. Chyhin V.I. Vymiruvannia koordynat bezpilotnykh litalnykh ob'ektiv z vykorystanniam zvukovoi i videoaparatury / V.I. Chyhin, P.Ia. Mykhailyshyn // *V vseukrainska nauk.-tekhn. konf. u tsaryni metrolohii «Technical Using of Measurement – 2019»*, m. Slavske, 29 sich. – 2 liut. 2019 r. – S. 10–12.
3. Fedyshyn N. Doslidzhennia zvukovoi systemy vyivlennia litalnykh ob'ektiv z vykorystanniam harmonik v akustychnomu syhnali / N. Fedyshyn, V.I. Chyhin // *Mizhnar. konf. molodykh vchenykh ta aspirantiv "IEF-2017. Instytut elektronnoi fizyky NAN Ukrainy"*, m. Uzhhorod, 23–26 trav. 2017. – S. 13–15.
4. Chyhin V. Eksperymentalnyi bezpilotnyi aviatsiinyi kompleks dlia fotozakhop-lennia / V.I. Chyhin, P.Ia. Mykhailyshyn // *Visnyk Khmelnytskoho Natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. – 2019. – № 2 (271). – S. 202–205.
5. Chyhin V. Eksperymentalni doslidzhennia bezpilotnoho aviatsiinoho kompleksu pry foto zakhoplenni / V. Chyhin, P. Mykhailyshyn // *Visnyk Khmelnytskoho Natsionalnoho universytetu*. – 2020. – № 3(285). – R. 170–174.
6. Chyhin V. Stvorennia kompiuternykh zasobiv keruvannia avtonomnym litalnym aparatom z zastosuvanniam dystantsiinykh khmarnykh obchyslen / Vasyl Chyhin // *Kompiuterni systemy ta merezhi. Kafedra EOM NULP*. – 2021. – № 3. – S. 106–113.
7. Salnik Yu.P., Matala I.V., Onishchenko V.A. The current state of equipping the Armed Forces of Ukraine with unmanned aviation complexes. The team sciences works of Kharkiv University. *Air Forces*, 2011, Issue 2 (28). P. 46–51.
8. Glotov V., Gunina A., Teleshchuk Yu. Analysis of the possibilities of using unmanned aerial vehicles for military purposes. *Photogrammetry, geoinformation systems and cartography*. 2017. V. 1 (33). R. 139–146.
9. Avtomatychne vidstezhennia ob'ekta na Python. URL: <https://robotos.in/uroki/avtomaticheskoe-otslezhivanie-ob-ekta-na-python>
10. Ballon Finder. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=yRmXwRqPesY&feature=youtu.be>
11. DJI Mavic 2 pro active track 2.0 mode. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=qEmd5g2fMcE&feature=youtu.be>
12. Experimental DJI system. URL: <https://vido.com.ua/article/12354/ekspierimentalnaia-sistiema-dji-pomoghaiet-priedotvrashchat-stolknovieniia-dronov-zalogh-biezopasnogho-vozdushnogho-dvizhieniia>
13. Mission-planner. URL: <http://www.ardupilot.org/wiki/arducopter/install-mission-planner.html> (Accessed: 05 December 2021)
14. QGroundControl . URL: <http://qgroundcontrol.com> (Accessed: 05 December 2021)
15. Raspberry Pi Documentation. URL: <https://www.raspberrypi.com/documentation/>
16. Raspberry Pi Models Comparison. URL: <https://socialcompare.com/en/comparison/raspberrypi-models-comparison>
17. Flask vs Django vs NodeJS. URL: <https://www.softwaretestinghelp.com/django-vs-flask-vs-node/>
18. 5 Cool Alternatives To Django and Flask For Deploying Endpoints And FullStack. URL: <https://towardsdatascience.com/5-cool-alternatives-to-django-and-flask-for-deploying-endpoints-5c99a066696>
19. Flask documentation. URL: <https://flask.palletsprojects.com/en/2.0.x/>
20. Python GUI Programming with Tkinter. URL: <https://realpython.com/python-gui-tkinter/>

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-220-223>

УДК 510.51

**ЩЕРБАНЬ Володимир**

Київський національний університет технологій та дизайну  
<https://orcid.org/0000-0002-4274-4425>  
[scherbanvu@ukr.net](mailto:scherbanvu@ukr.net)

**КОЛЬВА Микита**

Київський національний університет технологій та дизайну  
<https://orcid.org/0000-0001-9955-0069>  
[radik061@gmail.com](mailto:radik061@gmail.com)

**ЕГОРОВ Дмитро**

Київський національний університет технологій та дизайну  
<https://orcid.org/0000-0002-0002-7663>  
[deskoda3232@gmail.com](mailto:deskoda3232@gmail.com)

**КОЛИСКО Оксана**

Київський національний університет технологій та дизайну  
<https://orcid.org/0000-0003-4043-1238>  
[kipt@i.com.ua](mailto:kipt@i.com.ua)

**ЩЕРБАНЬ Юрій**

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

## **РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ КІНЕМАТИЧНОГО ТА ДИНАМІЧНОГО АНАЛІЗУ ВАЖІЛЬНИХ МЕХАНІЗМІВ МАШИН ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ ПРОГРАМИ ДЛЯ ОЦІНКИ НАПРУЖЕНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ**

*Розробка комп'ютерного модуля для кінематичного та динамічного аналізу важільних механізмів машин легкої промисловості дозволяє визначити параметри, які 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, кінематичний та динамічний аналіз, машини легкої промисловості, напруженість технологічних процесів.*

SHCHERBAN Volodymyr, KOLVA Nikita, EGOROV Dmitrij, KOLISKO Oksana  
Kyiv National University of Technologies and Design  
SHCHERBAN Yuryj  
Kyiv Professional College of Applied Sciences

## **DEVELOPMENT OF A COMPUTER MODULE FOR KINEMATIC AND DYNAMIC ANALYSIS OF IMPORTANT MECHANISMS OF LIGHT INDUSTRIAL MACHINES, PROGRAMS FOR ASSESSING THE TENSION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES**

*The development of a computer module for kinematic and dynamic analysis of the lever mechanisms of light industry machines allows determining the parameters that 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 of the technological equipment. Kinematic and dynamic analysis of flat mechanisms plays a significant role in the design of new mechanisms and modernization of existing ones. The results obtained during these studies can be used to calculate the strength of individual links, their inertial characteristics, optimization of structural parameters of mechanisms, and minimization of consumed energy.*

*A sharp increase in tension leads to a violation of the normal course of the technological process of thread processing. The imperfection of the structural elements of the feed system, thread tensioning devices and thread guides on knitting, textile and sewing machines will not allow thread processing with a sudden increase in input tension. 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. To do this, it is effective to use specially developed programs for performing a computational experiment. 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. The development of special computer programs for determining the tension in the working area allows you to determine the necessary technological parameters, make adjustments to both the structure itself and the components of the thread feeding system to obtain the minimum necessary tension in the working area.*

*The objective function in the problem is the minimum necessary tension, which is the minimum sum of the angles covered by the thread of guide surfaces that have a cylindrical, elliptical shape, discrete segments of a straight line. The use of a computer program allows you to determine tensions and changes in relative tension in the filling zones of light and textile industry machines, which allows you to optimize the shape of the thread supply line even at the stage of designing the technological process.*

*The development of application packages of computer programs allows to reduce the time for the design of technological processes in the light and textile industry as much as possible. This is due to the modernization of the thread filling line on the technological equipment, which allows to minimize thread tension in the working area. Minimization of tension is ensured by optimization of the shape of the thread filling line, in which the total angle of coverage of the guides will be minimal. Computer determination of kinematic and dynamic parameters of flat mechanisms allows to determine the parameters used in determining the intensity of technological processes.*

*Keywords: computer module, kinematic and dynamic analysis, light industry machines, intensity of technological processes.*

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

Розробка комп'ютерного модуля для кінематичного та динамічного аналізу важільних механізмів машин легкої промисловості дозволяє визначати параметри, які використовуються в програмі для оцінки напруженості технологічних процесів легкої та текстильної промисловості при визначенні зміни відносного натягу нитки по зонах заправки на технологічному обладнанні. Кінематичний та динамічний аналіз плоских механізмів виграє значну роль при проектуванні нових механізмів та модернізації існуючих. Результати, які отримуються при проведенні даних досліджень, можна використовувати при розрахунку міцності окремих ланок, їх інерційних характеристик, оптимізації конструктивних параметрів механізмів, мінімізації споживаної енергії.

Різде збільшення натягу призводить до порушення нормального проходження технологічного процесу переробки нитки. Недосконалість структурних елементів системи подачі, пристроїв для натягу нитки та спрямовувачів нитки на трикотажних, текстильних та швейних машинах не дозволяють здійснювати переробку ниток при стрибкому зростанні вхідного натягу. Розробка нових схем системи подачі нитки потребує оперативної оцінки значення натягу перед робочою зоною. Для цього ефективно використовувати спеціально розроблені програми для виконання обчислювального експерименту. 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. Розробка спеціальних комп'ютерних програм для визначення натягу в робочій зоні дозволяє визначати необхідні технологічні параметри, провадити корегування як самої структури, так і складових компонентів системи подачі нитки для отримання мінімально необхідного натягу в робочій зоні.

Цільовою функцією в задачі виступає мінімально необхідний натяг, яка представляє собою мінімальну суму кутів охоплення ниткою напрямних поверхонь які мають циліндричну, еліптичну форми, дискретні відрізки прямої лінії. Використання комп'ютерної програми дозволяє визначати напруженості та зміни відносного натягу по зонах заправки машин легкої та текстильної промисловості, 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 удосконалення системи подачі ниток на технологічному обладнанні, конструкції існуючих пристроїв натягу та транспортування нитки та розробки нових.

## **Аналіз досліджень та публікацій**

Аналіз дефектів, що приводять до обриву нитки при переробці, показав, що найбільш вагомими є: слабкі місця на нитці (стоншування), шишки і потовщення, моховитість [1, 4, 8]. 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 [4, 6]. 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 [4–9]. Максимального значення натягу буде перед робочою зоною. 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.

Основним параметром оптимізації системи подачі ниток на технологічному обладнанні текстильної та трикотажної промисловості є мінімально необхідний натяг в робочій зоні [3–8]. Збільшення натягу в робочій зоні призводить до обриву ниток і, як наслідок, до зупинки технологічного обладнання [3, 4, 9]. Простої устаткування, пов'язані з ліквідацією обриву, складають в даний час 75–80 % від загального часу простоїв [4].

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.

Комп'ютерне визначення кінематичних та динамічних параметрів плоских механізмів дозволяє визначати параметри, які використовуються при визначенні напруженості технологічних процесів [1, 3–5].

## **Формулювання цілей статті**

Метою роботи є розробка комп'ютерного модуля для кінематичного та динамічного аналізу важільних механізмів машин легкої промисловості програми для оцінки напруженості технологічних процесів.

## **Виклад основного матеріалу**

На рис. 1а представлена початкова форма  $TPMForm1 = class(TForm)$  комп'ютерного модуля K DAM для кінематичного та кінетостатичного аналізу плоских важільних механізмів машин легкої промисловості.



ініціює виконання процедури `procedure Button10Click(Sender: TObject)` присвоювання значень кінематичних та динамічних параметрів точки ВК на коромислі початковій точці А наступної групи Асура.

Компонент `Button5: TButton` ініціює виконання процедури `procedure Button5Click(Sender: TObject)` переходу до модуля `unit ku0` додавання кулісної групи Асура до механізму. Модуль `unit ku0` включає форму `TFormku0 = class(TForm)` для обрання номеру схеми та введення вхідних даних для кулісної групи для розрахунку. Компонент `Button11: TButton` ініціює виконання процедури `procedure Button11Click(Sender: TObject)` присвоювання значень кінематичних та динамічних параметрів точки КСА на кулісі початковій точці А наступної групи Асура, яка може бути приєднана до механізму.

Компонент `Button1: TButton` ініціює виконання процедури `procedure Button1Click(Sender: TObject)` закриття форми `TRMForm2 = class(TForm)` та виходу з програми.

### **Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі**

Розроблений комп'ютерний модуль для кінематичного та динамічного аналізу важільних механізмів машин легкої промисловості програми для оцінки напруженості технологічних процесів.

### **Література**

1. Scherban V.Yu., Kolisko O.Z., Sholudko M.I., Kalashnik V.Yu. Algorithmic, software and mathematical components of CAD in the fashion industry. K.: Education of Ukraine, 2017. 745 p.
2. 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.
3. Щербань В.Ю. Механіка нитки. К. : Освіта України, 2018. 533 с.
4. Щербань В.Ю., Волков О.И., Щербань Ю.Ю. САПР оборудования и технологических процессов легкой и текстильной промышленности. К. : Бумсервис, 2004. 519 с.
5. Scherban V.Yu., Krasnitsky S.M., Rezanov V.G. Mathematical Models in CAD. Selected sections and examples of application. K.: KNUVD, 2011. 220 p.
6. Щербань В.Ю., Щербань Ю.Ю., Колиско О.З., Мельник Г.В., Шолудько М.І., Калашник В.Ю. Базове проектує забезпечення САПР в індустрії моди. К.: Освіта України, 2018. 902 с.
7. Щербань В.Ю., Калашник В.Ю., Колиско О.З., Шолудько М.І. Дослідження впливу матеріалу нитки і анізотропії тертя на її натяг і форму осі. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2015. 223(2). С. 25-29.
8. Shcherban V., Melnyk G., Sholudko M., Kalashnyk V. Warp yarn tension during fabric formation. *Fibres and Textiles*. 2018. volume 25. № 2. P. 97-104.
9. Yakubitskaya I.A., Chugin V.V., Shcherban V.Yu. Differential equations of the relative motion of the filament element on the end sections of the coil of the winding drum. *Technology of the textile industry*. 1997. № 6. P. 50-54.

### **References**

1. Scherban V.Yu., Kolisko O.Z., Sholudko M.I., Kalashnik V.Yu. Algorithmic, software and mathematical components of CAD in the fashion industry. K.: Education of Ukraine, 2017. 745 p.
2. 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.
3. Scherban V.Yu. Mechanics of Threads. K.: Formation of Ukraine, 2018. 533 p.
4. Scherban V.Yu., Volkov O.I., Shcherban Yu.Yu. CAD equipment and technological processes for light and textile industries. K.: Boomservice, 2004. 519 p.
5. Scherban V.Yu., Krasnitsky S.M., Rezanov V.G. Mathematical Models in CAD. Selected sections and examples of application. K.: KNUVD, 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.

КОЗУБ Юрій

Луганський національний університет імені Тараса Шевченка

<https://orcid.org/0000-0002-3366-6031>e-mail: [kosub.yg@gmail.com](mailto:kosub.yg@gmail.com)

КОЗУБ Галина

Луганський національний університет імені Тараса Шевченка

<https://orcid.org/0000-0001-5387-050X>e-mail: [kozubg@luguniv.edu.ua](mailto:kozubg@luguniv.edu.ua)

## ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБКИ МУЛЬТИПЛАТФОРМНИХ ЗАСТОСУНКІВ НА KOTLIN

Проведено дослідження методології розробки мультиплатформних застосунків на мові програмування Kotlin. Представлено методіку розробки мультиплатформного застосунку для операційних систем Windows, Android, macOS та Linux, що дозволяє створювати музичні мелодії у новому форматі. Досліджено принципи декларативного програмування та фреймворки для мультиплатформної розробки. Для програмної реалізації окремих нативних додатків, обрано нативні рішення. Такому рішенню сприяє використання фреймворків Kotlin Multiplatform та Compose Multiplatform. Kotlin Multiplatform дозволяє створювати універсальний код логіки мультиплатформного застосунку, у поєднанні з UI фреймворком Compose Multiplatform. Використання такого поєднання дає можливість написання єдиного коду логіки та інтерфейсу застосунку для декількох платформ одночасно, що допомагає економити час і уникати значної кількості помилок. Описано архітектурний патерн MVI, який найкраще підходить під декларативний стиль мультиплатформного фреймворку Compose Multiplatform. Розглянуто шаблон проектування Dependency Injection, а також інші засоби проектування мультиплатформних застосунків, таких як: бібліотека Kotlin Coroutines для підтримки асинхронності і паралельних обчислень у Kotlin, система збірки проектів Gradle Kotlin DSL, бібліотека Decompose та фреймворк MVIKotlin. Запропоновано методіку розробки архітектури компонентів Android-додатку. Модульна структура архітектури проекту поділена на дві частини: на common модуль, який містить у собі основну логіку додатку, а також платформні реалізації компонентів, та платформні модулі, що виконують ініціалізацію та запуск застосунку на певній платформі. Для налагодження доступу до репозиторіїв з компонентів бізнес-логіки застосунку, використовується впровадження залежностей. Логіка впровадження залежностей описується у файлах-модулях Koin. Запропоновано методіку, що узагальнює методологію розробки мультиплатформних застосунків на мові програмування Kotlin для розробки інтерфейсів користувача під декілька платформ.

Ключові слова: Kotlin, Gradle, Common, Jetpack Compose, Dependency Injection, Kotlin Multiplatform, Compose Multiplatform, Koin.

KOZUB Yurii, KOZUB Halyna  
Luhansk Taras Shevchenko National University

## FEATURES OF MULTIPLATFORM APPLICATION DEVELOPMENT ON KOTLIN

A study of the methodology of developing multi-platform applications using the Kotlin programming language was conducted. The method of developing a multi-platform application for Windows, Android, macOS and Linux operating systems is presented, which allows you to create musical melodies in a new format. The principles of declarative programming and frameworks for multi-platform development are studied. For the software implementation of individual native applications, native solutions have been chosen. This solution is facilitated by the use of Kotlin Multiplatform and Compose Multiplatform frameworks. Kotlin Multiplatform allows you to create a universal logic code of a multiplatform application, in combination with the Compose Multiplatform UI framework. Using such a combination makes it possible to write a single logic code and application interface for several platforms at the same time, which helps to save time and avoid a significant number of errors. The MVI architectural pattern is described, which best fits the declarative style of the Compose Multiplatform framework. The Dependency Injection design pattern is considered, as well as other tools for designing multiplatform applications, such as: the Kotlin Coroutines library to support asynchrony and parallel computing in Kotlin, the Gradle Kotlin DSL project assembly system, the Decompose library, and the MVIKotlin framework. A methodology for developing the architecture of Android application components is proposed. The modular structure of the project architecture is divided into two parts: the common module, which contains the main logic of the application, as well as platform implementations of components, and platform modules that perform initialization and launch of the application on a certain platform. Dependency implementation is used to establish access to repositories from application business logic components. The logic of implementing dependencies is described in Koin module files. A methodology is proposed that summarizes the methodology of developing multi-platform applications in the Kotlin programming language for developing user interfaces for several platforms.

Key words: Kotlin, Gradle, Common, Jetpack Compose, Dependency Injection, Kotlin Multiplatform, Compose Multiplatform, Koin.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Поширення смартфонів призвело до розробки великої кількості програмних застосунків, що робить їх розробку важливою сферою. Оскільки один і той самий сервіс у формі застосунку потрібно розробляти на кількох платформах, почали з'являтися різні технології нативного рішення – спочатку кросплатформні, а тепер мультиплатформні. Ці технології були розроблені головним чином для скорочення витрат і підвищення ефективності процесу розробки програм. Плюсами кросплатформної розробки є висока швидкість та низька вартість розробки. До недоліків відносяться: складна підтримка низкорівневих



платформних функцій; відносно низька продуктивність, у порівнянні з нативними застосунками; забирає більш місця у пам'яті; нові платформні можливості з'являються пізніше ніж у нативних застосунках.

### Аналіз досліджень та публікацій

Серед розробників мобільних застосунків, спостерігається тенденція вміння швидко вносити зміни у застосунок на потребу ринку. Внаслідок чого виникає необхідність визначення ефективних підходів до розробки конкурентних мобільних мультиплатформних застосунків.

Виробник кожної платформи чи операційної системи (ОС), надає набір для розробки програмного забезпечення (SDK), який містить усе необхідне для розробки програм на певній платформі чи ОС. Кросплатформні фреймворки мають окремий SDK, який зазвичай є шаром поверх рідного SDK. При програмній реалізації окремих мобільних застосунків під декілька платформ, у розробників, часто виникають проблеми з нативною розробкою, кросплатформність не може вирішити деякі з цих проблем за допомогою компромісів, зростають витрати на синхронізацію і мультиплатформність може бути кращим рішенням [1, 2].

Програмна реалізація окремих мобільних застосунків під декілька платформ сприяє збільшенню витрат на їх підтримку. На швидкість розробки, впровадження нових функціональностей, якість та зручності використання програмного застосунку впливає застосування кросплатформних інструментів. Для прискорення процесу написання коду, краще використовувати Xamarin.Forms, в якому майже всі елементи повністю сумісні з будь-якими платформами. Xamarin – платформа від Microsoft для створення застосунків під Android, iOS, Windows, Linux, macOS, watchOS та tvOS. Xamarin включає єдину загальну кодову базу C# і надає можливість тестувати застосунки на декількох пристроях з використанням Xamarin Cloud. Xamarin має два основних інструменти: Xamarin.Android, Xamarin.iOS і Xamarin.Forms. По частині кросплатформної розробки Xamarin пропонує використовувати єдиний API Xamarin.Essentials. Xamarin.Android і Xamarin.iOS наділяють застосунок тими ж можливостями і інтерфейсом, які є у нативних рішень [3].

React Native – це платформа з відкритим кодом для розробки мобільних додатків, дозволяє писати застосунки для iOS, Android, Windows, Web, Windows Phone, VR, Android TV, macOS, tvOS на мові JavaScript. Середовище поставляється з великим набором готових компонентів, однак вони не завжди адаптуються під різні платформи, що вимагає додаткових коригувань в коді. В гонитві за продуктивністю розробники віддають перевагу саме цьому фреймворку. Native дозволяє використовувати кастомні модулі на мовах для нативної розробки, але їх необхідно писати окремо для кожної платформи [4].

Безкоштовний кросплатформний фреймворк Flutter від Google з відкритим вихідним кодом для швидкої розробки застосунків під Android, iOS, Windows, Linux, macOS, Web та Google Fuchsia, використовує об'єктно-орієнтовану мову програмування Dart використовує один і той же код для всіх платформ, перевершує конкурентів і демонструє найвищу продуктивність завдяки власному движку рендерингу і сучасній мові Dart, яка була розроблена Google. Flutter включає сторонні SDK, API для 2D, анімації, власні віджети Material Design і надає можливість повторно використовувати існуючий код Java, Swift та Objective-C [5].

Незважаючи на значну кількість досліджень в області кросплатформного програмування проблема використання декларативного підходу до створення мультиплатформних застосунків потребує подальших досліджень.

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є дослідження особливостей технології Kotlin при створенні мультиплатформних застосунків.

### Виклад основного матеріалу

Для розробки мультиплатформних застосунків використовується мова програмування Kotlin інструменти та бібліотеки з підтримкою Kotlin Multiplatform, такі як: Kotlin Coroutines, UI-фреймворк Jetpack Compose, патерн MVI, бібліотеки SQLDelight та Koin.

Kotlin – кросплатформова, статично типізована мова програмування загального призначення з підтримкою виводу типів. Kotlin розроблений для повної взаємодії з Java, де версія стандартної бібліотеки Kotlin для JVM залежить від бібліотеки класів Java, але тип взаємодії дозволяє зробити його синтаксис більш коротким і лаконічним. Kotlin в основному орієнтований на JVM, але також компілюється на JavaScript (наприклад, для інтерфейсних Web-додатків з використанням React) або власного коду (через LLVM), наприклад, для власних додатків iOS, що використовують бізнес-логіку спільно з додатками Android. [2, 6].

Асинхронне або неблокуюче програмування є важливою частиною розробки. При створенні серверних, програмних застосунків важливо забезпечити не тільки гнучкість з точки зору користувача, але і масштабованість, коли це необхідно. Паралельні обчислення дозволяють виконувати кілька завдань одночасно, а асинхронність дозволяє не блокувати основний хід програми під час виконання завдання, яка займає тривалий час.

У Kotlin підтримка асинхронності і паралельних обчислень втілена у вигляді корутин (coroutine). Корутина являє собою блок коду, який може виконуватися паралельно з іншим кодом. Базова функціональність, пов'язана з корутинами, зосереджена в бібліотеці kotlin.coroutines [7, 8]. Переваги

використання корутин полягає: у швидкому опрацюванні та витрачанні малої частини ресурсів процесора, у порівнянні зі звичайними потоками; займає менше місця у коді.

Для розробки багатомовного програмного забезпечення використовуємо інструмент автоматизації збірки проєктів Gradle. Він контролює процес розробки в завданнях компіляції та упаковки проєктів для їх тестування, розгортання та публікації. Підтримувані мови включають Kotlin (а також Java, Groovy, Scala), C/C++ та JavaScript. Іншою, якщо не основною функцією Gradle, є збір статистичних даних про використання бібліотек програмного забезпечення по всьому світу. Gradle ґрунтується на концепціях Apache Ant і Apache Maven, та представляє домену мову на основі Groovy і Kotlin, на відміну від конфігурації проєкту на основі XML, використовуваної Maven. Gradle використовує орієнтований ациклічний граф для визначення порядку, в якому можуть виконуватися завдання, за допомогою забезпечення управління залежностями. Gradle працює на JVM.

Gradle був розроблений для складання проєктів, які можуть вирости до великих розмірів. Він працює на основі ряду завдань збірки, які можуть виконуватися послідовно або паралельно. Інкрементні збірки підтримуються шляхом визначення частин дерева збірки, які вже оновлені. Будь-яке завдання, що залежить тільки від цих частин, не вимагає повторного виконання. Він також підтримує кешування компонентів збірки. Вміє створювати Web-візуалізацію збірки, що називається скануванням збірки Gradle. Програмне забезпечення розширюється для нових функцій і мов програмування за допомогою підсистеми плагінів.

DSL Kotlin від Gradle надає альтернативний синтаксис традиційному DSL Groovy з поліпшеними можливостями редагування в підтримуваних IDE, з чудовою підтримкою контенту, рефакторингом, документацією і багатьом іншим [9].

При створенні швидких і реактивних інтерфейсів для Android, Desktop та Web-додатків на Kotlin використовується фреймворк Compose Multiplatform, який складається з трьох частин: Jetpack Compose; Compose for Desktop; Composer for Web. За допомогою механізмів, наданих Kotlin Multiplatform, частини фреймворку стали об'єднані під одним плагіном Gradle і групою артефактів. Це спростило і прискорило розробку інтерфейсів додатків завдяки використанню єдиного коду під декілька платформ одночасно [10, 11]. В цільових платформах (targets) у Kotlin Multiplatform, на рис. 1 показано, як налаштовуються в нативний код необхідні нам операційні системи, де і компілюється код на Kotlin [6].

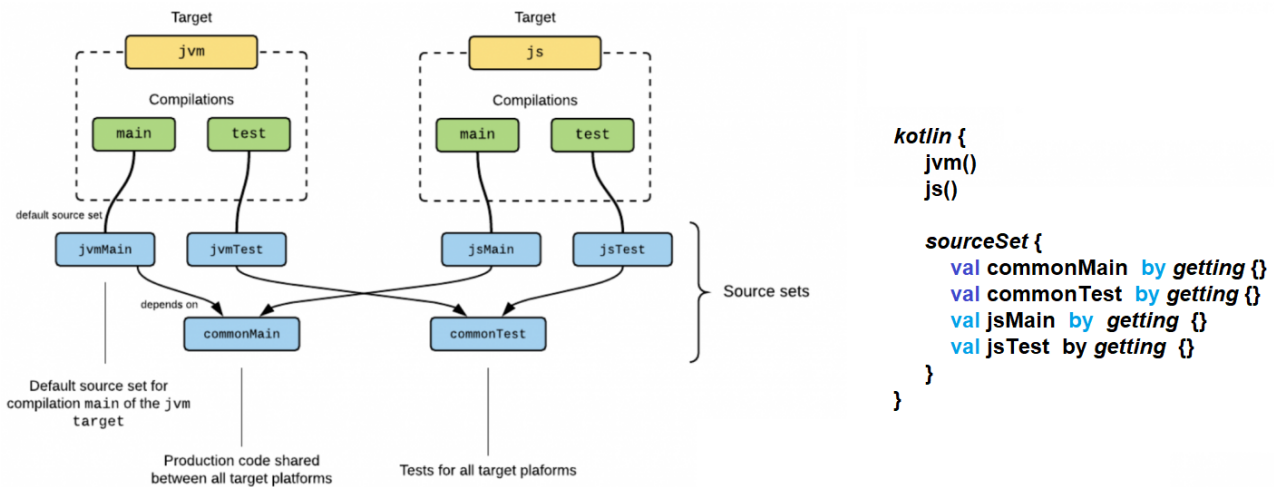


Рис. 1. Налаштування jvm та js targets [6]

Існує загальний набір source Sets вихідних кодів і платформних (їх стільки, скільки в проєкті targets, за цим стежить IDE). Для реалізації такої особливості використовується механізм Expect-actual. Expect-actual дозволяє із загального модуля звертатися до платформозалежного коду. Можна оголосити Expect декларацію в Common модулі і реалізувати її в платформних модулях [6].

Підтримка інших платформ реалізується аналогічно. За допомогою Kotlin Multiplatform витрачається менше часу на написання та підтримку одного й того ж коду для різних платформ і використовується механізм спільного коду. Фреймворк знаходиться на стадії розробки і, ще не вистачає готових рішень, але він, вже, має свої суттєві переваги: єдиний код, який можна в будь-який час дописувати і змінювати; поділ бізнес-логіки між платформами зі збереженням власного коду для кожного клієнтського інтерфейсу; будь-які зміни та коригування відбуваються одночасно на всіх платформах. Розглянемо приклад використання механізму Kotlin Multiplatform для отримання дати на пристроях:

```

Common:
internal expect val timestamp: Long

Android/JVM:
Internal actual val timestamp: Long
    
```

```

get() = java.lang.Ayatem.currentTimeMikkis

ios:
internal actual val timestamp: Long
get() = platform.Foundation.NSDate().timAnternalSince1970.toLong

```

Для програмного забезпечення (ПЗ), якому потрібна постійна підтримка, при написанні коду необхідно мінімізувати зв'язаність і максимізувати його цілісність. Щоб згрупувати якомога більше зв'язаного коду разом, підтримувати та масштабувати його, коли застосунок зростає, користуємося добре відомим принципом розробки ПЗ - Separation of concerns. Для опису інтерфейсу користувача використовуються Composable функції, що засновані на функціональному підході до програмування у Jetpack Compose:

```

@Composable
fun App(appData: AppData) {
    val derivedData = compute(appData)
    Header()
    if (appData.isOwner) {
        EditButton()
    }
    Body {
        for (item in derivedData.items) {
            Item(item)
        }
    }
}

```

У цьому прикладі Composable функція отримує дані як параметри з класу appData та перетворює їх у елемент інтерфейсу користувача. Отже, при використанні будь-якого коду на Kotlin, обрані дані застосовують їх для опису ієрархії (наприклад: виклик Composable-функцій Header() і Body()). Це означає, що при виклику інших Composable-функцій, вони відображають структуру UI, при використанні надаються всі примітиви Kotlin, включаючи оператори if і цикли for для управління структурою UI, щоб вирішувати більш складну логіку інтерфейсу користувача.

Переваги Jetpack Compose полягають у його незалежності від конкретних версій цільової платформи; вся робота з UI виконується за допомогою мови програмування Kotlin; використання композиції замість спадкування. UI-компонент описується у вигляді функції з анотацією Composable, яка відповідає тільки за обмежений функціонал, тобто без зайвої логіки; однонаправленість потоку даних; зменшення кількості коду для UI-логіки. Таке прагматичне рішення, що спрощує інкапсуляцію стану в Composable функціях при зберіганні між викликами, його сигнатуру що дозволяє виконувати деякі оптимізації, особливо зручно використовувати для анімацій та інших речей, які не потрібно змінювати або спостерігати зовні [12].

Статично типізовану мову програмування Kotlin використано для розробки мультиплатформних застосунків. Вона працює поверх JVM та компілюється в JavaScript [6]. При використанні Jetpack Compose обрано патерн MVI, який найкраще підходить для опису логіки інтерфейсу користувача [13]. Взаємодія з інтерфейсом користувача у MVI обробляється бізнес-логікою, це вносить зміни в стан, що впливає на відображення інтерфейсу користувача та призводить до односпрямованого і циклічного потоку даних. За допомогою засобів Kotlin (Flow, StateFlow та Channel) реалізовано реактивне отримання оновлених даних [14].

Для налагодження написання спільного коду, обрано потужні інструменти, такі як логування та “подорож у часі”, що надає фреймворк MVIKotlin при використанні шаблону MVI для Kotlin Multiplatform. MVIKotlin не застосовує жодної конкретної архітектури. Його відповідальність описується тим, що надає одне джерело істини для стану, забезпечує абстракцію для UI з ефективними оновленнями та забезпечує прив'язку до життєвого циклу між входами та виходами.

Для опису контракту бізнес-логіки компонентів інтерфейсу мультиплатформного застосування, обрано модель Store [13]. Наступний код демонструє реалізацію контракту бізнес-логіки компонентів у інтерфейсах Store, що виконується у класах MusicStore з розробленого ПЗ “Composer” [15]:

```

interface MusicStore : Store<MusicStore.Intent, MusicStore.State, Nothing> {
    sealed class Intent {
        data class TabChanged(val newTab: Tab) : Intent()
        object SearchClick : Intent()
        data class TypeOfSortChanged(val typeOfSort: TypeOfSort) : Intent()
        data class SearchFilterChanged(val searchFilter: String) : Intent()
        object SearchCancelClick : Intent()
        data class SelectedItemsChanged(val selectedItems: Int) : Intent()
        object RemoveSelection : Intent()
    }
    data class State(
        val selectedTab: Tab = Tab.AllMusic,
        val currentTypeOfSort: TypeOfSort = TypeOfSort.Ascending,
        val screenState: MusicScreenState = MusicScreenState.Default
    )
}

```

```

enum class Tab {
    AllMusic, AllPlaylists, AllSamples
}
sealed class MusicScreenState {
    object Default : MusicScreenState()
    data class Search(val searchFilter: String = "") : MusicScreenState()
    data class ItemsSelection(val selectedItems: Int = 1) : MusicScreenState()
}
}

```

Налаштування спільного модуля додатку виконано у файлі `build.gradle.kts` модуля `common`. Налаштування Gradle android додатку виконані у файлі `build.gradle.kts` модуля `android`. Налаштування Gradle desktop додатку виконані у файлі `build.gradle.kts` модуля `desktop`.

Архітектура проекту поділена на дві частини:

1. Common модуль містить у собі основну логіку застосунку, а також платформні реалізації компонентів;
2. Платформні модулі виконують ініціалізацію головного компоненту застосунку зі спільного модуля, вмикають DI та запускають застосунок.

Впровадження залежностей застосунку здійснюється за допомогою шаблону проєктування `Dependency Injection`, щоб отримати поділ завдань на створення та використання об'єктів та підвищити читабельність і повторне використання коду. Це шаблон проєктування, при якому об'єкт отримує інші об'єкти, від яких він залежить. Як правило, приймаючий об'єкт називається клієнтом, а переданий об'єкт називається сервісом. Код, який передає сервіс клієнту, називається інжектором. Замість того, щоб клієнт вказував, який сервіс він буде використовувати, інжектор повідомляє клієнту, який сервіс використовувати. Впровадження відноситься до передачі залежності (сервісу) клієнту, який її використовує. Сервіс стає частиною стану клієнта. Передача сервісу клієнту, замість дозволу клієнту створювати або знаходити сервіс, є основною вимогою шаблону.

Для налагодження доступу до репозиторіїв з компонентів бізнес-логіки ПЗ, використовується впровадження залежностей. Логіка впровадження залежностей описується у файлах-модулях `Koin`. `DatabaseModule` описує створення об'єкту бази даних для кожної платформи окремо. `PreferencesModule` створює об'єкт `Settings`, який використовується для роботи з платформними сховищами налаштувань додатку:

```

val preferencesModule = module {
    factory { Settings() }
}

```

`RepositoryModule` реалізує створення об'єктів репозиторіїв:

```

val repositoryModule = module {
    factory<SongRepository>()
    factory<PreferencesRepository>()
}

```

`SoundMashineModule` створює об'єкт утиліти для відтворення звуків:

- Контракт у `common` модулі:

```
expect val soundMachineModule: Module
```

- Реалізація для `android`:

```
actual val soundMachineModule = module {
    factory { SoundMachineImpl() as SoundMachine }
}

```

- Реалізація для `desktop`:

```
actual val soundMachineModule = module {
    factory { SoundMachineImpl() as SoundMachine }
}

```

Всі модулі впровадження залежностей ініціюються у функції `initKoin`:

```

fun initKoin(appDeclaration: KoinAppDeclaration = {}): KoinApplication {
    return startKoin {
        appDeclaration()
        modules(
            databaseModule,
            preferencesModule,
            repositoryModule,
            soundMachineModule
        )
    }
}

```

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В роботі розглянуто принципи декларативного підходу для розробки інтерфейсів користувача під декілька платформ. Описано відмінності для різних платформ для системи налаштування Gradle, застосування `Dependency Injection` та логіку впровадження залежностей у файлах-модулях `Koin` в застосуванні. Проведено аналіз сучасних інструментів та методик розробки мультиплатформних застосунків: `Compose Multiplatform`, `Jetpack Compose`, `MVikotlin`, `Dependency Injection`. За запропонованою методикою, що узагальнює методологію розробки мультиплатформних застосунків на мові програмування

Kotlin, з використанням декларативного стилю мультиплатформного фреймворку Compose Multiplatform створено проєкт структури застосування.

### Література

1. Nagy R. Simplifying Application Development with Kotlin Multiplatform Mobile. Packt, 2022. 184 p. <https://www.packtpub.com/product/simplifying-application-development-with-kotlin-multiplatform-mobile/9781801812580>.
2. Soshin A. Kotlin Design Patterns and Best Practices - Second Edition. Packt. 2022. 356 p.
3. Xamarin documentation. URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/xamarin/> React Native. URL: <https://reactnative.dev/>
4. React Native. URL: <https://reactnative.dev/>
5. Flutter. URL: <https://flutter.dev/>
6. Kotlin Programming Language. URL: <https://kotlinlang.org>
7. Coroutines. URL: <https://kotlinlang.org/docs/coroutines-overview.html>
8. Корутини. URL: <https://metanit.com/kotlin/tutorial/8.1.php>
9. Gradle Kotlin DSL Primer. URL: [https://docs.gradle.org/current/userguide/kotlin\\_dsl.html](https://docs.gradle.org/current/userguide/kotlin_dsl.html)
10. Compose Multiplatform. URL: <https://www.jetbrains.com/ru-ru/lp/compose-mpp/>
11. Build better apps faster with Jetpack Compose. URL: <https://developer.android.com/jetpack/compose>
12. Understanding Jetpack Compose – part 1 of 2. URL: <https://medium.com/androiddevelopers/understanding-jetpack-compose-part-1-of-2-ca316fe39050>
13. MVIKotlin Overview. URL: <https://arkivanov.github.io/MVIKotlin/>
14. Козуб, Г., Козуб Ю., Могильний Г., Жуков А. Розробка мобільного Android-додатку з застосуванням принципів Clean Architecture. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, вип. 5 (269), Вересень 2021, С. 5–10.
15. Жуков А. В., Козуб Г.О. Застосування фреймворку Jetpack Compose у багатомодульному Android-додатку. Вітчизняна наука на зламі епох: проблеми та перспективи розвитку : зб. наук. праць. Переяслав, 2021. Вип. 67. С. 109–111.

### References

1. Nagy R. Simplifying Application Development with Kotlin Multiplatform Mobile. Packt, 2022. 184 p. <https://www.packtpub.com/product/simplifying-application-development-with-kotlin-multiplatform-mobile/9781801812580>.
2. Soshin A. Kotlin Design Patterns and Best Practices - Second Edition. Packt. 2022. 356 p.
3. Xamarin documentation. URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/xamarin/> React Native. URL: <https://reactnative.dev/>
4. React Native. URL: <https://reactnative.dev/>
5. Flutter. URL: <https://flutter.dev/>
6. Kotlin Programming Language. URL: <https://kotlinlang.org>
7. Coroutines. URL: <https://kotlinlang.org/docs/coroutines-overview.html>
8. Корутини. URL: <https://metanit.com/kotlin/tutorial/8.1.php>
9. Gradle Kotlin DSL Primer. URL: [https://docs.gradle.org/current/userguide/kotlin\\_dsl.html](https://docs.gradle.org/current/userguide/kotlin_dsl.html)
10. Compose Multiplatform. URL: <https://www.jetbrains.com/ru-ru/lp/compose-mpp/>
11. Build better apps faster with Jetpack Compose. URL: <https://developer.android.com/jetpack/compose>
12. Understanding Jetpack Compose – part 1 of 2. URL: <https://medium.com/androiddevelopers/understanding-jetpack-compose-part-1-of-2-ca316fe39050>
13. MVIKotlin Overview. URL: <https://arkivanov.github.io/MVIKotlin/>
14. Kozub, H., Kozub Yu., Mohylnyi H., Zhukov A. Rozrobka mobilnoho Android-dodatku z zastosuvanniam pryntsyviv Slean Architecture. Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia, vyp. 5 (269), Veresen 2021, S. 5–10.
15. Zhukov A. V., Kozub H.O. Zastosuvannia freimvorku Jetpack Compose u bahatomodulnomu Android-dodatku. Vitshyzniana nauka na zlami epokh: problemy ta perspektyvy rozvytku : zb. nauk. prats. Pereiaslav, 2021. Vyp. 67. S. 109–111.

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-230-236>

УДК 66.047.45

РУТКЕВИЧ Володимир

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-6366-7772>

e-mail: [v\\_rut@ukr.net](mailto:v_rut@ukr.net)

ДІДИК Андрій

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-0524-0017>

[anddidyk99@gmail.com](mailto:anddidyk99@gmail.com)

## ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ДЛЯ СУШІННЯ ВОЛОСЬКОГО ГОРІХА В ШКАРАЛУПІ

*Розглядається питання підвищення якісних показників волоського горіха в процесі зберігання та переробки, за рахунок використання сучасних і прогресивних методів та засобів для його сушіння.*

*Зазначено, що Україна має значний потенціал у вирощуванні волоського горіха, але за рахунок відсутності сучасних і високоефективних засобів для його переробки змушена продавати за заниженими цінами в якості сировини на вторинні ринки. Підвищена вологість волоського горіха при його збиранні на рівні 35-45 % та відсутність сучасного високоефективного і енергозберігаючого обладнання в Україні призводить до зберігання даного продукту в природних умовах у спеціально критих і добре провітрюваних приміщеннях. Такий процес висушування плодів дуже затягується, оскільки на волоські горіхи постійно діє надлишкова волога, створюються умови активного розвитку мікроорганізмів. При випаданні дощу нерідко цей спосіб висушування призводить до повного псування плодів. Тому для високоефективного ведення бізнесу, пов'язаного з волоським горіхом, просто не обійтися без спеціальної сушильної техніки. Дане обладнання допоможе значно прискорити процес, зробить його більш ефективним та економічно вигідним та дозволить довести вологість волоського горіха до Міжнародного стандарту (не більше 10 %) та технічних вимог.*

*Встановлено, що сучасні методи та засоби для сушіння запобігають появі плісняви, забезпечують високу якість цінних ядер горіхів і гарантують тривалий термін їх зберігання. Свіжі горіхи сушать до залишкової вологості 6-12 % у потоці сухого теплого повітря при температурі від 20 до 36 °C. Температура сушіння волоського горіха залежить від його розміру та вологості. Процес сушіння може здійснюватись як у професійних сушильних шафах, так і за допомогою спеціальних нагрівальних пристроїв для сушіння горіхів.*

*Розглянуто сучасне ефективне сушильне обладнання від перевірених часом брендів Feucht-Obsttechnik, Amb Rousset та інших фірм. Нове високоефективне та ресурсозберігаюче обладнання представлено у вигляді секційних конструкцій, що працює на економічному газовому тепловому генераторі. В даному обладнанні здійснюється сушіння цілих горіхів протягом 1-3 діб, внаслідок чого вологість досягається 12-13 %. Продуктивність такої техніки в залежності від кількості секцій складає 1-4 тонни продукції на добу.*

*Також зазначено, що серед різноманіття існуючих технологій та засобів сушіння сировини найбільш перспективними способами, що дозволяють інтенсифікувати процес при забезпеченні високої якості готового продукту та підвищення ефективності виробництва, є пристрої, що комбінують різні режими та способи сушіння.*

*Ключові слова: волоський горіх, сушильне обладнання, продуктивність, енергоефективність, витрати, вологість.*

RUTKEVYCH Volodymyr, DIDYK Andrii

Vinnitsia National Agrarian University

## OVERVIEW OF METHODS AND TOOLS FOR DRYING WALNUTS IN THE SHELL

*The question of increasing the quality indicators of walnut in the process of storage and processing, due to the use of modern and progressive methods and means for its drying, is considered.*

*It is noted that Ukraine has a significant potential in the cultivation of walnuts, but due to the lack of modern and highly efficient means for its processing, it is forced to sell them at low prices as raw materials to secondary markets. The increased moisture content of walnuts during harvesting at the level of 35-45% and the lack of modern highly efficient and energy-saving equipment in Ukraine leads to the storage of this product in natural conditions in specially covered and well-ventilated rooms. This process of drying the fruits is very long, since excess moisture constantly acts on the walnuts, creating conditions for the active development of microorganisms. When it rains, this method of drying often leads to complete spoilage of the fruits. Therefore, for highly efficient business related to walnuts, special drying equipment is simply indispensable. This equipment will help to significantly speed up the process, make it more efficient and economically profitable, and will allow to bring the moisture content of the walnut to the International Standard (no more than 10%) and technical requirements.*

*It has been established that modern methods and means for drying prevent the appearance of mold, ensure high quality of valuable nut kernels and guarantee a long shelf life. Fresh nuts are dried to a residual moisture content of 6-12% in a stream of dry warm air at a temperature of 20 to 36 °C. The drying temperature of a walnut depends on its size and humidity. The drying process can be carried out both in professional drying cabinets and with the help of special heating devices for drying nuts.*

*Modern efficient drying equipment from the time-tested brands Feucht-Obsttechnik, Amb Rousset and other companies were considered. The new highly efficient and resource-saving equipment is presented in the form of sectional structures, which works on an economical gas heat generator. In this equipment, whole nuts are dried for 1-3 days, as a result of which the humidity reaches 12-13 %. The productivity of such equipment, depending on the number of sections, is 1-4 tons of products per day.*

*It is also stated that among the variety of existing technologies and means of drying raw materials, the most promising ways to intensify the process while ensuring high quality of the finished product and increasing production efficiency are devices that combine different modes and methods of drying.*

*Key words: walnut, drying equipment, productivity, energy efficiency, costs, humidity.*

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

Світові аграрні експерти з виробництва та переробки волоських горіхів стверджують, що горіхова галузь характеризується значним зростанням порівняно з іншими видами агропромислового виробництва. Особливі кліматичні умови України сприяють ефективному розвитку горіхового бізнесу. За останні 10 років обсяг експорту на світовий ринок горіхів з України збільшився у 30 разів. Наша країна експортує щорічно в середньому 37 % горіхів, решта ж частини йде на внутрішнє споживання. Для того, щоб дана галузь була перспективною, слід подбати не лише про вирощування, а й про подальшу переробку волоського горіха, оскільки він є джерелом альтернативних основних фізіологічно активних сполук, що замінюють продукти харчування тваринного походження [1, 2].

Даний напрямок ведення агробізнесу є перспективним, рентабельним, оскільки дохід з 1 га може становити біля 1 млн. грн. та є екологічно чистим, що є актуальним в умовах сталого розвитку [3].

Одним із найскладніших, недосконалих методів обробки плодів волоського горіха є його сушіння. Волоські горіхи в період їх збирання зазвичай містять завищений вміст вологи на рівні 35-45 %, що небажано, оскільки при підвищеній вологості створюються сприятливі умови для розвитку мікробіологічних та ферментативних процесів, що призводять до швидкого псування волоського горіха [4, 5]. Відповідно до міжнародного стандарту та технічних умов, вологість цільного волоського горіха повинна становити не більше 10 %. Тому розробка заходів та засобів для збереження та підвищення якісних показників волоського горіха є актуальним завданням сьогодення.

### Аналіз досліджень та публікацій

Волоські горіхи відносяться до продуктів найбільш схильних до ризику окислювального псування на етапах зберігання, транспортування та реалізації. При цьому слід враховувати, що конкретні ботанічні сорти, вирощені у різних географічних регіонах, мають індивідуальний хімічний склад, що визначає інтенсивність протікаючих окислювальних процесів, тому горіхи різних партій мають різний потенціал зберігання показників якості.

В табл.1 наведено світові країни лідери з виробництва та експорту волоського горіха: США, Китай, Чилі, Туреччина, Канада, Іран, Молдова та Україна [6, 7]. Україна переважно експортує цілий волоський горіх, ціна даного продукту на світовому ринку на початку 2021 року становила приблизно 2 €/кг.

В Україні вирощування волоських горіхів переважно здійснюється у приватних селянських господарствах, що зосереджені переважно у Вінницькій, Хмельницькій, Чернігівській, Дніпропетровській, Донецькій та Львівській областях. На рис 1. представлено площу горіхових насаджень в Україні (за даними Держстату).

Таблиця 1

#### Провідні світові країни експортери волоського (грецького) горіху, тис. тонн

Країни	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22
США	459,165	409,564	429,442	412,067	494,394	440,000
Китай	18,400	45,200	62,100	144,100	183,500	220,000
Чилі	116,800	123,700	147,900	135,400	145,000	150,000
Україна	55,100	82,000	106,100	105,000	75,000	107,700
Молдова	34,000	37,200	26,300	29,800	18,200	25,000
ЄС	21,015	21,182	21,531	20,286	16,000	17,000
Туреччина	7,800	6,400	6,900	8,000	10,000	17,000
Інші країни	18,900	1,600	10,000	10,000	9,700	7,900
Усього	731,180	739,846	810,273	864,653	951,794	979,600

Джерело. За даними досліджень і аналізу інформації USDA.

Волоські горіхи експортуються з України в основному до країн Європи 77,5 %, Близького Сходу (16,7), країн ЄАЕС (5%), Африки (0,3 %) та Азії (0,5%). Ці покупці переробляють українські горіхи і продають їх до країн Перської затоки за вищими цінами.

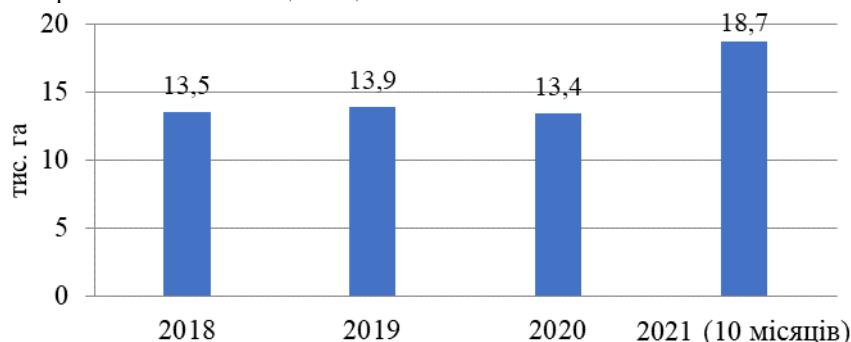


Рис. 1. Площа під волоськими горіховими насадженнями в Україні (за даними Держстату)

Деякі підприємства, що працюють у горіховому бізнесі, здійснюють постачання лише цілого волоського горіха, не займаючись його подальшою переробкою.

На території України та в країнах СНД на волоський горіх у шкаралупі діє ГОСТ16832-71[7]. У цьому документі описуються вимоги, на підставі яких горіхова сировина відноситься до того чи іншого сорту. Горіх у шкаралупі поділяють на 3 сорти – вищий, перший та другий. Для горіха у шкаралупі стандартизуються зовнішній вигляд (горіхи повинні бути цілими, очищеними від оплодня), забарвлення шкаралупи, яка повинна бути від світло-сірого до світло-коричневого кольору – для горіха вищого та першого сортів, і від світло-сірого до темно-коричневого – для горіха другого сорту. Обов'язково враховуються розмір горіха по найбільшому поперечному діаметру в мм (горіх вищого ґатунку – не менше 28,0 мм; першого – 25,0 мм; другого – 20,0 мм), його кругла форма, якість шкаралупи, яка визначається як легкість розколонування та вихід ядра, що у горіха вищого та першого сорту має бути не менше 45-50 %.

Вимоги до вологості цілого волоського горіха не вище 10 % визначає ГОСТ 16832-71 (Міждержавний стандарт. Горіхи грецькі. Технічні умови). Вологість цілого горіха після його збирання може сягати 35-45 %. Тому він вимагає сушіння для доведення до кондиції [4, 6].

Сушіння цілого горіха в Україні здійснюється, як правило, в природних умовах, у критих приміщеннях, що провітрюються (рис. 2). Це пов'язано з тим, що фізично важко прискорити процес сушіння цілого горіха за допомогою спеціального обладнання. До цього ж економічно неефективно, оскільки даний процес потребує великих витрат на енергоносії.



Рис. 2. Природний спосіб сушіння волоського горіха на сонці

Якість горіхів при обробці їх цим методом низька – оболонка шкаралупи набуває неприємного темно-сірого забарвлення. Смакові якості плодів різко знижуються; внаслідок розпаду – розкладання жирних речовин відбувається окислення ядра, горіхи набувають неприємного присмаку і запаху. Сушіння плодів волоського горіха на землі протікає не менше 12 і навіть 20 днів, процес висушування плодів дуже затягується, оскільки на волоські горіхи постійно діє надлишкова волога, створюються умови активного розвитку мікроорганізмів. При випаданні дощу нерідко цей спосіб висушування призводить до повного псування плодів. Тому для забезпечення збереження врожаю та якості волоського горіха необхідне кондиціонування та використання спеціального сушильного обладнання [4, 8].

Важливим фактором, що впливає на якість та безпеку продукту харчування, є фактор збереження, що залежить від необхідних умов і терміну зберігання. Збільшення термінів зберігання продуктів можливе в рамках застосування основних шести напрямків: термообробка, зниження температури, зміна атмосфери, зменшення вмісту води, опромінення та застосування хімічних консервантів.

При характеристиці рослинної сировини відзначається значний вміст в ньому води та відносно низька кількість сухої речовини.

Основна частина води рослинної сировини знаходиться у ньому у вільному вигляді і видаляється за допомогою сушіння. Близько 5 % вологи досить міцно зв'язано з клітинними колоїдами [9].

Вода, що міститься в будь-якому матеріалі, поділяється на вільну, зв'язану і хімічно зв'язану. В капілярах та у міжклітинному просторі зосереджена вільна волога. У замкнутих оболонках, якими є клітини та вакуолі, утримується зв'язана вода. Саме процес випаровування зв'язаної води обтяжується проникненням через замкнуту оболонку за рахунок сил дифузії. З метою забезпечення збереження води, необхідної для життя всередині клітини, природна проникність клітин та вакуолей достатньо мала. Таким чином, сушіння продуктів при малих рівнях вологості особливо складно. При видаленні хімічно зв'язаної води через те, що вона має поріг по енергії зв'язку, відбувається суттєва зміна структури речовини.

Дослідження, присвячені вивченню аналізу фізико-хімічних змін складу горіхоплідних у процесі зберігання, проведені багатьма вітчизняними та зарубіжними вченими, зокрема: Сперанським В.Г., Страховим С.А., Цурканом О.В., Скоканом Л.Є., Котовим Б.І., Grossom N.R., Martinez M.L., Çağlarirmak N., Amaral J.S., Savage G.P. та іншими [9, 10].

Тому враховуючи дану ситуацію, яка склалася в країні з даною галуззю, необхідно забезпечити виробництво високих урожаїв горіхів та підвищити якісні параметри волоського горіха, які б продовжили термін його зберігання, що можна зробити шляхом розробки та обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів обладнання для сушіння волоського горіха в шкаралупі.

**Мета роботи – на основі аналізу існуючих методів та засобів сушіння волоського горіха в шкаралупі визначити перспективні напрями розвитку даного обладнання.**



### Виклад основного матеріалу

Сушіння волоського горіха запобігає появі плісняви, забезпечує високу якість цінних ядер горіхів і гарантує тривалий термін їх зберігання. Свіжі горіхи сушать до залишкової вологості 6-12 % у потоці сухого теплого повітря при температурі від 20 до 36 °С. Температура сушіння волоського горіха залежить від його розміру та вологості. Процес сушіння може здійснюватись як у професійних сушильних шафах, так і за допомогою спеціальних нагрівальних пристроїв для сушіння горіхів [4, 7].

На сьогоднішній день серед сучасних технологій сушіння найпоширеніші наступні методи сушіння: інфрачервоний, сублімаційний, конвективний, мікрохвильовий, комбінований та інші [9, 10].

Інфрачервоний (ІЧ) метод сушіння ґрунтується на передачі тепла з використанням інфрачервоного опромінення. Дуже ефективно використання ІЧ – нагріву для тонких шарів продукту, що висушується. У цьому випадку інтенсифікація збільшується в 1,5 – 2,0 рази при зниженні витрат у 1,5 рази. На відміну від конвективного та кондуктивного сушіння, вона має ряд переваг, проте є досить енергоємним методом [4, 9].

При використанні інфрачервоного випромінювання в результаті сушіння оброблюваний продукт добре зберігає свої властивості, зокрема колір, смак та запах. Згодом при нетривалому замочуванні продукт легко відновлює свої властивості. Одночасно в процесі ІЧ – сушіння, проходить стерилізація продукції.

Сушіння продукту сублімаційним методом передбачає видалення вологи з продукту при низьких температурах і тиску [4]. При цьому здійснюється перехід речовини з твердого стану безпосередньо в газоподібний. Технології сублімаційного сушіння характеризуються рядом переваг. Зокрема, сублімаційне сушіння максимально забезпечує збереження основних вітамінів та білкових речовин, сприяє збереженню смаку, кольору, запаху, форми та розмірів.

Загально визнано, що найкращим способом зневоднення рослинного та тваринної сировини є спосіб вакуум-сублімаційного сушіння в полі СВЧ. Істотною перевагою СВЧ – нагріву є інтенсифікація процесів тепло- та масообміну, що обумовлено прогріванням продукту по всьому об'єму та збігом градієнтів вологості та температури. У той же час інтенсивне утворення пари при використанні СВЧ – енергії приведе до несвоєчасного видалення молекул води, яка випарувалася, що є обтяжуючим фактором. Однак через високі енерговитрати цей спосіб не знайшов широкого застосування.

Короткі характеристики сучасних технологій сушіння наведені в табл. 2.

Таблиця 2

#### Характеристики сучасних технологій сушіння

Методи сушіння	Капітальні витрати на 1 виробленої продукцію, тис. грн.	Продуктивність (по випаровуваній волозі), кг/год	Вартість обладнання, тис. грн.	Енергозатрати на випаровування 1 кг вологи, кВт/год
Інфрачервоний	2,3625	200	472,5	0,9-1
Сублімаційний (вакуумний)	350	0,25	875	2,7-3
Конвективний	1,8	500	900	1,8-3
Мікрохвильовий	10,4	43	447,5	1,6-1,8
Комбінований (конвективно-мікрохвильовий)	2,025	290	586,75	1-2,2

У результаті аналізу даної таблиці можна зробити висновок, що найефективнішим за капітальними витратами на одиницю виробленої продукції є комбінований метод. Найменш ефективна, відповідно, сушіння методом сублімації. Незважаючи на відмінну якість кінцевого продукту, широкого поширення дана технологія не отримує через високу вартість необхідного обладнання і, як наслідок, дорогий кінцевий товар.

Основними напрямками вдосконалення технологій сушіння є поліпшення якості кінцевого продукту харчування та ресурсозбереження. Технологічні прийоми дозволяють підвищувати ефективність використання сировинних ресурсів. Зниження енергоємності обладнання сприяє підвищенню ефективності виробництва [11–13].

Аналіз даних таблиці показує, що застосовувані технології в тій чи іншій степені відповідають необхідним вимогам сучасності. З різноманіття існуючих технологій сушіння сировини найбільш перспективними способами, що дозволяють інтенсифікувати процес при забезпеченні високої якості готового продукту та підвищення ефективності виробництва, є пристрої, що комбінують різні режими та способи сушіння.

Світовий ринок пропонує досить велику кількість пропозицій сушильного обладнання різного типу: конвекційного, інфрачервоного, мікрохвильового. Інфрачервона технологія дозволяє значно підвищити продуктивність сушіння сировини, але потребує великого споживання електроенергії. Крім того, інфрачервоне випромінювання не нагріває повітря, а предмет. Більше того, якщо суб'єкт неоднорідного кольору, то температура в різних його точках можуть бути різними. Це ускладнює контроль температури на сушильному обладнанні, що для ядра волоського горіха дуже важливо.

Обладнання для сушіння волоського горіха в шкаралупі виготовляють такі закордонні фірми, як «Rivmes», «Fasma», «Zaffrani» (Італія); Feucht-Obsttechnik (Німечина); Vimar Equipos (Іспанія), обладнання для сушіння волоського горіха в шкаралупі виробляють також кілька французьких фірм – «Amb Rousset» і «Recolt – Concept» [14, 15].

На рис. 3 представлено колісну моноблочну сушку для горіхів фірми «RIVMES» (Італія) [14]. Дана машина складається з елеватора для завантаження та вивантаження волоських горіхів, шнека для переміщення горіхів, дизельного паливника з паливним баком, електричної панелі для керування циклами сушіння. Переміщення машини може здійснюватись у двох варіантах залежно від побажань замовника: переміщення на короткі відстані по фермі, переміщення за допомогою трактора.



Рис. 3. Колісна моноблочна сушарка для волоських горіхів Rivmes (Італія)

Сушарка для горіхів 50EN фірми Zaffrani (Італія) підходить для всіх типів застосування та завдяки своїй універсальності та модульності дозволяє задовольняти найрізноманітніші потреби (рис. 4) [14]. Ефективна система змішування гарячого та холодного повітря нагнітає єдиний потік повітря з постійною температурою та однорідною циркуляцією усередині сушарки. Таким чином гарантується рівномірне нагрівання продукту і, отже, його правильне сушіння, при якому зберігаються його властивості та органолептичні якості.

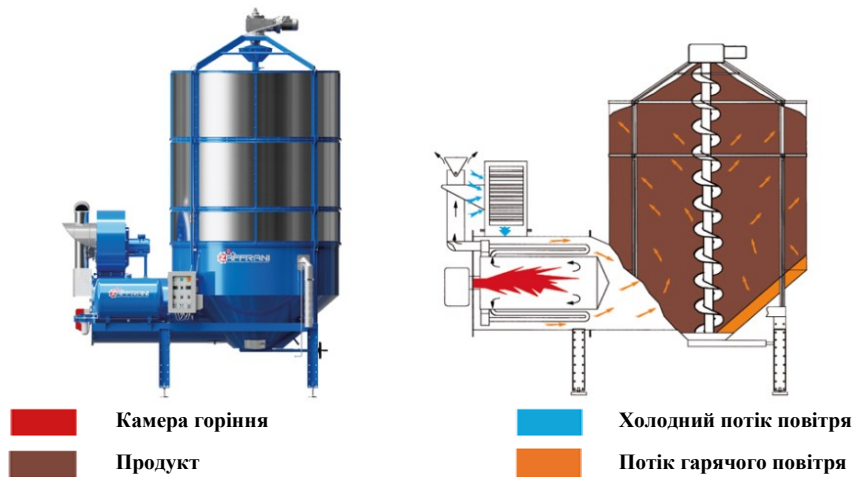


Рис. 4. Функціональна схема сушарки для горіхів 50EN «Zaffrani» (Італія)

Німецька фірма «Feucht-Obsttechnik» пропонує для волоських горіхів багаторівневу сушильну шафу Multi-level (рис. 5a) [15]. У багаторівневій сушильній шафі забезпечується рівномірне сушіння горіхів за рахунок їх постійного переміщення. Попереднє сушіння волоських горіхів проходить на верхніх рівнях, а остаточне сушіння – на нижніх. Це дозволяє підтримувати підвищену температуру повітря від 30 до 36 °С. Під дією сили тяжіння горіхи переміщуються зверху донизу. За рахунок додавання секцій можна підвищити продуктивність сушіння. Багаторівнева сушильна шафа для горіхів обладнана декількома дверцятами і центральним отвором.



Рис. 5. Обладнання для сушіння волоських горіхів у шкаралупі: Multi-level (а) і СН Т (б)

Крім того, сушильна шафа доступна зі шнековим або відцентровим змішувачем та нагрівачем з різною тепловіддачею (залежить від розміру камери шафи). Рівень вологості горіхів можна перевірити за допомогою додаткового вимірювача вологості.

Спеціальне сушильне обладнання моделі СН Т (рис. 5б) для сушіння волоського горіха забезпечує рівномірне та швидке просушування [14]. Після простої трансформації, машина може використовуватися також для сушіння кукурудзи. Завдяки маленьким габаритам і невеликій вазі, дана машина може легко транспортуватися за допомогою трактора. Гаряче повітря легко проходить через двостінковий циліндр. Після заповнення машини температура встановлюється в залежності від виду плодів, які потрібно просушити. Для завантаження плодів машина обладнана стрічковим конвеєром. Продуктивність 1000-5000 кг.

В Україні схоже за конструкцією обладнання виготовляє товариство з обмеженою відповідальністю «НАТ ЕКСІМ» м. Львів (рис. 6а) [16]. Дане обладнання може містити довільну кількість секцій, усередині резервуару секції вмонтовано шнек, який дозволяє вимішувати продукт (рис. 6 б).



Рис. 6. Обладнання для сушіння волоських горіхів у шкаралупі ТОВ «НАТ ЕКСІМ»: а) Сушка для сушіння волоських горіхів у шкаралупі, б) Сушильний комплекс «СВГ»

Подача продукту в кожен з секцій здійснюється за допомогою похилих та горизонтальних конвеєрів. Основними перевагами сушильного комплексу «СВГ» є порівняно короткий термін сушіння та можливість рівномірного висушування всіх горіхів. Обладнання відзначається енергозберігаючими можливостями: тепле повітря отримане від калориферів, нагрітих водяною системою. Таке конструктивне рішення дозволяє використовувати котли нагріву води різного типу (на дровах, газі чи електричні). Потужності котла достатньо не тільки для роботи сушильних камер, а також для обігріву виробничих чи офісних приміщень. Режими роботи можуть бути як ручними, так і повністю автоматичними. За допомогою сушильного комплексу «СВГ» сушіння горіхів відбувається в температурному діапазоні від 25 до 65° С. Продуктивність залежить від вихідної вологості горіхів та в середньому складає від 2000 до 12000 кг/добу в залежності від кількості резервуарів. Робочий об'єм одного резервуара 4,91 м<sup>3</sup>.

#### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Світовий ринок пропонує досить велику кількість пропозицій сушильного обладнання волоського горіха різного типу: конвекційного, інфрачервоного, мікрохвильового. З різноманіття існуючих технологій сушіння сировини найбільш перспективними способами, що дозволяють інтенсифікувати процес при забезпеченні високої якості готового продукту та підвищення ефективності виробництва, є пристрої, що комбінують різні режими та способи сушіння.

#### Література

1. Сатіна Г.М. Грецький горіх в Україні: економічний огляд і перспективи / Г.М. Сатіна. – Київ : видавничий центр НАУ, 2006. – 22 с.

2. Волоський горіх [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://gorihvovod.blogspot.com/2012/11/80-90.html> (дата звернення 1.01.2023).
3. Самойленко О. Грецький горіх: ваш бізнес сьогодні, завтра і в майбутньому [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://propozitsiya.com/ua/greckiy-gorih-vash-biznes-sogodni-zavtra-i-v-maybutnomu> (дата звернення 1.01.2023).
4. Неговський А. Н., Пахно В. Г. Переработка грецких орехов [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.nutexim.com/pererabotka-hretskykh-orehov> (дата звернення 1.01.2023).
5. Горіх волоський [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://uk.wikipedia.org/wiki/> (дата звернення 1.01.2023).
6. Ринок горіхів: географія продажів, експортери і виробництво [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://kurkul.com/spetsproekty/1215-rinok-gorihiv-geografiya-prodajiv-eksporteri-i-virobnitstvo> (дата звернення 1.01.2023).
7. Глобальний і вітчизняний ринок волоських горіхів [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://agro-business.com.ua/agro/ekonomichniy-hektar/item/24754-hlobalnyi-i-vitchyzniani-rynok-voloskykh-horikhiv.html> (дата звернення 1.01.2023).
8. За два роки Україна скоротила експорт волоського горіха удвічі [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://agravery.com/uk/posts/show/za-dva-roki-ukraina-skorotila-eksport-voloskogo-goriha-udvichi> (дата звернення 1.01.2023).
9. Калетнік Г.М. Особливості конструкції вібраційного обладнання для сушіння високо вологої сировини / Г.М. Калетнік, О.В. Цуркан // Вібрації в техніці та технологіях. – 2021. – № 1(100). – С. 5–13.
10. Котов Б.І. Розрахунок кінематики сушіння неоднорідних рослинних матеріалів / Б.І. Котов, А.В. Спірін, І.А. Зозуляк, А.В. Півнюк // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2017. – № 1(96). – С. 96–99.
11. Шмат С.І. Тенденції сталого розвитку сучасного сільськогосподарського машинобудування в Україні і за рубежом [Електронний ресурс] / С.І. Шмат, П.Г. Лузан, С.В. Колісник // КНТУ. – 2010. Режим доступу : <http://dSPACE.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/4971>
12. Руткевич В.С. Інноваційні засоби для вивантаження стеблових кормів з траншейних сховищ / В.С. Руткевич, В.П. Кушнір, О.О. Остапчук // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2022. – № 1 (305). – С. 261–269.
13. Ratushna N. Методичні підходи до створення нової сільськогосподарської техніки у відповідності з вимогами ринку наукоємної продукції / N. Ratushna, I. Mahmudov, A. Kokhno // MOTROL. – 2007. – № 9А. – С. 119–123.
14. Сушарки для горіхів [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.agriexpo.ru/proizvoditel-susilka-orehov-2781.html> (дата звернення 1.01.2023).
15. Багаторівнева сушильна шафа [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://obstechnik.com/sushka-greetskogo-oreha/> (дата звернення 1.01.2023).
16. Сушильний комплекс «СВГ» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.nutexim.com/uk/services/sushilnij-kompleks/> (дата звернення 1.01.2023).

#### References

1. Satina H.M. Hretskyi horikh v Ukraini: ekonomichniy ohliad i perspektyvy / H.M. Satina. – Kyiv : vydavnychiy tsentr NAU, 2006. – 22 s.
2. Voloskyi horikh [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <http://gorihvovod.blogspot.com/2012/11/80-90.html> (data zvernennia 1.01.2023).
3. Samoilenko O. Hretskyi horikh: vash biznes sohodni, zavtra i v maibutnomu [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <http://propozitsiya.com/ua/greckiy-gorih-vash-biznes-sogodni-zavtra-i-v-maybutnomu> (data zvernennia 1.01.2023).
4. Nehovskiy A. N., Pakhno V. H. Pererabotka hretskykh orekhov [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <http://www.nutexim.com/pererabotka-hretskykh-orehov> (data zvernennia 1.01.2023).
5. Horikh voloskyi [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <https://uk.wikipedia.org/wiki/> (data zvernennia 1.01.2023).
6. Rynok horikhiv: heohrafiia prodazhiv, eksportery i vyrobnytstvo [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <https://kurkul.com/spetsproekty/1215-rinok-gorihiv-geografiya-prodajiv-eksporteri-i-virobnitstvo> (data zvernennia 1.01.2023).
7. Hlobalnyi i vitchyzniani rynok voloskykh horikhiv [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <http://agro-business.com.ua/agro/ekonomichniy-hektar/item/24754-hlobalnyi-i-vitchyzniani-rynok-voloskykh-horikhiv.html> (data zvernennia 1.01.2023).
8. Za dva roky Ukraina skorotyla eksport voloskoho horikha udvichi [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <http://agravery.com/uk/posts/show/za-dva-roki-ukraina-skorotila-eksport-voloskogo-goriha-udvichi> (data zvernennia 1.01.2023).
9. Kaletnik H.M. Osoblyvosti konstruktсии vibratsiinoho obladnannia dlia sushinnia vysoko volohoi syrovyny / H.M. Kaletnik, O.V. Tsurkan // Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh. – 2021. – № 1(100). – S. 5–13.
10. Kotov B.I. Rozrakhunok kinematyky sushinnia neodnorodnykh roslynnykh materialiv / B.I. Kotov, A.V. Spirin, I.A. Zozuliak, A.V. Pivniuk // Tekhnika, enerhetyka, transport APK. – 2017. – № 1(96). – S. 96–99.
11. Shmat S.I. Tendentsii staloho rozvytku suchasnoho silskohospodarskoho mashynobuduvannia v Ukraini i za rubezhem [Elektronnyi Resurs] / S.I. Shmat, P.H. Luzan, S.V. Kolisnyk // KNTU. – 2010. Rezhym dostupu : <http://dSPACE.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/4971>
12. Rutkevych V.S. Innovatsiini zasoby dlia vyvantazhennia steblovykh kormiv z transheinykh skhovyshch / V.S. Rutkevych, V.P. Kushnir, O.O. Ostapchuk // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky. – 2022. – № 1 (305). – С. 261–269.
13. Ratushna N. Metodichni pidkhody do stvorennia novoi silskohospodarskoi tekhniki u vidpovidnosti z vymohamy rynku naukoiemnoi produktsii / N. Ratushna, I. Mahmudov, A. Kokhno // MOTROL. – 2007. – № 9А. – С. 119–123.
14. Susharky dlia horikhiv [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <https://www.agriexpo.ru/proizvoditel-susilka-orehov-2781.html> (data zvernennia 1.01.2023).
15. Bahatorivneva sushylna shafa [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <https://obstechnik.com/sushka-greetskogo-oreha/> (data zvernennia 1.01.2023).
16. Sushylnyi kompleks «SVH» [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <https://www.nutexim.com/uk/services/sushilnij-kompleks/> (data zvernennia 1.01.2023).

## МІКРОЕЛЕКТРОННІ АВТОГЕНЕРАТОРНІ СЕНСОРИ ТЕМПЕРАТУРИ

Запропоновано мікроелектронні автогенераторні сенсори температури на основі транзисторних структур з диференційним від'ємним опором з первинними параметричними термочутливими елементами на базі біполярних і польових транзисторів, причому первинні параметричні термочутливі елементи є активними компонентами схем параметричних автогенераторних сенсорів температури, що значно спрощує конструкцію пристроїв. На підставі розгляду фізичних процесів у первинних параметричних термочутливих компонентах і автогенераторах сенсорів температури, розроблено математичні моделі автогенераторних сенсорів температури, на основі яких отримано аналітичні вирази для визначення параметричних залежностей функцій чутливості та функцій перетворення. Показано, що основний внесок у функції перетворення і чутливості вносить зміна температури навколишнього середовища, що викликає зміну еквівалентної ємності і диференційного від'ємного опору параметричних автогенераторних сенсорів температури, що відповідно, змінює вихідну частоту пристрою. Чутливість сенсора з термочутливим біполярним транзистором складає від 11,25 кГц/°C до 21,5 кГц/°C, а сенсора з термочутливим польовим транзистором складає від 2,77 кГц/°C до 4,25 кГц/°C в діапазоні зміни температури навколишнього середовища від 0 °C до 100 °C. Отримані параметричні залежності функцій чутливості та перетворення показують можливість значно простіше розраховувати основні характеристики параметричних автогенераторних сенсорів, а також наочно демонструють вплив кожного компонента параметричних перетворювачів та елементів параметричних автогенераторних сенсорів на вихідну частоту пристроїв у порівнянні з розрахунками функцій чутливості та перетворення з нелінійних еквівалентних схем пристроїв на основі розв'язку рівнянь Кірхгофа.

Ключові слова: сенсор температури, диференційний від'ємний опір, автогенератор, частота, термочутливі транзистори.

OSADCHUK Yaroslav

Vinnytsia National Technical University

## MICROELECTRONIC AUTOGENERATOR TEMPERATURE SENSORS

Microelectronic autogenerator temperature sensors based on transistor structures with differential negative resistance with primary parametric thermosensitive elements based on bipolar and field-effect transistors are proposed, moreover, primary parametric thermosensitive elements are active components of the circuits of parametric autogenerator temperature sensors, which greatly simplifies the design of the device. Based on the consideration of physical processes in primary parametric temperature-sensitive components and autogenerators of temperature sensors, mathematical models of autogenerator temperature sensors were developed, on the basis of which analytical expressions were obtained to determine the parametric dependences of sensitivity functions and transformation functions. It is shown that the main contribution to the conversion and sensitivity functions is made by a change in the ambient temperature, which causes a change in the equivalent capacitance and negative differential resistance of parametric autogenerator temperature sensors, which, accordingly, changes the output frequency of the device. The sensitivity of the sensor with a thermally sensitive bipolar transistor is from 11.25 kHz/°C to 21.5 kHz/°C, and the sensor with a thermally sensitive field-effect transistor is from 2.77 kHz/°C to 4.25 kHz/°C in the range of ambient temperature change 0 °C up to 100 °C. The obtained parametric dependences of the sensitivity and conversion functions show the possibility of easier calculation of the main characteristics of parametric autogenerator sensors, and also clearly demonstrate the influence of each component of parametric transducers and elements of parametric self-oscillating sensors on the output frequency of devices in comparison with the calculations of sensitivity and conversion functions from nonlinear equivalent circuits basis for solving the Kirchhoff equations.

Keywords: temperature sensor, differential negative resistance, autogenerator, frequency, thermosensitive transistors.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Вимірювання температури потрібно у всіх сферах діяльності людини, оскільки величина температури в технологічних процесах визначає якість виготовлення продукції. Це стосується таких галузей виробництва, як авіаційна та космічна техніка, хімічна промисловість, металургія, енергетика, сільське господарство, медицина, дослідження довкілля, що потребує створення приладів вимірювання температури з високими метрологічними характеристиками [1–6].

На теперішній час для вимірювання температури використовуються сенсори, які виконані у вигляді мікроелектронних напівпровідникових схем, термістори, інфрачервоні сенсори, термопари, термометри опору. Для вимірювання температури в діапазоні від -55°C до +170°C використовуються сенсори на основі мікроелектронної технології. Вони знайшли широке застосування в інформаційно-вимірювальних системах, комп'ютерній техніці, телекомунікаційних та радіотехнічних засобах, в інверторах і блоках живлення та ін. [7, 8].

У випадках застосування в інформаційних системах амплітудних сенсорів, якими є сенсори температури, побудова комутаторів, які не вносять значних помилок у результати вимірювань, є найскладнішою проблемою. Паразитні ЕРС, перехідні опори і взаємний вплив каналів у таких комутаторах

приводять до появи великих помилок, радикальної боротьби з якими не знайдено до теперішнього часу [9, 10].

Усунути наведені вище недоліки можливо при використанні сенсорів з частотно-модульованим вихідним сигналом, що дозволяє будувати комутатори за найпростішими схемами, не вносячи при цьому ніяких помилок у результати вимірювань [11, 12].

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Одним з перспективних науково-технічних напрямків у створенні параметричних сенсорів температури є дослідження в галузі сенсорної техніки на основі реактивних властивостей мікроелектронних транзисторних структур з частотним вихідним сигналом. Мікроелектронні автогенераторні сенсори температури з частотним вихідним сигналом поєднують простоту і універсальність, які мають аналогові засоби вимірювання, з точністю та завадостійкістю, якими характеризуються вимірювальні пристрої з кодовим виходом. Використання принципу перетворення «температура-частота» на основі мікроелектронних параметричних автогенераторних сенсорів температури суттєво знижує вартість інформаційно-вимірювальних приладів та систем, а також дозволяє значно зменшити масу та габарити сенсорів температури, підвищити чутливість та точність перетворень інформативного сигналу [13–19].

### Постановка завдання

Метою роботи є розробка та дослідження автогенераторних сенсорів температури на основі напівпровідникових транзисторних структур, в яких термочутливі біполярний і польовий транзистори виступають як первинні перетворювачі температури, так і активні елементи автогенераторних параметричних сенсорів, в яких втрати енергії в коливальних системах компенсуються енергією диференційного від'ємного опору. Для дослідження поставленої мети у роботі потрібно розв'язати такі задачі:

- 1) Провести аналіз існуючих наукових джерел та обґрунтувати використання напівпровідникових транзисторних структур з диференційним від'ємним опором для побудови автогенераторних параметричних сенсорів температури з частотним виходом.
- 2) Розробити математичні моделі автогенераторних параметричних сенсорів температури, в яких враховано залежність параметрів температурно-чутливих елементів від дії температури та їх вплив на вихідну частоту автогенераторного сенсора.
- 3) Отримати аналітичні вирази параметричної залежності вихідної частоти і чутливості автогенераторного параметричного сенсора від зміни температури навколишнього середовища.
- 4) Зробити висновки з проведених досліджень.

### Математичні моделі сенсорів температури

Автогенераторний сенсор температури з частотним виходом будується на основі напівпровідникової транзисторної структури з диференційним від'ємним опором, в якій термочутливим елементом є біполярний транзистор VT1, одночасно транзистор VT1 виступає як і активний елемент схеми автогенератора. На рис. 1 надано схему сенсора температури.

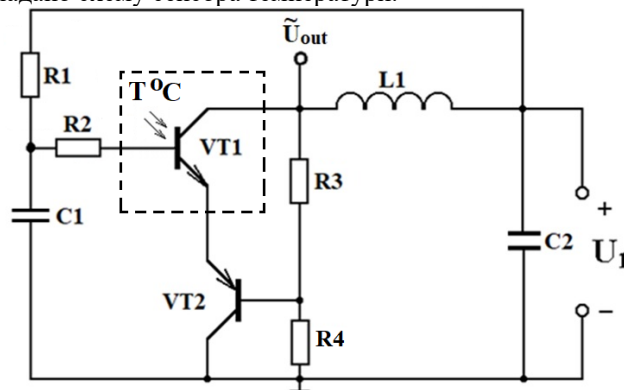


Рис. 1. Електрична схема авто генераторного сенсора температури

Коливальний контур автогенераторного параметричного сенсора утворений ємнісною складовою повного опору на електродах колектор-колектор біполярних транзисторів VT1 і VT2 та пасивної індуктивності L1. Електричне коло R2C1 створює додатковий зворотний позитивний зв'язок, що збільшує диференційний від'ємний опір. Енергія диференційного від'ємного опору компенсує втрати енергії в коливальному контурі автогенераторного параметричного сенсора температури. При зміні температури, яка діє на термочутливий біполярний транзистор VT1 відбувається зміна ємнісної складової повного опору на виводах колектор-колектор біполярних транзисторів VT1 і VT2 та диференційного від'ємного опору, що змінює вихідну частоту автогенераторного параметричного сенсора температури. Резистори R1-R4 і джерело постійної напруги U1 забезпечують вибір робочої точки на спадній ділянці вольт-амперної

характеристики автогенераторного параметричного сенсора температури. Конденсатор С2 запобігає протіканню змінного струму через блок живлення.

Перейдемо до розрахунку залежності параметрів термочутливого біполярного транзистора VT1 від температури. Транзистор VT1 включено за схемою із загальним емітером, тому струм бази  $I_B$  дорівнює [20].

$$I_B = (1 - h_{21B})I_E - I_{CB0} \quad (1)$$

де  $h_{21B}$  – коефіцієнт передачі струму за схемою із загальною базою,  $I_E$  – прямий струм р-п переходу емітер – база,  $I_{CB0}$  – зворотний струм колекторного р-п переходу. Слід зауважити, що  $I_{CB0} \ll I_E$ , тому його впливом можна знехтувати, з другого боку, товщина бази  $W_p$  транзистора VT1 значно менша дифузійної довжини електронів  $L_n$ . З врахуванням цих зауважень, а також, що  $D_n = \mu_n \frac{kT}{q}$ ,  $n_i^2 = n_p p_p$ ,

$h_{21B} = \frac{1}{2} \left( \frac{W_p}{L_n} \right)^2$  струм бази приймає вигляд

$$I_B = \frac{\mu_n k_B T S n_i^2}{2W_p p_p} e^{\frac{qU}{k_B T}} \quad (2)$$

де  $\mu_n$  – рухливість електронів,  $k_B$  – стала Больцмана,  $T$  – температура,  $S$  – площа перерізу бази,  $n_i$  – власна концентрація електронів у напівпровіднику,  $p_p$  – концентрація дірок у напівпровіднику бази,  $q$  – заряд електрона,  $U$  – прикладена пряма напруга до р – переходу база-емітер транзистора VT1.

Величина  $n_i$  у загальному вигляді описується формулою [20].

$$n_i^2 = AT^3 e^{-\frac{E_g}{k_B T}} \quad (3)$$

де  $A$  – стала величина, яка залежить від добутку квантових станів електронів у зоні провідності напівпровідникового матеріалу і дірок у валентній зоні,  $E_g$  – ширина забороненої зони напівпровідникового матеріалу. При підстановці виразу (3) у формулу (2) отримуємо вираз

$$I_B = \left[ \frac{AS\mu_n k_B T^4}{2W_p p_p} \right] e^{-\frac{E_g - qU}{k_B T}} \quad (4)$$

Виходячи з формули (4), опір базової області  $R_B$  транзистора VT1 від температури описується формулою

$$R_B(T) = \frac{2U_B W_p p_p}{AS\mu_n k_B T^4 e^{-\frac{E_g - qU}{k_B T}}} \quad (5)$$

де  $U_B$  – напруга на базовій області біполярного транзистора VT1. Зміна опору базової області транзистора VT1 при дії температури у загальному вигляді приймає вигляд

$$\Delta R_B(T) = \frac{\partial R_B}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial R_B}{\partial \mu_n} \Delta \mu_n(T) + \frac{\partial R_B}{\partial f_{\text{exp}}} \Delta f_{\text{exp}}(T) \quad (6)$$

Провівши диференціювання у виразі (6), отримуємо формулу

$$\begin{aligned} \Delta R_B(T) = & -8T^{-5} \frac{U_B W_p p_p}{AS\mu_n(T)k_B} e^{\frac{E_g - qU}{k_B T}} \Delta T - \frac{2U_B W_p p_p}{AS\mu_n^2(T)k_B T^4} e^{\frac{E_g - qU}{k_B T}} \Delta \mu_n(T) - \\ & - \frac{2U_B W_p p_p}{AS\mu_n k_B T^6} e^{\frac{E_g - qU}{k_B T}} \left( \frac{E_g - qU}{k_B} \right) \Delta T. \end{aligned} \quad (7)$$

Визначивши залежність зміни складових опору бази термочутливого біполярного транзистора VT1 від температури, перейдемо до визначення аналітичного виразу параметричної залежності вихідної частоти автогенераторного сенсора температури. При розв'язанні даної задачі необхідно дослідити перетворення енергії теплового поля в енергію змінного електричного поля на виході автогенераторного сенсора температури. На основі вище сказаного, визначимо коефіцієнт корисної дії автогенераторного сенсора температури. На першому етапі роботи автогенераторного сенсора температури енергія теплового поля перетворюється в енергію постійного електричного поля, яка є вхідною величиною для автогенераторного сенсора температури. В подальшому, енергія електричного поля термочутливого біполярного транзистора перетворюється в енергію змінного електричного поля, яка зв'язана з еквівалентною ємністю  $C_{ekv}$  коливального контуру автогенераторного сенсора температури. На підставі цього, коефіцієнт корисної дії автогенераторного сенсора визначається формулою

$$\eta = \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}} \quad (8)$$

де

$$P_{\text{вх}} = \left[ \frac{AS\mu_n k_B T^4 U_B}{2W_p p_p} \right] e^{-\frac{E_g - qU}{k_B T}} \quad (9)$$

а величина  $P_{\text{вих}}$  дорівнює

$$P_{\text{вих}} = \frac{C_{\text{екв}} U^2}{2t} \quad (10)$$

де  $t$  – період коливань вихідного сигналу автогенераторного сенсора температури без дії температури.

З врахуванням формул (9) і (10), коефіцієнт корисної дії автогенераторного сенсора температури має вигляд

$$\eta = \frac{C_{\text{екв}} U^2 W_p p_p e^{-\frac{E_g - qU}{k_B T}}}{AS\mu_n k_B T^4 U_B} \quad (11)$$

З формули (11) визначається еквівалентна ємність  $C_{\text{екв}}$  автогенераторного сенсора температури, яка описується виразом

$$C_{\text{екв}} = \frac{\eta AS\mu_n k_B T^4 U_B}{U^2 W_p p_p e^{-\frac{E_g - qU}{k_B T}}} \quad (12)$$

Еквівалентну ємність  $C_{\text{екв}}$  автогенераторного сенсора температури, можна визначити з формули резонансної частоти автогенератора, яка має вигляд [21]

$$F_0 = \frac{1}{2\pi R_g C_{\text{екв}}} \sqrt{\frac{R_g^2 C_{\text{екв}}}{L} - 1} \quad (13)$$

де  $R_g$  – диференційний від’ємний опір коливального контуру,  $L$  – індуктивність контуру. З виразу (13) отримуюмо квадратне рівняння, на основі якого визначаємо еквівалентну ємність  $C_{\text{екв}}$

$$(4\pi^2 F_0^2 R_g^2 L) C_{\text{екв}}^2 - R_g^2 C_{\text{екв}} + L = 0 \quad (14)$$

Введемо наступні позначення

$$b_1 = 4\pi^2 F_0^2 R_g^2 L \quad (15)$$

$$b_2 = R_g^2 \quad (16)$$

$$b_3 = L \quad (17)$$

$$b_4 = C_{\text{екв}} = \frac{\eta AS\mu_n k_B T^4 U_B}{U^2 W_p p_p e^{-\frac{E_g - qU}{k_B T}}} \quad (18)$$

Еквівалентна ємність  $C_{\text{екв}}$  з розв’язку рівняння (14) дорівнює

$$C_{\text{екв}} = \frac{b_2 \pm \sqrt{b_2^2 - 4b_1 b_3}}{2b_1} \quad (19)$$

Прирівнявши вираз (19) до виразу (12), отримуюмо рівняння для визначення  $F_0$ , яке має вигляд

$$b_1 = \frac{b_2}{b_4} - \frac{b_3}{b_4^2} \quad (20)$$

Підставивши значення виразів (15)–(18) у формулу (20), отримуюмо рівняння

$$4\pi^2 F_0^2 R_g^2 L = \frac{R_g^2 U^2 W_p p_p e^{-\frac{E_g - qU}{k_B T}}}{\eta AS\mu_n k_B T^4 U_B} - \frac{LU^4 W_p^2 p_p^2 e^{-\frac{2(E_g - qU)}{k_B T}}}{\eta^2 A^2 S^2 \mu_n^2 t^2 k_B^2 T^8 U_B^2 R_g^2} \quad (21)$$

З рівняння (21) визначаємо параметричну залежність резонансної частоти автогенераторного сенсора температури від параметрів первинного перетворювача температури і параметрів автогенератора

$$F_0 = \frac{1}{2} \left[ \frac{U^2 W_p p_p e^{-\frac{E_g - qU}{k_B T}}}{\eta AS\mu_n k_B T^4 U_B L} - \frac{U^4 W_p^2 p_p^2 e^{-\frac{2(E_g - qU)}{k_B T}}}{\eta^2 A^2 S^2 \mu_n^2 t^2 k_B^2 T^8 U_B^2 R_g^2} \right]^{1/2} \quad (22)$$



Отримана формула (22), яка описує параметричну залежність резонансної частоти автогенераторного сенсора температури, дозволяє простим шляхом розраховувати функцію перетворення параметричного сенсора температури, ніж складним шляхом з нелінійної еквівалентної схеми параметричного автогенераторного сенсора на основі розв'язку рівнянь Кірхгофа.

На рис. 2 надано графічну залежність розрахункової та експериментальної кривих функції перетворення автогенераторного сенсора температури

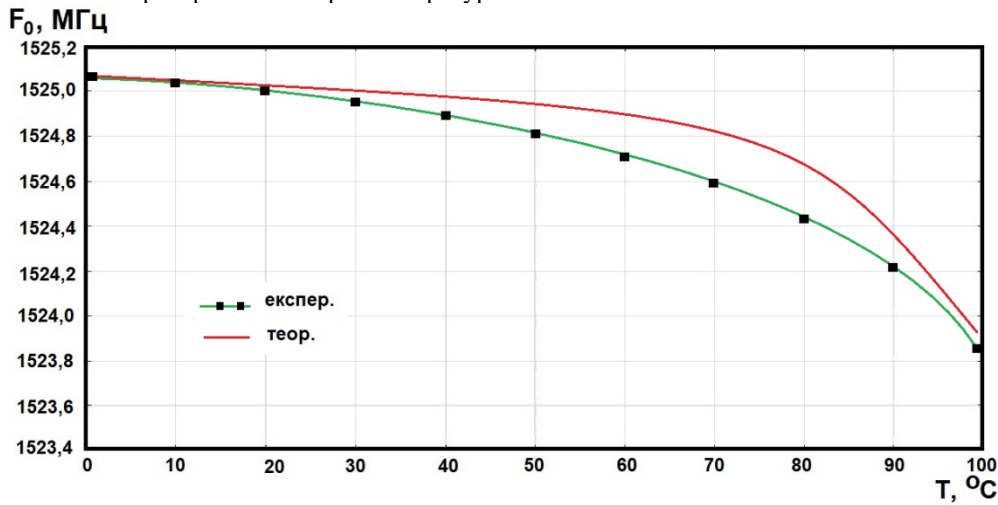


Рис. 2. Залежність функції перетворення авто генераторного параметричного сенсора від температури

Чутливість частоти автогенераторного сенсора температури визначається, як похідна функції (22) за параметром температури. Експериментальні дослідження показують, що вихідна змінна напруга  $U_{\sim}$  автогенераторного сенсора температури також залежить від температури, тому цей факт необхідно врахувати при визначенні чутливості автогенераторного сенсора температури. Тому, з врахуванням цього зауваження, функція (22) приймає вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[ U_{\sim}^2(T) T^{-4} \mu_n^{-1}(T) e^{\frac{E_g - qU}{k_B T}} b_5 - U_{\sim}^4(T) T^{-8} \mu_n^{-2}(T) e^{\frac{2(E_g - qU)}{k_B T}} b_6 \right]^{1/2} \quad (23)$$

де

$$b_5 = \frac{W_p P_p}{\eta A S t k_B U_B L}, \quad (24)$$

$$b_6 = \frac{W_p^2 P_p^2}{\eta^2 A^2 S^2 t^2 k_B^2 U_B^2 R_g^2}, \quad (25)$$

Виходячи з виразу (23), функція чутливості автогенераторного сенсора температури описується формулою

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi} \left[ U_{\sim}^2(T) T^{-4} \mu_n^{-1}(T) e^{\frac{E_g - qU}{k_B T}} b_5 - U_{\sim}^4(T) T^{-8} \mu_n^{-2}(T) e^{\frac{2(E_g - qU)}{k_B T}} b_6 \right]^{1/2} \times$$

$$\times \left[ \left( 2U_{\sim}(T) \frac{dU_{\sim}(T)}{dT} T^{-4} - 4T^{-5} U_{\sim}^2(T) \right) \mu_n^{-1}(T) e^{\frac{E_g - qU}{k_B T}} + \left( -\mu_n^{-2}(T) \frac{d\mu_n(T)}{dT} e^{\frac{E_g - qU}{k_B T}} - \right. \right. \quad (26)$$

$$\left. \left. - e^{\frac{E_g - qU}{k_B T}} \frac{E_g - qU}{k_B} \mu_n^{-1}(T) U_{\sim}^2(T) T^{-4} \right) \right] b_5 - \left[ \left( U_{\sim}^3(T) \frac{dU_{\sim}(T)}{dT} T^{-8} - 8U_{\sim}^4(T) T^{-9} \mu_n^{-2}(T) e^{\frac{2(E_g - qU)}{k_B T}} \right) + \right.$$

$$\left. + \left( -2\mu_n^{-3}(T) \frac{d\mu_n(T)}{dT} e^{\frac{2(E_g - qU)}{k_B T}} - e^{\frac{2(E_g - qU)}{k_B T}} \frac{2(E_g - qU)}{k_B} T^{-2} \mu_n^{-2}(T) U_{\sim}^4(T) T^{-8} \right) \right] b_6.$$

Графік розрахункової та експериментальної кривих функції чутливості автогенераторного сенсора температури від температури представлено на рис. 3. Як видно з графіка (див. рис. 3), чутливість автогенераторного сенсора температури з термочутливим біполярним транзистором складає від 11,25 кГц/°C до 21,5 кГц/°C в діапазоні вимірюваної температури від 0 °C до 100 °C.

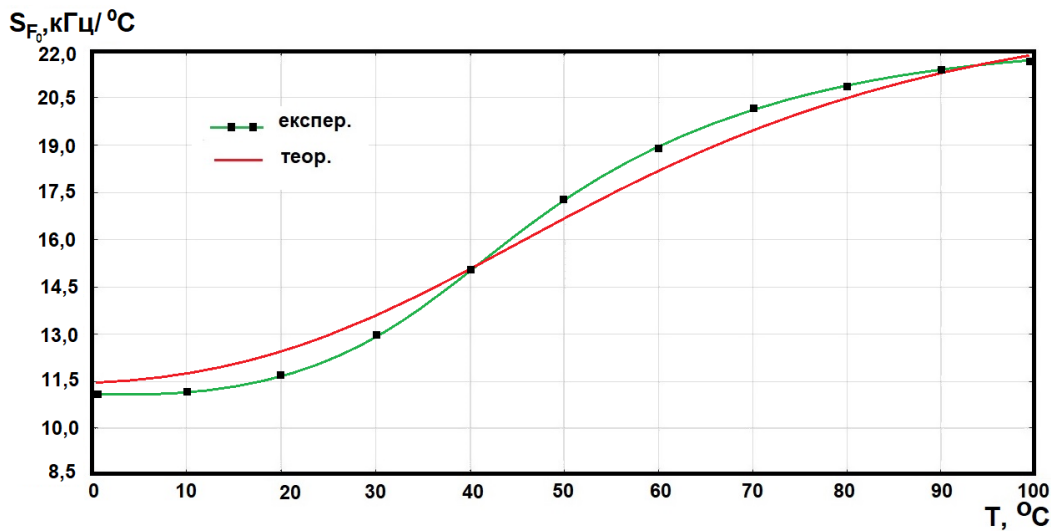


Рис. 3. Залежність функції чутливості автогенераторного сенсора температури від температури

Перейдемо до викладу досліджень характеристик мікроелектронного параметричного автогенераторного сенсора температури, в якому первинним температурно-чутливим елементом є польовий транзистор з індукованим каналом, причому транзистор також є активним елементом автогенератора, що значно спрощує конструкцію сенсорів температури. Електрична схема автогенераторного сенсора температури надана на рис. 4.

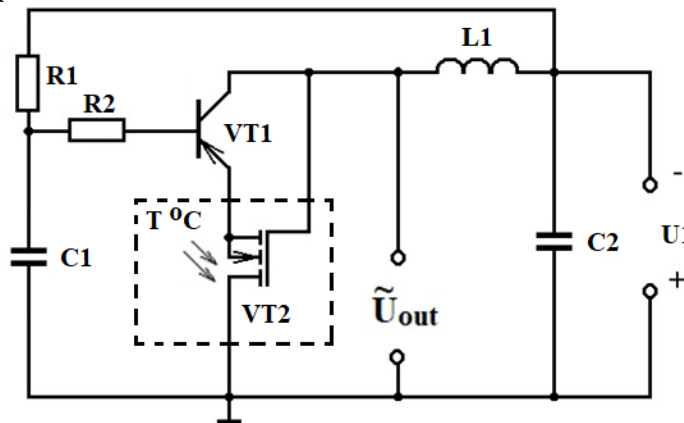


Рис. 4. Електрична схема автогенераторного сенсора температури

Дана схема являє собою інтегральну гібридну схему, що складається з біполярного транзистора VT1 і термочутливого польового транзистора з індукованим каналом VT2. На електродах колектор-стік транзисторів VT1 і VT2 існує повний опір, активна складова цього опору має від’ємне значення, а реактивна складова носить ємнісний характер. Підключення пасивної індуктивності L1 до колектора біполярного транзистора VT1 створює коливальний контур автогенераторного сенсора температури, втрати енергії в якому компенсуються енергією диференційного від’ємного опору. За допомогою джерела постійної напруги U1 та резисторів R1-R2 встановлюється робоча точка автогенераторного сенсора температури на спадній ділянці вольт-амперної характеристики.

Коло з резистора R2 та конденсатора C1 створює додатній зворотній зв’язок виходу автогенераторного сенсора температури з входом, що збільшує диференційний від’ємний опір у коливальній системі пристрою. Конденсатор C2 запобігає проходженню змінного струму через джерело напруги U1. При дії температури на польовий транзистор VT2 відбувається зміна ємнісної складової повного опору транзисторної структури та диференційного від’ємного опору на виході автогенераторного сенсора температури, що викликає зміну вихідної частоти вимірювального пристрою.

Перейдемо до визначення залежності опору каналу польового транзистора VT2 від дії температури. Величина струму стоку в режимі насичення має вигляд [20]

$$I_C = \frac{Z \mu_n C_0}{2L_{кан}} (U_3 - U_{пор})^2, \tag{27}$$

де  $Z$  – ширина каналу,  $L$  – довжина каналу,  $C_0$  – величина ємності підзатворного діелектрика на одиницю площі,  $\mu_n$  – рухливість електронів у каналі,  $U_{пор}$  – порогова напруга каналу польового транзистора,  $U_3$  – напруга на затворі польового транзистора відносно витоків. Опір каналу в залежності від температури визначається виразом

$$R_{кан}(T) = \frac{2U_{CB}L_{кан}}{Z\mu_n(T)C_0(U_3 - U_{пор}(T))^2}, \quad (28)$$

де  $U_{CB}$  – напруга на електродах стік-витік польового термочутливого транзистора. Зміна опору каналу при дії температури описується формулою

$$\Delta R_{кан}(T) = \frac{dR_{кан}}{d\mu_n(T)} \Delta\mu_n(T) + \frac{dR_{кан}}{dU_{пор}(T)} \Delta U_{пор}(T). \quad (29)$$

Виконавши диференціювання у формулі (29), отримуємо вираз

$$\Delta R_{кан}(T) = -\frac{2U_{CB}L_{кан}}{ZC_0(U_3 - U_{пор}(T))^2} \mu_n^{-2}(T) \Delta\mu_n(T) - \frac{4U_{CB}L_{кан}}{Z\mu_n(T)C_0(U_3 - U_{пор}(T))^3} \Delta U_{пор}(T). \quad (30)$$

Отримавши аналітичний вираз зміни опору каналу термочутливого польового транзистора від дії температури, можна перейти до визначення аналітичного виразу параметричної залежності вихідної частоти автогенераторного сенсора температури від зміни температури. Дана залежність визначається аналогічним чином як і для автогенераторного сенсора температури з термочутливим біполярним транзистором, що була розглянута вище.

Виходячи з формули (10), (28) і (29), коефіцієнт корисної дії автогенераторного сенсора температури дорівнює

$$\eta = \frac{C_{екв}U_{CB}^2L_{кан}}{U_{CB}tZ\mu_nC_0(U_3 - U_{пор})^2} \quad (31)$$

З формули (31) визначається величина еквівалентної ємності автогенераторного сенсора температури  $C_{екв}$ , яка має вигляд

$$C_{екв} = \frac{\eta U_{CB}tZ\mu_nC_0(U_3 - U_{пор})^2}{U_{CB}^2L_{кан}}, \quad (32)$$

З другого боку, еквівалентна ємність  $C_{екв}$  коливального контуру автогенераторного сенсора температури зв'язана з резонансною частотою вимірювального пристрою виразом (13). Підставивши у формулу (13) вираз (32), отримуємо аналітичний вираз для параметричної залежності вихідної резонансної частоти автогенераторного сенсора температури від параметрів первинного термочутливого польового транзистора і параметрів самого автогенератора. Ця залежність описується рівнянням

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{U_{CB}^2L_{кан}}{\eta U_{CB}tZ\mu_nC_0(U_3 - U_{пор})^2L} - \frac{U_{CB}^2L_{кан}^2}{\eta^2 U_{CB}^2t^2Z^2\mu_n^2C_0^2(U_3 - U_{пор})^2R_g^2} \right]^{1/2}. \quad (33)$$

Формула (33) є функцією перетворення автогенераторного сенсора температури. На рис. 5 подано розрахункову і експериментальну залежності функції перетворення автогенераторного сенсора температури від дії температури.

Функція чутливості автогенераторного сенсора температури визначається на основі виразу (33), при цьому вважається, що вихідна змінна напруга автогенераторного сенсора температури також залежить від температури. Таким чином, функцію перетворення (33) залежності її складових від температури можна представити у вигляді

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[ \left( U_{CB}^2(T)\mu_n^{-1}(T)(U_3 - U_{пор}(T))^{-2} \right) b_7 - \left( U_{CB}^4(T)\mu_n^{-2}(T)(U_3 - U_{пор}(T))^{-4} \right) b_8 \right]^{1/2}. \quad (34)$$

де

$$b_7 = \frac{L_{кан}}{\eta t Z C_0 U_{CB} L}, \quad (35)$$

$$b_8 = \frac{L_{кан}^2}{\eta^2 U_{CB}^2 t^2 Z^2 C_0^2 R_g^2}. \quad (36)$$

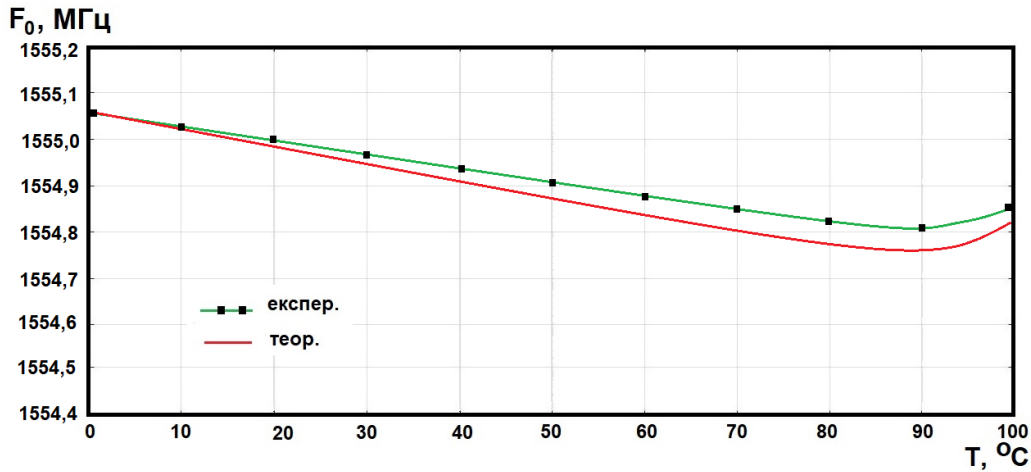


Рис. 5. Залежність функції перетворення автогенераторного сенсора температури від температури

Виконавши диференціювання функції (34) за параметром температури, отримаємо функцію чутливості автогенераторного сенсора температури, яка описується рівнянням

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi} \left[ (U_-^2(T) \mu_n^{-1}(T) (U_3 - U_{nop}(T))^{-2}) b_7 - (U_-^4(T) \mu_n^{-2}(T) (U_3 - U_{nop}(T))^{-4}) b_8 \right]^{1/2} \times$$

$$\times \left[ \left( 2U_-(T) \frac{dU_-(T)}{dT} \mu_n^{-1}(T) (U_3 - U_{nop}(T))^{-2} - \left( \mu_n^{-2}(T) \frac{d\mu_n(T)}{dT} (U_3 - U_{nop}(T))^{-2} + \right. \right. \right. \quad (37)$$

$$\left. \left. \left. + 2(U_3 - U_{nop}(T))^{-2} \frac{dU_{nop}(T)}{dT} \mu_n^{-1}(T) \right) U_-^2(T) \right] b_7 - \left[ 4U_-^3(T) \frac{dU_-(T)}{dT} \mu_n^{-1}(T) (U_3 - U_{nop}(T))^{-2} - \right.$$

$$\left. \left. - \left( 2\mu_n^{-3}(T) \frac{d\mu_n(T)}{dT} (U_3 - U_{nop}(T))^{-4} + 4(U_3 - U_{nop}(T))^{-5} \frac{dU_{nop}(T)}{dT} \mu_n^{-2}(T) \right) U_-^4(T) \right] b_8 \right].$$

На рис. 6 надано розрахункову і експериментальну залежності функції чутливості автогенераторного сенсора температури від дії температури.

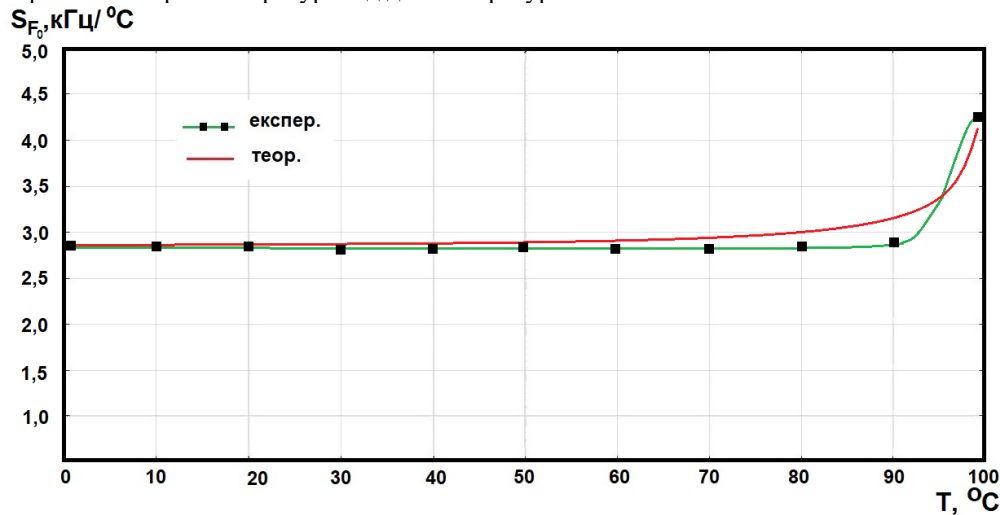


Рис. 6. Залежність функції чутливості автогенераторного сенсора від зміни температури

Як видно з графіка (рис. 6), чутливість автогенераторного сенсора температури з термочутливим польовим транзистором складає від 2,77 кГц/°С до 4,25 кГц/°С в діапазоні вимірюваної температури від 0 °С до 100 °С.

Частотний діапазон сенсорів температури з частотним вихідним сигналом вибраний від 1500 МГц до 1600 МГц. Її діапазон частот застосовується для обладнання, що працює в частотному діапазоні від 1,0 ГГц до 2,0 ГГц (наземні термінали, системи Inmarsat, бездротова аудіо та відеоапаратура) [22–24].

Експериментальні дослідження проведено за допомогою аналізатора радіочастотного спектру Arinst SSA TG-LC. На рис. 7 представлено радіочастотний спектр автогенераторного сенсора температури з частотним вихідним сигналом який базується на основі двох біполярних транзисторів, частота передачі складає 1525,0 МГц.

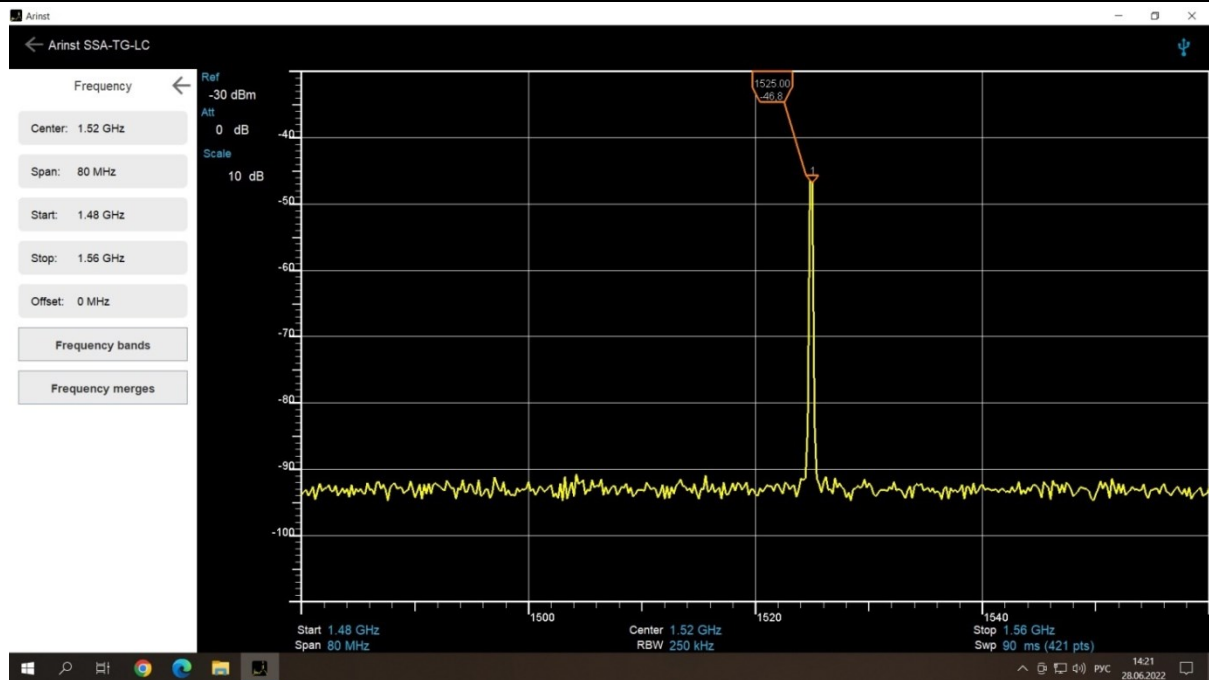


Рис. 7. Спектр автогенераторного сенсора температури з частотним вихідним сигналом на основі двох біполярних транзисторів

На рис. 8 представлено радіочастотний спектр автогенераторного сенсора температури з частотним вихідним сигналом який базується на основі біполярного та польового транзисторів, частота передачі складає 1555,0 МГц.

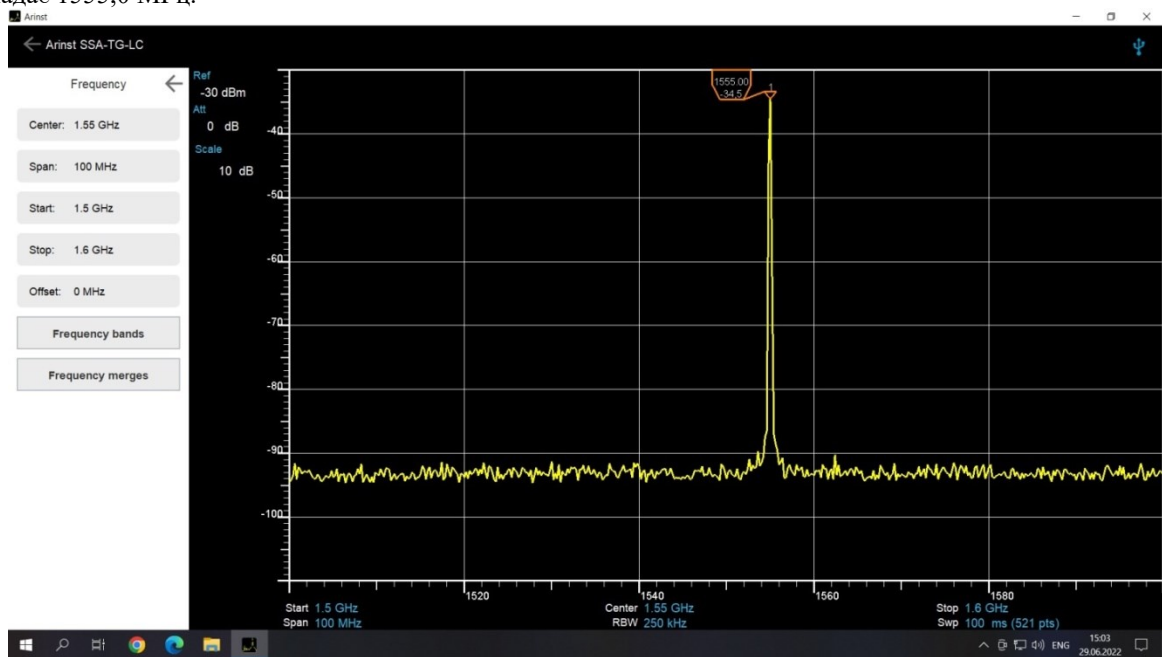


Рис. 8. Спектр автогенераторного сенсора температури з частотним вихідним сигналом на основі біполярного та польового транзисторів

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Запропоновано мікроелектронні автогенераторні сенсори температури на основі транзисторних структур з диференційним від'ємним опором з термочутливими елементами на базі біполярних і польових транзисторів, причому термочутливі елементи пристроїв є активними елементами схем самих автогенераторів, що значно спрощує конструкцію інформаційно-вимірювальних пристроїв та систем.

2. На основі розгляду фізичних процесів, які протікають у термочутливих елементах і автогенераторних параметричних сенсорах, розроблено математичні моделі сенсорів температури, за допомогою яких отримано параметричні залежності функцій чутливості і перетворення. Доведено, що основний внесок у зміну функцій перетворення і чутливості вносить зміна температури. Це викликає зміну еквівалентної ємності автогенераторних параметричних сенсорів температури і диференційного від'ємного опору вимірювальних пристроїв, що у свою чергу, змінює вихідну частоту автогенераторних параметричних сенсорів температури. Чутливість автогенераторного сенсора з термочутливим біполярним транзистором

складає від 11,25 кГц/°C до 21,5 кГц/°C, а автогенераторного сенсора з термочутливим польовим транзистором складає від 2,77 кГц/°C до 4,25 кГц/°C в діапазоні вимірюваної температури від 0 °C до 100 °C.

3. Отримані аналітичні вирази, які описують параметричні залежності функцій чутливості та перетворення, які дозволяють значно простіше розраховувати основні параметри сенсорів температури і показують вплив кожного параметра перетворювачів і автогенераторів на вихідну частоту сенсорів температури у порівнянні з розрахунками функцій перетворення з нелінійних еквівалентних схем пристроїв. У параметричних сенсорах температури з частотним виходом не потрібно застосовувати аналого-цифрові перетворювачі та операційні підсилювачі при подальшій обробці інформативних сигналів, що значно зменшує ціну інформаційно-вимірювальних приладів та систем, а також дозволяють передачу інформації на велику відстань при роботі автогенераторних сенсорів температури у НВЧ діапазоні.

### Література

1. Sabrie Soloman. *Sensors. Handbook*. New York: McGraw-Hill Companies. 2010. 1352 p.
2. Kim J.H., Jo B.W., Jo J.H., Kim D.K. Development of an IoT-Based Construction Worker Physiological Data Monitoring Platform at High Temperatures. *Sensors*. 2020; 20(19):5682.
3. Ghafoori Y., Vidmar A., Riha J., Kryżanowski A. A Review of Measurement Calibration and Interpretation for Seepage Monitoring by Optical Fiber Distributed Temperature Sensors. *Sensors*. 2020; 20(19):5696.
4. Jebelli H., Choi B., Lee S. Application of Wearable Biosensors to Construction Sites. II: Assessing Workers' Physical Demand. *J. Constr. Eng. Manag.* 2019, 145, 04019080.
5. Sergey Y. Yurish. *Sensors and Applications in Measuring and Automation Control Systems*, (Book Series: Advances in Sensors: Reviews, Vol. 4. IFSA Publishing, S.L. (Barcelona, Spain). 2016. 507 p.
6. Ettahri O., Oukaira A., Ali M., Hassan A., Nabavi M., Savaria Y., Lakhssassi A. A Real-Time Thermal Monitoring System Intended for Embedded Sensors Interfaces. *Sensors*. 2020; 20(19):5657.
7. Rao S., Pangallo G., Della Corte F.G. Integrated Amorphous Silicon p-i-n Temperature Sensor for CMOS Photonics. *Sensors*. 2016; 16(1):67.
8. Lee Y.H.D., Thompson M.O., Lipson M. Deposited low temperature silicon GHz modulator. *Opt. Express*. 2013, 21. P. 26688–26692.
9. Oukaira A., Taheri S., Nour M., Lakhssassi A. Simulation and validation of thermal stability for complex system design high power dissipation. *IEEE Int. Conf. Smart Energy Grid Eng.* 2017. P. 229–233.
10. Eder C., Valente V., Donaldson N., Demosthenous A. A CMOS Smart Temperature and Humidity Sensor with Combined Readout. *Sensors*. 2014; 14(9). P. 17192-17211.
11. Shafique K., Khawaja B.A., Sabir F., Qazi S., Mustaqim M. Internet of things (IoT) for next-generation smart systems: A review of current challenges, future trends and prospects for emerging 5G-IoT Scenarios. *IEEE Access* 2020, 8. P. 23022–23040.
12. Safi A., Ahmad Z., Jehangiri A.I., Latip R., Zaman S.K.u., Khan M.A., Ghoniem R.M. A Fault Tolerant Surveillance System for Fire Detection and Prevention Using LoRaWAN in Smart Buildings. *Sensors* 2022, 22, 8411.
13. Осадчук В. С. Радіовимірювальні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором для неруйнівного теплового контролю / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, С. В. Барабан. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 212 с.
14. Осадчук В.С. Реактивные свойства транзисторов и транзисторных схем / В.С. Осадчук, А.В. Осадчук. – Винница : «Универсум-Винница», 1999. – 275 с.
15. Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.O., Semenov A.O., Martyniuk V.V., Prytula M.O. Investigation of a radio-frequency temperature transducer with a thermosensitive resistive element based on a complex compound of heterometallic  $\beta$ -diketonate. *ICEMS-BIOMED-2022 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 1254 (2022) 012027.
16. Осадчук В. С. Мікроелектронні сенсори температури з частотним виходом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Н. С. Кравчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 162 с.
17. Осадчук О.В. Дослідження сенсора температури з частотним виходом на основі квантової гетероструктури з диференційним від'ємним опором / О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук // Вісник Хмельницького національного університету. – 2021. – № 2 (295). – С. 156–164.
18. Osadchuk A.V., Osadchuk I.O., Semenov A.O. The Mathematical Model of Radio-measuring Frequency Transducer of Optical Radiation Based on MOS Transistor Structures with Negative Differential Resistance. *Journal of Nano- and Electronic Physics. Scientific journal*. Vol. 13 No 4, 04001(6 pp) (2021).
19. Осадчук Я.О. Дослідження автогенераторних параметричних сенсорів температури / Я.О.Осадчук, О.В. Осадчук, В.С. Осадчук // Вісник Хмельницького національного університету. – 2022. – № 1 (305). – С. 172–180.
20. Борисов О.В. Основи твердотільної електроніки / О.В. Борисов. – Київ : Освіта України. 2011. – 460 с.
21. Osadchuk I.O., Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Semenov A.O., Koval K.O. Microwave Oscillator on Transistor Structures with Dielectric Resonators. *Proceedings of the 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*, Kharkiv, Ukraine, 21–25 September 2020. Volume 3 on 2020 IEEE 10th International Kharkiv

Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW). P. 902-906.

22. Jayantkumar Dorave, Ritesh Sadiwala. Uplink and Downlink Variation in Drone Technology for Cloud, Edge, Fog and Smart Dust Integrated IoT Architecture: Demonstrated Over WSNs. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. 2089 (2021) 012023.

23. Leonhard Korowajczuk. LTE, WIMAX and WLAN Network Design, Optimization and Performance Analysis. John Wiley & Sons Ltd, United Kingdom, 2011. 784 p.

24. Maria-Gabriella di Benedetto, Pol Serra i Lidón. Analysis of the NB-IoT technology towards massive Machine Type Communication. University Sapienza di Roma, 2018. 69 p.

### References

1. Sabrie Soloman. *Sensors. Handbook*. New York: McGraw-Hill Companies. 2010. 1352 p.
2. Kim J.H., Jo B.W., Jo J.H., Kim D.K. Development of an IoT-Based Construction Worker Physiological Data Monitoring Platform at High Temperatures. *Sensors*. 2020; 20(19):5682.
3. Ghafoori Y., Vidmar A., Řiha J., Kryžanowski A. A Review of Measurement Calibration and Interpretation for Seepage Monitoring by Optical Fiber Distributed Temperature Sensors. *Sensors*. 2020; 20(19):5696.
4. Jebelli H., Choi B., Lee S. Application of Wearable Biosensors to Construction Sites. II: Assessing Workers' Physical Demand. *J. Constr. Eng. Manag.* 2019, 145, 04019080.
5. Sergej Y. Yurish. *Sensors and Applications in Measuring and Automation Control Systems*, (Book Series: Advances in Sensors: Reviews, Vol. 4. IFSA Publishing, S.L. (Barcelona, Spain). 2016. 507 p.
6. Ettahri O., Oukaira A., Ali M., Hassan A., Nabavi M., Savaria Y., Lakhssassi A. A Real-Time Thermal Monitoring System Intended for Embedded Sensors Interfaces. *Sensors*. 2020; 20(19):5657.
7. Rao S., Pangallo G., Della Corte F.G. Integrated Amorphous Silicon p-i-n Temperature Sensor for CMOS Photonics. *Sensors*. 2016; 16(1):67.
8. Lee Y.H.D., Thompson M.O., Lipson M. Deposited low temperature silicon GHz modulator. *Opt. Express*. 2013, 21. P. 26688–26692.
9. Oukaira A., Taheri S., Nour M., Lakhssassi A. Simulation and validation of thermal stability for complex system design high power dissipation. *IEEE Int. Conf. Smart Energy Grid Eng.* 2017. P. 229–233.
10. Eder C., Valente V., Donaldson N., Demosthenous A. A CMOS Smart Temperature and Humidity Sensor with Combined Readout. *Sensors*. 2014; 14(9). P. 17192–17211.
11. Shafique K., Khawaja B.A., Sabir F., Qazi S., Mustaqim M. Internet of things (IoT) for next-generation smart systems: A review of current challenges, future trends and prospects for emerging 5G-IoT Scenarios. *IEEE Access* 2020, 8. P. 23022–23040.
12. Safi A., Ahmad Z., Jehangiri A.I., Latip R., Zaman S.K.u., Khan M.A., Ghoniem R.M. A Fault Tolerant Surveillance System for Fire Detection and Prevention Using LoRaWAN in Smart Buildings. *Sensors* 2022, 22, 8411.
13. Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Baraban S.V. Radio measuring transducers based on transistor structures with negative resistance for non-destructive thermal control. *Vinnitsia: VNTU*, 2015. 212 p.
14. Osadchuk V.S., Osadchuk A.V. Reactive properties of transistors and transistor circuits. *Vinnitsa: "Universum-Vinnitsa"*, 1999. 275 p.
15. Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.O., Semenov A.O., Martyniuk V.V., Prytula M.O. Investigation of a radio-frequency temperature transducer with a thermosensitive resistive element based on a complex compound of heterometallic  $\beta$ -diketonate. *ICEMS-BIOMED-2022 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 1254 (2022) 012027.
16. Osadchuk V. S., Osadchuk O. V., Kravchuk N. S. Mikroelektronni sensory temperatury z chastotnym vykhodom. *Vinnitsia: UNIVERSUM-Vinnitsia*, 2006. 162 s.
17. Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Osadchuk Ya.O. Research of a temperature sensor with a frequency output based on a quantum heterostructure with a differential negative resistance. *Herald of the Khmelnytskyi National University*, No. 2, 2021 (295). P.156-164.
18. Osadchuk A.V., Osadchuk I.O., Semenov A.O. The Mathematical Model of Radio-measuring Frequency Transducer of Optical Radiation Based on MOS Transistor Structures with Negative Differential Resistance. *Journal of Nano- and Electronic Physics. Scientific journal*. Vol. 13 No 4, 04001(6 pp) (2021).
19. Osadchuk I.O., Osadchuk O.V., Osadchuk V.S. Research of self-generating parametric temperature sensors. *Herald of Khmelnytskyi National University*, No. 1, 2022 (305). P. 172-180.
20. Borysov O.V. *Fundamentals of solid-state electronics*. Kyiv. Education of Ukraine. 2011. 460 p.
21. Osadchuk I.O., Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Semenov A.O., Koval K.O. Microwave Oscillator on Transistor Structures with Dielectric Resonators. *Proceedings of the 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*, Kharkiv, Ukraine, 21–25 September 2020. Volume 3 on 2020 IEEE 10th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW). P. 902-906.
22. Jayantkumar Dorave, Ritesh Sadiwala. Uplink and Downlink Variation in Drone Technology for Cloud, Edge, Fog and Smart Dust Integrated IoT Architecture: Demonstrated Over WSNs. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. 2089 (2021) 012023.
23. Leonhard Korowajczuk. LTE, WIMAX and WLAN Network Design, Optimization and Performance Analysis. John Wiley & Sons Ltd, United Kingdom, 2011. 784 p.
24. Maria-Gabriella di Benedetto, Pol Serra i Lidón. Analysis of the NB-IoT technology towards massive Machine Type Communication. University Sapienza di Roma, 2018. 69 p.

СИНЬКО Анна

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-8355-461X>e-mail: [anna.i.synko@lpnu.ua](mailto:anna.i.synko@lpnu.ua)

## АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ ФОРМУВАННЯ ДОКУМЕНТАЦІЇ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ВІРТУАЛЬНИХ СПІЛЬНОТ

На сьогодні спостерігається швидкий розвиток галузі інформаційних технологій, що складається з виробництва інформаційної техніки та інформації до неї, яка повинна бути зафіксована у вигляді документації. Формування документації, що буде містити не тільки думку виробника, а і споживача, постає важливим завданням. Адже, в першу чергу, програмне забезпечення орієнтоване на користувачів. Зазвичай розробники надають опис до програмного забезпечення на офіційних сайтах або у сховищах даних. В той час як споживачі розміщують інформацію у віртуальних спільнотах, які стрімко набирають популярність серед населення. В результаті цього автор розробив архітектуру системи щодо формування документації програмного забезпечення на основі досвіду користувачів, споживачів, джерелом якої будуть віртуальні спільноти. Наведена в статті архітектура системи потрібна для подальшої розробки програмно-алгоритмічного комплексу формування документації програмного забезпечення за допомогою віртуальних спільнот.

*Ключові слова:* віртуальна спільнота, документація, програмне забезпечення, мультиагентна система.

SYNKO Anna

Lviv Polytechnic National University

## RESEARCH OF STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF MEAT AS AN OBJECT OF PROCESSING IN MEAT COMMUNOTOR

Today, there is a rapid development of the field of information technologies, which consists of the production of information technologies and related information, which must be written in the form of documentation. Formation of documentation that will contain not only the opinion of the manufacturer, but also the consumer becomes an important task. Because in the first of all, the software is primarily user-oriented. Developers usually provide a description of the software on official sites or in data repositories. While consumers post information in virtual communities, which are rapidly gaining popularity among the population. As a result, the author developed the system architecture for the formation of software documentation based on user experience, the source of which will be virtual communities.

The architecture is presented in the form of a multi-agent system, which consists of the set of interacting agents. Agents are autonomous and interactive software systems that solve certain separate tasks, activate themselves and can interact with other agents and the environment in which they function at different points in time. After studying the methods of data integration from virtual communities, the method of data consolidation was chosen. For the correct interaction of agents, each other, a consolidated data repository is used, which receives data from various virtual communities and transfers it to documentation. The system architecture includes the following agents: data collection (from various virtual communities and their transfer to the consolidated data repository); verification of information content of posts (which were obtained as a result of the work of the previous agent) for reliability and adequacy, presence of unwanted content, elimination of duplication of data; structuring community posts according to existing documentation parts; assessment of the quality of the generated documentation according to the characteristics of the ISO/IEC 25010 standard.

*Keywords:* virtual community, documentation, software, multi-agent system.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Розвиток інформаційних технологій (ІТ) надав нові можливості для комунікації людей, став поштовхом до появи і впровадження у життя кожного користувача Інтернетом нового виду спілкування – веб-комунікації, що здійснюється безпосередньо у глобальному середовищі Інтернет. Веб-комунікація відбувається за допомогою спеціальних сервісів у World Wide Web (WWW), зокрема у віртуальних спільнотах (ВС). На сьогодні ВС є активним, популярним майданчиком, де користувачі обмінюються досвідом, тим самим утворюючи інформаційне наповнення [1].

Також зазнала розвитку галузь ІТ-технологій. Попит на ІТ-послуги є рекордно високим і навіть перевищує пропозицію на ринку. Згідно статистики, ринок інформаційних технологій України щорічно зростає на 20–25 %. За час війни 2014 р. і до тепер, це єдина галузь, що надалі продовжує зростати та розвиватися, тим самим робить Україну країною з найбільш інноваційним розвитком в галузі технологій.

Галузь ІТ складається з двох суттєво різних частин: виробництво інформаційної техніки (машин, обладнання, програм, тощо) і виробництво безпосередньо інформації, яка повинна бути задокументованою. Тому формування належної документації програмного забезпечення (ДПЗ), що буде відповідати державним та міжнародним стандартам є важливою задачею.

Зазвичай ДПЗ формують та публікують розробники програмного продукту, хоча і не завжди. Документація має охоплювати не тільки думки виробника/розробника, але і користувача. Адже досвід користувачів, споживачів так само може бути корисним. Іноді, кориснішим ніж думка виробника. Так як у ВС користувачі щоденно обмінюються своїми думками, які можуть становити контент ДПЗ, що заснований на досвіді користувачів. Для представлення формування процесу формування ДПЗ за допомогою ВС виникає потреба у розробці та відображенні архітектури системи, що дозволить провести деталізацію системи на певні складові та відобразити взаємозв'язки між ними.



### Аналіз досліджень та публікацій

У попередніх дослідженнях автори [2] 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. Тому цьому присвячено багато досліджень. Наприклад, автор [3] зробив класифікацію на основі поведінкових особливостей членів спільноти, щоб зрозуміти їхню діяльність щодо створення контенту та спрогнозувати їхні подальші дії. У роботі [4] наводиться оцінка дописів, яка залежить від рейтингу та способу спілкування з автором, який його опублікував. Автор [5] визначив аспекти перевірки якості та достовірності інформаційного наповнення у ВС.

Питанням дослідження формування туристичної документації на основі відкритих веб-ресурсів наведено в роботі [6]. Автор [7] описав десять випадків у вигляді схем розроблення та формування інформаційно-довідкового забезпечення суспільних комунікаційних систем, що дозволяють розв'язувати задачі розробки документації як інформаційного продукту. Життєвий цикл процесу формування ДПЗ та відповідні типи документів, які утворюються на тій чи іншій стадії розробки програмного продукту наведено в роботі [8].

Грунтуючись на вище згаданих роботах науковців щодо розробки документації та основних властивостей ВС було досліджено питання формування ДПЗ за допомогою ВС, в результаті чого побудовано архітектуру системи.

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є розробка архітектури системи формування документації програмного забезпечення за допомогою віртуальних спільнот.

### Виклад основного матеріалу

Для збереження інформації з певної предметної області застосовують сховища даних, які в подальшому використовуються для підтримки прийняття рішень. Джерела інформації (віртуальні спільноти) зазвичай є однотипними, але при цьому мають різну структуру. Тому для роботи з даними потрібно їх привести єдиного вигляду та, надалі, завантажити до сховища даних. Після цього отриману інформацію можна опрацювати для формування документації як готового інформаційного продукту. Отже сховище даних є важливою складовою для генерування документації з джерелами якої виступають ВС.

Процес збору, поєднання та упорядкування інформації з ВС виконують за допомогою методів інтеграції даних: тиражування, федералізації, консолідації [9–11]. Ці методи допомагають отримати цілісне уявлення щодо обраної предметної області [6]. Дослідивши переваги та недоліки даних методів, було прийнято рішення застосувати консолідацію даних, яка полягає у формуванні єдиного сховища документації з різнорідних спільнот. Це дозволить скласти адекватну інформаційну модель проблемної області з метою її аналізу опрацювання та ефективного використання в процесах підтримки прийняття рішень [6].

Для збору та збереження отриманих даних з ВС, що після опрацювання можуть стати контентом ДПЗ, застосовано проміжне сховище даних – сховище консолідованих даних (СКД).

Для формування ДПЗ за допомогою ВС необхідно застосувати багатоагентну (мультиагентну) систему, що складається з множини взаємодіючих агентів, як автономних та інтерактивних програмних систем, що вирішують певні окремі задачі, самостійно активізуються та можуть взаємодіяти з іншими агентами та середовищем, у якому функціонують в різні моменти часу. Агент, як комп'ютерна програма, має такі властивості: ефективність, коректність, повнота, надійність. Агенти напряму між собою не взаємодіють, а тільки через СКД. Результати роботи кожного агента записуються в СКД або у документацію (рис. 1). Переваги застосування мультиагентної системи для формування ДПЗ за допомогою ВС полягають у наступному:

- розподілена робота агентів на різних обчислюваних ресурсах;
- зменшення часових затрат та навантаження на процесор комп'ютера;
- контроль та ефективність роботи кожного агента;
- поділ однієї складної задачі на простіші окремі задачі;
- можливість розподілу завдань для розробників (груп розробників) агентів;
- автономна робота кожного агента.

Побудова архітектури системи необхідна для відображення взаємодії агентів та сховищ за допомогою яких вони працюють та передають результат виконаного завдання. Для формування ДПЗ на основі ВС залучено наступних агентів: збору даних, перевірки контенту, структурування публікацій та оцінювання якості.

Архітектуру системи формування ДПЗ із залученням агентів наведено на рис. 1.

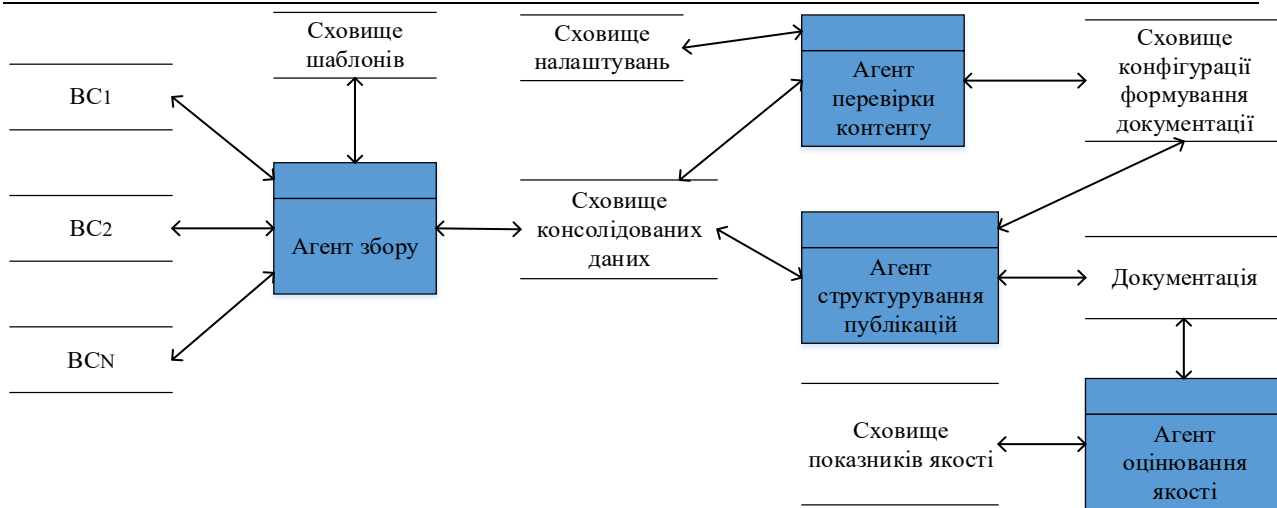


Рис. 1. Архітектура системи формування ДПЗ за допомогою ВС

**Агент збору даних.** Основною задачею даного агента є збір даних з ВС та їх передача у СКД. Для роботи агенту збору даних попередньо експерт повинен відібрати ВС, розробити відповідні шаблони до них на основі DOM дерев спільнот. Ці шаблони мають містити атрибути, що знадобляться для подальшої роботи СКД і відповідно всіх інших агентів, що будуть працювати із цими даними. Отже, експерт повинен надати список ВС і шаблони, що будуть зберігатися у сховищі шаблонів.

Обмеженням в роботі агенту збору даних є обсяг інформації, що можна отримати в результаті автоматизованого завантаження даних з ВС за певними параметрами для уникнення блокування.

**Агент перевірки контенту.** Агент повинен перевіряти та відбирати дані, що є у СКД. Основні завдання агента перевірки контенту:

1. Обчислення адекватності тем, що є у ВС, як джерела корисної інформації за показниками – релевантності [12] та актуальності (розрахунок абсолютного приросту дописів в темі за певний період часу).
2. Обчислення рейтингів: дописів (на основі реакції користувачів), тем (середньозважене рейтингів дискусій, що були завантажені у СКД з цієї теми), спільноти.
3. Визначення авторитетних дискусій (які містять множину ієрархічно впорядкованих дописів) на основі оцінювання користувачами дописів [13], що є в цих дискусіях, а також аналізу тональності дописів-коментарів, за допомогою методу аналізу тональності тексту [14].
4. Перевірка тексту на наявність небажаного інформаційного наповнення (НІН), який може бути в дописах ВС, але не має бути в ДПЗ. Виявлення НІН відбувається за допомогою заздалегідь сформованого словника, що містить набір неприйнятних термінів для контенту ДПЗ.
5. Виявлення плагіату дописів для усунення дублювання контенту.
6. Перевірка семантичної близькості наявних дописів.

Реалізація завдань №5 та №6 є подібною з точки зору реалізації та потребує виконання таких дій: нормалізації тексту допису, застосування методу TF-IDF для формування словника (та методу n-грами [15]), перетворення кожного тексту в TF-IDF вектор, надання статистичних оцінок на основі кореляційного аналізу векторів.

**Агент структурування інформаційного наповнення.** Агент виконує розподіл дописів з СКД у заздалегідь визначені розділи ДПЗ за допомогою методів кластеризації [16]. При цьому враховуються наступні критерії: глибина документації (максимальне значення глибини має бути не більше трьох відповідно до правила «трьох кліків» яке передбачає, що користувач повинен мати можливість знайти будь-яку інформацію не більше ніж за три натискання комп'ютерною мишею), балансування (рівномірного розподілу) – вглиб (довжина гілок кожного розділу не має перевищувати ніж на одиницю) та вшир (кількості дописів на кожний розділ).

**Агент оцінювання якості.** Агент здійснює оцінку сформованої ДПЗ відповідно до показників якості [1], що наведені у міжнародному стандарті ISO/IEC 25010. Проведення аналізу ДПЗ відбувається за такими характеристиками [1]: функціональна придатність (повнота, коректність) та якість у використанні (можливість визначення придатності інформації, розпізнавання, привабливості (враження)).

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Досліджено основні процеси, що потрібні для формування ДПЗ, в результаті чого розроблена архітектура у вигляді мультиагентної системи. Переваги застосування агентів для вирішення поставленого завдання наведені в роботі. Дослідивши методи інтеграції даних з ВС обрано метод консолідації даних. Для коректної взаємодії агентів один між одним застосовано СКД, що отримує дані з різних ВС та передає у документацію. Також описано перелік завдань для кожного агента та методи, за допомогою яких вони виконують їх. Наведена архітектура системи є підґрунтям для подальшої розробки програмно-алгоритмічного комплексу формування ДПЗ за допомогою ВС.

## Література

1. Марковець О.В. Формування якісної технічної документації до програмного забезпечення / О.В. Марковець, А.І. Синько // Вісник ВПІ. – 2021. – № 2. – С. 98–106. – DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-155-2-98-106>
2. Пелешишин А. М. Аналіз існуючих типів віртуальних спільнот у мережі Інтернет та побудова моделі віртуальної спільноти на основі веб-форуму / А.М. Пелешишин, Р.Б. Кравець, Ю.О. Серов // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Інформаційні системи та мережі. – 2011. – Вип. 699. – С. 212–221.
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.
4. 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. ICCSEE 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](https://doi.org/10.1007/978-3-030-80472-5_6).
5. Korzh R., Peleshchyshyn A., Trach O., Tsiutsiura M. Increasing the Efficiency of the Processes of Formation of the Informational Image of the HEI. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, Cham. 2020. № 1080. P. 661-679.
6. Марків О.О. Лінгвістичне забезпечення формування туристичної документації на основі відкритих веб-ресурсів : дисертація на здобуття наукового ступеня к.т.н. / Марків Оксана Олександрівна. – Львів : Національний університет "Львівська політехніка", 2017. – 188 с.
7. Форкун Ю.В. Сучасні підходи технології розроблення та формування інформаційно-довідкового забезпечення суспільних комунікаційних систем / Ю.В. Форкун, А.М. Пелешишин // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2012. – № 2 (56). – С. 4–10.
8. Synko A., Peleshchyshyn A. Software development documenting – documentation types and standards. *Visnyk TNTU. Tern.: TNTU*, 2020. № 2 (98). P. 120-128. DOI: [https://doi.org/10.33108/visnyk\\_tntu2020.02](https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2020.02)
9. Жежнич П. І. Консолідовані інформаційні ресурси баз даних та знань : навчальний посібник / П.І. Жежнич. – Львів : Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2010. – 212 с.
10. Литвин В.В. Проектування інформаційних систем : навч. посіб. / В. В. Литвин, Н.Б. Шаховська. – Львів : Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2010. – 210 с.
11. Шаховська Н.Б. Аналіз інформаційних систем оброблення даних туристичної сфери / Н.Б. Шаховська, Д.І. Угрин // *Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць*. – Львів : НЛТУ України. – 2008. – № 10 (18). – С. 258–263.
12. Ramos J. Using TF-IDF to Determine Word Relevance in Document Queries. 2003.
13. Synko A. The method of trust level of publications hosted in virtual communities. *Scientific Journal of TNTU. Tern.: TNTU*. 2022. № 1 (105). P. 68–79.
14. Hutto C.J., Gilbert E. VADER: A Parsimonious Rule-based Model for Sentiment Analysis of Social Media Text. *Proceedings of the International AAAI Conference on Web and Social Media*. 2014. № 8 (1). P. 216-225. DOI: <https://doi.org/10.1609/icwsm.v8i1.14550>
15. Kondrak G. String Processing and Information Retrieval. 12th International Conference. SPIRE: International Symposium on String Processing and Information Retrieval. Buenos Aires, Argentina. 2005.
16. Frades I., Matthiesen R. Overview on Techniques in Cluster Analysis. *Bioinformatics Methods in Clinical Research*. 2010. P. 81–107. DOI: [10.1007/978-1-60327-194-3\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-60327-194-3_5)

## References

1. Markovets O.V. Formuvannya yakisnoi tekhnichnoi dokumentatsii do programnogo zabezpechennia / O.V. Markovets, A.I. Synko // *Visnyk VPI*. – 2021. – № 2. – С. 98–106. – DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-155-2-98-106>
2. Peleshchyshyn A. M. Analiz isnuuychkh typiv virtualnykh spilnot u merezhi Internet ta pobudova modeli virtualnoi spilnoty na osnovi veb-forumu / A.M. Peleshchyshyn, R.B. Kravets, Yu.O. Sierov // *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". Informatsiini systemy ta merezhi*. – 2011. – Vyp. 699. – С. 212–221.
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.
4. 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. ICCSEE 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](https://doi.org/10.1007/978-3-030-80472-5_6).
5. Korzh R., Peleshchyshyn A., Trach O., Tsiutsiura M. Increasing the Efficiency of the Processes of Formation of the Informational Image of the HEI. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, Cham. 2020. № 1080. P. 661-679.
6. Markiv O.O. Linhvistychnе zabezpechennia formuvannia turystychnoi dokumentatsii na osnovi vidkrytykh veb-resursiv : dysertatsiia na zdobuttia naukovooho stupenia k.t.n. / Markiv Oksana Oleksandrivna. – Lviv : Natsionalnyi universytet "Lvivska politekhnika", 2017. – 188 s.
7. Forkun Yu.V. Suchasni pidkhody tekhnolohii rozroblennia ta formuvannia informatsiino-dovidkovoho zabezpechennia suspilnykh komunikatsiinykh system / Yu.V. Forkun, A.M. Peleshchyshyn // *Vostochno-Evropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohiy*. – 2012. – № 2 (56). – С. 4–10.
8. Synko A., Peleshchyshyn A. Software development documenting – documentation types and standards. *Visnyk TNTU. Tern.: TNTU*, 2020. № 2 (98). P. 120-128. DOI: [https://doi.org/10.33108/visnyk\\_tntu2020.02](https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2020.02)
9. Zhezhnych P. I. Konsolidovani informatsiini resursy baz danykh ta znan : navchalnyi posibnyk / P.I. Zhezhnych. – Lviv : Vydavnytstvo Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika", 2010. – 212 с.
10. Lytvyn V.V. Proektuvannia informatsiinykh system : navch. posib. / V. V. Lytvyn, N.B. Shakhovska. – Lviv : Vyd-vo Nats. un-tu "Lvivska politekhnika", 2010. – 210 с.

- 
11. Shakhovska N.B. Analiz informatsiinykh system obroblennia danykh turystychnoi sfery / N.B. Shakhovska, D.I. Uhryn // Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy : zb. nauk.-tekh. prats. – Lviv : NLTU Ukrainy. – 2008. – № 10 (18). – S. 258–263.
  12. Ramos J. Using TF-IDF to Determine Word Relevance in Document Queries. 2003.
  13. Synko A. The method of trust level of publications hosted in virtual communities. Scientific Journal of TNTU. Tern.: TNTU. 2022. № 1 (105). P. 68–79.
  14. Hutto C.J., Gilbert E. VADER: A Parsimonious Rule-based Model for Sentiment Analysis of Social Media Text. Proceedings of the International AAAI Conference on Web and Social Media. 2014. № 8 (1). P. 216-225. DOI: <https://doi.org/10.1609/icwsm.v8i1.14550>
  15. Kondrak G. String Processing and Information Retrieval. 12th International Conference. SPIRE: International Symposium on String Processing and Information Retrieval. Buenos Aires, Argentina. 2005.
  16. Frades I., Matthiesen R. Overview on Techniques in Cluster Analysis. Bioinformatics Methods in Clinical Research. 2010. P. 81–107. DOI: 10.1007/978-1-60327-194-3\_5

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-253-256>

УДК 621.311:621.3.064.1

ДАВИДЕНКО Людмила

Луцький національний технічний університет  
<https://orcid.org/0000-0002-0176-2045>  
[l.davydenko@lutsk-ntu.com.ua](mailto:l.davydenko@lutsk-ntu.com.ua)

ДАВИДЕНКО Володимир

Луцький національний технічний університет  
<https://orcid.org/0000-0001-6183-9879>

## АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В НИЗЬКОВОЛЬТНІЙ РОЗПОДІЛЬЧІЙ МЕРЕЖІ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

*Стаття присвячена питанню аналізу короткого замикання в мережі напругою до 1 кВ промислового підприємства. Методологія аналізу базується на рекомендаціях серії стандартів ANSI/IEEE щодо розрахунку струму короткого замикання для вибору і перевірки комутаційних апаратів і захисних пристроїв за рівнем струму короткого замикання низьковольтних мереж. Як інструмент аналізу застосовано модуль Short Circuit пакету програм ETAP. Результати аналізу забезпечують перевірку відповідності характеристик обладнання струмам короткого замикання, що є основою прийняття висновку щодо коректності проектних рішень.*

*Ключові слова:* струм КЗ, максимальне значення струму КЗ, програмне забезпечення ETAP.

DAVYDENKO Liudmyla, DAVYDENKO Volodymyr  
Luts'k National Technical University

### ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS IN THE LOW-VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORK OF AN INDUSTRIAL ENTERPRISE

*Analysis of a short circuit in the distribution network with a voltage of up to 1 kV of the power supply system of an industrial enterprise. The procedure for calculating the short-circuit current in accordance with the recommendations of the ANSI/IEEE standard C37 series, which regulates the calculation of the short-circuit current for the selection and verification of switchgear and protective devices according to the short circuit current rating, was used to calculate the short-circuit current in the low-voltage distribution network of an industrial enterprise. The need to automate the process of calculating short-circuit currents in the power supply system of an industrial enterprise was substantiated. The Electrical Transient Analyzer Program (ETAP) software was used as an analysis tool. The design of the low-voltage distribution network was carried out in the ETAP software environment. The Short Circuit package of the ETAP software was used to calculate the short-circuit current on any bus of the distribution network. The result of the analysis is the determination of the short circuit current values and the verification of the compliance of the characteristics of the installed electrical equipment with the short-circuit currents. The effectiveness of using ETAP software for short-circuit analysis in order to select and verify the electrical equipment of the low-voltage distribution network of an industrial enterprise according to the level of short-circuit current was proven. The results of the analysis of the short-circuit current using the ETAP software provided an opportunity to verify the correctness of the decisions made regarding the selection of low-voltage switchgear of the distribution network of the facility's power supply system. Analysis of short-circuit current using ETAP software provides the possibility of selecting switchgear and protective devices according to the level of short-circuit current, which contributes to the design of a reliable power supply system for the facility.*

*Keywords:* short circuit analysis, short circuit current, maximum value of short circuit current, ETAP software.

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

Ефективна та надійна система електропостачання (СЕП) є важливим компонентом промислового об'єкту. Специфічною особливістю електропостачання будь-якого об'єкту є одночасна участь великої кількості елементів у передачі та споживання електроенергії, та неминучість аварійних пошкоджень, що має вплив на надійність СЕП та роботу споживачів електроенергії. Однією з причин порушення нормального режиму роботи СЕП та виникнення аварійних ситуацій є коротке замикання (КЗ), що призводить до появи електромагнітних перехідних процесів в СЕП і може мати негативний вплив на стан та роботу електрообладнання. Тому, розрахунок та аналіз КЗ на різних рівнях СЕП є одним із завдань, що потребує вирішення як на етапі проектування, так і на етапі експлуатації СЕП для забезпечення надійності електропостачання об'єкту.

#### Аналіз досліджень та публікацій

Струми, що виникають в результаті КЗ (випадкового чи навмисного з'єднання точок електроустановки або струмопровідними частинами, спричиненого пошкодженням ізоляції або помилкою персоналу [1, 2]), створюють серйозну небезпеку для елементів СЕП на всіх рівнях напруги. КЗ в СЕП можна зменшити шляхом належного обслуговування та експлуатації системи, але неможливо повністю уникнути [3]. Виникнення КЗ зумовлює істотне збільшення струму в вітках СЕП, яке супроводжується його термічною і динамічною дією на електрообладнання, внаслідок чого можливе механічне ушкодження і навіть загоряння електроустановки. Небезпечний вплив струму КЗ на електрообладнання висуває жорсткі вимоги щодо стійкості електричних апаратів, струмопровідних частин, конструкцій розподільчих пристроїв (РП) до термічної та динамічної дії струму КЗ [4]. Значення струму КЗ є одним із чинників, що використовується для вибору параметрів комутаційних апаратів та РП [5], а також для координації захисних

реле та пристроїв. Комутаційні апарати та захисні пристрої в низьковольтній (НВ) розподільчій мережі промисловості вимагають обов'язкової оцінки їх вимикаючої здатності для підтримки робочого стану системи і підвищення безпеки працівників. Автоматичні вимикачі та запобіжники РП та промислових пультів управління повинні мати достатню вимикаючу (розривну) здатність, тобто, граничний струм вимкнення апарату не повинен бути менший за максимальний струм КЗ, який може протікати у вітці, де встановлено апарат. Кабелі та шинопроводи розподільчої та внутрішньоцехової мережі також мають повинні бути стійкими струму КЗ. Таким чином, всі комутаційно-захисні апарати та струмопровідні елементи повинні мати відповідний рівень стійкості струму КЗ - так званий Short Circuit Current Rating (SCCR), який представляє собою максимально допустиме значення струму КЗ, який може витримати елемент. Важливим моментом для оцінки стійкості елементів СЕП струму КЗ є визначення найбільшого його значення в розрахунковій точці для розрахункового режиму роботи електроустановки [4]. При цьому, значення струму трифазного КЗ є базовим для вибору комутаційної і захисної апаратури та для оцінки параметрів інших видів КЗ [5]. Таким чином, для правильного вибору комутаційних апаратів і налаштування пристроїв захисту на стадії проектування, забезпечення надійності роботи електроустановок та всієї СЕП під час її експлуатації необхідним є детальний розрахунок струму трифазного КЗ та аналіз його значення на всіх рівнях СЕП [2, 6].

### Формулювання цілей статті

Метою статті є аналіз КЗ в низьковольтній розподільчій мережі промислового підприємства із застосуванням сучасних інструментів автоматизації розрахунків струму КЗ.

### Виклад основного матеріалу

Аналіз КЗ передбачає ідентифікацію величини струму, що протікає через елементи СЕП при КЗ в деякій точці [7], та її порівняння з SCCR електрообладнання і струмопровідних елементів, що є першим кроком до забезпечення надійного захисту енергосистеми. Після визначення струмів КЗ, проводиться дослідження та координація захисту для визначення оптимальних характеристик і налаштувань захисних пристроїв СЕП.

Процедури розрахунків струму КЗ регламентують є американські стандарти ANSI/IEEE і європейський аналог - стандарт Міжнародної електротехнічної комісії IEC 60909. Стандарти ANSI/IEEE серії С37 призначені для розрахунку струму КЗ з метою вибору комутаційних апаратів в мережі до 1 кВ та вище 1 кВ. Стандарт IEC 60909-3:2009 є більш загальним і надає загальні рекомендації щодо аналізу будь-якого виду КЗ (симетричного та несиметричного) в трифазній електричній системі змінного струму промислової частоти 50 Гц.

У розрахунках КЗ згідно рекомендацій стандартів ANSI усі зовнішні та внутрішні джерела напруги електричних машин замінюються еквівалентним джерелом напруги в точці КЗ, яке дорівнює напрузі перед КЗ у точці, і всі електричні машини представлені їхніми внутрішніми опорами [7]. Згідно ANSI визначаються три типи струму КЗ, залежно від періоду часу, який розглядається від початку виникнення КЗ: миттєве значення струму КЗ; значення струму вимкнення (переривання) КЗ; усталене значення струму КЗ. Для цього формуються три різні мережі імпедансів [2]: мережа півперіоду ( $\frac{1}{2}T$ , де  $T$  - період струму КЗ,  $T=0,02$  с) (надперехідна мережа), мережа з 1,5-4 періодами (перехідна мережа) і мережа з 30 періодами (мережа усталеного стану). У мережі півперіоду всі синхронні та асинхронні машини зображуються їх надперехідним реактивним опором. Миттєвий струм КЗ розраховується через  $\frac{1}{2}T$  після виникнення КЗ і представляє собою найбільше значення струму КЗ до моменту, поки його змінна (вимушена, періодична) та постійна (вільна, аперіодична) складові спадають до усталеного значення [2, 7]. У мережі  $\frac{1}{2}$ -4 періодів для розрахунку струму КЗ використовується перехідний реактивний опір синхронних та асинхронних машин, а струм вимкнення (переривання) КЗ розраховується через  $4T$  після виникнення КЗ. У схемі з 30 періодами для розрахунку струму КЗ використовується синхронний реактивний опір синхронних і асинхронних машин. Стандарти ANSI/IEEE рекомендують використовувати окремі мережі R і X для обчислення відношення X/R. Для кожної несправної шини визначають відношення X/R, яке використовується для визначення коригуючого коефіцієнта для врахування часового зміщення (затухання) аперіодичної складової струму КЗ [7]. В результаті визначаються відповідні струми КЗ, які використовуються для різних захисних пристроїв: для перевірки спрацювання та вимкнення струму КЗ автоматичних вимикачів високої напруги, перевірки вимикаючої (перериваючої) здатності запобіжників і автоматичних вимикачів низької напруги (НН), перевірки стійкості ізоляторів шин, виконання налаштування реле [7]. Струми КЗ першого періоду (через  $\frac{1}{2}T$  після виникнення КЗ), які називають струмами короткочасного КЗ, стосуються роботи автоматичних вимикачів. Ці струми враховують зміну аперіодичної складової та обчислюються на основі припущення про відсутність загасання періодичної складової струму в джерелах живлення точки КЗ. Враховуючи, що вимикачі та запобіжники НН спрацьовують у першому періоді, їх номінальні характеристики відключення порівнюються з миттєвим значенням струму КЗ.

Залежно від розмірів, СЕП промисловості може містити десятки шин, особливо коли розглядаються шини НН. Необхідність розрахунку струму КЗ в багатьох точках НВ мережі СЕП робить процес розрахунку трудомістким, оскільки кожен сценарій розрахунку - це окрема схема короткозамкненого кола з різним шляхом протікання струму КЗ. За таких умов необхідною є автоматизація розрахунків із

застосуванням відповідного програмного забезпечення (ПЗ). Швидкість і надійність комп'ютерних розрахунків значно вища навіть для невеликих електричних систем. Тому, розрахунок струму КЗ у різних точках СЕП на основі стандартів ANSI/IEEE виконано із застосуванням пакету Short Circuit ПЗ Electrical Transient Analyzer Program (ETAP), яке є комплексним рішенням для моделювання, проектування та аналізу промислових енергосистем [8, 9].

Для забезпечення необхідної точності розрахунку струму короткого замикання необхідне знання схеми системи електропостачання об'єкту. На першому етапі виконується проектування мережі в середовищі ETAP. Фрагмент спроектованої в програмі ETAP однолінійної схеми розподільчої мережі СЕП промпідприємства наведено на рисунку 1. Після проектування однолінійної схеми розподільчої мережі в режимі редагування, поточне представлення перемикається в режим аналізу КЗ. Обчислення струму КЗ контролюються та передаються відповідно до налаштувань досліджуваного випадку, вибраного на панелі інструментів. Редактор випадків аналізу КЗ включає вибір несправної шини, змінні керування рішенням і різні опції для вихідних звітів. Доступ до них здійснюється з панелі інструментів досліджуваного випадку, або з системного менеджера. Враховуючи вихідну схему та параметри елементів в нормальному режимі роботи, кожен вузол індивідуально піддається виходу з ладу за допомогою вибору шини в редакторі аналізу випадків КЗ. Програма обчислює середньоквадратичні значення струмів КЗ за 1/2 періоду на всіх шинах НВ мережі для визначення миттєвих значень струму КЗ. Результати моделювання КЗ відображено на однолінійній схемі СЕП (рис. 2), що є зручним засобом візуалізації результатів аналізу. Результати розрахунку струму трифазного КЗ відображено у зведеному звіті (рис. 3), створеному програмою ETAP та отриманому шляхом вибору менеджера звітів про КЗ ANSI.

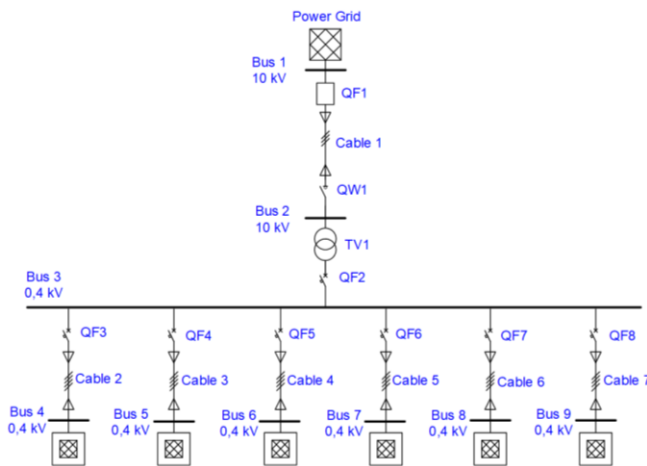


Рис. 1. Фрагмент однолінійної схеми розподільчої мережі

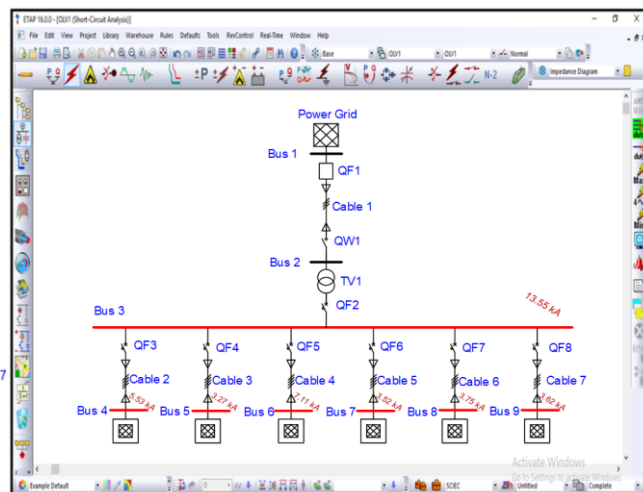


Рис. 2. Результати аналізу короткого замикання в низьковольтній розподільчій мережі

**Short-Circuit Summari Report**

1/2 Cycle – 3-Phase

Prefault Voltage = 100% of the Bus Nominal Voltage

Bus		3-Phase Fault		
ID	kV	Real	Imag.	Mag.
Bus 3	0.4	7.44	-9.33	13.55
Bus 4	0.4	4.32	-3.91	5.53
Bus 5	0.4	3.75	-2.31	3.27
Bus 6	0.4	6.28	-5.16	7.11
Bus 7	0.4	3.25	-2.51	3.52
Bus 8	0.4	3.45	-2.68	3.75
Bus 9	0.4	3.31	-2.56	3.62

All fault currents are symmetrical (1/2 Cycle network) values in rms kA

Рис. 3. Звіт про аналіз короткого замикання

Обчислені значення струму КЗ через кожен елемент НВ розподільчої мережі порівнюються з його SCCR, та, за необхідності, видаються відповідні попередження. Загальні параметри попередження для аналізу КЗ такі: якщо струм через елемент перевищує 95% номінального значення струму вимкнення КЗ, фіксується граничне попередження; якщо струм через елемент складає 100% номінального значення струму вимкнення КЗ або більше, фіксується критичне попередження. Аналогічні попередження видаються стосовно шин РП 0,4 кВ. Список попереджень про КЗ включає всі пристрої з критичними або граничними порушеннями рейтингу. Якщо немає пристроїв, перелічених у режимі попередження, це свідчить про те, що

електричне обладнання вибрано відповідно до параметрів КЗ. Результати аналізу КЗ в досліджуваній НВ мережі не містять попереджень про порушення SCCR, що підтверджує відповідність характеристик вибраної апаратури рівням струму КЗ.

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Аналіз струмів КЗ в НВ розподільчій мережі є основою для вибору комутаційних апаратів та захисних пристроїв. Розрахунок струму КЗ згідно стандартів ANSI/IEEE серії C37 передбачає визначення миттєвого значення, значення струму вимкнення та усталеного значення струму КЗ залежно від розрахункового періоду часу від початку КЗ. Для перевірки запобіжників і вимикачів НН за SCCR використовується миттєве значення струму КЗ. Розрахунок струму КЗ за допомогою модуля Short Circuit ПЗ ETAP спрощує аналіз КЗ в розгалуженій НВ розподільчій мережі СЕП підприємства. Результатом аналізу є розрахунок струму КЗ в заданих точках НВ мережі та повідомлення щодо відповідності характеристик встановленого обладнання за SCCR.

### Література

1. Esen V. The determination of short circuits and grounding faults in electric power systems using time-frequency analysis / V. Esen, B. Oral, T. Akinci // *Journal of Energy in Southern Africa*. - 2015. - Vol. 26. - P. 123-132.
2. Sankar S.L. ANSI and IEC Standards Based Short Circuit Analysis of a Typical 2×30 MW Thermal Power Plant / S.L. Sankar, M.M. Iqbal // *Middle-East Journal of Scientific Research*. - 2015. - Vol. 23(8). - P. 1617-1625.
3. Janiga P. Short-circuit - analysis and calculation / P. Janiga, Ž. Eleschová, D. Viglaš // *WSEAS transactions on power systems*. - 2014. - Vol. 9. - P. 291-299.
4. Пантелєєва І.В. Проблема координації рівнів струмів КЗ в енергосистемах / І.В. Пантелєєва // *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. - 2020. - Т. 31. - № 1. - С. 34-39.
5. Ягуп В.Г. Аналіз трифазного короткого замикання із застосуванням сучасних інформаційних технологій / В.Г. Ягуп, К.В. Ягуп // *Комунальне господарство міст*. - 2010. - №97. - С. 199-205.
6. Пантелєєва І.В. Шляхи обмеження рівнів струмів КЗ в електричних мережах / І.В. Пантелєєва, А.В. Глушко // *Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Нові рішення у сучасних технологіях*. - 2020. - № 4 (6). - С. 54-59.
7. Mahiwal L.G. Short Circuit Analysis of Electrical Distribution System for Typical Chemical Industry / L.G. Mahiwal, J.G. Jamnani, K.N. Velani // *2019 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), Proceedings*. - 2019. - P. 475-480.
8. Latt A.Z. Short Circuit Analysis of 33/11/0.4 kV Distribution System Using ETAP / A.Z. Latt // *International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science (IJLTEMAS)*. - 2019. - P. 79-85.
9. Prabhu J.A.X. Design of electrical system based on Short Circuit study using ETAP for IEC projects / J.A.X. Prabhu, K.S. Nande, S. Shukla, C.N. Ade // *2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)*. - 2016. - P. 1-6.

### References

1. Esen V. The determination of short circuits and grounding faults in electric power systems using time-frequency analysis / V. Esen, B. Oral, T. Akinci // *Journal of Energy in Southern Africa*. - 2015. - Vol. 26. - P. 123-132.
2. Sankar S.L. ANSI and IEC Standards Based Short Circuit Analysis of a Typical 2×30 MW Thermal Power Plant / S.L. Sankar, M.M. Iqbal // *Middle-East Journal of Scientific Research*. - 2015. - Vol. 23(8). - P. 1617-1625.
3. Janiga P. Short-circuit - analysis and calculation / P. Janiga, Ž. Eleschová, D. Viglaš // *WSEAS transactions on power systems*. - 2014. - Vol. 9. - P. 291-299.
4. Pantielieieva I.V. The problem of coordination of short current in power systems / I.V. Pantielieieva // *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. - 2020. - Vol. 31. - № 1. - P. 34-39.
5. Yahup V.H. Analysis of a three-phase short circuit using modern information technologies / V.H. Yahup, K.V. Yahup // *Municipal economy of cities*. - 2010. - №97. - P. 199-205.
6. Pantielieieva I.V. Ways to limit the levels of short circuit currents in electrical grids / I.V. Pantielieieva, A.V. Hlushko // *Bulletin of the NTU "KhPI". Series: New Solutions in Modern Technology*. - 2020. - № 4 (6). - P. 54-59.
7. Mahiwal L.G. Short Circuit Analysis of Electrical Distribution System for Typical Chemical Industry / L.G. Mahiwal, J.G. Jamnani, K.N. Velani // *2019 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), Proceedings*. - 2019. - P. 475-480.
8. Latt A.Z. Short Circuit Analysis of 33/11/0.4 kV Distribution System Using ETAP / A.Z. Latt // *International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science (IJLTEMAS)*. - 2019. - P. 79-85.
9. Prabhu J.A.X. Design of electrical system based on Short Circuit study using ETAP for IEC projects. J.A.X. Prabhu, K.S. Nande, S. Shukla, C.N. Ade // *2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)*. - 2016. - P. 1-6.



## ЗРУЧНЕ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ БІЗНЕСУ З МОЖЛИВІСТЮ АДАПТАЦІИ ДО РИНКОВИХ ВИМОГ

*Для підтримки повсякденної діяльності, бізнес-компанії потребують гнучких систем, які дозволять їм адаптуватися до ринків, що доволі швидко змінюються в умовах сьогодення. Однак, більша частина програмного забезпечення, яка існує на ринку, не задовольняє потреби конкретної компанії, не кажучи про адаптацію до вимог, які дуже швидко змінюються. Програмне забезпечення для підтримки підприємств, призначено в основному для вирішення поставлених конкретних завдань. Постає питання про можливість спрощення розробки програмного забезпечення для бізнесу, не маючи обмежень і також мати змогу створювати користувацьке програмне забезпечення саме для бізнесу не тільки для використання, а й для подальшої адаптації. Виникає необхідність уникнення багаторазового введення одних і тих самих даних у кілька звітних документів (створення звітів, оглядів, тощо) для зменшення накладних витрат та запобігання помилкам.*

*Ключові слова: програмне забезпечення, бізнес-компанії, документація, Java Script, фреймворк, плагін, веб-сервер Apache, багатозадачне інтегроване середовище розробки (IDE) Eclipse, PHP-фреймворк Symfony.*

PRAVORSKA Natalya  
Khmelnitskyi national university

## CONVENIENT SOFTWARE FOR BUSINESS WITH THE POSSIBILITY OF ADAPTATION TO MARKET REQUIREMENTS

*To support day-to-day operations, business companies need flexible systems that will allow them to adapt to the markets that are changing quite quickly in today's environment. However, most of the software that exists in the market does not meet the needs of a particular company, let alone adapt to the requirements that change very quickly. Software for supporting enterprises, intended mainly for solving specific tasks. The question arises about the possibility of simplifying the development of business software, without limitations, and also being able to create custom software specifically for business, not only for use, but also for further adaptation.*

*In business-companies, there is a need to transmit external inspection data to laboratories, as well as the possible collection of these results and combining them into research reports, which contain the results of checks on the quality and quantity of manufactured products. Usually, in order to perform such actions, it is customary for companies to use standard office programs and paper records that will allow you to conduct reviews and create various reports. In such cases, it becomes necessary to enter the same data many times in several documents. Companies are trying to find applications that can reduce such overhead and prevent errors. Since there are no existing solutions to support such activities, there is a need to create such supporting software. The task is to develop a method called "administration generation" capable of introducing a level of abstraction to reduce repetitive tasks during development. Using the Apache open-source web-server, which allows customization for a specific business-company, and the Eclipse multipurpose integrated development environment (IDE), which supports multiple development languages, including PHP and JavaScript, this method was implemented. It used the fully pluggable Symfony PHP framework combined with the highly flexible Ext JS JavaScript framework. Symfony allows you to implement the right "administrative generation" property and extensibility to meet the right current market requirements. Ext JS is currently integrating to improve the user experience. Both the first and the second are known for their excellent documentation and active community.*

*Keywords: software, business-companies, documentation, Java Script, framework, Plugin, Apache web-server, Eclipse multipurpose integrated development environment (IDE), Symfony PHP framework.*

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

Сьогодні бізнес-компанії прагнуть не тільки використовувати гнучкі системи, які будуть забезпечувати їх повсякденну діяльність, але й мають допомагати швидко проводити адаптацію в таких умовах. Програмне забезпечення, яке існує на ринку може задовольнити виконання лише поставленої конкретної задачі, а не пристосовується під потреби конкретної компанії, не кажучи про спроможність швидкої адаптації до вимог. Є багато невеликих бізнес-компаній, які хотіли б отримати програмне забезпечення, яке можна не лише використовувати, а й підлаштовувати під свої проблеми. У бізнес-компаніях виникає необхідність передачі даних зовнішній інспекції, лабораторіям, а також можливий збір цих результатів та об'єднання їх в звіти про дослідження, які в собі містять результати перевірок на якість та кількість виробленої продукції. Зазвичай, для того, щоб виконати такі дії, у компаніях прийнято використовувати стандартні офісні програми та паперові записи, які дозволять проводити огляд та створювати різноманітні звіти. В таких випадках виникає необхідність введення багато разів одних і тих самих даних у кілька документів. Компанії намагаються знайти додатки, завдяки яким можливе зменшення подібних накладних витрат та запобігання помилкам. Оскільки існуючих рішень для підтримки такої діяльності не існує, виникає потреба у створенні подібного допоміжного програмного забезпечення.

### Аналіз досліджень та публікацій

Багато бізнес-компаній на сьогодні намагаються провести адаптацію або просто обійти функціональність програмного забезпечення, замість того, щоб виконувати адаптацію додатку під потреби

компанії [1], те ж стосується і систем підтримки підприємств [2]. Через занадто високі витрати, компанії, які працюють з готовим комерційним програмним забезпеченням (наприклад, COTS – це упаковане або консервоване (готове) апаратне або програмне забезпечення, яке адаптоване на ринку до потреб закупівельної організації, а не введення в експлуатацію виготовлених на замовлення або індивідуальних рішень), майже ніколи не виконують адаптацію їх до своїх конкретних потреб [3]. Ті компанії, для потреб яких немає COTS-рішення, по всій ймовірності, застосовують для підтримки своєї діяльності лише стандартні офісні програми (наприклад, такі як електронні таблиці, текстові редактори і тому подібне). Однак через свою жорстку природу, додатки COTS, також ускладнюють для бізнес-компанії зміну її бізнес-процесів [3]. Створюється багато проблем тому, що програмне забезпечення не має змоги повністю підтримувати компанію, оскільки іде зростання накладних витрат, через надмірне повторення завдань та збільшення ймовірності появи помилок [4]. Через такі недоліки бізнес-компанії втрачають конкурентну перевагу та стають менш ефективними, ніж цього хотілося.

### Виклад основного матеріалу

При вище описаних проблемах постає питання створення такого програмного забезпечення, корисних програм, які будуть підлаштовуватися під потреби діяльності і бізнес-процесів кожної окремої бізнес-фірми. Критерієм тут мають виступати підтримка робочого процесу компанії за відносно низьких витрат. Компанія, при підтримці подібного ПЗ не буде витрачати кошти та час на пошук обхідних шляхів, а зосереджується на своїй основній діяльності та підвищує свою ефективність. Для розробки індивідуального програмного забезпечення бізнесу, необхідно провести вивчення загальних бізнес-вимог, які стануть основою для пошуку методів та інструментів для полегшення реалізації виконання такого завдання.

В першу чергу компанії хочуть мати змогу проводити редагування представлення об'єктів (тобто клієнтів, продукції і тому подібне), з якими стикається бізнес-процес і з властивостями, з якими доводиться компанії працювати. Також виникає необхідність, і компанії зацікавлені в тому, щоб була можливість подання визначених даних у своїх звітах і оглядах, до того ж з можливістю їх адаптації під конкретно свій бізнес. Крім цього існує запит на обмін інформацією зі своєї системи з іншими компаніями та деякими стандартними додатками (наприклад, додатком для ведення бухгалтерського обліку, з яким компанії вже працюють, або додатком для роботи з електронними таблицями, для самостійної обробки своїх даних будь-яким зручним для них способом). Так як бізнес-компанії знаходяться в постійному розвитку, то допоміжне програмне забезпечення повинно мати змогу впоратися з такими змінами.

Ще існує спостереження, що, як керівний персонал, так і робітники бізнес-компанії хочуть мати доступ до своїх даних з різних місць і з різних пристроїв, а не тільки зі свого офісу, але й зі свого домашнього помешкання, чи коли вони знаходяться в готелі. Це буде створювати додаткові вимоги та потреби щодо безпеки, так як програмне забезпечення не зможе більше працювати автономно або в локальній мережі. І небажано, щоб дані цієї компанії біли у відкритому доступі.

Отже, провівши аналіз, з'ясовано, що для підтримки діяльності бізнес-компанії ПЗ має вмінати:

- обробляти та маніпулювати різними даними бізнес-компанії, при цьому підтримуючи їхній робочий процес;
- зберігати огляди цих даних (списки з декількох елементів; детально за елементами);
- підтримувати передачу цих даних (до різних користувачів; у різні компанії; до різних додатків);
- проводити адаптацію до змін всередині компанії.

Бажано, щоб програмне забезпечення мало наступні властивості:

- доступність (простота встановлення (для нових співробітників, на нові машини або у тимчасових місцях);
- легкість використання;
- доступність з будь-якого місця (дозволяє працювати з домашнього приміщення, готель, в дорозі);
- безпечність (недоступність для інших користувачів; не можливість відображення даних, для яких немає доступних облікових даних).

Для реалізації поставленої задачі розробки програмного забезпечення за вказаними параметрами було вирішено використовувати метод, який має назву «генерація адміністрування», спроможного вводити рівень абстракції для зменшення завдань, які повторюються під час розробки.

Перед початком розробки програмного забезпечення необхідно виконати аналіз роботи бізнес-компанії. Подібний аналіз можна проводити з використанням декількох методик:

- проведення співбесіди з робітниками та керівництвом компанії, для з'ясування їх проблем та побажань;
- потім проводиться аналіз документації компанії (такої, як звіти, огляди та тому подібне), щоб створити образ бізнес-процесу. Проведення додаткових інтерв'ю допомогло розумінню роботи компанії;
- інформація, яка отримана на основі інтерв'ю та документації об'єднувалась в один документ та розміщалася на сторінці компанії для перевірки та оновлення;
- проведення спостереження на протязі звичайного робочого дня в офісі бізнес-компанії необхідно для повного розуміння її робочого процесу. В ході спостережень було з'ясовано:

перелік та типи завдань, як часто завдання перериваються телефонними дзвінками від клієнтів та інших сторін для обміну інформацією.

В результаті проведення вище описаних кроків було отримано офіційний звіт про огляд, що містить дані з паперового носія (журналу) про кількість (можливо якість і інше) продукції, які клієнти використовують для остаточної оплати. Також виникає необхідність з'ясування акторів (тобто контакти самої бізнес-компанії з різними сторонами). Як виявилось з цього акторами виступає сама компанія (а також її головний офіс); клієнти (ті, хто перевіряє якість отриманої продукції та проводить оплату); сюрвеєри (страховики, які виконують огляд та надають оцінку якості транспорту та товару, який перевозиться); лабораторії (які аналізують зразки, щоб перевірити якість продукції); агенти (які призначаються відправниками і забезпечують спосіб зв'язку між відправником і людьми на землі); термінали (місця для перевантаження продукції); страхувальники (які вирішують проблемні ситуації та це організовано у співпраці із клієнтом та сюрвеєром); бухгалтер (допомагає вести бухгалтерію бізнес-компанії).

Наступним кроком буде складання всіх документів, які необхідні компанії та створення зведеної бази даних, де можна буде об'єднати дані та звіти, куди вони будуть заноситися. Для встановлення вимог для допоміжного програмного забезпечення постає також необхідність в проведенні аналізу всього робочого процесу бізнес-компанії. Після цього створюються таблиці з усіма завданнями робочого процесу та агентами, Таким чином проводиться зв'язок між тим, хто за яке завдання буде відповідати. Можна розробити діаграми для наочного показу завдань та агентів. Після опитування співробітників виконується корекція та оновлення представлених таблиць та діаграм моделей.

Наприклад, можна розглянути інформацію про створення звітів для роботи бухгалтерії, яка представлена в таблиці 1. Відповідно цієї таблиці можна наочно побачити послідовність виконання завдання на діаграмі рисунок 1. Також це стосується і завдання для самої бізнес-компанії, яке представлено в таблиці 2 та його наочне представлення на рис. 1 і рис. 2, відповідно.

Таблиця 1.

**Послідовність виконання завдань робочого процесу пересилки продукції компанії**

Активність	Створити остаточний звіт
<b>Завдання</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Отримати присвоєння бізнес-компанії</li> <li>2. Перевірити всю інформацію</li> <li>3. Об'єднати інформацію у звіті</li> <li>4. Надіслати клієнту та бізнес-компанії</li> <li>5. Створити рахунок</li> <li>6. Позначити завдання як виконане, щоб видалити його з потоку завдань</li> </ol>

Таблиця 2.

**Послідовність виконання завдань робочого процесу компанії відносно клієнта**

Активність	Створити рахунок
<b>Завдання</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Отримати присвоєння бізнес-компанії</li> <li>2. Перейти до рахунку</li> <li>3. Перевірити розрахунки</li> <li>4. Надіслати клієнту та бізнес-компанії</li> </ol>

Після того, як будуть описані всі етапи робочого процесу бізнес-компанії та її діяльність ретельно проаналізована, можна приступити до визначення та опису проблеми, яка постає перед компанією. Незважаючи на те, що діяльність бізнес-компанії може мало відрізнятися від подібних їй, можуть існувати унікальні моменти.

Саме з цієї причини, якщо навіть і є програмне забезпечення, яке допомагає у робочому процесі бізнес-компанії для виготовлення своєї продукції, його результати необхідно прив'язувати до документації при подальшій роботі відділів компанії (наприклад, бухгалтерії, відділу постачання і тому подібне)

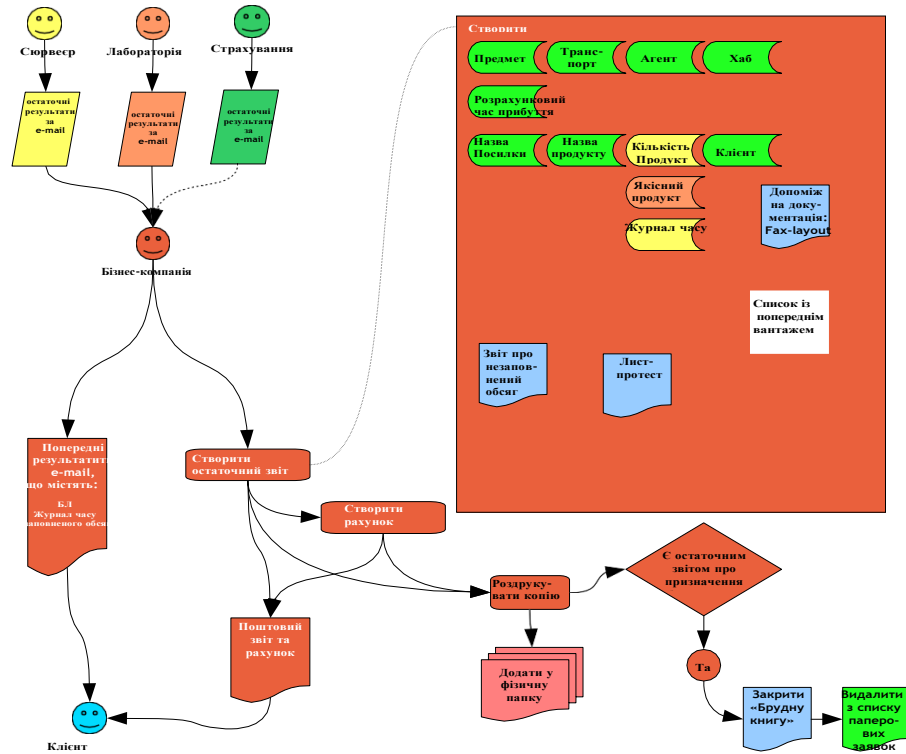


Рис. 1. Діаграма завдань робочого процесу, після опитування робітників бізнес-компанії

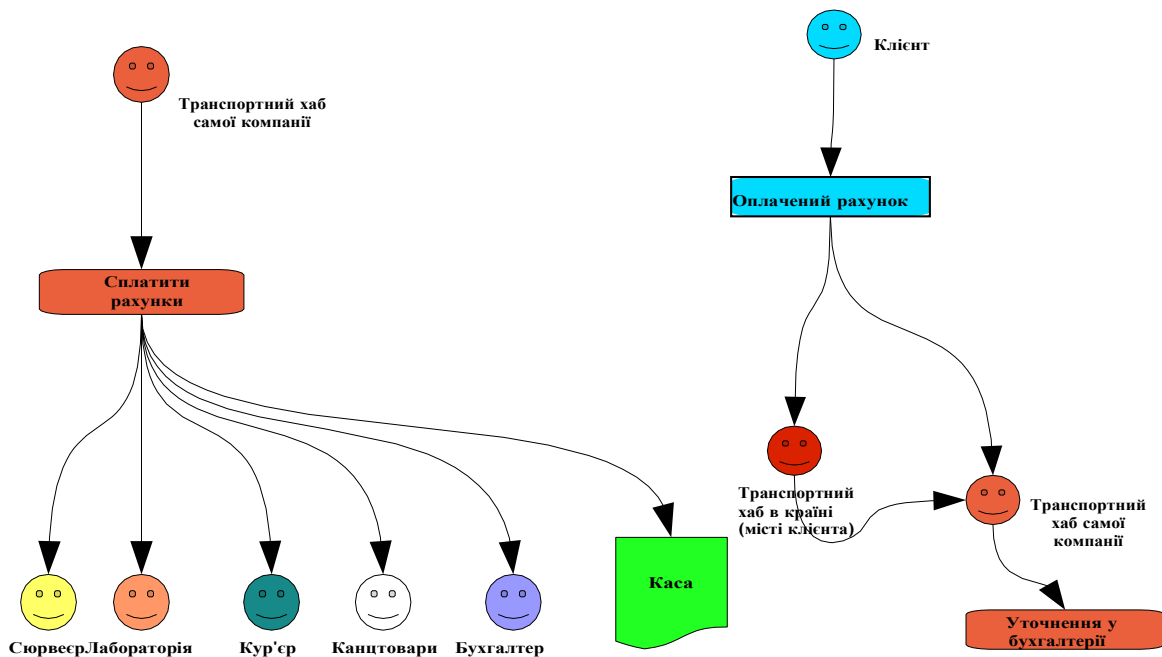


Рис. 2. Завдання робочого процесу компанії, пов'язані з грошовим потоком

Отже зазвичай готових COTS-рішень не існує і компанія має витратити кошти на замовлення програмного забезпечення, яке буде задовольняти всі її потреби, що робить його непривабливим для софтверних компаній, які будуть займатися вирішенням такої проблеми.

На даний момент багато невеликих бізнес-компаній, в якості підтримки свого бізнесу задовольняються стандартними офісними програмами, такими як Microsoft Office (Microsoft Word, Excel і Access) та поштових клієнтів (наприклад, Mozilla Thunderbird, Gmail, Microsoft Outlook, тощо). В такому разі накладні витрати збільшуються, оскільки вони проводяться виконання великої кількості завдань для оновлення всіх своїх оглядів, які можуть повторюються в документах і навіть в одному документі, але в різних місцях. Після виконання всієї роботи, оновлення знову розсилають різним сторонам, при чому вибір документів іде в ручному режимі та розсилання проводиться відповідним компаніям та клієнтам. Тому помилки тут реально становлять високу ймовірність і як, правило, іде зростання накладних витрат.

Однак, на цьому проблеми не закінчуються. Комп'ютери в бізнес-компаніях залежать також своєї потужності та своєї захищеності від вірусів. Тому в деяких випадках компанії проводять дублювання своїх

даних в паперових варіантах (журналах, звітах і тому подібне). В цьому випадку накладні витрати будуть зменшуватися при довірі до комп'ютерів.

При роботі над розв'язанням проблеми було вирішено скористатися методом «генерації адміністрування», який дає змогу вводити рівень абстракції для зниження кількості завдань, які будуть повторюватися під час розробки програмного забезпечення. Однак цей метод не може творити «чудеса». Можливості «генерації адміністрування» обмежуються зумовленою функціональністю, яка буде визначатися у шаблонах, при поєднанні з інформацією, отриманою з моделі даних та конфігурації. В такому випадку, це буде означати існування дозволу маніпулювання конкретними елементами відповідно до моделі даних та відображення огляду цих елементів.

Якщо можливості генератора занадто обмежені, то після того, як буде згенеровано код програмного продукту, його можна не тільки розширити, а й покращити і навіть замінити на той код користувача, який буде дозволяти представити результат в такому вигляді, який необхідний для виконання завдань робочого процесу. Однак, незважаючи на те, що такий підхід робить створення адміністрування доволі гнучким інструментом, треба пам'ятати, що заміна згенерованого коду або навіть встановлення великої кількості властивостей у конфігурації треба використовувати з великою обережністю, оскільки це може сварити проблему подібну до створення шаблонів. Це буде ускладнювати підтримку відповідності застосунку до моделі даних у разі її зміни. Дуже добре, що змін, які потребуються лише для того, щоб дії та представлення відповідали новій моделі даних набагато менше, тому їх реалізація доволі швидка та проста.

Генерація адміністрування використовується для:

1. Створення на основі моделі даних та конфігурації представлень для об'єкта (можливість користувацького коду розширювати, покращувати та змінювати згенерований код; складність програмування користувацького коду, як і «звичайного» коду);

2. Використання паттернів для шаблонів генератора (скорочення часу розробки та зміни при помилках; відносно легка адаптація до змін у моделі даних).

Недоліком генерації адміністрування можна назвати необхідність часу, для звикання написання шаблонів.

Метод «генерації адміністрування» було реалізовано при використанні веб-сервера з відкритим кодом Apache, який дає змогу налаштування під потреби конкретної бізнес-компанії та багатозначного інтегрованого середовища розробки (IDE) Eclipse, що підтримує кілька мов розробки, включаючи PHP і JavaScript, даний метод було реалізовано.

Використовувався PHP-фреймворк Symfony, що повністю підключається, у поєднанні з дуже гнучким JavaScript-фреймворком Ext JS. Symfony дозволяє реалізувати потрібну властивість "генерації адміністрування" та розширення для відповідності потрібним сьогоденним ринковим вимогам. Ext JS в цей час виконує інтеграцію для поліпшення взаємодії з користувачем. Як перший, так і другий відомі своєю відмінною документацією і активною спільністю.

Symfony – це безкоштовна серверна PHP-інфраструктура з відкритим вихідним кодом, яка повністю підключається і підтримує об'єктно-орієнтовану гнучку (веб-розробку). Це зводиться до того, що вона використовує найкращі практики, доступні для методів, таких як шаблон ModelViewControl (MVC), щоб розділити знання та логіку їхнього подання. Надається повністю об'єктно-орієнтоване середовище, в якому об'єктно-реляційне відображення (ORM) використовується для прозорого перетворення даних між (PHP) об'єктами та таблицями в реляційній базі даних. Нарешті, доступні інструменти формування шаблонів та адміністрування для автоматичного створення дій та уявлень на основі моделі. Генератор адміністрування, як і решта фреймворку, можна налаштувати, змінювати та розширювати (за допомогою плагінів), щоб змусити його робити все, що завгодно. Все це допомагає скоротити час розробки та дозволяє створювати продукт, орієнтований на користувача.

Однією з найважливіших функцій, інтегрованих у Symfony, безперечно є ORM. У Symfony зараз доступні дві різні ORM: Propel і Doctrine. Обидва ORM доступні для PHP, і там, де Propel в даний час інтегрований за умовчанням у Symfony, Doctrine можна встановити як плагін, щоб повністю замінити Propel. У Propel є кілька завдань у Symfony. Як і слід очікувати від ORM, він пропонує можливість прозорого доступу та управління даними, що зберігаються в базі даних, з об'єктів у середовищі розробки. І тому він генерує базові класи з урахуванням таблиць, визначених у базі даних. Створюються так звані однорангові класи, які містять інформацію про те, як витягувати елементи з бази даних та поміщати їх у сконструйовані об'єкти. Нарешті, надаються класи-оболонки, які розширюють ці базові об'єкти та базові однорангові класи, щоб запропонувати можливість покращити їх за допомогою функцій користувача.

Крім створення цих класів, Propel також може створювати структуру самої бази на основі опису моделі даних. За замовчуванням цей опис має бути написаний на XML, але Symfony надала додатковий рідер, здатний конвертувати YAML в XML, що робить визначення цього опису дуже простим (рис. 3). Інший спосіб створення класів можливий шляхом надання Propel вже існуючої бази даних, щоб він міг базувати визначення моделі безпосередньо з бази даних.

```

propel:
  # countries
  country:
    country_id:
      type: INTEGER
      required: true
      autoIncrement: true
      primaryKey: true
    name:
      type: VARCHAR
      size: 150
      required: true
    abbreviation:
      type: VARCHAR(4)
      required: false

  # cities
  city:
    city_id:
      type: INTEGER
      required: true
      autoIncrement: true
      primaryKey: true
    country_id:
      type: INTEGER
      required: true
      index: true
      foreignTable: country
      foreignReference: country id
      onDelete: RESTRICT # Ви не можете видалити країну, поки є пов'язане з нею місто
    onUpdate: CASCADE
    name:
      type: VARCHAR(150)
      required: true

```

Рис. 3 Приклад визначення моделі даних у файлі schema.yml

Саме властивості ORM у Symfony, такі як: можливість налаштування бази даних, створення таблиць зі стовпцями на основі опису моделі даних; можливість створення об'єктної моделі з одноранговими класами для отримання декількох елементів на основі моделі даних або існуючій бази даних; дозволяє налаштовувати об'єкти з об'єктної моделі, тому можна реалізувати всі бізнес-процеси і логіку; дозволяє налаштовувати однорангові об'єкти, що супроводжують об'єктну модель, щоб мати можливість визначати розширені відносини та для налаштування продуктивності; ORM Propel, що підключається, за замовчуванням можна замінити іншими, такими як Doctrine – дають змогу в процесі конструювання програмного забезпечення вирішувати поставлені завдання перед розробниками.

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

На сьогодні постає питання в допомозі невеликим бізнес-компаніям для спрощення розвитку бізнесу, отримати програмне забезпечення, яке при цьому буде давати змогу, не тільки використання в робочому процесі, в її адаптації до нових ринкових вимог. Тобто, компанія повинна мати можливість ефективного використання створеного програмного застосунку за своїми потребами (це стосується вимог ринкових, платіжних, митних, податкових і таке інше). Є намагання за допомогою подібних програмних застосунків зменшити накладні витрати та уникнути помилок, через багаторазове введення одних і тих самих даних в різні документи, які компанія має надавати не тільки клієнту, а в різні установи.

На сьогодні майже не має готових рішень для підтримки таких вимог, тому після проведення аналізу робочого процесу окремої бізнес-компанії є спроба розробити такий програмний продукт з використанням, як методу «генерації адміністрування», так і інтегрованого середовища та РНР-фреймворку. Представлена тільки невеличка модель робочого процесу, за якою будуть створюватися діаграми моделі даних, а потім на її основі буде написаний код програмного забезпечення. Також використання такого потужного інструменту, як Symfony, дасть змогу сконструювати програмне забезпечення, яке б задовольняло всі поставлені замовником вимоги.

### References

1. Wallace Thomas F., Kremzar Michael H. ERP: Making It Happen (3rd Ed.) Wiley, Hardcover – 2001– 384 p.
2. Ree, 2007: Leon van der Ree, Enterprise Support Systems, 2007
3. Themistocleous, Irani, O'Keefe and Paul, Marinos Themistocleous, Zahir Irani, Robert M. O'Keefe and Ray Paul.: ERP Problems and Application Integration Issues: An Empirical Survey – Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences – 2001.
4. Bouwman, Hooff, Wijngaert & Dijk, 2005: Harry Bouwman, Bart vd Hooff, Lidwien vd Wijngaert and Jan A G M v Dijk, Information & Communication Technology in Organizations, 2005, ISBN: 1412900905
5. Ronald E. Rise and Paul M. Leonardi. Information & Communication Technology in Organizations. – The SAGE Handbook of Organizational Communication: Advances in Theory, Research, and Method – SAGE Publications, 2013 – 848 p.

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-263-270>

УДК 629.113:629.3.01

ГОЛЕНКО Костянтин

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-6140-4573>e-mail: [kgolenko@gmail.com](mailto:kgolenko@gmail.com)

МАКОВКІН Олег

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-4487-7448>e-mail: [makovkin@ukr.net](mailto:makovkin@ukr.net)

ПОСОНСЬКИЙ Сергій

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4697-7699>e-mail: [p.s.f@ukr.net](mailto:p.s.f@ukr.net)

## ФОРМУВАННЯ КРАЙОВИХ УМОВ АНАЛІЗУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КУЗОВІВ МІСЬКИХ АВТОБУСІВ

В роботі запропоновано методику формування крайових умов для аналізу каркасу кузова низькопідлогових автобусів типу Low-floor та Low-entry в умовах статичного навантаження з відповідними заходами оптимізації ферми щодо міцності та рівномірності в умовах розрахункових режимів згину та кручення.

Ключові слова: автобус, каркас кузова, міцність, рівномірність, жорсткість на кручення, напруження по Мізесу, деформації, переміщення, згин, кручення, напружено-деформований стан

HOLENKO Kostyantyn, MAKOVKIN Oleg, POSONSKYI Sergii  
Khmelnitskyi National University

### BOUNDARY CONDITIONS FORMATION OF THE STRESS-STRAIN STATE ANALYSIS OF CITY BUS BODIES

The presented research proposes a method of forming boundary conditions for the analysis of the Low-floor and Low-entry types of bus body frames under the static load conditions with appropriate measures to optimize the strength during bending and torsion modes of load. The assessment of the stress-strain state of the body frame is performed using the FEM, which is rightfully considered the most effective in the conditions of simulating the real-life behaviour of the metal structures under various load regimes. It is obvious that the main driving force behind the deep integration of FEM into the work process of developing the new bus models are the financial and time constraints of design and production. Besides the existing acute shortage of real tests of completed vehicles using strain gauges is the significant reason of various FEM-based methodologies for passive safety assessment and safety margin determination. From a mathematical point of view, the frame of the bus is a solid body, which in modelling can most strictly be described as a set of geometrically similar elements connected to each other in such a way that they form a structure as close as possible in shape to a real body. Stress-strain state of the bus body frame could be investigated for the different loading modes, but the most popular ones are the bending and torsion regimes, which are typical while the new bus model is designed and obtained. Furthermore, it's definitely possible to judge, that the guarantee of sufficient safety under the terms of the UN-ECE Regulation (R66, R94, etc) is the height rigidity of the bus body frame during the bending and torsion tests. On the other hand, it is important to understand that the body frame must be equally strong and minimal in terms of material consumption, that's why our goal is to investigate efficient boundary conditions formation which will provide as close to the natural tests' behaviour as possible.

Keywords: bus, body frame, strength, uniform strength, torsional stiffness, von Mises yield criterion, strain, deformations, displacement, bending, torsion, stress-strain state, safety factor.

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

Тенденція розвитку вітчизняного автобусобудування продиктована відповідністю вже діючим в країнах ЄС нормативним вимогам забезпечення перевезення у міському транспорті пасажирів з обмеженими фізичними можливостями. Згідно з Правил №107 ЄЕК ООН, рівень підлоги сучасних міських та приміських автобусів має відповідати висоті тротуару та знаходитись в межах 340-360 мм, забезпечуючи прохід в салон без сходинок принаймні в передній та міжосьовій частині кузова. Пневматична підвіска автобуса може бути доповнена системою підйому та опускання кузова (kneeling), яка сприяє зручності входу в салон та виходу на тротуар. При цьому, тип кузова із рівномірно низьким рівнем підлоги по всій його довжині, наявністю дверних проходів без сходинок, має назву Low-floor та застосовується переважно в класі таксі із загальною довжиною 12 м. Створення автобусів Low-floor класу таксі є економічно вигідним при великих обсягах виробництва і в основному орієнтовано на фінансово забезпечені муніципальні автопарки, проте в сучасних умовах України основна частка пасажироперевезень забезпечена приватними перевізниками, серед котрих все більшої популярності набуває середній клас автобусів так званого типу Low-entry, де більше 60% довжини салону рівень підлоги складає 340-360 мм (вхід без сходинок), а зона ведучого моста непортального типу та задній звис характеризуються переходом на 1-2 сходинки з підйомом підлоги на 250-400 мм та формуванням відповідної несівної ферми. Будучи відносно новими для вітчизняного автобусобудування автобуси Low-entry вимагають проведення аналізу напружено-деформованого стану їх каркасів кузовів з формуванням адекватних крайових умов, що і є тематикою даної роботи і визначає її актуальність.

### Аналіз досліджень та публікацій

Серед історично важливих видань, що заклали фундамент сучасних методів аналізу напружено-деформованого стану каркасів кузовів автобусів, слід виділити роботу [1]. Незважаючи на тривалий процес розвитку наукових вчень щодо отримання достатніх показників крутильної жорсткості, значень деформацій зон мотовідсіку або віконних проїм, загальної рівномірності конструкції та інших оціночних показників ефективності кузова, постановка крайових умов залишилась незмінною, а тому подібні публікації не втрачають своєї актуальності й досі. Так, польськими вченими наводяться прикладні дані щодо згинання автомобільних рам зі змінною шириною, а також запропоновані цінні відомості стосовно формування структур та їх складових [2]. До сучасних літературних джерел, присвячених міцності каркасів кузовів можна віднести публікації науковців з Азії: аналіз міцності, жорсткості та режимів рами кузова автобуса [3]; модальний аналіз рами кузова автобуса на основі Nuregworks [4]; аналіз кінцевих елементів і дослідження випробувань міського автобуса XQ6125 [5]. У публікаціях [6-10] авторами представлено широку гаму моделей автобусів різних типів та класів, а також подано розрахунки монококів, просторових ферм та рам в різних програмних середовищах. Без виключень усі дані публікації базуються на застосуванні методу кінцевих елементів. У публікаціях [11-12] автори досліджують міські автобуси з ДВЗ та електротягою, що мають суттєві відмінності у компоновці.

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є: формування крайових умов для аналізу каркасу кузова низькопідлогових автобусів типу Low-floor та Low-entry в умовах статичного навантаження з відповідними заходами оптимізації ферми щодо міцності та рівномірності в умовах режимів згину та кручення.

### Постановка задачі та аналіз проведених досліджень

Перш ніж перейти до дослідження крайових умов статичного розрахунку кузовів низькопідлогових автобусів, доцільно ознайомитися з теорією методу кінцевих елементів стрижневих та твердотілих моделей. В основу реалізації методу кінцевих елементів для розрахунку напружено-деформованого стану каркасу кузова покладено метод переміщень: всередині кінцевого елемента переміщення в довільній точці описується набором певних функцій, зазвичай поліноми від координат точки. Підстановкою в ці функції координат вузлових точок кінцевого елемента дозволяє записати переміщення  $u(x)$  довільної точки елемента через невідомі переміщення його вузлових точок:

$$\bar{u}(x) = \sum_{i=1}^n N_i(x) \bar{u}_i \text{ або } \bar{u}(x) = N(x) \bar{U}, \quad (1)$$

де:  $N_i(x)$  - функція форми елемента;  $\bar{u}_i$  - вектор переміщення  $i$ -го вузла елемента;  $N(x)$  - матриця функцій форм;  $\bar{U}$  - вектор всіх вузлових переміщень елемента

Розглянемо напружено-деформований стан кінцевого елемента. Рівняння  $\bar{\sigma} = D \bar{\epsilon}$  описує зв'язок напружень  $\bar{\sigma}(x)$  з деформаціями  $\bar{\epsilon}(x)$  для лінійної поведінки матеріалу, де  $D$  - матриця пружності закону Гука.

Деформація може бути виражена через вузлові переміщення елемента.

$$\bar{\epsilon} = B \bar{U} \quad (2)$$

Повна потенціальна енергія елемента визначається виразом:

$$\Pi^{(e)} = 1/2 \int_V \bar{\epsilon}^T D \bar{\epsilon} dV - \int_V \bar{u}^T \bar{p} dV - \int_S \bar{u}^T \bar{q} dS, \quad (3)$$

де:  $\bar{p}$  та  $\bar{q}$  - вектори об'ємних та поверхневих сил відповідно.

Підставляючи вектор деформації через вузлові переміщення, отримаємо:

$$\Pi^{(e)} = (1/2 \bar{U}^T \int_V (BN)^T D B N dV) \bar{U} - (\int_V \bar{p}^T N dV + \int_S \bar{q}^T N dS) \bar{U} \quad (4)$$

Вираз для потенціальної енергії можна записати як:

$$\Pi^{(e)} = 1/2 \bar{U}^T K \bar{U} - f^T \bar{U}, \quad (5)$$

де:  $K^{(e)} = \int_V (BN)^T D B N dV$  - матриця жорсткості елемента;  $f^T = \int_V \bar{p}^T N dV + \int_S \bar{q}^T N dS$  - вектор приведених вузлових сил.

Повну потенціальну енергію системи можна отримати додаванням всіх її елементів:

$$\Pi = \sum_e \Pi^{(e)} \quad (6)$$

Мінімізація функціоналу потенціальної енергії дає систему рівнянь МКЕ:



$$KU = F, \quad (7)$$

де:  $K$  - глобальна матриця жорсткості і  $F$  - вектор вузлових сил, отриманий шляхом додавання відповідних членів матриці жорсткості  $K^{(e)}$  та векторів  $f$  окремих кінцевих елементів.

Статичний розрахунок заснований на матричному методі переміщень, метою якого є визначення невідомих переміщень вузлів конструкції. За основу взято рівняння рівноваги:

$$F = K \cdot x, \quad (8)$$

де:  $K$  - матриця жорсткості системи;  $F$  - вектор зовнішніх силових факторів;  $x$  - вектор невідомих вузлових переміщень

Розмірність системи представляє собою кількість ступенів вільності конструкції. У загальному випадку в кожному вузлі є 6 ступенів вільності (3 лінійних переміщення і 3 кути повороту). Після рішення даної системи, тобто знаходження переміщень, визначаються всі інші невідомі параметри конструкції: деформації, зусилля в елементах, напруження, моменти згину та кручення, тощо.

Об'єктом досліджень обрано перспективну розробку ВАТ «Укравтобуспром» - модель 4289, яка відноситься до міських автобусів *mid*-класу та характеризується виконанням каркасу кузова з дотриманням компоновальних рішень *Low-entry* (рис. 1). Тридверний міський автобус середньої місткості з розташуванням двигуна у задньому звісі призначений для перевезення пасажирів на міських маршрутах з інтенсивними пасажиропотоками по дорогах з твердим покриттям, які допускають осьове навантаження на ведучу вісь не більше 11,5 т.

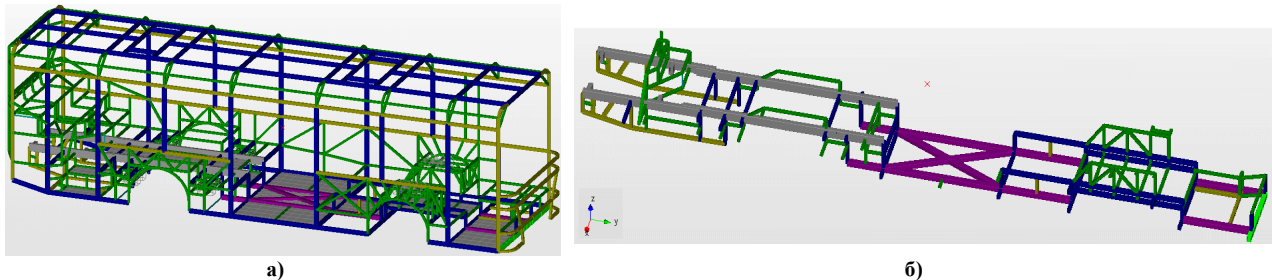


Рис. 1. Розрахункова 3D-модель автобуса моделі 4289: а) - каркас кузова; б) – ферма основи

Як відомо, кожен кузов або шасі, що формує з каркасом єдине ціле, піддаються деформаціям двох основних типів:

- згину, котрий виникає в результаті дії власної ваги та прикладеного вантажу (симетричне навантаження);
- крученню, викликаному нерівностями дороги, по котрій рухається транспортний засіб (кососиметричне навантаження).

Для статичного розрахунку автобуса на міцність методом кінцевих елементів необхідним є представлення мас всіх складових агрегатів та систем автобуса у вигляді зосереджених навантажень, прикладених у конструктивно визначених місцях розрахункової моделі, що відповідають дійсним точкам їх кріплення. У розрахунку приймається величина повної маси автобуса згідно з ТУ (14000 кг) за виключенням невіднесених його складових, до котрих належать колеса, маточини та рухомі елементи підвіски загальною масою 620 кг. Розглянемо послідовно особливості формування крайових умов для кожного з двох режимів.

### Режим згину

Типовий алгоритм проведення випробувань на статичну міцність при згині складається з наступних етапів навантажування баластом:

- власна вага підресореної частини автобуса;
- вага решти відсутніх вузлів та агрегатів;
- корисного навантаження, прийнятого для даного етапу розрахунків

При аналізі статичної міцності на основі оцінки напружень слід дотримуватись правила: сумарні напруження в досліджуваному елементі кузова не повинні перевищувати допустимих з умов міцності матеріалу. Для аналізу впливу пікових навантажень вводиться коефіцієнт запасу міцності:

$$n = \frac{\sigma_T}{\sigma_{\text{сум}}}, \text{ причому } \sigma_{\text{сум}} \leq \frac{\sigma_T}{n} \text{ або } \sigma_{\text{сум}} \leq [\sigma], \quad (9)$$

де:  $\sigma_{\text{сум}}$  - сумарні напруження згину,  $\sigma_{\text{сум}} = \sigma_c + \sigma_d$ , МПа;  $\sigma_c, \sigma_d$  - напруження, викликані відповідно статичними та динамічними навантаженнями, МПа;  $\sigma_T$  - межа текучості матеріалу, МПа;  $n$  - коефіцієнт запасу міцності;  $[\sigma]$  - допустиме по запасу міцності напруження

Для імітації натурних випробувань із забезпеченням запасу міцності вводять коефіцієнт динамічності  $K_d$ , котрий залежить від типу автобуса та особливостей його експлуатації. Типова оцінка допустимих з умов статичної міцності напружень при режимі згину виконується з урахуванням коефіцієнту  $K_d$ , котрий визначається у фіксований момент часу для детермінованих процесів навантажень як відношення динамічного до статичного навантаження. Слід підкреслити, що значення коефіцієнту динамічності  $K_d$  не є дискретним і зменшується зі зменшенням навантаження, а сама його залежність від швидкості руху носить параболічний характер. Для довільних процесів записують характеристику розподілу динамічного коефіцієнту у вигляді середньоквадратичного значення дисперсії напружень [13]:

$$K_d = \sqrt{D_\sigma}/\sigma_c \quad (10)$$

Методика визначення складових залежності (10) є доступною для ознайомлення у [13], або може базуватися на експериментальних замірах вертикальних прискорень в різних точках підресореної маси чи вертикальних зусиль, діючих зі сторони елементів підвіски. Якщо метою постановки крайових умов статичного аналізу є максимальне скорочення матеріалоємності каркасу кузова, тобто знаходження напружень в необхідних межах текучості матеріалу виготовлення без додаткового запасу міцності при заданих режимах експлуатації, то підбір коефіцієнту динамічності пропонується визначати на основі математичної моделі автобуса за допомогою програмних пакетів ANSYS, ADAMS, LS Dyna, тощо. В результаті такої комп'ютерної імітації буде отримана сітка дискретних значень коефіцієнта  $K_d$  в залежності від рівня завантаженості та швидкості його руху.

Оскільки експериментальні значення про напруження згину, викликані динамічними напруженнями прототипу автобуса відсутні, то на даному етапі розрахунків пропонується застосовувати значення  $K_d$  максимальним для досліджуваного моделі при її повному навантаженні. Відтак умову необхідної міцності запишемо наближено:

$$\frac{\sigma_T}{n} \geq \sigma_c + \sigma_d, \text{ де } \sigma_d = \sigma_c \cdot K_d \quad (11)$$

При міцнісному аналізі кузовів автобусів оцінка статичної міцності елементів кузова проводиться, виходячи з такої умови:

$$\sigma_T \geq \sigma_c n (1 + K_d), \quad (12)$$

де:  $n(1 + K_d) = C_d$  - сумарний коефіцієнт динамічності.

Тоді запишемо (12) у наступному вигляді:

$$[\sigma_3] = \frac{\sigma_T}{C_d}, \quad (13)$$

де:  $[\sigma_3]$  - допустиме напруження режиму згину від статичного навантаження.

Оцінка статичної міцності каркасу кузова при режимі згину остаточно приймає вигляд:

$$\sigma_c \leq \frac{\sigma_T}{C_d} \quad (14)$$

Для машин типу Low-entry та Low-floor сумарний коефіцієнт динамічності  $C_d$  пропонується приймати рівним 2.5, тобто:  $C_d = \sigma_c + \sigma_c K_d$ , де  $K_d = 1.5$ . Практично величина коефіцієнту  $C_d = 2.5$  означає, що каркас кузова автобуса повинен витримати напруження в межах текучості матеріалу, які виникають при зростанні його повної підресореної маси у 2.5 рази.

Сумарне навантаження згину можна записати так:

$$\sum P_3 = C_d m_n g, \quad (15)$$

де:  $m_n$  - повна маса автобуса, кг

В'язі прикладаються до маточин кожного з 4-х коліс автобуса таким чином, щоб сприймати вертикальне навантаження та обмежити переміщення кузова як єдиного цілого відносно інших осей (рис. 2а). Як видно з розрахункової схеми:

- переднє та заднє ліві колеса мають обмеження переміщень по вертикалі (вісь Z) за рахунок введеної ланки заданої жорсткості;
- переднє праве колесо обмежене по переміщеннях всіх трьох осей X,Y,Z;
- заднє праве колесо має обмеження по напрямку осей Y,Z, причому, вертикальна ланка відповідає заданій жорсткості;

### Режим кручення

Режим кручення є другим видом статичного розрахунку і полягає в імітації повної зупинки автобуса або його руху з малою швидкістю при переїзді через нерівності дороги (горби, вибоїни, бордюри, ями, тощо), в результаті чого одне з коліс автобуса втрачає контакт з поверхнею. В даному випадку все навантаження автобуса сприймають тільки 3 колеса в трикутному (сформованому плямами контакту коліс з дорожнім полотном), у котрому розміщений зведений центр мас автобуса. Оскільки найбільш навантаженою представляється задня частина автобуса типу Low-entry, що також підтверджують результати осьового зважування, то для збереження статичної рівноваги вивішеними можуть бути лише колеса передньої осі (праве або ліве). Випадок з вивішуванням одного з коліс задньої осі є можливим лише на короткий період часу.

Відповідно до однієї з існуючих гіпотез для незалежної оцінки статичної міцності при крученні, умова запишеться так:

$$[\sigma_k] = [\sigma] - [\sigma_s] \text{ або } [\sigma_k] = \frac{\sigma_s K_d}{C_d}, \quad (16)$$

де:  $[\sigma_k]$  - допустиме напруження режиму кручення.

Оцінка статичної міцності каркасу кузова при режимі кручення остаточно приймає вигляд:

$$\sigma_k \leq \frac{\sigma_s K_d}{C_d} \quad (17)$$

Оскільки випробування автобуса в реальних умовах відбуваються при дуже малій швидкості або повній її відсутності, то каркас кузова при цьому сприймає лише номінальні навантаження, тотожні повній масі ТЗ. Практично це означає, що сумарний коефіцієнт динамічності  $C_d = 1$ .

Сумарне навантаження згину можна записати так:

$$\sum P_3 = C_d m_{пг} g \text{ або } \sum P_3 = m_{пг} g \text{ при } C_d = 1, \quad (18)$$

де:  $m_{пг}$  - повна маса автобуса, кг.

Як і у випадку аналізу режиму згину, прикладання в'язей виконується по маточинах коліс автобуса, дотримуючись наступних умов:

1) при вивішуванні лівого переднього колеса (рис. 2б):

- усунені всі обмеження на переміщення лівого переднього колеса;
- переднє праве колесо обмежене по переміщеннях всіх трьох осей X, Y, Z;
- заднє праве колесо має обмеження по напрямку осей Y, Z, причому, вертикальна ланка

відповідає заданій жорсткості;

- заднє ліве колесо обмежено по вертикалі (вісь Z) за рахунок введеної ланки заданої жорсткості;

При вивішуванні правого переднього колеса схема буде симетричною.

2) при вивішуванні лівого заднього колеса:

- переднє ліве колесо обмежено по вертикалі (вісь Z) за рахунок введеної ланки заданої жорсткості;

жорсткості;

- переднє праве колесо обмежене по переміщеннях всіх трьох осей X, Y, Z;

- заднє праве колесо має обмеження по напрямку осей Y, Z, причому, вертикальна ланка

відповідає заданій жорсткості;

- усунені всі обмеження на переміщення лівого заднього колеса;

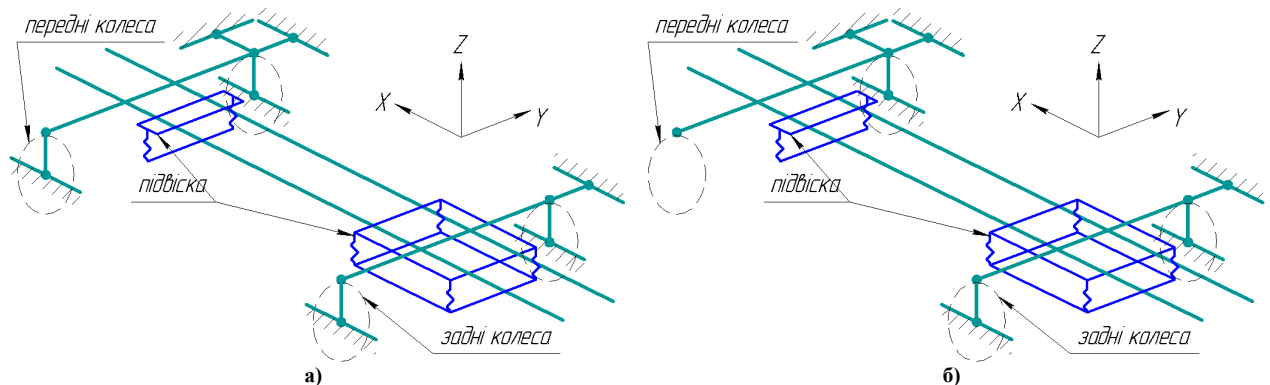


Рис. 2. Схема прикладання в'язей до маточин коліс: а) – режим згину; б) - вивішування лівого переднього колеса

Як було зазначено, вивішування одного з коліс задньої осі допускається, але такі процеси є короткотривалими.

### Особливості розрахунків на режими згину та кручення

Окрім отримання значень напружень при розрахунку на режим кручення важливим є визначення, власне, кута закручування (рис. 3).

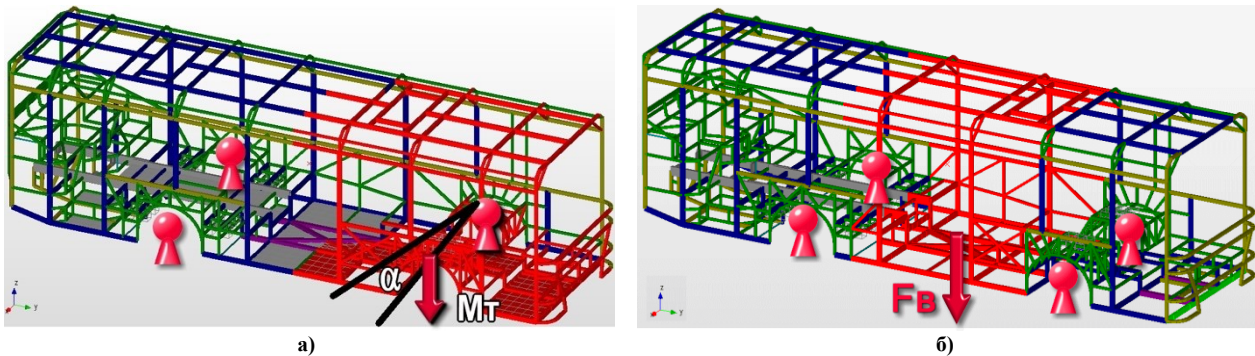


Рис. 3. Схема визначення жорсткості кузова: а) – режими кручення; б) – режим згину

Режим кручення: відношення моменту згину від рівнодійної всіх зосереджених в активній області сил до величини максимального кута закручування (рис. 3а).

$$C_T = M_T / \alpha, \tag{19}$$

де:  $C_T$  - крутильна жорсткість при вивішуванні коліс, Нм/°;  $M_T$  - момент згину від рівнодійної сил, Нм;  $\alpha$  - максимальний кут закручування, °

Під активною областю сил розуміється площа навколо кожної зі звільнених точок опор передньої осі автобуса (центрів), визначена радіусом  $L_2$ , рівним його габаритній ширині (рис. 4). До складу цієї площі входять всі розташовані в об'ємі над нею зосереджені маси вузлів, агрегатів, систем, стоячих та сидячих пасажирів, тому в геометричному розумінні розглядається усічений тор. Добуток суми даних мас на прискорення вільного падіння дорівнює рівнодійній силі  $F_P$ :

$$F_P = (m_1 + m_2 + \dots + m_n)g = \sum m_n g, \tag{20}$$

де:  $m_1, m_2, \dots, m_n$  - маси відповідних вузлів, агрегатів, стоячих та сидячих пасажирів, кг;  $g$  - прискорення вільного падіння,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

Тоді залежність для  $M_T$  запишеться у вигляді добутку рівнодійної сили  $F_P$  на плече  $l$ :

$$M_T = F_P \cdot l, \tag{21}$$

де:  $l$  - віддаль від точки опори до вузла, в якому зафіксовано найбільший вертикальний прогин, мм.

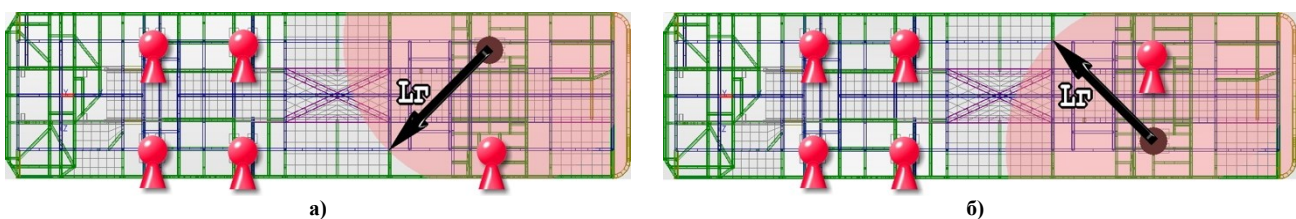


Рис. 4. Схеми геометричного визначення активної області:  
а) - вивішування лівого переднього колеса; б) - вивішування правого переднього колеса

Розглянемо особливості режим згину – визначення максимального прогину конструкції (рис. 3б):

$$C_B = F_B / \Delta z, \tag{22}$$

де:  $C_B$  – жорсткість кузова, Н/мм;  $F_B$  – сумарне навантаження в базі, Н;  $\Delta z$  – максимальний прогин у базі, мм

Оскільки конструктивно визначено, що кріплення фланця пневмобалону підвіски (переважно болтове) до відповідної ферми каркасу кузова є нерухомим та позбавлене ступеней вільності, відтак до розрахункової моделі прикладаються відповідні в'язі (рис. 5).

За результатами МКЕ-розрахунку на базі крайових умов, представлених вище, можна отримати

величезний масив даних, таких як: карти напружень та деформації (рис. 6а); моменти згину (рис. 6б), тощо. Вдаючись у деталі аналізу міцності, інженер-розробник має можливість перевірити безпечність експлуатації силової установки у складі двигуна й трансмісії - відносне переміщення точок кріплення даного складального вузла не має перевищувати 5-10 мм для забезпечення нормальної з точки зору ресурсу роботи ДВЗ та КПП. Аналогічні заміри у контрольних точках слід проводити й для віконних проїм – сучасна більшість автобусів передбачають клеєві з'єднання вікон з рамою, відтак скло стає складовою несівної конструкції та приймає навантаження на себе.

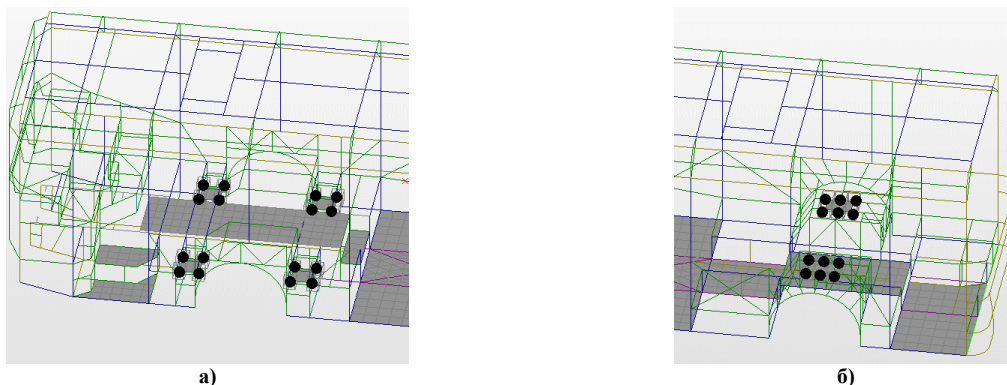


Рис. 5. Схема прикладання в'язей до точок кріплення фланців пневмобалонів з відповідними фермами каркасу кузова типу Low-entry (режим згину): а) – в'язі у задній частині; б) – в'язі у передній частині

Міцність скла надзвичайно висока:  $1000 \text{ Н/мм}^2 = 1000 \text{ МПа}$ . Це означає, що для того, щоб розбити скляний кубик товщиною 1 см, потрібен вантаж близько 10 т. З міцністю на розрив ситуація протилежна - коли скло відхиляється (згин або кручення), воно має одну сторону в режимі стискання, а іншу – розтягу. У той час як стійкість скла до стискання надзвичайно висока, його стійкість до розтягування значно нижча й знаходиться при прогині в околі 40 МПа ( $\text{Н/мм}^2$ ) для звичайного скла та від 120 до 200 МПа для загартованого (залежно від товщини, кромки, отворів, виїмок тощо).

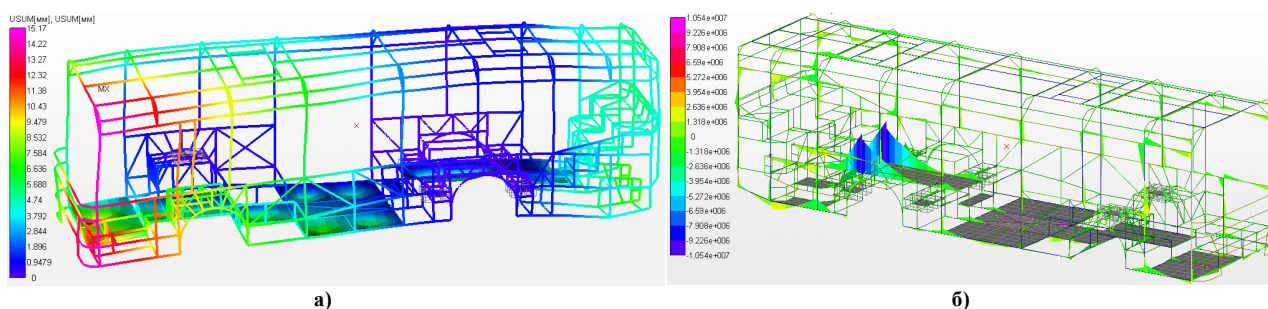


Рис. 6. Карти напружено-деформованого стану: а) – переміщення при режимі кручення; б) – момент згину у вертикальній площині при режимі згину

Таким чином, віконні проїми – це предмет окремих глибоких досліджень у складі каркасу кузова, що вимагають оцінки відносних переміщень найбільш віддалених точок та ретельного контролю напружень. Підбір оптимальних січень (профілів) труб просторового каркасу кузова є важливою частиною роботи по оптимізації структури й міцності автобусних кузовів – конструкція має мати зони поглинання напружень з однієї сторони (демонструвати податливість) та нести несівну функцію (бути максимально жорсткою) – з іншої. Кожна ітерація методом кінцевих елементів з попередньою зміною конфігурації каркасу кузова щодо підбору оптимальних січень труб або їх характеру сполучення у вузли вимагає значних розрахункових ресурсів, а відтак крайові умови, що закладаються у розрахунок, повинні з запасом навантажувати модель, щоб надалі вона забезпечила необхідний запас міцності в умовах реальної експлуатації.

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Статичний розрахунок є найважливішим базовим видом аналізу міцності та рівномірності рамних та просторових конструкцій (ферм каркасів кузовів) транспортних засобів, адже його результати визначають подальший ресурс та безпеку експлуатації машини. До основних видів випробувань автобусних кузовів відносяться режими згину та кручення, котрі мають особливості в плані формування крайових умов в залежності від типу та класу транспортного засобу.

2. Режим згину для низькопідлогових автобусів типу Low-floor та Low-entry проходить в умовах прикладання в'язей до точок кріплення підвіски усіх коліс передньої та задньої осі, а також з врахуванням коефіцієнту динамічності, значення котрого складає 2.5. До моделі прикладаються маси усіх вузлів та агрегатів підресорених мас у фактичних точках їх кріплення або розташування у фізичному автобусі.

3. Режим кручення спрямований на визначення крутильної жорсткості кузова, безпечності встановлення вікон у рамі в результаті її деформації з можливим розтріскуванням скла; забезпечення нормальної експлуатації вузлів та агрегатів щодо зміщення їх точок кріплення; зазорів у дверних проїмах, тощо. Коефіцієнт динамічності складає 1.0 для цього режиму розрахунку та відповідає випадку повільного переїзду через нерівності або вивішування колеса, що втратило опору під собою.

4. Існує низка інших режимів випробувань, що слідує за згином та крученням, наприклад, динамічні випробування на рівень пасивної безпеки (бокові перекидання, фронтальні краш-тести та інші види, визначені Правилами СЕК ООН). Кожен з таких режимів має свою специфіку підходу до формування крайових умов і є актуальною темою для конструкторських бюро, що розробляють аналітичні методики тестування кузовів автобусів, еквівалентні натурним випробуванням. Такий підхід забезпечує неймовірну фінансову економію порівняно з руйнуванням високовартісних прототипів автобусів, вартість котрих складає мільйони гривень.

### Література

1. Тесер Є. Кузова великовантажних автомобілів: Пров. з пол./Пер. Г. В. Коршуков - М.: Машинобудування, 1979.-232 с.
2. Romanov Fr., Slomka A., Teisseyre J. – Skrecanie ram camochodowych o zmiennej szerokosci. IkiEM Politechniki Wroclawskiej; Zeszyt nr 17, Wroclaw 1972.
3. Yao, Chung & Yang, Mengjie. (2021). Analysis of Strength Stiffness and Modes for Bus Body Frame. Journal of Physics: Conference Series. 1748. 062073. 10.1088/1742-6596/1748/6/062073.
4. Jing, K., Chen, J.X., Wu J. (2018) Modal analysis of bus body frame based on Hyperworks. J. Agricultural Equipment & Technology., 2: 54-57.
5. Yin, Z. P. (2007) Finite element analysis and test investigation for XQ6125 city bus. D.Shanghai: Shanghai Jiao Tong University.
6. Shen, Y. F., Zheng, S. L., Feng, J. Z. (2013) Strength and modal analysis for highway bus frame and bus body frame. J. Modern Manufacturing Engineering., 7: 90-95.
7. Zhao, H., Jiang, K., Cao, W. G. (2007) Finite element analysis for half integral body structure of buses. J. Automotive Engineering., 4: 346-350.
8. Wang, X., Su, R.Y., Fan, Z.J. (2007) Finite element analysis and light weight design for bus structure. J. Automobile Technology., 7: 28-31.
9. Nguyễn Thành Tâm, Nguyễn Văn Sỹ. Strength research of monocoque bus body frame structure. Vol. 45 No. 03 (2020): Journal Of Science And Technology - Volume 45B (03-2020). <https://doi.org/10.46242/jst-juh.v45i01.1015>
10. Tian Fang, Wang Tao and Shi Qin, Finite Element Analysis for Monocoque Bus/Coach Body Structure. Bus & Coach Technology and Research. No 1: 17-19, 2012.
11. Dario Croccolo, Massimiliano De Agostinis and Nicolò Vincenzi, Structural Analysis of an Articulated Urban Bus Chassis via FEM: a Methodology Applied to a Case Study. Journal of Mechanical Engineering.57 (2011) 11, 799-809.
12. Zhuo Yang, Baoqing Deng, Mengqi Deng and Gongrui Sun, A Study on Finite Element Analysis of Electric Bus Frame for Lightweight Design. MATEC Web of Conferences 175, 03049, (2018). IFCAE-IOT 2018
13. Regulation No 107 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UNECE) — Uniform provisions concerning the approval of category M2 or M3 vehicles with regard to their general construction [2018/237]

### References

1. Teser Ye. Kuzova velykovantazhnykh avtomobiliv: Prov. z pol./Per. H. V. Korshukov - M.: Mashynobuduvannya, 1979.-232 s.
2. Romanov Fr., Slomka A., Teisseyre J. – Skrecanie ram camochodowych o zmiennej szerokosci. IkiEM Politechniki Wroclawskiej; Zeszyt nr 17, Wroclaw 1972.
3. Yao, Chung & Yang, Mengjie. (2021). Analysis of Strength Stiffness and Modes for Bus Body Frame. Journal of Physics: Conference Series. 1748. 062073. 10.1088/1742-6596/1748/6/062073.
4. Jing, K., Chen, J.X., Wu J. (2018) Modal analysis of bus body frame based on Hyperworks. J. Agricultural Equipment & Technology., 2: 54-57.
5. Yin, Z. P. (2007) Finite element analysis and test investigation for XQ6125 city bus. D.Shanghai: Shanghai Jiao Tong University.
6. Shen, Y. F., Zheng, S. L., Feng, J. Z. (2013) Strength and modal analysis for highway bus frame and bus body frame. J. Modern Manufacturing Engineering., 7: 90-95.
7. Zhao, H., Jiang, K., Cao, W. G. (2007) Finite element analysis for half integral body structure of buses. J. Automotive Engineering., 4: 346-350.
8. Wang, X., Su, R.Y., Fan, Z.J. (2007) Finite element analysis and light weight design for bus structure. J. Automobile Technology., 7: 28-31.
9. Nguyễn Thành Tâm, Nguyễn Văn Sỹ. Strength research of monocoque bus body frame structure. Vol. 45 No. 03 (2020): Journal Of Science And Technology - Volume 45B (03-2020). <https://doi.org/10.46242/jst-juh.v45i01.1015>
10. Tian Fang, Wang Tao and Shi Qin, Finite Element Analysis for Monocoque Bus/Coach Body Structure. Bus & Coach Technology and Research. No 1: 17-19, 2012.
11. Dario Croccolo, Massimiliano De Agostinis and Nicolò Vincenzi, Structural Analysis of an Articulated Urban Bus Chassis via FEM: a Methodology Applied to a Case Study. Journal of Mechanical Engineering.57 (2011) 11, 799-809.
12. Zhuo Yang, Baoqing Deng, Mengqi Deng and Gongrui Sun, A Study on Finite Element Analysis of Electric Bus Frame for Lightweight Design. MATEC Web of Conferences 175, 03049, (2018). IFCAE-IOT 2018
13. Regulation No 107 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UNECE) — Uniform provisions concerning the approval of category M2 or M3 vehicles with regard to their general construction [2018/237]

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-271-275>

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](mailto:Yurii.P.Kryvenchuk@lpnu.ua)

**ОЛЕСКЕВИЧ Софія**

Національний університет "Львівська політехніка"

e-mail: [sofia.oleskevych.knm.2019@lpnu.ua](mailto:sofia.oleskevych.knm.2019@lpnu.ua)

## ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ДЛЯ СТОМАТОЛОГІЧНОЇ КЛІНІКИ З МОЖЛИВІСТЮ ВИЯВЛЕННЯ КАРІЄСУ НА ПАНОРАМНИХ ЗНІМКАХ ЗУБІВ

У нинішньому сценарії основні проблеми здоров'я ротової порожнини людини є надзвичайно важливою сферою дослідження. Двомірне рентгенографічне зображення зубів широко використовується для аналітичного аналізу багатьох стоматологічних захворювань, одним з яких є карієс.

Карієс зубів — багатофакторне захворювання, яке може бути спричинене взаємодією між генетичними факторами та факторами ризику навколишнього середовища. Незважаючи на наявність інструментів для оцінки ризику виникнення карієсу, моделі прогнозування не є оптимальними та доступними у сучасній стоматології. Після проведеного аналізу було виявлено, що доцільним завданням буде побудувати нову модель, яка зможе бути інтегрована у будь-який сайт та сервіс стоматологічної клініки. Це дозволить лікарям зробити процес визначення захворювання прозорішим, а також дасть можливість пацієнтам пройти безкоштовну «консультацію» завдяки методам штучного інтелекту.

Ключові слова: карієс, зуби, згорткові нейронні мережі.

KRYVENCHUK Yurii, OLESKEVYCH Sofia

Lviv Polytechnic National University

### CREATION OF CARIES DETECTION SYSTEM

The usage of modern technological solutions in dentistry is gaining increasingly popularity. Every year the systems are becoming more and more perfect. Of course, it will take more than one year to get the best ones and most reliable results, but you can be sure that it will completely change the way people think about receiving quality dental treatment. Identifying the problem, treatment and its quality directly depends on the human factor from both sides. This applies both to the doctor's qualifications and his own experience, and to the patient. At the same time, doctors very often have to deal with non-standard and unique cases, complications, which in the future are accompanied by the involvement of a whole team of specialists. From the patient's side – from X-ray to computed tomography – has a very high probability of receiving completely different diagnoses from specialists of the same sector. That is, in essence, his health depends on how accurately dentists will be able to interpret the results of examinations and formulate a treatment plan. In order to minimize the influence of the human factor, the use of artificial intelligence, which does not have the ability to miss nuances, feel fatigue and be distracted, is quite necessary. Caries, also known as tooth decay or cavities, are one of the most common oral health problems. They are caused by the buildup of plaque and bacteria on the teeth, which can lead to erosion of the enamel and dentin. Dental x-rays, also known as radiographs, are commonly used to detect caries in the early stages. However, interpreting radiographs can be challenging and prone to human error. AI-based caries detection systems can assist with the interpretation of radiographs by identifying patterns in the images that are indicative of caries. One example of an AI-based caries detection system is a machine learning algorithm will be trained to recognize patterns in radiographs that are indicative of caries. The algorithm can analyze the x-ray images and flag any areas of the tooth that have a high probability of being carious. This can help dentists identify the problem in its early stages, when it is still reversible, and provide appropriate treatment. AI-based caries detection systems can also be used to improve patient diagnosis and treatment by identifying high-risk patients, providing more accurate diagnosis, and developing personalized treatment plans.

Keywords: caries, dentistry, AI, ML, caries detection.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Карієс - це одна з найпоширеніших стоматологічних проблем, що виникає через накопичення бактерій та зубного наліту на зубах, що може призвести до руйнування емалі та дентину. Виявлення карієсу є не завжди простим та пацієнт часто не здатний помітити його у складнодоступних місцях. Саме тому, роблячи рентгенівський 2D знімок, можна виявити карієс та й низку інших захворювань ротової порожнини.

Розробка моделі, яка здатна визначити карієс, буде використана та інтегрована в існуючу систему стоматологічної клініки. У світі є декілька сайтів із схожою імплементацією, однак на українському ринку схожих взагалі немає. Розроблену систему буде використано у цілях взаємодії лікаря та AI-помічника, з допомогою якої буде простіше виявляти проблеми та переконуватись у правильності діагнозу. З сторони пацієнта система дасть змогу дистанційно отримати «діагноз» та покаже наявні проблеми на ортопантограми.

### Аналіз останніх джерел

У статті [1] група дослідників вивчала та розпізнавала набір даних із 196 комплектів періапікальних рентгенограм зубів. Під час рентгенографічної оцінки на характер знімків впливатимуть такі фактори, як час введення, точка випромінювання тощо. Ми повертаємо зображення на рівній площині та вертикально, робимо повільні повороти та змінюємо яскравість зображення в межах певного діапазону, щоб імітувати

різні можливі умови оцінки в реальності. Запропонована мережева архітектура з CNN забезпечує більшу точність виявлення стоматологічних захворювань. Це дослідження також повідомляє, що під час планування заходів з обробки даних та інтерпретації результатів аналізу необхідно враховувати аналітичні навички для аналізу зображень зубів. Алгоритми Scale Invariant Feature Transform (SIFT) і Speed Up Robust Features (SURF), які використовуються в цій пропонуваній роботі, добре ідентифікують точки збігу для отримання окремо виділеного зображення зуба.

Публікація [2] зосереджується на новому підході автоматичного виявлення зубів і класифікації стоматологічних проблем за допомогою панорамних рентгенівських знімків, які можуть допомогти медичному персоналу прийняти рішення щодо правильного діагнозу. Для цієї роботи було зібрано панорамні рентгенограми з трьох стоматологічних клінік і висвітлено 14 різних стоматологічних проблем, які можуть виникнути. CNN було навчено використовувати анотовані дані для отримання інформації про семантичну сегментацію. Далі було виконано кілька операцій обробки зображення для сегментації та уточнення обмежувальних рамок, що відповідають виявленням зубів. Нарешті, кожен екземпляр зуба було позначено та ідентифіковано за допомогою голосування більшості на основі гістограми в межах виявленої області нетипового інтересу. Реалізоване рішення було оцінено щодо кількох метрик, таких як перетин через об'єднання для семантичної сегментації та точності, прецизійності, запам'ятовування та оцінки F1 для згенерованих виявлень обмежувальної рамки.

Мета статті [3] заключається у дослідженні self-supervised методів. Основна ідея полягає в тому, що згорткові нейронні мережі (CNN) навчені вивчати семантичні представлення даних із немаркованих зображень, не вимагаючи людських міток. Слід зазначити, що в цьому дослідженні цей етап попереднього навчання виконується на необроблених BWR, навіть без обрізання зубів за допомогою допоміжної моделі. Результатом кожного алгоритму є модель кодера CNN, яку можна точно налаштувати для наступних завдань, наприклад, класифікації карієсу зубів.

Також важливою частиною дослідження стало вивчення аугментації рентгенівського знімка:

- Випадкове обрізання зміненого розміру між 50–100% розміру вхідного зображення.
- Випадкове горизонтальне перекидання з імовірністю 50%.
- Коригування кольору (імовірності): яскравість (20%), контраст (10%) і насиченість (10%).
- Довільні кути повороту до 20 градусів у обидві сторони.

В результаті було виявлено, що зниження ймовірності коригування кольору найбільш ефектively.

Автори статті [4] незважаючи на високоєфективні інструменти стоматологічної консультації, доступні в сучасній системі охорони здоров'я, ця робота підкреслює важливість використання кількох джерел даних, що називається мультимодальністю, для отримання більшої кількості функцій і отримання точних характеристик. Запропонована модель прогнозування, побудована з використанням мультимодальних даних, продемонструвала багатообіцяючі показники з точністю 90%, показником F1 89%, запам'ятовуванням 90% і точністю 89%.

У дослідженні [5] реалізоване розпізнавання стоматологічних захворювань за допомогою гібридних методів вирізання графів і згорткової нейронної мережі. У процесі ідентифікації стоматологічних захворювань двовимірні рентгенівські зображення зубів використовуються для прогнозування аномальних змін, наявних у зубах. Двовірні зображення зубів збираються з двовірної рентгенівської камери під назвою ORTHOPHOS XG 5 ceph, створеної компанією Sirona Dental Systems. 1500 зображень проходять обробку, а потім досліджуються пікселі зображення, щоб перевірити якість.

Публікація [6] зосереджується на аналізі 620 невідреставрованих молярів/премолярів, зроблених за допомогою смартфона. Отримані зображення оцінювали на діагностику карієсу за допомогою кодів ICDAS II. Точність, чутливість і специфічність найкращої моделі становили 92,37%, 88,1% і 96,6% для «С проти (VNC + NSC)», тоді як вони становили 83,33%, 82,2% і 66,7% для «VNC проти NSC». Незважаючи на те, що запропонована система SVM потребувала подальшого вдосконалення та перевірки, а дані лише знімалися зі смартфона, вона мала сприятливий потенціал для клінічної діагностики з розумною точністю та мінімальними витратами.

Дослідники у статті [7] провели дослідження 1055 підлітків. Усі учасники заповнили анкету щодо здоров'я порожнини рота, обстеження порожнини рота, біологічні тести (слини та карієстату) та аналіз послідовності однонуклеотидного поліморфізму. На основі цих даних була побудована модель прогнозування ризику карієсу, використовуючи випадковий ліс з точністю 0,78 у когорті 1 (когорта навчання). Також було додатково перевірено здатність цієї моделі прогнозувати ризик карієсу до розрізнення та калібрування, використовуючи когорту 2. Точність моделі прогнозування ризику карієсу в когорті 2 (когорта тестування) становила 0,73, що вказує на високу здатність до розрізнення. Стратифікація ризику показала, що модель прогнозування ризику карієсу може точно ідентифікувати осіб з високим і дуже високим ризиком карієсу, але недооцінює ризики для осіб з низьким і дуже низьким ризиком карієсом. Таким чином, модель має потенціал для використання як потужний інструмент на рівні спільноти для виявлення осіб із високим ризиком карієсу.

Автори статті [8] досліджували змішаний набір даних (і кольорові і рентгенівські знімки) та реалізували повноцінний інструмент для визначення карієсу. Автори пропонували різні варіанти локалізації карієсу на кольорових знімках, а зійшлися на перетворенні кольорових фотографій в чорно-білі, потім був етап покращення якості (фільтр Гаусса), сегментація. Також дослідники використовували алгоритм k-



середніх для усунення нецікавих областей і використовували j48, Random Tree, Random Forests, SVM і Naive Bayes класифікатори для виявлення каріозних зображень. Запропонована M-RCNN допомогла досягти високої локалізації каріозних ділянок зубів, а оцінки, проведені експертними стоматологами, показали, що коректність анованих наборів становить до 90%, а загальний рівень ефективності у використанні даної системи понад 80%.

Публікація [9] описує ефективність класифікатора SVM. Початково був набір з 95 рентгенівських знімків, далі відбувалась сегментація зубів YOLO, feature description (VGG16, VGG19, Resnet18, Resnet50, Resnet101, Xception і Densenet201). Для отримання остаточного оптимального результату використовується метод голосування мажоритарністю з використанням характеристик моделі. SVM має найкращу продуктивність для кожного дескриптора в остаточному голосуванні. Для SVM точність, чутливість і специфічність із Densenet становили 90,57%, 95,65% і 86,67% відповідно. VGG16 мав найнижчу точність, чутливість і специфічність (79,25%, 73,91% і 83,33% відповідно).

У статті [10] автори більшість дослідження виділили на виявлення карієсу. Були задіяні експерти-стоматологи та лікарі, які допомогли у лейбленні даних. Загалом вся мета статті полягала у виборі правильних параметрів для моделі YOLO. У результаті було досягнуто 87% точності зі встановленим параметром 0,3.

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є: створення першої української системи для виявлення карієсу за 2D ортопантомограмами зубів з допомогою алгоритмів машинного навчання та порівняння точності отриманих результатів з іншими моделями.

### Виклад основного матеріалу

#### Огляд наборів даних

Проаналізувавши роботи у численних джерелах, стало зрозуміло, що більшість датасетів є приватними. Знайти датасет на просторах інтернету було важко, адже всі дані повинні бути або анонімізовані, або люди повинні підписати дозволу про обробку даних. Однак був зроблений запит на отримання Tufts Dental Database. Цей набір даних складається з 1000 панорамних зображень стоматологічної рентгенографії з експертним маркуванням аномалій і зубів.

#### Етапи процесу виявлення карієсу

Найбільш прямий процес виявлення карієсу зазвичай поділяють на три основні етапи: препроцесінг зображення, вилучення ознак, класифікація карієсу.

*Препроцесінг зображення.* Препроцесінг зображення є чи не найважливішим етапом, адже приводячи знімки до однакового виду збільшується ймовірність правильного діагностування.

Існує кілька поширених етапів попередньої обробки зображень, які можна застосувати до зображень перед тим, як вони будуть введені в згорткову нейронну мережу (CNN). До них належать:

1. Зміна розміру: зображення мають бути змінені до того самого розміру, як правило, розміру, на якому навчалася мережа.
2. Масштабування: зображення слід масштабувати до однакового діапазону значень пікселів, як правило,  $[0, 1]$  або  $[-1, 1]$ .
3. Нормалізація: дані зображення повинні бути нормалізовані, щоб мати нульове середнє та одиничну дисперсію.
4. Збільшення даних: додаткові навчальні дані можна згенерувати шляхом застосування випадкових перетворень до вихідних зображень, таких як обертання, перевертання, масштабування та кадрування.
5. Порядок каналів кольорів: порядок каналів даних зображення слід налаштувати відповідно до порядку каналів, очікуваного мережею, як правило, RGB.
6. Одночасне кодування: для проблем класифікації з кількома класами цільові мітки мають бути закодовані одним оперативним кодуванням.

Важливо зазначити, що конкретні етапи попередньої обробки та їхні параметри можуть відрізнятися залежно від конкретної архітектури CNN і набору даних, що використовується.

*Вилучення ознак.* Виділення ознак у CNN зображень передбачає використання згорткових шарів мережі для вилучення ознак із вхідного зображення. Потім ці функції проходять через повністю підключені рівні мережі для класифікації. Згорткові шари використовують фільтри для виявлення певних особливостей зображення, наприклад країв або текстур. Коли зображення проходить через кілька згорткових шарів, витягнуті функції стають усе більш складними та абстрактними. Цей процес дозволяє мережі вивчати корисні представлення зображення, які є корисними для поточного завдання, наприклад розпізнавання площі зуба, де наявний карієс.

*Класифікація карієсу.* В останні роки методи глибокого навчання були застосовані для класифікації карієсу за допомогою зображень зубів. Згорткові нейронні мережі (CNN) використовувалися для класифікації карієсу як легкого, середнього або важкого ступеня на основі зображень. Класична CNN навчається на наборі даних, позначених відповідним ступенем тяжкості карієсу, а після навчання CNN може класифікувати нові зображення зубів з високою точністю.

Принцип роботи системи наведено на рис.1.

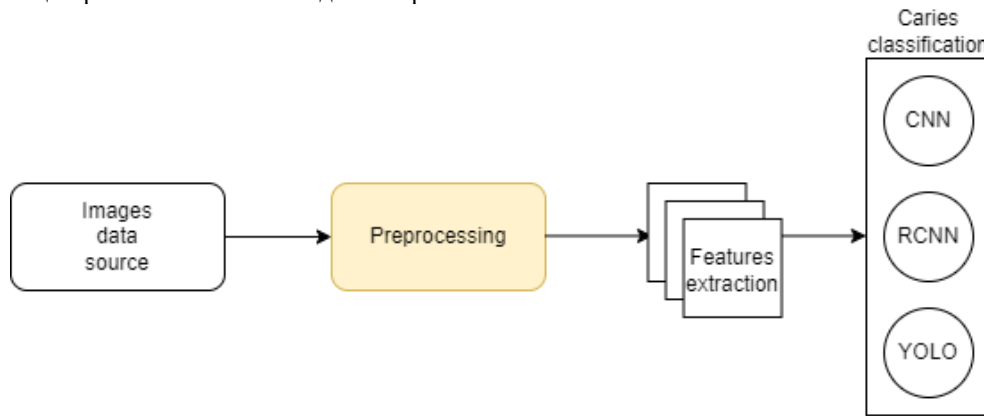


Рис.1 Принцип роботи системи

Загалом, використання методів глибокого навчання для класифікації карієсу має потенціал для підвищення точності та ефективності процесу діагностики та може бути цінним інструментом для стоматологів і спеціалістів із догляду за порожниною рота.

#### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В результаті проведеної роботи було створено систему визначення карієсу за 2D ортопантомограмою зубів. Ця розробка допомагає пацієнту визначити карієс, всього лише завантаживши свій знімок на сайт клініки. З сторони лікаря, система допоможе підтвердити будь-які сумніви щодо діагнозу та отримати другу незалежну від експерта думку.

Детальне дослідження задачі визначення карієсу показало, що система має застосування і буде справді корисною в щоденній роботі, а оскільки ця галузь є взагалі не досліджена в Україні, то дана розробка є доцільною та зробить перший крок в сторону AI в українській стоматології.

#### Література

1. M. A. K. Khan, M. V. A. Nag, T. U. G. Mir, i S. Dhiman, «Dental image analysis approach integrates dental image diagnosis», *International Journal of Current Research and Review*, вип. 12, вип. 16, с. 47–52, 2020, doi: 10.31782/IJCRR.2020.12166.
2. M. P. Muresan, A. R. Barbur, i S. Nedevschi, «Teeth Detection and Dental Problem Classification in Panoramic X-Ray Images using Deep Learning and Image Processing Techniques», представлена на Proceedings - 2020 IEEE 16th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing, ICCP 2020, 2020, с. 457–463. doi: 10.1109/ICCP51029.2020.9266244.
3. A. Taleb *et al.*, «Self-Supervised Learning Methods for Label-Efficient Dental Caries Classification», *Diagnostics*, вип. 12, вип. 5, 2022, doi: 10.3390/diagnostics12051237.
4. K. Panetta, R. Rajendran, A. Ramesh, i S. Rao, «Tufts Dental Database: A Multimodal Panoramic X-Ray Dataset for Benchmarking Diagnostic Systems», *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, вип. PP, с. 1–1, Жов 2021, doi: 10.1109/JBHI.2021.3117575.
5. A. A. Al Kheraif, A. A. Wahba, i H. Fouad, «Detection of dental diseases from radiographic 2d dental image using hybrid graph-cut technique and convolutional neural network», *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, вип. 146, с. 333–342, 2019, doi: 10.1016/j.measurement.2019.06.014.
6. D. L. Duong, M. H. Kabir, i R. F. Kuo, «Automated caries detection with smartphone color photography using machine learning», *Health Informatics Journal*, вип. 27, вип. 2, 2021, doi: 10.1177/14604582211007530.
7. L. Pang, K. Wang, Y. Tao, Q. Zhi, J. Zhang, i H. Lin, «A New Model for Caries Risk Prediction in Teenagers Using a Machine Learning Algorithm Based on Environmental and Genetic Factors», *Front Genet*, вип. 12, с. 636867, 2021, doi: 10.3389/fgene.2021.636867.
8. U. Rashid *et al.*, «A hybrid mask RCNN-based tool to localize dental cavities from real-time mixed photographic images», *PeerJ Comput Sci*, вип. 8, с. e888, Лют 2022, doi: 10.7717/peerj-cs.888.
9. T. H. Bui, K. Hamamoto, i M. P. Paing, «Automated Caries Screening Using Ensemble Deep Learning on Panoramic Radiographs», *Entropy*, вип. 24, вип. 10, 2022, doi: 10.3390/e24101358.
10. A. Sonavane i R. Kohar, «Dental Cavity Detection Using YOLO», *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, вип. 91, с. 141–152, 2022, doi: 10.1007/978-981-16-6285-0\_12.

#### References

1. M. A. K. Khan, M. V. A. Nag, T. U. G. Mir, i S. Dhiman, «Dental image analysis approach integrates dental image diagnosis», *International Journal of Current Research and Review*, вип. 12, вип. 16, с. 47–52, 2020, doi: 10.31782/IJCRR.2020.12166.

2. M. P. Muresan, A. R. Barbura, i S. Nedeveschi, «Teeth Detection and Dental Problem Classification in Panoramic X-Ray Images using Deep Learning and Image Processing Techniques», представлена на Proceedings - 2020 IEEE 16th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing, ICCP 2020, 2020, с. 457–463. doi: 10.1109/ICCP51029.2020.9266244.
3. A. Taleb *et al.*, «Self-Supervised Learning Methods for Label-Efficient Dental Caries Classification», *Diagnostics*, вип. 12, вип. 5, 2022, doi: 10.3390/diagnostics12051237.
4. K. Panetta, R. Rajendran, A. Ramesh, i S. Rao, «Tufts Dental Database: A Multimodal Panoramic X-Ray Dataset for Benchmarking Diagnostic Systems», *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, вип. PP, с. 1–1, Жов 2021, doi: 10.1109/JBHI.2021.3117575.
5. A. A. Al Kheraif, A. A. Wahba, i H. Fouad, «Detection of dental diseases from radiographic 2d dental image using hybrid graph-cut technique and convolutional neural network», *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, вип. 146, с. 333–342, 2019, doi: 10.1016/j.measurement.2019.06.014.
6. D. L. Duong, M. H. Kabir, i R. F. Kuo, «Automated caries detection with smartphone color photography using machine learning», *Health Informatics Journal*, вип. 27, вип. 2, 2021, doi: 10.1177/14604582211007530.
7. L. Pang, K. Wang, Y. Tao, Q. Zhi, J. Zhang, i H. Lin, «A New Model for Caries Risk Prediction in Teenagers Using a Machine Learning Algorithm Based on Environmental and Genetic Factors», *Front Genet*, вип. 12, с. 636867, 2021, doi: 10.3389/fgene.2021.636867.
8. U. Rashid *et al.*, «A hybrid mask RCNN-based tool to localize dental cavities from real-time mixed photographic images», *PeerJ Comput Sci*, вип. 8, с. e888, Лют 2022, doi: 10.7717/peerj-cs.888.
9. T. H. Vui, K. Hamamoto, i M. P. Paing, «Automated Caries Screening Using Ensemble Deep Learning on Panoramic Radiographs», *Entropy*, вип. 24, вип. 10, 2022, doi: 10.3390/e24101358.
10. A. Sonavane i R. Kohar, «Dental Cavity Detection Using YOLO», *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, вип. 91, с. 141–152, 2022, doi: 10.1007/978-981-16-6285-0\_12.

**КРИВЕНЧУК Юрій**

Національний університет "Львівська політехніка"

<https://orcid.org/0000-0002-2504-5833>e-mail: [Yurii.P.Kryvenchuk@lpnu.ua](mailto:Yurii.P.Kryvenchuk@lpnu.ua)**ГОРІШНА Надія**

Національний університет "Львівська політехніка"

e-mail: [nadiia.horishna.knm.2019@lpnu.ua](mailto:nadiia.horishna.knm.2019@lpnu.ua)

## АНАЛІЗ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАРПЛАТ ЗА ДОПОМОГОЮ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

В роботі наведено результати дослідження теми прогнозування заробітної плати людини за параметрами посади, досвіду її рівня освіти та розроблення системи для вирішення такої задачі, з метою покращення якості ринку заробітних плат та впровадження таких систем у відповідні сфери в Україні. Виділено та описано такі основні етапи: визначення тестових наборів даних, навчання нейронної мережі, передбачення зарплати. Після проведення аналізу результатів було виявлено, що створення системи передбачення заробітної плати за посадою, досвідом та рівнем освіти є актуальним та доцільним завданням на сьогодні, а найбільш ефективним інструментом для цього є використання нейронних мереж.

Ключові слова: передбачення зарплати, нейронні мережі.

KRYVENCHUK Yurii, HORISHNA Nadiia  
Lviv Polytechnic National University

### CREATION OF SALARY PREDICTION SYSTEM

Salary prediction is an important problem for many organizations as it directly affects the financial wellbeing of employees and the competitiveness of the organization. Accurately predicting employee salaries enables organizations to make informed decisions about compensation and benefits packages, leading to a more equitable distribution of compensation, improved organizational performance and increased employee satisfaction. In today's highly competitive job market, accurate salary prediction is increasingly important as organizations seek to attract and retain the best talent, maintain a motivated and productive workforce, and stay ahead of the competition. The prediction of salaries for employees can be challenging as it requires taking into account a wide range of factors including years of experience, education, skills, job responsibilities, industry trends and more.

Salary prediction systems can also help to identify and eliminate any potential salary disparities between different groups of employees. By providing a more objective and data-driven approach to determining salaries, these systems can help to promote fairness and equity in the workplace. Additionally, salary prediction systems can be useful for companies to budget and plan their finances, by having a better understanding of the potential salary range for a given job, the company can budget accordingly. The practical value of this work is the salary prediction system which can provide valuable insights and help to make more informed decisions about compensation, which can benefit both employers and employees.

Moreover, with the advent of machine learning and artificial intelligence, it has become possible to develop sophisticated algorithms and models to analyze vast amounts of data and make accurate salary predictions. These systems use deep learning techniques, such as neural networks, to analyze large amounts of data and predict salaries based on a wide range of factors. This technology is becoming increasingly widespread and is poised to play a major role in the future of human resources and compensation decision-making.

Keywords: salary prediction, neural networks.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Системи прогнозування заробітної плати можуть надати цінну інформацію, яка допоможе як роботодавцям, так і працівникам приймати більш обґрунтовані рішення щодо винагороди, сприяти чесності та справедливості на робочому місці. Люди, що у пошуках роботи, зможуть використовувати систему прогнозування зарплати, щоб знайти роботу, яка відповідає їхнім кваліфікаціям і очікуваній зарплаті. Це може допомогти їм у вирішенні питання про те, на яку посаду претендувати, а також скоротить час і зусилля, витрачені на роботу, яка не підходить. Крім того, дана система може допомогти визначити найважливіші характеристики, які впливають на заробітну плату, що можна використовувати для покращення процесу роботи з персоналом. Забезпечуючи більш об'єктивний підхід до визначення заробітної плати, який базується на даних, компанії можуть використовувати систему прогнозування, щоб краще складати бюджет і планувати свої фінанси. Маючи краще розуміння потенційного діапазону зарплати для даної роботи, компанія може відповідним чином скласти бюджет.

### Аналіз досліджень та публікацій

У статті [1] обговорюється передбачення зарплати та візуалізація вакансії, пов'язані з їх майбутньою кар'єрою. Для вирішення проблеми було застосовано підхід лінійної регресії та методи візуалізації. Дані, які використовувалися для дослідження, були попередньо оброблені, після цього автори

розробили модель і працювали з реальними даними. Для визначення якості моделі використовувалася середня абсолютна похибка (MAE). У даному випадку лінійна регресія була непридатна для перевірки точності, оскільки даний проект передбачає зарплату на основі необхідного багаторічного досвіду. Отже, у цій роботі сказано, що було доцільніше з'ясувати якість даних і різницю між фактичними та прогнозованими даними, використовуючи MAE, як найпростіший показник для розуміння. Результати надійності вказують на позитивну кореляцію з фактичними значеннями. Недоліком я би відокремила використання обмеженої інформації на веб-сайті Jobstreet як єдиного джерела даних. У статті [2] розв'язувалась задача порівняння ефективності двох методів регресії, а саме алгоритмів простої лінійної регресії (SLR) і множинної лінійної регресії (MLR) у двох випадках: прогнозування зарплати працівників через певні роки та прогнозування цін на нерухомість. Набір даних, використаний у цьому експерименті, є набором даних із відкритим кодом від KaggleInc. Алгоритми порівнювалися з використанням таких параметрів, як значення R-квадрат, середня абсолютна похибка (MAE), середня квадратична похибка (MSE), показник дисперсії та середньоквадратична похибка (RMSE). Результати показали, що MLR забезпечує кращу ефективність порівняно з SLR. У даній науковій публікації самі автори стверджують, що покращити експеримент рекомендується таким чином, що брати на опрацювання великий набір даних, щоб побудувати кращу модель передбачення. У статті [3] прогнозування зарплати розглядається як проблема порядкової регресії та використовуються методи глибокого навчання для побудови моделі прогнозування зарплати для визначення відносного порядку між різними рівнями зарплати. Зокрема, щоб вирішити цю проблему, автори використовують особисту інформацію студентів, оцінки та сімейні дані як вхідні дані функції та багатовихідну глибоку нейронну мережу для фіксації кореляції між рівнями заробітної плати під час навчання. Щоб покращити продуктивність моделі, використовується агрегація відсіву та початкового завантаження. Проте дане дослідження не може бути застосовано більш широко, адже тут для аналізу беруться такі вхідні значення, як оцінки студентів, тому запропоноване вирішення підійде тільки для вузького кола людей, а саме студентів. У статті [4] дослідження проводяться для прогнозування вмісту веб-сайту на основі даних про відвідувачів із підходом інтелектуального аналізу даних. У цій роботі для аналізу та передбачень використовують два алгоритми для порівняння: Random forest та k-NN. Оцінка алгоритму Random forest має значення точності 71 відсоток, тоді як алгоритм k-NN має вищі значення точності, а саме 84,88 відсотка. Підсумовуючи цей експеримент, можна зробити висновок, що алгоритм k-NN виконує прогнозування процесу обробки даних щодо ефективніше, ніж Random forest у даному випадку. З недоліків варто виокремити складність обчислень та відносно низьку точність. У статті [5] автор зосередився на вивченні прогнозування зарплати за допомогою різних моделей глибокої нейронної мережі, включаючи TextCNN, Bi-GRU-LSTM-CNN і Bi-GRU-CNN з різними попередньо підготовленими вставками слів у набір даних про роботу в IT. Крім того, він запропонував просту та ефективну модель ensemble, що поєднує різні моделі глибоких нейронних мереж. Результати його експериментів показали, що запропонована модель досягла результату з показником точності F 72,71%. Для покращення даного дослідження, можна працювати над отриманням кращих результатів з вищим показником точності експерименту. У статті [6] описано, як проводити власні дослідження зарплати, як інтерпретувати результати та як організації можуть застосовувати результати. Автор стверджує, що дане дослідження було проведено, щоб використовувати результати аналізу для виявлення окремих випадків, коли зарплата може не відповідати прогнозам. Для цього було використано модель заробітної плати, щоб передбачити заробіток кожної особи, а потім порівнювання цих прогнозованих даних з фактичними заробітками, які отримують працівники. Першим кроком у цьому процесі було виконання регресійного аналізу, а після цього використання результатів цієї моделі, щоб передбачити, якою була б зарплата кожної особи, в залежності від статі чи кольору шкіри. Недоліком даної роботи є те, що дослідження більше фокусується на різних вхідних варіаціях даних, ніж на якості регресійного аналізу. У статті [7] виконано дослідження того, які сфери роботи мають більший вплив на зарплату, як вони взаємопов'язані та як це можна передбачити. Формулювання проблеми було поставлено, як прогнозування заробітної плати як задачі класифікації для кращої точності шляхом зосередження на дискретних діапазонах замість безперервних значень заробітної плати. У даній роботі було проведено порівняння кількох класифікаторів, включаючи SVM, MLP, random forest, AdaBoost і їх ансамблі, щоб знайти модель з найкращою точністю прогнозування діапазону зарплати. Цю модель автор запропонував використовувати на веб-сайтах з пошуку роботи, щоб забезпечити автоматичну класифікацію вакансій за діапазоном зарплати, навіть якщо реально запропонована зарплата відсутня, або використовувати як алгоритм у системі рекомендацій щодо роботи. Дане дослідження проведено масштабно, з використанням різних методів та також було зроблено аналіз використаних методів з точки зору точності та оцінки F1. Класифікатори на основі ансамблів дерев рішень, а також на основі ансамблів голосування досягають найкращої точності. Їхня середня точність становить  $\approx 0,84$ . KNN досягає середньої точності  $\approx 0,79$ , а всі решта моделей (LR, MLP і SVM) поведуться істотно гірше. Для LR автор це пояснює нелінійністю проблеми, тоді як для MLP і SVM дефіцит даних, ймовірно, є найбільшою перешкодою. У статті [8] досліджуються алгоритми машинного навчання та підходи до прогнозування доходу випускників. У цій роботі проведено поглиблений аналіз, щоб визначити, чи можна підвищити точність традиційних алгоритмів за допомогою наукового підходу. Автор для даного дослідження використав набір даних, який містить значення доходу та великий набір незалежних демографічних ознак студентів. Результати показують, що моделі машинного навчання перевершили параметричні моделі лінійної та логістичної

регресії у прогнозуванні поточного доходу зі статистично значущими результатами у трьох різних завданнях. Крім того, пізніші методи виявилися найточнішими для прогнозування першого доходу випускника після закінчення навчання. Проте тут така ж проблема як у статті [5], автори використовують для вхідних даних саме інформацію про студентів. У статті [9] за допомогою статистичного машинного навчання (ML) розроблено та перевірено цілісну професійну та економічну структуру для прогнозування зарплати. Використані моделі розроблялися на основі професійних особливостей та організаційних характеристик. П'ять різних керованих алгоритмів ML навчали на основі даних опитування ринку праці Саудівської Аравії для оцінки середньої річної зарплати в різних видах економічної діяльності та основних професійних групах. У прогнозуванні середньої заробітної плати за видами економічної діяльності регресія байєсівського процесу Гаусса ML показала помітне покращення порівняно з множинною лінійною регресією. Крім того, були отримані нижчі похибки результатів. Проте прогноз зарплати для основних професійних груп показав, що штучні нейронні мережі показали найкращі результати. У статті [10] автор пропонує розширену нейронну мережу з кооперативною структурою, а саме мережу композиції заробітної плати та навичок (SSCN), щоб відокремлювати професійні навички та вимірювати їх цінність на основі масових оголошень про роботу. Експерименти показують, що SSCN може не тільки призначити значущу цінність професійним навичкам, але й перевершує порівняльні моделі для прогнозування зарплати. У даній роботі робиться наголос саме на навички людей, в залежності від яких буде проводитись оцінка заробітної плати. Тут автор стверджує, що використовував класичні моделі регресії, включаючи лінійну регресію (LR), опорну векторну машину (SVM) і дерево рішень із посиленням градієнта (GBDT). Оскільки ці методи обробляють структуровані вектори ознак фіксованого розміру, було об'єднано характеристики навичок і контекст роботи як їхні вхідні дані. Проте у цій роботі не було описано прогнозування й аналіз заробітної плати використовуючи вказані методи.

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є: створення сучасної та якісної системи передбачення заробітної плати людей за параметрами посади, досвіду й рівня освіти для застосування на ринку заробітних плат.

### 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

#### Огляд наборів даних, що містять інформацію про заробітну плату людей з вказаними параметрами

База даних	Кількість прикладів	Локація	Параметри
Jobs Dataset from Glassdoor	741	USA	Job title, salary estimate, job description. Rating, company name, location, headquarters, size, founded
indeed-job-site-software-jobs-dataset	7289	worldwide	Job position, company, requirements, rating, experience, average yearly salary, work category, education level, job title, state
Glassdoor Job Postings : Data Science	3324	USA	Job title, company, state, city, min salary, max salary, job description, industry, rating, date posted, job type
Salary prediction dataset	366918	USA	Title, full description, location, company, category, salary

#### Етапи процесу передбачення заробітної плати

Процес прогнозування заробітної плати складається з наступних етапів: збір даних, підготовка даних, виокремлення ознак, вибір моделі, навчання моделі та оцінка моделі. *Збір даних.* Перший етап складається з пошуку даних з різних джерел та вибір ключових характеристик, які впливатимуть на заробітну плату, як-от посада, багаторічний досвід, рівень освіти та географічне розташування. *Підготовка даних.* Даний етап включає очищення та попередню обробку даних, щоб забезпечити їх точність і якість, наприклад, видалення даних поза вибіркою та обробка відсутніх значень. *Розробка функцій.* На цьому кроці створюються нові функції з існуючих даних, наприклад таку функцію, яка поєднує освіту та багаторічний досвід. *Вибір моделі.* Тут потрібно вибрати найбільш відповідний алгоритм машинного навчання для завдання, а саме нейронну мережу. Загалом FNN, MLP і RNN є найбільш часто використовуваними нейронними мережами для прогнозування зарплати. 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 коректності вибрати найоптимальнішу. *Навчання моделі.* Наступним етапом буде навчання моделі, використовуючи підготовлені навчальні дані, налаштовуючи гіперпараметри та оцінюючи продуктивність моделі за допомогою таких показників, як середня квадратична помилка або середня абсолютна помилка. *Оцінка моделі.* Тут оцінюється продуктивність розгорнутої моделі на нових, невідомих даних, щоб визначити її точність і внести необхідні покращення.

**Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі**

В результаті проведеної роботи було створено систему прогнозування заробітної плати людини. Ця розробка може мати значний вплив на процес прийняття рішень у багатьох організаціях. Нейронні мережі, зокрема методи глибокого навчання, показують багатообіцяючі результати в цій галузі, пропонуючи високий рівень точності та здатність обробляти складні та нелінійні зв'язки в даних. Процес прогнозування заробітної плати включає кілька етапів, включаючи збір даних, підготовку даних, розробку функцій, вибір моделі, навчання моделі та оцінку моделі. Поєднуючи технічну експертизу зі знаннями предметної області, організації можуть розробити ефективні та результативні системи прогнозування заробітної плати, які допоможуть приймати обґрунтовані рішення щодо винагороди та пільг для працівників. Оскільки ця галузь недостатньо досліджена в Україні, то дана розробка є доцільною та актуальною.

**Література**

1. Abu Samah K. A. F. A linear regression approach to predicting salaries with visualizations of job vacancies: a case study of jobstreet malaysia / K. A. F. Abu Samah, N. S. Dinnie Wirakarnain, R. Hamzah, [et al.] // IAES International Journal of Artificial Intelligence (IJ-AI). — 2022. — Vol. 11, No. 3. — P. 1130.
2. Bansal U. Empirical analysis of regression techniques by house price and salary prediction / U. Bansal, A. Narang, A. Sachdeva, [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2021. — Vol. 1022, No. 1. — P. 012110.
3. Kuo J.-Y. Building graduate salary grading prediction model based on deep learning / J.-Y. Kuo, C.-H. Liu, H.-C. Lin // Intelligent Automation & Soft Computing. — 2021. — Vol. 27, No. 1. — P. 53–68.
4. Iskandar I. D. Popular content prediction based on web visitor data with data mining approach / I. D. Iskandar, N. C. Basjaruddin, D. Supriadi, [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — Vol. 1641, No. 1. — P. 012105.
5. Van Huynh T. Job prediction: from deep neural network models to applications / T. Van Huynh, K. Van Nguyen, N. L.-T. Nguyen, A. G.-T. Nguyen. — Ho Chi Minh, Vietnam : IEEE, 2020.
6. Taylor L. L. How to do a salary equity study: with an illustrative example from higher education / L. L. Taylor, J. N. Lahey, M. I. Beck, J. E. Froyd // Public Personnel Management. — 2020. — Vol. 49, No. 1. — P. 57–82.
7. Martín I. Salary prediction in the it job market with few high-dimensional samples: a spanish case study: / I. Martín, A. Mariello, R. Battiti, J. A. Hernández // International Journal of Computational Intelligence Systems. — 2018. — Vol. 11, No. 1. — P. 1192.
8. Gomez-Cravioto D. A. Supervised machine learning predictive analytics for alumni income / D. A. Gomez-Cravioto, R. E. Diaz-Ramos, N. Hernandez-Gress, [et al.] // Journal of Big Data. — 2022. — Vol. 9, No. 1. — P. 11.
9. Matbouli Y. T. Statistical machine learning regression models for salary prediction featuring economy wide activities and occupations / Y. T. Matbouli, S. M. Alghamdi // Information. — 2022. — Vol. 13, No. 10. — P. 495.
10. Sun Y. Market-oriented job skill valuation with cooperative composition neural network / Y. Sun, F. Zhuang, H. Zhu, [et al.] // Nature Communications. — 2021. — Vol. 12, No. 1. — P. 1992.

**References**

1. Abu Samah K. A. F. A linear regression approach to predicting salaries with visualizations of job vacancies: a case study of jobstreet malaysia / K. A. F. Abu Samah, N. S. Dinnie Wirakarnain, R. Hamzah, [et al.] // IAES International Journal of Artificial Intelligence (IJ-AI). — 2022. — Vol. 11, No. 3. — P. 1130.
2. Bansal U. Empirical analysis of regression techniques by house price and salary prediction / U. Bansal, A. Narang, A. Sachdeva, [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2021. — Vol. 1022, No. 1. — P. 012110.
3. Kuo J.-Y. Building graduate salary grading prediction model based on deep learning / J.-Y. Kuo, C.-H. Liu, H.-C. Lin // Intelligent Automation & Soft Computing. — 2021. — Vol. 27, No. 1. — P. 53–68.
4. Iskandar I. D. Popular content prediction based on web visitor data with data mining approach / I. D. Iskandar, N. C. Basjaruddin, D. Supriadi, [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — Vol. 1641, No. 1. — P. 012105.
5. Van Huynh T. Job prediction: from deep neural network models to applications / T. Van Huynh, K. Van Nguyen, N. L.-T. Nguyen, A. G.-T. Nguyen. — Ho Chi Minh, Vietnam : IEEE, 2020.
6. Taylor L. L. How to do a salary equity study: with an illustrative example from higher education / L. L. Taylor, J. N. Lahey, M. I. Beck, J. E. Froyd // Public Personnel Management. — 2020. — Vol. 49, No. 1. — P. 57–82.
7. Martín I. Salary prediction in the it job market with few high-dimensional samples: a spanish case study: / I. Martín, A. Mariello, R. Battiti, J. A. Hernández // International Journal of Computational Intelligence Systems. — 2018. — Vol. 11, No. 1. — P. 1192.
8. Gomez-Cravioto D. A. Supervised machine learning predictive analytics for alumni income / D. A. Gomez-Cravioto, R. E. Diaz-Ramos, N. Hernandez-Gress, [et al.] // Journal of Big Data. — 2022. — Vol. 9, No. 1. — P. 11.
9. Matbouli Y. T. Statistical machine learning regression models for salary prediction featuring economy wide activities and occupations / Y. T. Matbouli, S. M. Alghamdi // Information. — 2022. — Vol. 13, No. 10. — P. 495.
10. Sun Y. Market-oriented job skill valuation with cooperative composition neural network / Y. Sun, F. Zhuang, H. Zhu, [et al.] // Nature Communications. — 2021. — Vol. 12, No. 1. — P. 1992.

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-280-288>

УДК 004.891.3:004.3

**ЗАСОРНОВА Ірина**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-6655-5023>

e-mail: [zasornovair@khmnu.edu.ua](mailto:zasornovair@khmnu.edu.ua)

**ЗАСОРНОВ Олександр**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-9387-6997>

e-mail: [zasornov.os@khnu.km.ua](mailto:zasornov.os@khnu.km.ua)

**МАЗНЕВ Євген**

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

<https://orcid.org/0000-0001-7952-8980>

e-mail: [maznev@snu.edu.ua](mailto:maznev@snu.edu.ua)

**САРАНА Олександр**

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

<https://orcid.org/0000-0003-1898-8283>

e-mail: [sarana@snu.edu.ua](mailto:sarana@snu.edu.ua)

## АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ ТЕСТУВАННЯ ВІДКРИТОЇ ПАРАМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЄКТУВАННЯ «ВАЛЕНТИНА»

У статті проаналізовано пропріетарні Lectra systems (Франція), Gerber Garment Technology (США), Investronika (Іспанія), Assyst GmbH (Німеччина), Wild Ginger Software (США) та відкриту PatternViewer (США), Валентина (Україна) системи автоматизованого проєктування для швейного виробництва.

Виконано аналітичний огляд інформації для тестування відкритої параметричної системи автоматизованого проєктування «Валентина». Наведено мінімальний перелік даних для якісного тестування, який містить 10-ть пунктів, основними з яких є: лістинги вихідних текстів програмних продуктів, зовнішня специфікація, план та методики тестування, варіанти тестів та отримані результати.

Отримана інформація для тестування відкритої параметричної системи автоматизованого проєктування «Валентина» в подальшому може бути використана для проведення аналізу способів тестування програмних продуктів та їх покращення, а також для розробки автоматизованих тестів, які можна впровадити у процеси створення та експлуатації програмних продуктів.

Ключові слова: «Валентина», системи автоматизованого проєктування, відкриті програмні продукти, інформація для тестування, GitLab.

ZASORNOVA Iryna, ZASORNOV Alexander

Khmelnytskyi National University

MAZNIEV Ievgen, SARANA Oleksandr

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

## ANALYTICAL REVIEW OF INFORMATION FOR TESTING THE OPEN PARAMETRIC SYSTEM OF AUTOMATED PROJECTION «VALENTINA»

The article analyzes proprietary systems, such as Lectra systems (France), Gerber Garment Technology (USA), Investronika (Spain), Assyst GmbH (Germany), Wild Ginger Software (USA) and open PatternViewer (USA), Valentina (Ukraine) automated design systems for sewing production. An analytical review of the information for testing the open parametric system of automated projection and design «Valentina» was performed. It was determined that the theoretical foundations of automated testing of automated design systems are currently an incompletely resolved problem. The minimum list of data for qualitative testing is presented, which contains 10 items, the main of which are: listings of source texts of software products, external specification, test plan and methods, test options and obtained results. The article provides a list of Internet sources of the «Valentina» software product distribution, a list of communication methods, as well as a list of external specification items required for testing the «Valentina» software product. Various versions of the «Valentina» were considered, as well as the changes made in the test version v0.7.52 compared to the previous version v0.7.51. Various types of errors that occur during the development of new functions of software products are analyzed, including the inability to perform one of the functions; inability to complete a function; the appearance on the screen of symbols or program primitives that do not correspond to the action; involuntary closing of the program window; closing the program window without warnings about saving data; other errors. The information obtained for testing the open parametric system of automated projection «Valentina» can be used in the future for the analysis of methods of testing software products and their improvement, as well as for the development of automated tests that can be implemented in the processes of creating and operating software products.

Keywords: «Valentina», automated projection systems; open software products; information for testing, GitLab.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Звіт, який надано Консорціумом щодо якості інформації та програмного забезпечення (CISQ), містить інформацію, що проблеми якості програмного забезпечення у США на 2022 рік коштували біля 2,41 трлн. доларів [1]. Ці витрати походять від:

- кібернетичних атак;
- проблем з ланцюгами постачання сторонніх програм, які входять до складу програмного продукту (ПП);



– проблем накопичення технічної заборгованості, яка стосується витрат на усунення недоліків розробленого програмного забезпечення, що робить дані та системи потенційно вразливими.

Саме тому, тестування є важливим етапом у процесі розробки ПП. Серед великої кількості ПП окремо можна виділити системи автоматичного проектування (САПР). ПП САПР доволі складний об'єкт для тестування. Автоматизоване тестування САПР і досі зводиться до окремих тестів, які розробляють тестувальники з урахуванням коду ПП. Якщо САПР є пропрієтарною (proprietary software), то код такого ПП відповідно є власністю компанії та не може бути отриманим.

Це призводить до недостатності тестової інформації САПР і викликає певні труднощі щодо дослідження та розробки теоретичних основ тестування САПР.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Останні дослідження стосовно тестування ПП тісно пов'язані з публікаціями, у яких дослідники здійснюють аналіз даних для розроблення нових способів тестування на різних етапах розробки та використання ПП. Такі дослідники як: Говорущенко Т.О. [2–5], Троян А.М., Моденов Ю.Б. [6], P.D.D. Dominic and Handaru Jati [7], Ісаков, О.С. [8], Мактрейгор Д. [9], Канер С. [10] та інші чітко визначили необхідність отримання даних процесу тестування ПП для аналізу та дослідження.

Тестування є важливим етапом життєвого циклу виробництва ПП [8]. Тестування починають із збору інформації та формуванню вимог щодо ПП. Характеристики специфікації вимог до ПП значною мірою визначаються характеристиками вхідної інформації. У роботі [2] автори виконують аналіз вимог до сучасних ПП. Якщо вхідна інформація є недостатньою, або ж вона є неточною, неоднозначною чи суперечливою, то існує висока імовірність, що усі ці недоліки проявляться і у специфікації вимог до ПП. Така (не якісна) специфікація вимог може негативно вплинути на успішність тестування.

Найбільш поширеним тестування є не автоматизоване тестування, де перевірку роботи програм здійснюють за результатами їх виконання з використанням спеціально підібраних вихідних даних, які називають тестами. Не автоматизоване тестування програм роблять шляхом опрацювання тестових даних і порівняння отриманих результатів з очікуваними. За дослідженнями авторів [6] автоматизоване тестування для забезпечення якості програмних продуктів неможливо здійснити без попереднього аналізу ручного тестування, що дозволяє визначити доцільність автоматизації та можливість її використання у тому чи іншому випадку. Часто для одержання певних даних, необхідно звернутися до зовнішніх сервісів із запитом на виконання операцій та відобразити їхні результати у протоколі тестування інформаційної бази. На думку авторів [8] вибір відповідних елементів програми, для автоматизації тестування, буде визначним для тестування. Проте, це можливо здійснити за умов наявності повної інформації стосовно процесу тестування ПП. До повної інформації необхідно віднести відомості про внутрішню структуру і код ПП. Оскільки без цього неможливо використати тестування методом White Box [8–10].

Авторами К. Fatima, N.Z. Wawany, M. Bukhari [11] проведено оцінку зручності використання, доступності та вразливості пакистанських банківських веб-сайтів у порівнянні з міжнародними. Однак, автори зазначають, що жоден із сайтів не пройшов тести із 100% результатом.

В останні роки було розроблено певну кількість веб-сайтів реєстрації вакцин проти COVID-19. Дослідники Sarah Alismai та Wallace Chipidza провели автоматизований аналіз веб-доступності 54-х офіційних сайтів (США) [12]. Результати показали неоптимальну відповідність інструкціям WCAG 2.0 і 2.1, що визначено за допомогою інструментів AChecker, WAVE і SortSite.

У праці [13] автори Agrawal G., Kumar D. і Singh M. провели аналіз 164-х державних веб-сайтів, які призначені для надання електронних послуг громадянам країни (Індія). Для проведення дослідження використовувались онлайн-інструменти TAW, MobileOK. Результати показали, що більшість розглянутих веб-сайтів мали низьку зручність використання. Це пов'язано із неможливістю повного доступу командою тестувальників до коду сайту. Така ж ситуація спостерігається і при тестуванні програм САПР.

Більшість сучасних пропрієтарних САПР розробляють з урахуванням інтересів розробників та замовників в умовах суворої конфіденційності. Тому, отримати інформацію стосовно тестування такого ПП практично неможливо. Проте, відсутність даних стосовно тестової інформації пропрієтарних САПР ускладнює дослідження та розробку практичних рекомендацій для тестування. Однак, існує доволі велика група відкритих (вільних) САПР.

Доступ до інформації стосовно розробки та тестування ПП можна здійснити, використовуючи інтернет-джерела. Проте, розробники таких САПР використовують різні способи зберігання інформації, контролю версій, тощо. Це значно ускладнює пошук і аналіз необхідних даних.

### **Формулювання невирішеної раніше проблеми**

Теоретичні основи автоматизованого тестування САПР і досі є не до кінця вирішеною проблемою. Тому, отримання і аналітичний огляд тестової інформації є важливими для дослідження та розробки теоретичних основ тестування САПР. Отримані відомості дозволять провести аналіз способів тестування ПП, запропонувати шляхи їх удосконалення та розробити автоматизовані тести, які можна впровадити у процес створення та експлуатації ПП.

### Виклад основного матеріалу

Класичним рішенням для швейного виробництва (ШВ) є система автоматизованого проектування (САПР). Проте, не всі САПР у повній мірі охоплюють потреби створення викрійок, адже у своїй більшості вони не дозволяють проектувати параметричні креслення. За останні десять років ситуація мало змінилася. Рівень комп'ютеризації середніх та малих ШВ і досі є незадовільним. Навіть ті підприємства, які намагаються впровадити у виробничий процес САПР та використовують пробний (ознайомчий) період, в результаті відмовляються від використання програмного забезпечення і виконують креслення в ручному режимі. В першу чергу, це пов'язано із недостатньою базою креслень (оскільки заповнення кресленнями здійснює саме підприємство, орієнтуючись на власний асортимент). Тому, лише підприємства, у яких відсоток сумісності промислових рішень та асортименту, що існує, перевищує 55% використовують ПП ШВ. Тільки доволі потужне підприємство може дозволити собі мати периферійне обладнання, яке використовують в швейній промисловості (плотери, графопобудовники, комплекси для настилення та крою, тощо). Відсутність такого обладнання робить використання ПП ШВ недоцільним. Користувач в такому випадку не має змоги відчутти доцільність використання САПР. Також стримує розповсюдження ПП ШВ відсутність висококваліфікованих фахівців.

Відомо, що більшість ПП ШВ є пропрієтарні (закриті). Такі ПП ШВ є платними і доволі дорогавартісними, а саме тому, не доступними широкому загалу. Наприклад, Lectra systems (Франція), Gerber Garment Technology (США), Investronika (Іспанія), Assyst GmbH (Німеччина), Wild Ginger Software (США), тощо. Не кожне середнє, а тим паче мале підприємство може собі дозволити їх використання [14]. Обмежене використання таких ПП ШВ (лише на великих підприємствах) призводить до недоступності потрібної технічної інформації. Оскільки орієнтація на використання широкодоступних ресурсів (реклама ПП ШВ, технічний опис роботи з САПР, зворотний зв'язок, тощо) не мають сенсу для представників середнього та малого бізнесу. Окрім того, більшість з відомих рішень підтримують тільки операційну систему Windows (тобто, у користувача відсутня можливість вибору іншої операційної системи).

Поряд з пропрієтарними, існують відкриті (вільні) ПП ШВ, які були створені як альтернатива (на протипагу платним ПП). Наприклад, PatternViewer (США), Валентина (Україна), тощо. Саме тому, у більшості випадків такі підприємства використовують безкоштовні графічні редактори або САПР, що є не адаптованими для потреб ШВ. Підприємству потрібно докласти чимало зусиль для адаптації ПП під власний асортимент. Окрім того, доволі важко використовувати такі ПП в індивідуальному виробництві (будинки побуту, весільні салони, майстерні для індивідуального виготовлення одягу, тощо).

Після ознайомлення і аналізу вільного ПП ШВ, для отримання тестової інформації САПР було обрано ПП «Валентина» (рис 1).

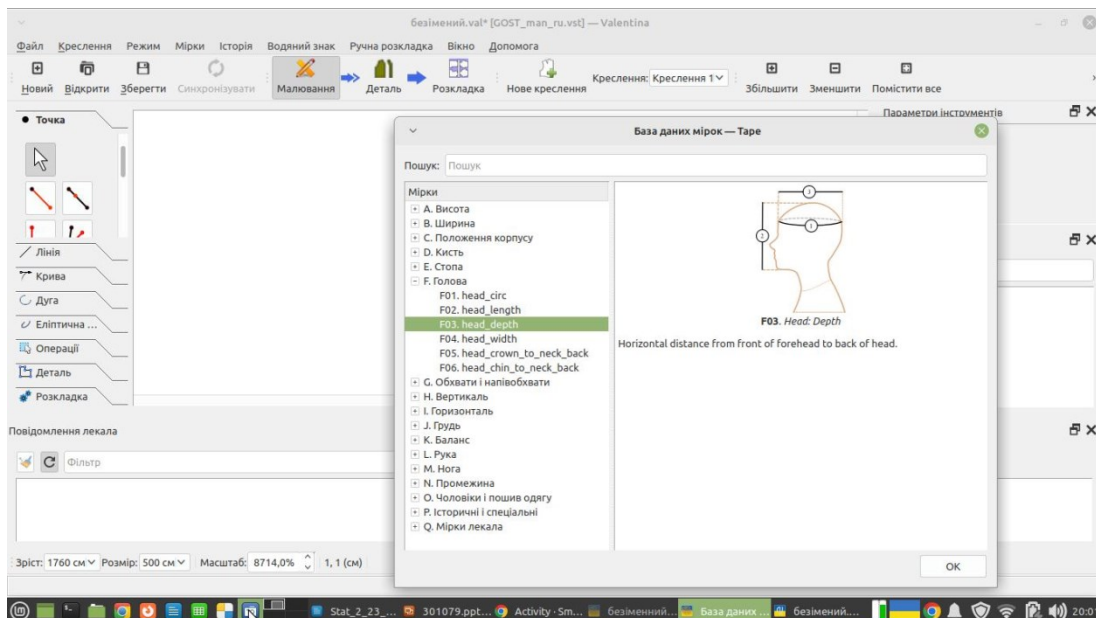


Рис. 1. Екранний образ ПП «Валентина»

Аналітичний огляд тестової інформації неможливо зробити без всебічного ознайомлення з обраним ПП.

Для створення і поширення ПП «Валентина» розробниками була обрана модель відкритого програмного забезпечення, що дозволило широко адаптувати програму для багатьох сучасних платформ (він є доступним не тільки для Windows, а також і для Mac OS X і Linux) [15].

ПП «Валентина» не є традиційним програмним рішенням для ШВ, так як в ній реалізована ідея роботи з параметричними викрійками. ПП «Валентина» — це кросплатформна програма для виготовлення викрійок та лекал деталей моделей одягу. Цей ПП дозволяє створювати шаблони викрійок, використовуючи стандартні таблиці розмірів, або індивідуальний набір мірок (рис 1). ПП «Валентина» поєднує нові

технології з традиційними методами для створення викрійок та лекал деталей моделей одягу [15].

Оскільки ПП «Валентина» є відкритим, то прямий доступ до нього можна отримати на GitLab [16]. Розробники ПП «Валентина» використовують GitLab, як хмарну платформу для хостингу проєкту та спільної розробки. У зв'язку з оновленням ПП «Валентина» необхідний контроль версій здійснюють, використовуючи популярну систему Git [17]. Крім того, вони використовують GitLab, як повноцінну соціальну мережу для розробників. На GitLab ПП «Валентина» розташовані open-source-проєкти. Кожен користувач GitLab ПП «Валентина» може, за згодою розробників, взяти участь у проєкті. Для цього можна ознайомитися з програмними рішеннями проєкту, розмістити своє портфоліо з прикладами коду, щоб додати посилання до резюме. Окрім того, на GitLab ПП «Валентина» можна отримати корисні посилання та пояснення щодо використання ПП. Також дистрибутив можна отримати на сайті програми [15] та з інших інтернет-джерел (табл. 1).

Таблиця 1

#### Перелік інтернет-джерел дистрибутива ПП «Валентина»

№	Ресурс	Адреса
1	Офіційний сайт	<a href="https://smart-pattern.com.ua/uk/valentina/download/">https://smart-pattern.com.ua/uk/valentina/download/</a>
2	Попередній репозиторій	<a href="https://bitbucket.org/dismine/valentina/src/master/">https://bitbucket.org/dismine/valentina/src/master/</a>
3	Основний репозиторій	<a href="https://gitlab.com/smart-pattern/valentina">https://gitlab.com/smart-pattern/valentina</a>
4	Репозиторій GitHub	<a href="https://github.com/dismine/valentina">https://github.com/dismine/valentina</a>
5	Репозиторій codeship	<a href="https://app.codeship.com/projects/383590">https://app.codeship.com/projects/383590</a>
6	Репозиторій Cirrus CI	<a href="https://cirrus-ci.com/github/dismine/valentina">https://cirrus-ci.com/github/dismine/valentina</a>
7	Репозиторій LaunchPad	<a href="https://code.launchpad.net/~dismine">https://code.launchpad.net/~dismine</a>
8	Репозиторій AppVeyor	<a href="https://ci.appveyor.com/project/dismine /valentina">https://ci.appveyor.com/project/dismine /valentina</a>

ПП «Валентина» дозволено використовувати без спеціалізованого дорогого периферійного обладнання, оскільки будь-яке креслення можливо роздрукувати на звичайному принтері.

Для інсталяції ПП «Валентина» доступними є стабільна та тестова версії:

- стабільна має парний номер;
- тестова має непарний номер.

Стабільною версією ПП «Валентина» вважається після тестового періоду, під час якого здійснюють перевірку роботи програми. На офіційному сайті програми доступними для завантаження є стабільна версія v0.6.1 та остання тестова версія v0.7.52 [18]. Для використання на виробництві рекомендовано використовувати стабільну версію v0.6.1.

Слід зазначити, що ПП «Валентина» також додана в репозиторій деяких дистрибутивів Linux. Наприклад, репозиторій Ubuntu вміщує наступні версії [19]:

- focal (20.04LTS) v0.6.1~dfsg-9: amd64 arm64 ppc64el s390x;
- jammy (22.04LTS) v0.7.49~dfsg-2: amd64 arm64 armhf ppc64el s390x;
- kinetic (22.10) v0.7.51~dfsg-1: amd64 arm64 armhf ppc64el s390x;
- lunar (23.04) v0.7.52~dfsg-1: amd64 arm64 armhf ppc64el s390x.

З наведеного списку бачимо, що залежно від версії операційної системи, змінюється версія ПП «Валентина». Проте, завжди існує можливість інсталяції останньої версії з сайту розробника.

Різниця між запропонованими версіями доволі суттєва, оскільки розробники постійно удосконалюють і розширяють можливості ПП «Валентина». Саме тому, ПП «Валентина» v0.7.52 (у порівнянні з v0.6.1) зазнала значних змін: були додані нові корисні функції та інструменти. З повним переліком змін можна ознайомитись у файлі ChangeLog.txt [20]. Цей файл дозволяє проаналізувати, які зміни були внесені в ПП «Валентина», починаючи з версій – v0.2.0, яка є першим публічним випуском і була представлена користувачу у 2013 році.

Для прикладу розглянемо, які зміни здійснені у тестовій версії v0.7.52 ПП «Валентина» (у порівнянні із попередньою версією v0.7.51):

- локалізація ги оголошена не сумісною. Якщо у налаштуваннях вказана ги локаль, то програма буде аварійно завершуватися;
- удосконалено попередження при розрахунках сегментів кривих. На додачу до імені кривої, додано ім'я точки, яку шукають;
- додаток Таре. Пункт «Додати Роздільник» додано до меню;
- додаток Таре. Пункт меню «Експортувати з наявних ...» тепер підтримує також експорт із багаторозмірних таблиць;
- при додаванні функції в Майстрі формул разом з іменем будуть додаватися дужки та знак розділовача аргументів, якщо такий потрібен;
- додано можливість вказувати тип одиниць виміру для значення прибавки;
- при експорті даних розкладки в додатку Puzzle тепер будуть враховуватися значення налаштувань «Примусове перевертання» та «Заборонити відзеркалення». Відповідні налаштування будуть автоматично застосовані до деталі без можливості відключення;
- запис про останні обрані значення вимірів багаторозмірної таблиці тепер зберігаються у файлі викрійки, що дозволяє обирати їх при наступному відкритті викрійки;
- візуалізацію створення декількох інструментів покращено, що дозволить в більш інтерактивному

режимі створювати об'єкти;

- об'єкт «Еліптична дуга» тепер підтримує параметр апроксимації кривої;
- розмір діалогу інструменту «Складна крива» тепер можна змінювати;
- удосконалено функцію «Показати у файловому менеджері» для системи Linux. Тепер відкривається не тільки директорія із файлом, але й сам файл виділяється.

Зрозуміло, що при розробці нових функцій, у програмі можуть виникнути різного роду помилки, до яких можна віднести:

- неможливість виконати одну з функцій;
- неможливість завершити функцію;
- поява на екрані символів або примітивів програми, що не відповідають дії;
- мимовільне закриття вікна програми;
- закриття вікна програми без попереджень про збереження даних;
- інші помилки.

Тобто, при використанні тестової версії можливо отримати помилки разом з новими можливостями останньої тестової версії. Проте, для тестування потрібно використовувати саме останню версію, оскільки вона ймовірно містить найбільшу кількість помилок, які необхідно виявити. При ознайомленні з командою розробника виявлено, що кількість офіційно закріплених тестувальників рівна п'яти. Така їх кількість може забезпечити тестування змін, які були впроваджені. Проте, більш повну перевірку роботи ПП «Валентина» можуть зробити лише користувачі [21]. Досвідчені фахівці, використовуючи нестабільні тестові версії і знаходячи помилки, допомагають розвитку ПП «Валентина». Зв'язок може бути здійснено з використанням GitLab та інших способів комунікації, запропонованих розробником, таблиця 2.

Таблиця 2

Перелік способів комунікації ПП «Валентина»

Ресурс	Адреса
Telegram	<a href="https://t.me/valentina_project">https://t.me/valentina_project</a>
Email	<a href="mailto:contact@smart-pattern.com.ua">contact@smart-pattern.com.ua</a>
Skype	<a href="skype:dismi?chat">skype:dismi?chat</a>
Viber	<a href="viber://chat?number=0380983467136">viber://chat?number=0380983467136</a>
WhatsApp	<a href="https://wa.me/0380983467136">https://wa.me/0380983467136</a>
Threema	<a href="https://threema.id/WVDPXTJC?text=">https://threema.id/WVDPXTJC?text=</a>
GitLab	<a href="https://gitlab.com/smart-pattern/valentina">https://gitlab.com/smart-pattern/valentina</a>

Окрім того, можна повідомити про помилку, використавши пункт головного меню – «Допомога», а далі підпункт – «Повідомити про помилку».

Як було вказано раніше, нововведення передбачають тестування програмного продукту для виявлення помилок його роботи. Після оновлення ПП з версії v0.7.51 до v0.7.52 тестувальники виявили ряд помилок, а саме:

- некоректне оновлення деталі в додатку «Пазл» при повторному імпорті необроблених даних;
- візуалізації інструменту «Точка перетину лінії та осі»;
- падіння ПП «Валентина» після скасування інструменту;
- зчитування імені деталі в додатку «Пазл»;
- попередження при розрахунку сегмента віддзеркаленої дуги;
- некоректну валідацію основного контуру. Помилково позитивне розпізнавання подвійної кривої;
- налаштування початкових параметрів вимірів багаторозмірної таблиці;
- оновлення міток вимірів багаторозмірної таблиці в додатку ПП «Валентина»;
- налаштування пунктів меню для Mac OS;
- проблему із сегментуванням кривої. При деяких конфігураціях кривої розрахунок відбувався не коректно;
- експорт PDF плиткою для випадків, коли принтер не підтримує роздільну здатність 96 пікселів на дюйм;
- розрахунок еліптичної дуги;
- не коректну генерацію прибавки на шов;

Після виявлення і виправлення перерахованих помилок ПП «Валентина» була представлена користувачам (тестова версія v0.7.52).

Раніше розробники використовували Bitbucket для зберігання файлів проєкту. Проте, останнє звернення було 15.10.2022 року [22]. Разом із тим, Bitbucket і досі містить цікаву інформацію стосовно тестування стабільної версії v0.6.1, (рис. 2).

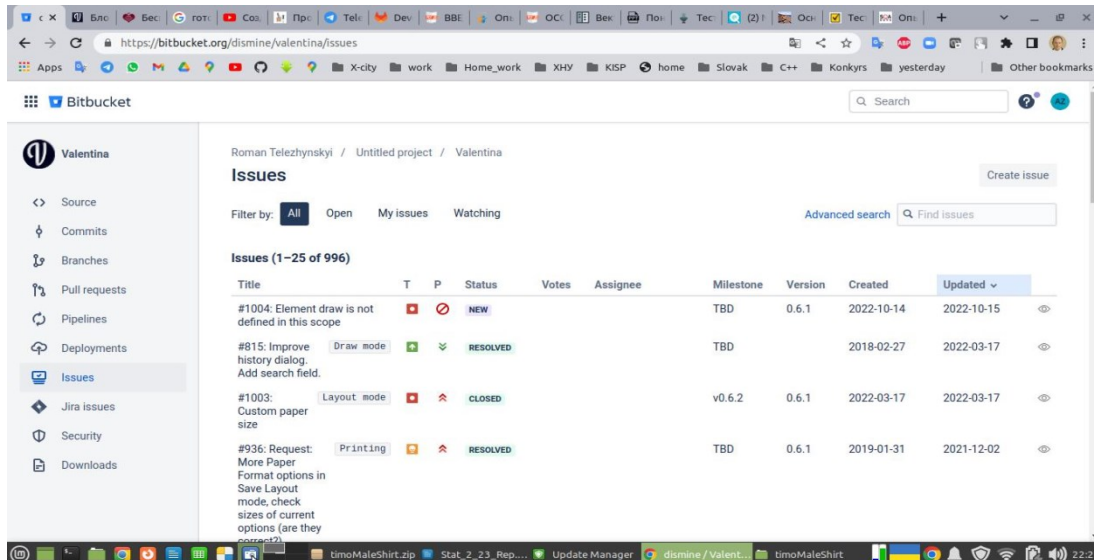


Рис. 2. Екранний образ Bitbucket ПП «Валентина» з інформацією стосовно тестування

Потім проєкт було розташовано на GitLab ПП «Валентина». Саме тут на Boards подано останню інформацію стосовно тестування (рис 3).

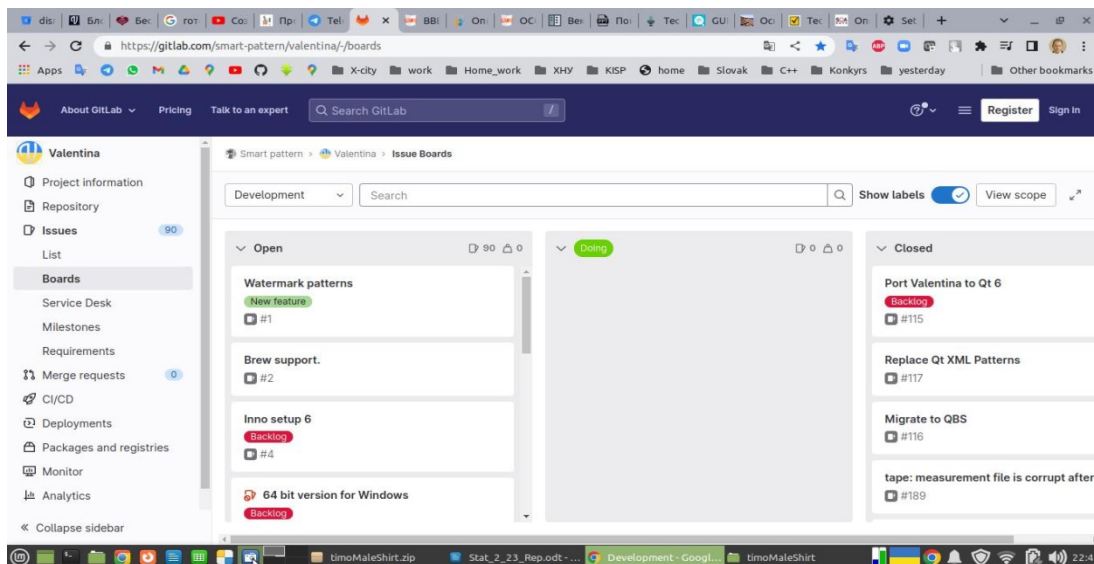


Рис. 3. Екранний образ Github ПП «Валентина» з інформацією стосовно тестування

Використовуючи репозиторій ПП «Валентина», Bitbucket, GitLab та інші інтернет-ресурси, можна отримати необхідну інформацію стосовно тестування та покращення ПП.

Така інформація повинна містити все, що відноситься до зовнішньої специфікації. Тобто, опис зовнішніх функцій та очікуваної поведінки ПП з погляду зовнішнього по відношенню до нього користувача. Перелік пунктів зовнішньої специфікації, необхідної для тестування ПП «Валентина» наведено у таблиці 3.

Таблиця 3

### Перелік пунктів зовнішньої специфікації, необхідної для тестування ПП «Валентина»

№	Пункти зовнішньої специфікації ПП «Валентина»	Наявність інформації
1	Назва та короткий опис ПП	присутня
2	Функціональна схема ПП	присутня
3	Організація діалогу ПП з користувачем	присутня
4	Опис меню, підменю, дій функціональних кнопок	присутня
5	Усі екранні форми або протокольні екранні повідомлення	присутня
6	Повідомлення для користувача (під час роботи з ПП) та відповіді на них	присутня
7	Повідомлення про помилки	присутня
8	Підказки користувачу та організація допомоги	присутня
9	Структура та організація баз даних ПП	присутня
10	Опис підготовки вхідних даних ПП	присутня
11	Вихідні друкарські форми ПП	присутня
12	Інші зовнішні сполучення ПП	присутня

Зовнішня специфікація містить опис лише зовнішніх аспектів ПП «Валентина» і не пов'язана з його внутрішньою структурою і кодом ПП. Окрім зовнішньої специфікації, важливим елементом тестових даних є сукупність усіх елементів інформації, які були створені у процесі конструювання ПП «Валентина». Мінімальний перелік даних для тестування повинен включати наступні базові елементи, таблиця 4.

Таблиця 4

**Мінімальний перелік даних, необхідних для тестування ПП «Валентина»**

№	Пункти переліку даних, необхідних для тестування ПП «Валентина»	Наявність інформації
1	Лістинги вихідних текстів ПП	присутня
2	Дистрибутив ПП	присутня
3	Посібники з роботи та інсталяції	присутня
4	Посібник користувача з налаштування	присутня
5	Документи супроводу, запити супроводу, стандарти та методики конструювання	присутня
6	Зовнішня специфікація	присутня
7	План та методики тестування	присутня
8	Варіанти тестів та отримані результати	присутня
9	Звіти про проблеми ПП	присутня
10	Звіти про конструкторські зміни	присутня

З таблиці 4 видно, що дані для тестування включають у себе велику кількість інформації. Проте, наявність усіх перерахованих відомостей не гарантує, що усі елементи переліку вірно розроблені, враховані і досить деталізовані для підтримки ПП в повному життєвому циклі. Розробник не може передбачити, як замовник реально буде використовувати ПП. Тому, для виявлення помилок (які здатен знайти тільки кінцевий користувач) при розробці ПП «Валентина» використовують процеси, Alpha Testing і Beta Testing.

**Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі**

Попередній огляд показав, що не усі існуючі САПР в повній мірі охоплюють потреби створення викрійок, адже в більшості своїй вони не дозволяють проектувати параметричні креслення. Поряд з пропріетарними, існують відкриті (вільні) ПП ШВ. Підприємству необхідно докладати багато зусиль для адаптації таких ПП під свій асортимент. Отримати необхідні дані для тестування САПР можна:

- у складі команди розробників (для пропріетарного та відкритого ПП);
- використавши інтернет-джерела (для відкритого ПП).

Після ознайомлення і аналізу вільного ПП ШВ для розробки структурованого підходу для отримання тестової інформації САПР було обрано ПП «Валентина».

Аналітичний огляд інформації для тестування відкритої параметричної САПР «Валентина» показав, що кількість основних інтернет-джерел рівна восьми. В процесі розробки дані постійно змінюються, тому найбільш повну інформацію містить репозиторій, в якому відбувається робота команди розробника. Розробник піклується про якість своєї продукції, оскільки процес тестування не припиняється. Окрім того, розробник чітко організував зворотній зв'язок з користувачами і доволі швидко реагує на помилки і побажання, здійснює якісний супровід ПП та має усю необхідну супроводжуючу документацію.

Проведений аналітичний огляд інформації для тестування показав, що для якісного тестування САПР недостатньо мати лише зовнішню специфікацію, яка включає у себе 12-ть пунктів. Мінімальний перелік даних вміщує 10-ть пунктів, основними з яких є: лістинги вихідних текстів ПП, зовнішня специфікація, план та методики тестування, варіанти тестів та отримані результати. При цьому, виконати тестування функціоналу ПП, маючи лише інформацію згідно зовнішньої специфікації, неможливо. Це пов'язано із тим, що тестувальник може не знати про усі функціональні можливості роботи ПП (якщо він не має доступу до коду ПП). Інформація про тестування, яке вже було проведено, потрібна для того, щоб не повторювати роботу та розробити шляхи удосконалення тестів. Окрім того, потрібно знати, які ПП були використані для тестування та які тести проводилися в ручному режимі, а які в автоматичному.

Отримана інформація для тестування відкритої параметричної САПР «Валентина» в подальшому може бути використана для проведення аналізу способів тестування ПП та їх покращення, а також для розробки автоматизованих тестів, які можна впровадити у процеси створення та експлуатації ПП.

**Література**

1. Software Quality Issues in the U.S. Cost an Estimated \$2.41 Trillion in 2022. URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/software-quality-issues-in-the-us-cost-an-estimated-2-41-trillion-in-2022--301695684.html>.

2. Говорущенко Т.О., Боднар М.А., Кушнір В.О. Сучасні проблеми формування та аналізу вимог до програмного забезпечення. Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». – Хмельницький, 2019. – С. 45-53. ISSN2219-9365. URL: <http://78.152.183.36/bitstream/123456789/8263/1/10.pdf>.

3. Hovorushchenko, T. & Popov, P.T. (2021). Method of developing the defect-free medical software by establishing the presence of residual defects. Proceedings of the 4th International Conference on Informatics & Data-Driven Medicine, 3038, pp. 11-21. ISSN 1613-0073. URL: <https://openaccess.city.ac.uk/id/eprint/27370/1/>.
4. I. Lopatto, T. Hovorushchenko, P. Popov and O. Pavlova, «Intelligent Multi-Agent System for Improving the Quality of Software by Taking into Account the Information of the Subject Area at All Stages of its Development.» 2021 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), Cracow, Poland, 2021, pp. 548-551, doi: 10.1109/IDAACS53288.2021.9660866.
5. T. Hovorushchenko and O. Pavlova, «Multi-Agent Technology for Assessing the Availability of Information at the Software Development Initial Stages.» 2021 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), LVIV, Ukraine, 2021, pp. 353-356, doi: 10.1109/CSIT52700.2021.9648832.
6. Троян А.М., Моденов Ю.Б. Доцільність автоматизованого тестування для забезпечення якості програмних продуктів. Проблеми інформатизації та управління. Том 1, №57-58. 2017. – С. 86-89. URL: <https://jrnل.nau.edu.ua/index.php/PIU/article/view/12798>.
7. P.D.D. Dominic and Handaru Jati. A comparison of Asian airlines websites quality: using a non-parametric test. International Journal of Business Innovation and Research. Vol. 5, No.5. 2011. – Pp. 599–623. URL: <https://doi.org/10.1504/IJBIR.2011.042451>.
8. Ісаков О.С. Дослідження моделей процесів тестування зручності використання програмних продуктів / О.С. Ісаков, О.Ю. Чердніченко, В.В. Мозгін, О.В. Янголенко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами: зб. наук. пр. – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – №2 (1278). – С. 73-80.
9. Allison R., Hayes C., McNulty CAM, Young V. A Comprehensive Framework to Evaluate Websites: Literature Review and Development of GoodWeb. JMIR Form Res. Vol. 3, Issue 4, (2019), pp: e14372. URL: doi:10.2196/14372.
10. Канер С., Фолк Д., Нгуен Е.К. Тестування програмного забезпечення. – К.: ДіаСофт, 2001. – 544 с.
11. K. Fatima, N. Z. Bawany and M. Bukhari, «Usability and Accessibility Evaluation of Banking Websites.» 2020 International Conference on Advanced Computer Science and Information Systems (ICACSIS), Depok, Indonesia, 2020, pp. 247-256, doi: 10.1109/ICACSIS51025.2020.9263083.
12. Sarah Alismail, Wallace Chipidza. Accessibility evaluation of COVID-19 vaccine registration websites across the United States. Journal of the American Medical Informatics Association, Volume 28, Issue 9, September 2021, Pp. 1990–1995, <https://doi.org/10.1093/jamia/ocab105>.
13. Agrawal, G., Kumar, D. & Singh, M. Assessing the usability, accessibility, and mobile readiness of e-government websites: a case study in India. Univ Access Inf Soc 21, pp. 737–748 (2022). URL: <https://doi.org/10.1007/s10209-021-00800-8>.
14. Огляд програм для моделювання одягу. URL: <https://education.in.ua/overview-of-programs-for-modeling-clothes/>.
15. Smart pattern. Валентина. Про проект. URL: <https://smart-pattern.com.ua/uk/valentina/about/>.
16. Valentina. GitLab. URL: <https://gitlab.com/smart-pattern/valentina>.
17. Version control with GIT. URL: <https://www.atlassian.com/git/tutorials/what-is-git>.
18. Smart pattern. Валентина. Історія версій. URL: <https://smart-pattern.com.ua/uk/valentina/history/>.
19. Ubuntu Repository Packages. URL: <https://packages.ubuntu.com/search?keywords=valentina&searchon=names%20&suite=all&section=all>.
20. Change Log. URL: <https://gitlab.com/smart-pattern/valentina/-/blob/develop/ChangeLog.txt>.
21. Revolutionizing garment-making in Italy with Valentina. URL: <https://librearts.org/2021/01/showcase-valentina-in-lavoro-tailor-shop/>.
22. Bitbucket. Valentina. URL: <https://bitbucket.org/dismine/valentina/src/master/>.

#### References

1. Economic-mathematical tools for building up a project team in the system of company's knowledge management / I. Chaikovska, T. Fasolko, L. Vaganova, O. Barabash // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2017. – № 3/3 (87). – P. 29–37.
2. Hovorushchenko T.O., Bodnar M.A., Kushnir V.O. Modern problems of the formation and analysis of software requirements. International Scientific and Technical Journal «Measuring and Computing Techniques in Technological Processes». – Khmelnytskyi, 2019. – P. 45–53. ISSN2219-9365. URL: <http://78.152.183.36/bitstream/123456789/8263/1/10.pdf>.
3. Hovorushchenko, T. & Popov, P.T. (2021). Method of developing the defect-free medical software by establishing the presence of residual defects. Proceedings of the 4th International Conference on Informatics & Data-Driven Medicine, 3038, pp. 11-21. ISSN 1613-0073. URL: <https://openaccess.city.ac.uk/id/eprint/27370/1/>.
4. I. Lopatto, T. Hovorushchenko, P. Popov and O. Pavlova, «Intelligent Multi-Agent System for Improving the Quality of Software by Taking into Account the Information of the Subject Area at All Stages of its Development.» 2021 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), Cracow, Poland, 2021, pp. 548–551, doi: 10.1109/IDAACS53288.2021.9660866.
5. T. Hovorushchenko and O. Pavlova, «Multi-Agent Technology for Assessing the Availability of Information at the Software Development Initial Stages.» 2021 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), LVIV, Ukraine, 2021, pp. 353–356, doi: 10.1109/CSIT52700.2021.9648832.

6. Troyan A.M., Modenov Y.B. The feasibility of automated testing to ensure the quality of software products. Problems of informatization and management. Volume 1, No.57-58. 2017. – P. 86–89. URL: <https://jrnlnau.edu.ua/index.php/PIU/article/view/12798>.
7. P.D.D. Dominic and Handaru Jati. A comparison of Asian airlines websites quality: using a non-parametric test. International Journal of Business Innovation and Research. Vol. 5, No.5. 2011. – Pp. 599–623. URL: <https://doi.org/10.1504/IJBIR.2011.042451>.
8. Isakov O.S. Study of models of software usability testing processes / O.S. Isakov, O.Yu. Cherednichenko, V.V. Mozgin, O.V. Yangolenko // Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Strategic management, management of portfolios, programs and projects: coll. of science pr. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2018. – No.2 (1278). – P. 73–80.
9. Allison R., Hayes C., McNulty CAM, Young V. A Comprehensive Framework to Evaluate Websites: Literature Review and Development of GoodWeb. JMIR Form Res. Vol. 3, Issue 4, (2019), pp: e14372. URL: [doi:10.2196/14372](https://doi.org/10.2196/14372).
10. Kaner S., Faulk D., Nguyen E.K. Software testing. – K.: DiaSoft, 2001. – 544 p.
11. K. Fatima, N. Z. Bawany and M. Bukhari, «Usability and Accessibility Evaluation of Banking Websites,» 2020 International Conference on Advanced Computer Science and Information Systems (ICACSIS), Depok, Indonesia, 2020, pp. 247-256, doi: 10.1109/ICACSIS51025.2020.9263083.
12. Sarah Alismail, Wallace Chipidza. Accessibility evaluation of COVID-19 vaccine registration websites across the United States. Journal of the American Medical Informatics Association, Volume 28, Issue 9, September 2021, Pp. 1990–1995, <https://doi.org/10.1093/jamia/ocab105>.
13. Agrawal, G., Kumar, D. & Singh, M. Assessing the usability, accessibility, and mobile readiness of e-government websites: a case study in India. Univ Access Inf Soc 21, pp. 737–748 (2022). URL: <https://doi.org/10.1007/s10209-021-00800-8>.
14. Overview of clothing modeling programs. URL: <https://education.in.ua/overview-of-programs-for-modeling-clothes/>.
15. Smart pattern. Valentine about the project. URL: <https://smart-pattern.com.ua/uk/valentina/about/>.
16. Valentina. GitLab. URL: <https://gitlab.com/smart-pattern/valentina>.
17. Version control with GIT. URL: <https://www.atlassian.com/git/tutorials/what-is-git>.
18. Smart pattern. Валентина. Історія версій. URL: <https://smart-pattern.com.ua/uk/valentina/history/>.
19. Ubuntu Repository Packages. URL: <https://packages.ubuntu.com/search?keywords=valentina&searchon=names%20&suite=all&section=all>.
20. Change Log. URL: <https://gitlab.com/smart-pattern/valentina/-/blob/develop/ChangeLog.txt>.
21. Revolutionizing garment-making in Italy with Valentina. URL: <https://librearts.org/2021/01/showcase-valentina-in-lavoro-tailor-shop/>.
22. Bitbucket. Valentina. URL: <https://bitbucket.org/dismine/valentina/src/master/>.



<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-289-293>

УДК 687.17:620.193

МИХАЙЛОВА Ніна

Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, м. Северодонецьк

ПРИВАЛА Валерій

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3465-6369>

[pva2012hnu@gmail.com](mailto:pva2012hnu@gmail.com)

ЛУЩЕВСЬКА Олена

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-2689-798X>

[lushchevskao@khmnu.edu.ua](mailto:lushchevskao@khmnu.edu.ua)

## ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР НА МАТЕРІАЛИ ІЗ ПОЛІМЕРНИМ ПОКРИТТЯМ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ В СТАТИЧНИХ УМОВАХ

*В статті проаналізовано результати дослідження впливу низьких температур в діапазоні від  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $-40^{\circ}\text{C}$  на проби матеріалів, які розглядаються як вірогідні для створення ізолюючих костюмів для слюсарів-апаратників хімічних виробництв. Для проведення досліджень авторами публікації розроблена відповідна методологія, яка ґрунтується на використанні оригінальної дослідної установки. За результатами досліджень визначені ті матеріали, які є найбільш стійкими до впливу низьких температур, і які можуть бути рекомендовані для виготовлення ізолюючих захисних костюмів для працівників хімічних виробництв.*

*Ключові слова: ізолюючий костюм, хімічна промисловість, низькі температури, агресивне середовище, статичні умови.*

MIHAILOVA Nina

Eastern National University. Volodymyr Dahl, m. Severodonetsk

PRIVALA Valerii, LUSHCHEVSKA Olena

Khmelnytsky National University

## STUDY OF THE INFLUENCE OF LOW TEMPERATURES ON MATERIALS WITH A SPECIAL PURPOSE POLYMER COATING UNDER STATIC CONDITIONS

*The domestic chemical industry urgently needs the creation of special high-class protective clothing that would allow working in extreme conditions without endangering the life and health of employees. In previous publications, it was determined that the necessary comprehensive protection against the effects of harmful production factors is provided by the creation and use of an insulating suit, which should become a barrier that prevents the penetration, and therefore the influence of mineral acids, alkalis, ammonia, salt solutions, etc. of different concentrations. That is, it is about the creation of special clothing with the required level of protection and preservation of such basic protective indicators as chemical resistance and impermeability of the material while preserving the tightness of the product as a whole.*

*Equipment for preparation and locksmiths for cleaning closed containers for transportation and storage of aggressive environments can simultaneously be exposed not only to mineral acids, alkalis, salt solutions based on them, but also to the remains of liquid ammonia, the evaporation of which occurs when temperatures drop, which leads to primary destruction polymer coating materials for special suits. For example, local destruction in contact with liquid ammonia leads to a sharp cooling (up to  $-340^{\circ}\text{C}$ ) of the contact surface of the material and destruction of the polymer coating, especially during operation (in dynamics), which can lead to a violation of the tightness of the protective product.*

*Since workers have to perform a significant number of work movements while wearing an insulating suit, there was a need to investigate such an indicator as the resistance of materials to both dynamic loads and static conditions at low temperature. The research was conducted on samples of materials with a polymer coating, which belong to the class of special purpose artificial leathers of both foreign and domestic manufacturers.*

*Key words: insulating suit, chemical industry, low temperatures, aggressive environment, static conditions.*

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Як було зазначено раніше [1], на вітчизняних підприємствах хімічної промисловості існують певні проблеми щодо забезпечення робітників якісним спеціальним одягом. Особливо гостро це питання постало у напрямку створення захисного одягу для працівників, виконання професійних обов'язків яких відбувається в умовах активного агресивного середовища. Зокрема це стосується слюсарів-апаратників, які здійснюють технічно-регламентні роботи ємностей для зберігання та транспортування речовин, що входять до комплексу небезпечних і шкідливих виробничих факторів (НШВФ). Особливості умов праці і наліз якості захисного одягу саме для цієї категорії робітників детально розглянуто у попередніх публікаціях [2].

З огляду на це визначено, що необхідний комплексний захист від впливу НШВФ передбачається за рахунок створення і використання ізолюючого костюму (ІК), який має стати бар'єром, що перешкоджає проникненню та впливу розчинів солей, лугів, мінеральних кислот, аміаку, тощо різних концентрацій.

Отже, йдеться про створення спеціального одягу з необхідним рівнем забезпечення та збереження таких основних захисних показників, як хімічна стійкість і непроникність матеріалу при збереженні

герметичності виробу в цілому. Тому питання методології добору матеріалів (або їх пакету) для створення ІК є первинним та актуальним.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні міжнародні розробки періодично наповнюють світовий ринок зразками виробничого захисного одягу для використання в різноманітних шкідливих умовах праці. Закордонні виробники захисного одягу постійно пропонують нові конструктивні і технічні рішення [3, 4, 5, 6, 7], проте переважна їх більшість спрямована на створення захисту тільки від вологи та переохолодження. Що ж стосується комплексного захисту від впливу цілої низки хімічно агресивних речовин, які присутні на хімічних підприємствах, то створення такого одягу вимагає особливих матеріалів і розробки відповідної методології роботи з ними. Крім того, створення нових матеріалів зазначеного функціоналу є тривалим за часом і вимагає значних фінансових витрат.

На підставі проведеного аналізу робіт [8, 9], пропонується провести дослідження, мета яких полягає у експериментальній оцінці проб матеріалів із полімерним одно- або двостороннім покриттям на тканий основі в умовах низьких температур.

Зазначені матеріали є аналогом штучної шкіри і широко використовуються світовими фірмами для виготовлення захисного одягу різного призначення. Зазвичай в таких спеціальних матеріалах за тканию основу використовують текстильне полотно полотняного або саржевого переплетення зі 100% модифікованих поліамідних волокон. Лицьова сторона полотна, залежно від функціонального призначення ІК, може бути покрита полімером з ПВХ (полівінілхлориду), бутилкаучуку або «вітону», а виворотна сторона – з ПВХ або бутилкаучуку, що надає їм певної еластичності [10]. Оскільки еластична штучна шкіра має полімерне покриття, то при виготовленні захисного одягу унеможлиблюється використання деяких видів ниткових швів, а фіксація припусків на шви допускається тільки шляхом настрочування їх припусків з обов'язковою наступною герметизацією. Крім того, деякі матеріали з полімерним покриттям є нестійкими до дії низьких температур, або до перепаду температур за короткий проміжок часу [11, 12].

Необхідність вивчення впливу низьких температур на текстильні матеріали з полімерним покриттям обґрунтована не тільки присутністю в переліку небезпечних і шкідливих виробничих факторів такої речовини як аміак, але й частотою застосування захисних виробів, старінням полімерного покриття з часом та інше. Вплив низьких температур на текстильні матеріали може спричинити появу негативних деформацій, що зумовлює зменшення геометричних характеристик, стійкості до зминання, еластичності та сприяти погіршенню фізико-механічних та захисних показників майбутнього виробу.

Однією із суттєвих причин впливу низьких температур на властивості текстильних матеріалів вважається наявність вологи в їхній структурі. В процесі впливу низьких температур волога (привнесена або хімічно пов'язана) перетворюється на кристалики льоду, які сприяють розвитку в структурі полімеру механічні напруги, що призводять до її розпушення, утворення тріщин, усадки, втрати міцності та інше. Необхідно визначити також, що ступінь впливу низьких температур залежать від природи, ступеня гідрофільності та впорядкованості молекулярної структури як волокон, так і полімерного покриття дослідних матеріалів. Наприклад, експериментально встановлено, що чим вище щільність упаковки макромолекул, тим більшою мірою проявляється розпушувача дія кристаликів льоду, що утворилися під час дії низької температури [13].

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є: вивчення стійкості до низьких температурах в статичних умовах матеріалів, які можуть бути рекомендованими при виготовленні ізолюючих костюмів для слюсарів-апаратників, які здійснюють очищення закритих ємностей для транспортування та зберігання агресивних середовищ. Дані робітники часто працюють із залишками рідкого аміаку, випаровування якого відбувається при зниженні температури, що призводить до першочергового руйнування полімерного покриття матеріалів спеціальних костюмів. Наприклад, локальні руйнування при контакті з рідким аміаком призводять до різкого охолодження (до мінус 34°C) контактної поверхні матеріалу та руйнування полімерного покриття не тільки в процесі роботи (в динаміці), а й в статичних умовах, що може призвести до порушення герметичності захисного виробу. Тому на підставі запропонованої функціонально-логічної схеми вибору та оцінки захисних властивостей спеціальних матеріалів для виготовлення ізолюючого костюма [14], виникла потреба у проведенні зазначених досліджень.

### Викладення основного матеріалу

На основі аналізу існуючих методів оцінки морозостійкості різних матеріалів у статичних умовах [15, 16], розроблено та апробовано новий спосіб вивчення впливу низьких температур на полімерні покриття спеціальних штучних шкір різного асортименту, що застосовуються при виготовленні ізолюючих костюмів.

Сутність запропонованого методу полягає в контролі зміни повітропроникності проби, підданої примусовому заморожуванню при заданій температурі та часу, а також примусовому розморожуванню при заданій температурі (плюсовій) і часу. У зв'язку з цим розроблений спосіб оцінки морозостійкості проб матеріалів з полімерним покриттям у статичних умовах передбачає циклічність випробувань у режимі «заморожування-розморожування», що може спричинити появу дефектів по товщині полімерного покриття.

Критерієм оцінки морозостійкості в статичних умовах випробувань у даному випадку є коефіцієнт морозостійкості ( $K$ ), який визначається як відношення значень повітропроникності «до» та «після» впливу фактору за формулою (1):

$$K = \frac{B_o}{B_1}; \quad (1)$$

де  $B_o$  – вихідна (початкова) величина повітропроникності проби матеріалу,  $\text{дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ;

$B_1$  – повітропроникність після проведення випробування проби матеріалу в режимі «заморожування-розморожування»,  $\text{дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ .

Аналіз запропонованого співвідношення показує, що з рівності абсолютних значень контрольованих показників коефіцієнт морозостійкості дорівнюватиме одиниці, а при збільшенні  $B_1$  його величина буде зменшуватися, наближаючись до нуля. Таким чином, значення коефіцієнта морозостійкості ( $K$ ) є основним критерієм. Вивчення повітропроникності в даному випадку проводилося за допомогою експериментальної установки МПЗ, яка є авторською розробкою вітчизняних вчених-дослідників. Принцип роботи установки МПЗ та алгоритм її використання детально описано в попередніх публікаціях та патентах [17].

Експерименти щодо морозостійкості спеціальних матеріалів у статиці були проведені з пробами спеціальних матеріалів вітчизняного виробництва: ІЗК, ПМБК-Н, ТСК-15, БЦК (табл.1).

Таблиця 1

**Деякі фізико-механічні характеристики спеціальних досліджуваних матеріалів із полімерним покриттям**

Найменування матеріалу	Товщина проби, мм	Поверхнева щільність, $\text{г}/\text{м}^2$	Жорсткість при згині, сН		Розривальне навантаження смужки розміром 50 x 100 мм, Н		Роздиральне навантаження смужки розміром 50 x 100 мм, Н	
			осн.	пітк.	осн.	пітк.	осн.	пітк.
ТСК-15	0,30	420,0	1,9	2,3	552,0	504,0	29,0	27,0
БЦК	0,35	479,0	5,6	3,8	931,0	514,0	43,0	43,0
ПМБК-Н	0,40	563,0	3,9	4,1	539,0	408,0	27,0	22,0
ІЗК	0,50	550,0	9,8	9,8	500,0	500,0	25,0	25,0

Відповідно до запропонованої методики, розмір зразків для проведення досліджень має бути діаметром 100 мм, або він може бути у вигляді квадрата зі стороною 100 мм. Попередньо проведені дослідження показали, що для отримання коректних результатів, що дають можливість робити обґрунтовані висновки стосовно морозостійкості проб у статичних умовах, достатньо вивчити п'ять зразків матеріалу кожного виду. Тобто повторювальність отриманих результатів є стабільною і не перевищують 5% похибки. Час експозиції від 3600 с (1 година) до 18000с (5 годин) з безперервної дії низькотемпературного фактору (мінус  $40^\circ\text{C}$ ) при інтервалі в 3600 с, а розморожування у всіх випадках проводилося при позитивній температурі (+  $70^\circ\text{C}$ ) протягом 1200 с в термошафі. Після охолодження матеріалу в умовах лабораторії проводили вивчення повітропроникності проб за допомогою установки МПЗ.

На підставі проведених експериментів та аналізу отриманих результатів нами встановлено, що проби матеріалу ІЗК протягом усього часу експозиції впливу низької температури (мінус  $40^\circ\text{C}$ ) залишалися морозостійкими, оскільки значення їх повітропроникності залишалося постійним =  $0,1 \text{ дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ , а коефіцієнт морозостійкості  $K=1$  (табл. 2).

Таблиця 2

**Зміна значення повітропроникності та коефіцієнта морозостійкості проб спеціальних матеріалів від часу впливу низької температури (мінус  $40^\circ\text{C}$ ) у статичних умовах**

Час заморожування проби, с	Найменування спеціального матеріалу:							
	ТСК-15		БЦК		ПМБК-Н		ІЗК	
	Повітропроникність, $B_1$ , $\text{дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$	Коефіцієнт морозостійкості, $K$	Повітропроникність, $B_1$ , $\text{дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$	Коефіцієнт морозостійкості, $K$	Повітропроникність, $B_1$ , $\text{дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$	Коефіцієнт морозостійкості, $K$	Повітропроникність, $B_1$ , $\text{дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$	Коефіцієнт морозостійкості, $K$
0	0,13	-	0,19	-	0,27	-	0,10	-
3600	0,13	1,0	0,22	0,86	0,29	0,93	0,10	1,0
7200	0,14	0,93	0,25	0,76	0,30	0,90	0,10	1,0
10800	0,15	0,87	0,29	0,66	0,32	0,84	0,10	1,0
14400	0,17	0,74	0,32	0,59	0,36	0,75	0,10	1,0
18000	0,21	0,61	0,37	0,51	0,43	0,63	0,10	1,0

Щодо інших спеціальних матеріалів, які приймали участь у дослідженні, то слід зазначити, що вплив низької температури та режим випробувань призводить до деструкції полімерного покриття за відсутності деформацій проб. Наприклад, початкове значення повітропроникності проб матеріалу ПМБК-Н дорівнює  $0,27 \text{ дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$  (табл. 2). Після 3600 с випробувань повітропроникність проб збільшилася до  $0,29 \text{ дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ , а

при наступних експериментах її значення збільшилося від  $0,3 \text{ дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$  (при 7200 с) до  $0,43 \text{ дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$  (при 18000 с) при контакті з низькою температурою.

На основі отриманих експериментальних даних побудовано графічну залежність зазначених величин, що відображено на рис.1.

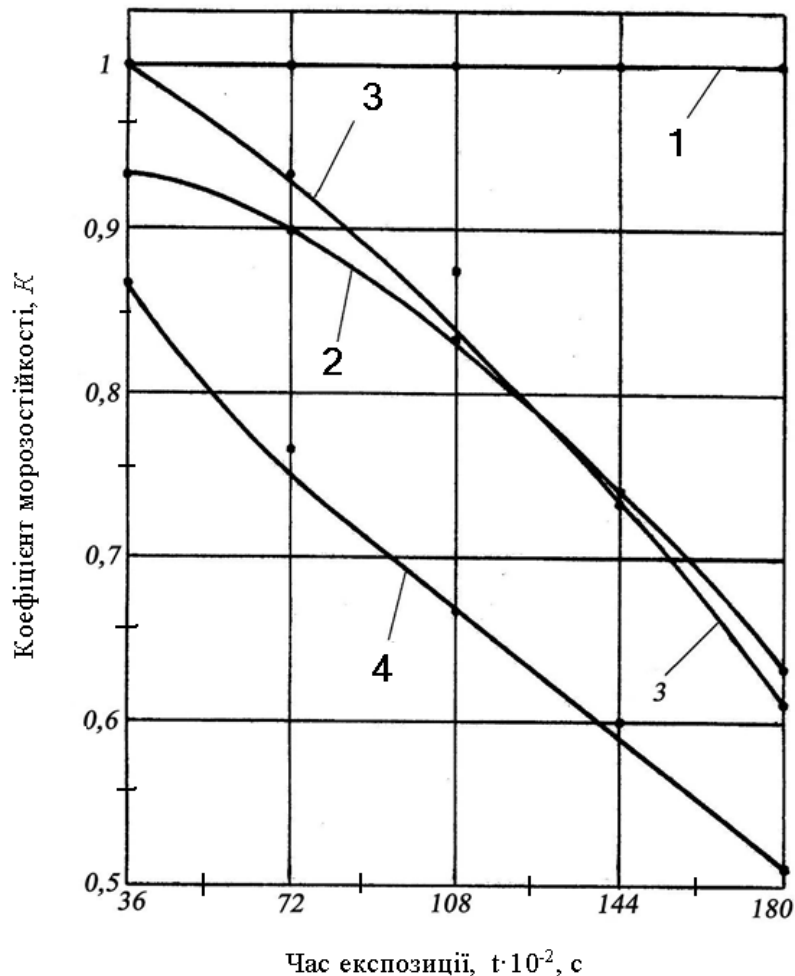


Рис.1. Зміна коефіцієнта морозостійкості залежно від часу впливу низької температури ( $-40^\circ\text{C}$ ) у статичних умовах на проби матеріалів: 1 – ІЗК; 2 – ПМБК-Н; 3 – ТСК-15; 4 – БЦК.

Аналіз кривих залежності зміни повітропроникності проб спеціальних матеріалів від тривалості і кількості циклів «заморожування-розморожування», свідчить про плавну зміну коефіцієнта морозостійкості (рис. 1), при цьому у пробах матеріалу ІЗК контрольований показник залишається незмінним протягом усього часу проведення експерименту (рис. 1, 1).

Однозначні висновки проведених досліджень можна зробити і по відношенню щодо проб спеціальних матеріалів ТСК-15 та БЦК. Так, після першої години експозиції коефіцієнт морозостійкості у статичних умовах матеріалу ТСК-15 залишився на рівні одиниці, а матеріалу БЦК – зменшився та став рівним 0,86 (табл. 2). Отже загальна тенденція є очевидною: збільшення часу експозиції призводить до зменшення значення коефіцієнта морозостійкості в обох пробах зазначених спеціальних матеріалів, проте темп зменшення для ПМБК-Н у часі є більш інтенсивним (рис. 1, 2).

#### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Проведені експерименти та аналіз отриманих результатів дають право стверджувати, що найбільш морозостійким спеціальним матеріалом у статичних умовах низьких температур є спеціальний матеріал ІЗК з полімерним покриттям, який виготовлений на тканинній основі (поліамід 40 % + бавовна 60%) з двостороннім покриттям з каучуку типу СКЕПТ-40.

Крім того, необхідно зазначити, що запропонована методологія проведення досліджень надає можливість ефективного вивчення та оцінювання впливу низьких температур у статичних умовах на захисні властивості спеціальних матеріалів для ізолюючих костюмів.

#### Література

1. Дослідження матеріалів, які використовують для виготовлення захисного одягу робітників-апаратників та слюсарів хімічної промисловості./ Михайлова Н.В., Привала В.О. - Хмельницький, Вісник ХНУ, 2018 р., № 1.- С. 124-129.

2. Аналіз умов праці робітників, які виконують очищення закритих ємностей від хімічно агресивних речовин. / Михайлова Н.В., Привала В.О. - Хмельницький, Вісник ХНУ, 2017 р., № 2 - С.96-103.
3. Ukrprofzashchita [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https:// http://ukrprofzahyst.com.ua/ru/odezhda-khimzaschity](https://http://ukrprofzahyst.com.ua/ru/odezhda-khimzaschity).
4. Types of overalls for protection against chemically aggressive environments [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pcgroup.ru/blog/vidy-specodezhdy-dlya-zaschity-ot-himicheskii-agressivnyh-sred>.
5. Galieva E.R. Analysis of insulating chemical suits as the main factor in the development of a universal technology for the manufacture of special protective clothing / Galieva E.R., Nurullina G.N., Abzaltdinova M.A. // Kazan, Bulletin of the Technological University. - 2016. - No. 8. – pp. 73–74.
6. Overalls and footwear with protection against chemicals [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://forma-odezhda.ru/encyclopedia/specodezhda-i-obuv-s-zacshitoj-ot-himicheskii-vecshestv>
7. Protective suits "Lakeland" [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.raboservice.ru/images/doc/lakeland\\_1.pdf](https://www.raboservice.ru/images/doc/lakeland_1.pdf)
8. ГОСТ 27652-88. Костюмы мужские для защиты от кислот. Технические условия. – Взамен ГОСТ 12.4.036-78; Введ. 01.01.90.: Изд-во стандартов, 1988. – 23 с.
9. Польская норма Р № 72/Р-04639. Определение кислотостойкости тканей. – Варшава, 1972. – 17 с.
10. ГОСТ 17-345-85. Ткани из химических волокон и их смесей с хлопком с кислотоотталкивающей пропиткой для спецодежды. Технические условия. Введ. 01.01.85. – Калинин. ЦНИИШВ. 1984. – 6 с.
11. ГОСТ 20876-75. Кожа искусственная. Метод определения морозостойкости в динамических условиях. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://ohranatruda.ru/ot\\_biblio/standart/181960](https://ohranatruda.ru/ot_biblio/standart/181960)
12. Костюми захисні в Україні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://prom.ua/Kostyummy-izoliruyuschie.html>.
13. Бузов Б.А., Никитин А.В. Исследование материалов для одежды в условиях пониженных температур. – М.: Легпромбытиздат, 1980. – 224 с.
14. Обґрунтування вибору показників для вивчення і оцінки захисних властивостей спеціальних матеріалів ізолюючого костюма працівників хімічної промисловості.- Хмельницький, "Вісник ХНУ", № 5, 2018 р.- С.50-54.
15. ГОСТ 15162-82. Кожа искусственная и синтетическая и пленочные материалы. Методы определения морозостойкости в статических условиях. Взамен ГОСТ 15162-69, ГОСТ 8974-78; Введ. 01.07.83.
16. ГОСТ 28789-90 (ИСО 4675-79). Ткани с резиновым или пластмассовым покрытием. Испытание на изгиб при низкой температуре. Введ. 01.01.92. – 1991. – 6 с.
17. Новий прилад по визначенню повітропроникнення матеріалів для одягу / Привала В.О., Мичко А.А., Михайлова Н.В. – Хмельницький, Вісник ТУП, 2003, № 5 - С.63-65.

#### References

1. Research of materials used for the production of protective clothing of hardware workers and fitters of the chemical industry./ Mykhaylova N.V., Pryvala V.O. - Khmelnytskyi, KHNU Bulletin, 2018, No. 1. - P. 124-129.
2. Analysis of the working conditions of workers who clean closed containers from chemically aggressive substances. / Mykhaylova N.V., Pryvala V.O. - Khmelnytskyi, KHNU Bulletin, 2017, No. 2 - P.96-103.
3. Ukrprofzashchita [Electronic resource]. – Access mode: [https:// http://ukrprofzahyst.com.ua/ru/odezhda-khimzaschity](https://http://ukrprofzahyst.com.ua/ru/odezhda-khimzaschity).
4. Types of overalls for protection against chemically aggressive environments [Electronic resource]. – Access mode: <https://pcgroup.ru/blog/vidy-specodezhdy-dlya-zaschity-ot-himicheskii-agressivnyh-sred>.
5. Galieva E.R. Analysis of insulating chemical suits as the main factor in the development of a universal technology for the manufacture of special protective clothing / Galieva E.R., Nurullina G.N., Abzaltdinova M.A. // Kazan, Bulletin of the Technological University. - 2016. - No. 8. – pp. 73–74.
6. Overalls and footwear with protection against chemicals [Electronic resource]. – Access mode: <https://forma-odezhda.ru/encyclopedia/specodezhda-i-obuv-s-zacshitoj-ot-himicheskii-vecshestv>
7. Protective suits "Lakeland" [Electronic resource]. – Access mode: [https://www.raboservice.ru/images/doc/lakeland\\_1.pdf](https://www.raboservice.ru/images/doc/lakeland_1.pdf)
8. GOST 27652-88. Men's suits for protection against acids. Technical conditions. – Instead of GOST 12.4.036-78; Input 01.01.90.: Standard Publishing House, 1988. - 23 p.
9. Polish norm R No. 72/R-04639. Determination of acid resistance of fabrics. - Warsaw, 1972. - 17 p.
10. GOST 17-345-85. Fabrics from chemical fibers and their mixtures with cotton with acid-repellent impregnation for workwear. Technical conditions. Input 01.01.85. - Kalinin. TsNIISHV. 1984. - 6 p.
11. GOST 20876-75. Artificial leather. The method of determining frost resistance in dynamic conditions. [Electronic resource]. – Access mode: [https://ohranatruda.ru/ot\\_biblio/standart/181960](https://ohranatruda.ru/ot_biblio/standart/181960)
12. Protective suits in Ukraine [Electronic resource]. – Access mode: <https://prom.ua/Kostyummy-izoliruyuschie.html>.
13. Buzov B.A., Nikityn A.V. Research of materials for clothing at low temperatures. - M.: Legprombytizdat, 1980. - 224 p.
14. Justification of the choice of indicators for the study and evaluation of the protective properties of special materials of the insulating suit of chemical industry workers.
15. GOST 15162-82. Artificial and synthetic leather and film materials. Methods of determining frost resistance in static conditions. Instead of GOST 15162-69, GOST 8974-78; Input 01.07.83
16. GOST 28789-90 (ISO 4675-79). Fabrics with a rubber or plastic coating. Bending test at low temperature. Input 01.01.92
17. A new device for determining the air permeability of clothing materials./Pryvala V.O., Mychko A.A., Mykhaylova N.V. – Khmelnytskyi, Visnyk TUP, 2003, No. 5 - P.63-65.

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-294-299>

УДК 543.3:546.134

МОКІЄНКО Андрій

Одеський національний медичний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4491-001X>

СПАСЬОНОВА Лариса

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

<https://orcid.org/0000-0002-7562-7241>

БОНДАРЧУК Олександр

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

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ У ПИТНІЙ ВОДІ ДІОКСИДУ ХЛОРУ, ХЛОРИТ- І ХЛОРАТ-АНІОНІВ

Аналіз показує, що першочерговим заходом з очищення води для питних потреб є її надійне знезараження окиснювачами, якими є хлор та його сполуки, діоксид хлору, озон.

Метою статті є аналіз існуючих методів визначення у питній воді діоксиду хлору, хлорит-, гіпохлорит- і хлорат-аніонів.

Для аналізу концентрованих розчинів діоксиду хлору (контроль продуктивності генераторів) використовуються йодометричний метод (визначення концентрації діоксиду хлору, вільного хлору, хлорит- і хлорат-аніонів; відносна помилка  $\leq 5\%$ ) та метод прямої абсорбції (визначення діоксиду хлору в діапазоні концентрацій 100-700 мг/дм<sup>3</sup>; відносна помилка  $\leq 2\%$ ). Для аналізу залишкових концентрацій діоксиду хлору, хлорит- і гіпохлорит-аніонів при їх спільній присутності використовуються титриметричний і фотометричний методи з використанням *N,N*-діетил-1,4-фенилендіамінсульфатом (ДФД) (помилка визначення складає 0,05 мг/дм<sup>3</sup>) та йодометричний з фотометричним визначенням йоду при 350 нм в діапазоні концентрацій 0,01-0,5 мг/дм<sup>3</sup>. Для аналізу залишкових концентрацій діоксиду хлору (селективні методи) застосовують фотометричний метод з хлорфеноловим червоним в діапазоні концентрацій 0,02-0,7 мг/дм<sup>3</sup>; відносна помилка  $\leq 5\%$ ; фотометричний з хромфіолетовою кислотою в діапазоні концентрацій 0,1-1,5 мг/дм<sup>3</sup>. Для аналізу залишкових концентрацій хлорит- і хлорат-аніонів використовують метод іонної хроматографії.

Зважаючи на необхідність гармонізації вітчизняних нормативно-методичних документів із європейськими слід вважати за необхідне контроль хлоритів і хлоратів у питній воді проводити методом іонної хроматографії.

Є доцільним проведення досліджень щодо апробації методу іонної хроматографії для одночасного визначення хлоритів і хлоратів у зразках води після її знезараження різними окиснювачами (гіпохлоритом натрію, озоном, діоксидом хлору).

Ключові слова: питна вода, методи визначення, діоксид хлору, хлорити, хлорати.

МОКІЄНКО Andrii

Odessa National Medical University

SPASONOVA Larysa, BONDARCHUK Oleksandr

National Technical University of Ukraine «Sikorsky polytechnical Institute»

## ANALYSIS OF METHODS FOR DETERMINATION OF CHLORINE DIOXIDE, CHLORITE AND CHLORATE ANIONS IN DRINKING WATER

The analysis shows that the primary measure for the purification of drinking water is its reliable disinfection with oxidants, which are chlorine and its compounds, chlorine dioxide, ozone.

The aim of the article is to analyze the existing methods for determination of chlorine dioxide, chlorite, hypochlorite and chlorate anions in drinking water.

To analyze the chlorine dioxide strength solutions (to control the generator performance) the iodometric method (determination of chlorine dioxide concentration, concentration of free chlorine, chlorite and chlorate anions; relative error  $\leq 5\%$ ) and the method of direct absorption at 445 nm (determination of chlorine dioxide concentration in the range of concentrations of 100-700 mg / l; relative error  $\leq 2\%$ ) were used. To analyze the residual concentrations of chlorine dioxide, chlorite and hypochlorite anions in their joint presence the titrimetric and photometric methods with *N,N*-diethyl-1,4-phenylenediamine sulfate (DFD) (error of determination is of 0.05 mg/l) were used as well as iodometric method with photometric determination of iodine at 350 nm in the concentration range 0.01-0.5 mg/l. To analyze the residual concentrations of chlorine dioxide (selective methods), such methods were used: the photometric method with chlorophenol red in the concentration range of 0.02-0.7 mg/l; relative error  $\leq 5\%$ ; photometric method with chromic violet acid in the concentration range of 0.1-1.5 mg/l. The method of ion chromatography was used to analyze the residual concentrations of chlorite and chlorate anions.

Given the necessity for harmonization of domestic regulatory and guidance documentation with European one, it should be considered as necessary to control chlorites and chlorates in drinking water by method of ion chromatography.

It is appropriate to conduct research on the approbation of ion chromatography method for the simultaneous determination of chlorites and chlorates in samples of water after its disinfection by various oxidants (sodium hypochlorite, ozone, chlorine dioxide).

Key words: drinking water, methods of determination, chlorine dioxide, chlorites, chlorates.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Стан джерел водопостачання та якість питної води безпосередньо впливають на здоров'я населення. Так, за даними ВООЗ, 25 % населення постійно ризикує захворіти на хвороби, пов'язані зі споживанням недоброякісної питної води. У країнах, що розвиваються, кожний третій мешканець страждає через брак

питної води та необхідних санітарних умов – основних вимог для здорового і гідного життя. У цих країнах приблизно 80 % всіх хвороб та одна третина смертельних випадків спричинені споживанням забрудненої води.

Незадовільний стан водних ресурсів – одна із основних і найбільш гострих еколого-водно-господарчих проблем нашої країни. Згідно інформації Департаменту гідрометеослужби і моніторингу Мінприроди України в даний час в Україні практично не залишилося водних об'єктів, які за екологічним станом відносяться до 1 категорії. Тому, першочерговим заходом з очищення води для питних потреб є її надійне знезараження окиснювачами, якими є хлор та його сполуки, діоксид хлору, озон.

Впровадження діоксиду хлору для знезараження питної води в Україні є перспективним напрямом для реалізації сучасних гігієнічних вимог до якості питної води.

### Аналіз досліджень та публікацій

Одним із важливих аспектів застосування діоксиду хлору в технологіях підготовки питної води є аналіз у воді залишкових концентрацій діоксиду хлору і його побічних продуктів - хлорит-, гіпохлорит-, хлорат-аніонів. При обробці води діоксидом хлору протікають окиснювально-відновні реакції цього окисника з речовинами, присутніми у воді, внаслідок чого діоксид хлору може відновлюватися до хлорит-, гіпохлорит- і хлорид-аніонів.

За літературними даними, хлорат-аніон може з'являтися в обробленій воді в результаті реакції диспропорціонування в лужному середовищі в кількості, що не перевищує 1 % від введеного діоксиду хлору при рН води  $\leq 9$  [1]. Особливістю аналізу є спільна присутність у воді вказаних вище кисневмісних сполук хлору, а аналітичні методи ґрунтуються на різних окиснювальних властивостях цих сполук.

Невирішеною частиною наукової проблеми є обмеженість узагальнюючих робіт щодо аналітичних підходів до визначення у питній воді діоксиду хлору і його похідних (хлоритів і хлоратів).

### Формулювання цілей статті

Метою статті є аналіз існуючих методів визначення у воді діоксиду хлору, хлорит-, гіпохлорит- і хлорат-аніонів.

### Виклад основного матеріалу

Терміни і визначення [1].

*Вільний хлор* – хлор, присутній у воді у вигляді хлорноватистої кислоти (HClO), гіпохлорит-аніону (ClO<sup>-</sup>) і розчиненого молекулярного хлору (Cl<sub>2</sub>).

*Зв'язаний хлор* – частина загального хлору, присутня у воді у вигляді неорганічних і органічних хлорамінів.

*Загальний хлор* – хлор, присутній у воді у вигляді вільного і зв'язаного хлору.

*Неорганічні хлораміни* – монохлорамін (NH<sub>2</sub>Cl), дихлорамін (NHCl<sub>2</sub>), трихлорид азоту (NCl<sub>3</sub>).

*Органічні хлораміни* – хлорпохідні органічних амінів (NR<sub>3</sub>, NHR<sub>2</sub>, NH<sub>2</sub>R).

*Діоксид хлору* – ClO<sub>2</sub>, є присутнім у воді у вигляді молекулярно розчиненого газу.

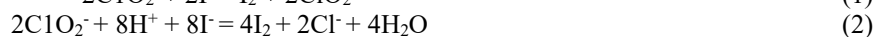
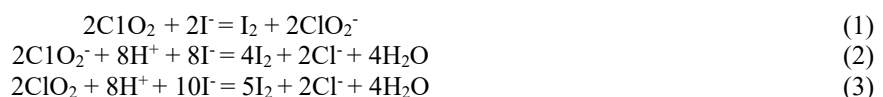
*Хлорит-аніон* – ClO<sub>2</sub><sup>-</sup> – аніон хлористої кислоти HClO<sub>2</sub>.

*Хлорат-аніон* – ClO<sub>3</sub><sup>-</sup> – аніон хлорноватистої кислоти HClO<sub>3</sub>.

Аналітичні методи умовно розділяють на методи контролю концентрованих розчинів діоксиду хлору (> 200 мг/дм<sup>3</sup>) і методи контролю залишкових концентрацій окисників - діоксиду хлору, хлоритів, хлору, хлоратів, сумарна концентрація яких  $\leq 0,07$  ммоль/дм<sup>3</sup>, а також класифікують за реагентами, які використовують для аналізу (таблиця за цитуванням [2-5]).

Йодометричний метод [5-7] частіше застосовується для аналізу водних розчинів з концентрацією ClO<sub>2</sub> > 200 мг/дм<sup>3</sup>, які отримують в генераторах діоксиду хлору в концентраціях 20-30 г/дм<sup>3</sup> (контроль продуктивності генераторів діоксиду хлору). Принцип методу полягає в титруванні йоду, що виділився, при дії окисників (сполук хлору) на йодид калію при різних значеннях рН. Окиснення йодид-іону діоксидом хлору відбувається в нейтральному середовищі при рН 7 і приводить до виділення одного моля йоду на кожні 2 моля діоксиду хлору. Хлорити не реагують з йодидами в нейтральному середовищі.

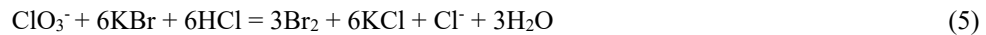
Такі реакції протікають тільки в кислому середовищі при рН 2:



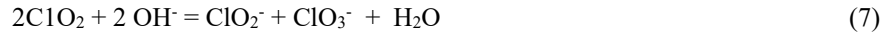
Йод, який утворюється в нейтральному розчині, знаходиться в співвідношенні 1: 5 з йодом, який утворюється в кислому середовищі (ClO<sub>2</sub> + 5e = Cl<sup>-</sup>). Окиснення йодиду хлором (Cl<sub>2</sub>) протікає в нейтральному або кислому середовищі:



Окиснення йодиду хлорат-аніоном ( $\text{ClO}_3^-$ ) протікає дуже повільно і тільки в сильно кислому середовищі і у присутності броміду калію як каталізатора:



Заздалегідь проводять розкладання діоксиду хлору в лужному середовищі:



Більше оперативним методом контролю вмісту діоксиду хлору в концентрованих розчинах є метод прямої абсорбції при довжині хвилі випромінювання 445 нм. Як показано раніше [2], значення оптичної щільності розчинів діоксиду хлору в діапазоні концентрацій 100-700 мг/дм<sup>3</sup> при  $\lambda = 445$  нм прямо пропорційні значенням концентрацій, тобто відповідають закону Бугера-Ламберта-Бера. Відносна помилка становить  $\leq 2\%$ .

Йодометричний метод (з різними модифікаціями) застосовують також для аналізу розбавлених розчинів діоксиду хлору [7-9].

У роботі [8] приведено визначення діоксиду хлору і хлорит-іонів у питній воді. Досліджені чутливість і специфічність методики фотометричного визначення  $\text{ClO}_2$  і  $\text{ClO}_2^-$ , яка ґрунтується на утворенні забарвленого розчину йоду при реакції аніонів з йодидом. Реакція для визначення  $\text{ClO}_2$  проводиться при рН 7 і 2,5, вимірювання оптичної щільності при 350 нм в кварcovій кюветі. При рН 7 визначенню  $\text{ClO}_2$  не заважає  $\text{ClO}_2^-$ . Діапазон концентрацій, що визначаються, складає 0,01-0,5 мг/дм<sup>3</sup>. При рН 2,5 визначенню заважає  $\text{ClO}_2^-$ , тому  $\text{ClO}_2$  відділяють продуванням азотом досліджуваного розчину з подальшим розчиненням його у воді або визначають його, екстрагуючи гексаном, при цьому чутливість методу підвищується. Хлорит-іони визначають в розчині при рН 2,5 після видалення  $\text{ClO}_2$ . Діапазон концентрацій, що визначаються, складає 0,02-0,1 мг/дм<sup>3</sup>.

На думку авторів [2] доступні методи не забезпечують надійного визначення цих форм в очищеній воді. Так, стандартні методи [6] для визначення хлору, діоксиду хлору і хлориту передбачають, що при рН 12 діоксид хлору диспропорціонує на хлорити і хлорати впродовж 10 хв. Останні дослідження показують, що діоксид хлору при концентраціях 5-10 мг/л при рН 12 знаходиться в розчині як молекулярний газ впродовж терміну від 20 хвилин до 3 годин. Стандартний метод не включає процедуру для визначення залишкової концентрації хлорату в обробленій воді. Автори описують процедуру амперометричного або потенціометричного визначення йоду, який утворюється внаслідок окиснення йодид-іону діоксидом хлору, хлором, хлоритом і хлоратом, оксидом феніларсину або тіосульфатом натрію. Підготовка зразків і коригування рН використовуються, щоб диференціювати різні форми хлору.

Аналітичний метод для визначення діоксиду хлору, хлору, хлориту і хлорату, описаний в цій статті, на думку авторів, можна застосовувати як для визначення продуктивності генератора діоксиду хлору, так і для вимірювання залишкових концентрацій в обробленій воді.

Межі виявлення у питній воді складають приблизно 0,05; 0,02; 0,02 і 0,25 мг/дм<sup>3</sup> для діоксиду хлору, хлору, хлориту і хлорату відповідно.

В роботі [9] приведена методика йодометричного визначення діоксиду хлору, хлору і хлоритів при їх спільній присутності, в якій рекомендується продування проби води повітрям або азотом для видалення діоксиду хлору і хлор-газу перед визначенням хлоритів. Чутливість методу  $\geq 2$  мг/дм<sup>3</sup>.

Метод з використанням реактиву ДФД є міжнародним стандартним методом визначення концентрацій різних окисників у воді, стандартизовано в Україні [12].

Принцип методу полягає у взаємодії усіх форм хлору (вільного, зв'язаного хлору, діоксиду хлору, хлорит-аніону) з N, N- діетил-1,4-фенилендіамінсульфатом з утворенням при рН 6,2-6,5 сполук червоного кольору. ДФД-метод може бути використаний двома способами: титруванням з розчином солі Мору; фотометрично - вимірюванням оптичної щільності розчинів.

Даний метод застосовують для суми концентрацій усіх форм хлору від 0,0004 до 0,07 ммоль/дм<sup>3</sup>. Для більш високих концентрацій досліджувану воду необхідно розбавляти. За наявності в досліджуваній воді усіх форм хлору проводиться ступінчасте визначення кожної з форм.

Заважають визначенню сполуки, які здатні окиснювати ДФД: бром, йод, бромаміни, йодаміни, озон, перекис водню, хромат-, перманганат-, нітрат-аніони, катіони заліза (III) і міді (II). Для усунення впливу катіонів заліза і міді застосовують трилон Б.

Освоєний і вдосконалений [3, 4] ДФД-метод представлений в затвердженому нормативному документі [15]. Розбіжність між паралельними пробами складає 0,05 мг/дм<sup>3</sup> для усіх форм хлору, які визначаються.

У країнах ЄС рекомендується визначати залишкові концентрації хлоритів і хлоратів методом іонної хроматографії. Цей метод стандартизовано в Україні [12].

Комітет дезінфекції ЕРА (США) [11, 15] приводить аналітичні методи визначення діоксиду хлору, хлоритів і хлоратів у водних розчинах. Для контролю залишкових концентрацій діоксиду хлору у воді



погоджені два методи (40 CFR §141.131(c): DPD(ДФД) Метод, 4500 - ClO<sub>2</sub> D і амперометрический метод II, 4500 - ClO<sub>2</sub> E.

Для контролю залишкових концентрацій хлорит-іону рекомендовано використовувати один з трьох методів (40 CFR §141.131(b): амперометричний метод II, 4500 - ClO<sub>2</sub> E; метод іонної хроматографії (Метод EPA 300.0) або метод іонної хроматографії (Метод EPA 300.1).

Інструкціями визначено, що амперометричне титрування може використовуватися для щоденного контролю хлориту в системах водорозподілу, а іонна хроматографія повинна використовуватися для щомісячного контролю хлориту і для додаткового контролю в системі розподілу.

Автори роботи [16] розділяють методи аналізу на 2 групи. Перша група базується на застосуванні відновників, таких як KI, оксид миш'яку або органічних барвників типу ДФД. Друга група - на застосуванні специфічних реагентів, зокрема, барвників, які при окисненні змінюють забарвлення. У роботі використані барвники: хромфіолетова кислота (ХФК), метилоранж, які специфічні тільки для ClO<sub>2</sub>. Приведені умови визначення на УФ-спектрофотометрі «Hewlett Packard 8540 A». Проведено дослідження залежності оптичної щільності стандартних розчинів Cl<sub>2</sub> і ClO<sub>2</sub> для кожного з барвників при різному значенні рН.

У статті [17] обговорені питання утворення хлорит- і хлорат-іонів і аналітичні методи їх визначення. Зокрема, розглядаються в порівняльному аспекті метод амперометричного титрування і метод іонної хроматографії.

Огляд основних методів визначення мікрограмових кількостей ClO<sub>2</sub>, ClO<sub>2</sub><sup>-</sup>, Cl<sub>2</sub> і ClO<sub>3</sub><sup>-</sup> представлений у роботі [18]. Розглянута роль подібних визначень для контролю хлорних виробництв, зокрема, синтезу ClO<sub>2</sub>. Для кожної з перерахованих речовин приведені найбільш точні і селективні методи визначень. Для визначення ClO<sub>2</sub> запропоновані 3 методи: фотометричний з ХФК, амперометричний і хемілюмінісцентний. Для визначення ClO<sub>2</sub><sup>-</sup> розглянуто 2 варіанти визначень: прямий і непрямий. Для 1-го варіанту рекомендовані полярографічний і вольтамперометричний методи. Непряме визначення ClO<sub>3</sub><sup>-</sup> може бути здійснено шляхом визначення еквівалентних кількостей ClO<sub>2</sub>, суми ClO<sup>-</sup> + ClO<sub>2</sub> та ін. Для визначення ClO<sub>3</sub><sup>-</sup> найбільш ефективний йодометричний метод. Приведено ряд методик для визначення усіх приведених форм хлору. Оцінена точність розглянутих методів.

У роботі [19] приведені методи безперервного визначення діоксиду хлору у воді. Для цієї мети можуть бути використані фотометрія і електрохімічні методи аналізу. Фотометричний аналіз здійснюється з реактивом ДФД при довжині хвилі 535 нм. Можливе створення безперервно працюючого фотоколориметра з чутливістю 1 мкг/дм<sup>3</sup>. В якості електрохімічних методів аналізу можуть бути застосовані амперометричні методи з відкритою 2-х електродною системою, з потенціостатуванням і з мембранною електрохімічною ячейкою. Усі вони базуються на вимірюванні щільності струму, що протікає через електрод, яка пропорційна концентрації діоксиду хлору. Найбільш перспективним вважається метод, в якому електроди відокремлені від розчину напівпроникною мембраною, через яку дифундує діоксид хлору. На підставі цієї схеми розроблено вимірювальну ячейку CDE 1,2 з областю вимірювання 5-500 мкг/дм<sup>3</sup>.

Фотометричний метод визначення діоксиду хлору з хлорфеноловим червоним (ХФЧ) дає можливість кількісно визначати концентрацію залишкового діоксиду хлору після обробки у воді у присутності хлоритів, хлоратів і гіпохлоритів [5].

Принцип методу базується на окиснювальній реакції діоксиду хлору з ХФЧ з розщеплюванням ароматичної сполуки і подальшим знебарвленням. 1 моль ХФЧ реагує з 2 молями ClO<sub>2</sub>. Вимірюють оптичну щільність розчину після додавання ХФЧ на довжині хвилі 575 нм. Визначенню заважають нітрити, нітрати і інші сильні аніони в концентраціях більше ніж 1 г/дм<sup>3</sup>; галогенвмісні оксиданти (хлорати, бромати, хлорити, хлораміни у високих концентраціях; вільний хлор при рН 7 і гіпохлорит-аніон при рН 9), які реагують з ХФЧ, даючи блакитне забарвлення, проте реакція протікає повільніше на 5-10 хв.

Метод використовується для аналізу природної, питної води і тільки частково для стічних вод. Межа виявлення діоксиду хлору 0,05 мг/дм<sup>3</sup>. Для концентрацій, що перевищують 0,7 мг/дм<sup>3</sup>, проби розбавляють. Аналіз проводиться безпосередньо після відбору проб, оскільки концентрація ClO<sub>2</sub> зменшується з часом у присутності речовин, здатних окиснюватися, і під дією світла.

Згідно з даними [3, 4] значення оптичної щільності розчинів діоксиду хлору в діапазоні концентрацій 0,05-1,0 мг/дм<sup>3</sup> прямо пропорційні значенням концентрацій, тобто відповідають закону Бугера-Ламберта -Бера. Залежність оптичної щільності (при вимірюванні в кюветі з товщиною оптичного шару 1 см) фотометричним методом з використанням ХФЧ при λ = 575 нм. Розбіжність між паралельними пробами ≤ 4%.

Принцип фотометричного методу з хромфіолетовою кислотою полягає в знебарвленні 1,5-біс-(4-метилфеніламіно-2-натрій сульфонат)-9,10-антрахінону (алізариновий фіолетовий 3R) при рН 8,1-8,4 [6, 21]. Чутливість методу - 0,04 - 2,5 мг/дм<sup>3</sup> ClO<sub>2</sub>, λ = 548-550 нм. Визначенню не заважає хлор (≤ 2 мг/дм<sup>3</sup>), хлораміни в тих же концентраціях, хлорити (≤ 3 мг/дм<sup>3</sup>), хлорати (≤ 2 мг/дм<sup>3</sup>). Межа виявлення 0,02 мг/дм<sup>3</sup>, стандартне відхилення 0,01 мг/дм<sup>3</sup>.

Для визначення діоксиду хлору у присутності хлору і хлоритів, що найбільш поширено в практиці водопостачання, пропонується не дуже чутливий тирозиновий метод, яким можна визначати ClO<sub>2</sub> з концентрацією ≥ 0,3 мг/дм<sup>3</sup> [9]. Діоксид хлору реагує з тирозином при рН 4,6-4,8. Визначенню заважають вільний хлор, який маскують додаванням малонової кислоти. Хлорити не заважають визначенню.

Для визначення діоксиду хлору у присутності хлору (але не хлоритів) пропонується більш чутливий метод з о-толідіном. Цим методом можна визначати  $\text{ClO}_2$  в концентраціях від 0,05 мг/дм<sup>3</sup> і вище. Відносно точні результати отримують тільки при суворому дотриманні умов визначення, особливо тривалості між окремими операціями. Діоксид хлору утворює з о-толідіном при рН 1,9 комплекс жовтого забарвлення, інтенсивність якого пропорційна його вмісту. Визначенню заважають вільний хлор, який маскуєть малою кислотою. Хлорити реагують подібно до діоксиду хлору [9].

Вивчений метод хемілюмінесцентного аналізу  $\text{ClO}_2$  у воді за допомогою проточної мембранної ячейки. Досліджений вплив рН реактиву і проб, швидкості потоку і температури. При рН 10 реактиву і проб усувається заважаючий вплив  $\text{HClO}$  і гіпохлорит- іонів. Чутливість методу в межах 0,05-1,50 мг/дм<sup>3</sup>  $\text{ClO}_2$ . Встановлено, що описаний метод дає можливість селективного вимірювання вмісту  $\text{ClO}_2$  у присутності  $\text{Cl}_2$ . Метод придатний для визначення  $\text{ClO}_2$  у водопровідній, річковій і стічній водах [13].

Для безперервного контролю хлору і діоксиду хлору в розподільчій мережі рекомендовано використовувати метод 3-х електродної амперометрії з проточним датчиком [21].

При контролі виробництва діоксиду хлору застосована автоматизована система фірми Spectra Tec. (США) із вбудованими спектрофотометрами для вимірювання вмісту  $\text{ClO}_2$ . Використовують прилад для визначення концентрації  $\text{ClO}_2$  в процесі виробництва і в стічних водах [22]. Приведені методи аналітичного контролю діоксиду хлору, а також його похідних хлоритів і хлоратів в процесі обробки природних вод [23], а саме УФ-спектрометрія  $\lambda=260$  і 359 нм з використанням модифікованих реактивів о-толідіну,  $\text{Fe(II)}$ -о-толідіну і  $\text{HCl}$ -о-толідіну. Контроль  $\text{ClO}_2$  і його похідних в розчинах реагентів може бути здійснений йодометричним способом у поєднанні з УФ-фотометричним.

Фірма Procheck, Höganäs (Швеція) виготовила автоматизовану установку Procheck CLD для безперервного вимірювання концентрації реагентів при виробництві  $\text{ClO}_2$ . Систему використовують для визначення вмісту  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaClO}_3$  і  $\text{ClO}_2$  при виробництві  $\text{ClO}_2$  за методом Mathieson на установці SVP – Lite [24].

#### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Зважаючи на необхідність гармонізації вітчизняних нормативно-методичних документів із європейськими слід вважати за необхідне контроль хлоритів і хлоратів у питній воді проводити методом іонної хроматографії.

Доцільним є проведення досліджень щодо апробації методу іонної хроматографії для одночасного визначення хлоритів і хлоратів у зразках води після її знезаражування різними окиснювачами (гіпохлоритом натрію, озоном, діоксидом хлору).

#### Література

1. Aieta E.M., Roberts P.V., Hernandez M. Determination of Chlorine Dioxide, Chlorine, Chlorite and Chlorate in Water//J.AWWA.-1984.-V.76, № 7.-P.64-74.
2. Petrenko N.F., Mokienko A.V. Chlorine Dioxide: Application in Water Treatment Technologies: Monograph. - Odesa: Optimum pub, 2005. - 486 p.
3. Петренко Н.Ф., Дервянко Т.О., Кизлова М.И. Аналитические методы определения в воде диоксида хлора, хлорит- и хлорат-анионов// Актуальні проблеми транспортної медицини. - 2008. - №4(14). - С. 95-102.
4. Mokienko A.V., Petrenko N.F., Gozhenko A.I. Water Disinfection. Hygienic and Health-Environmental Aspects. V. 2. Chlorine Dioxide. – Odesa: TES pub(l), 2012. - 604 p.
5. Mokienko A.V. Chlorine Dioxide: Usage in Water Treatment Technologies. 2nd E. revised and completed. - Odesa: Feniks pub(l). - 2021. - 336 p.
6. Standart Methods for the Examination of Water and Wasterwater, APHA, AWWA and WPCF. - Washington, D.C.(14th Ed., 1976).
7. Duchesne D., Lafrance P. Méthodes d'analyses du bi-oxyde de chlore// Sci. et techn. Eau. - 1986. – V.19(1), №73-74, P. 77-78.
8. Härtung G., Quentin K.-E. Bestimmung von Chlordioxid und Chlorit im Trinkwasser. Z. Wasser- und Abwasser-Forsch. - 1984. – V.17(2). - P. 50-62.
9. Унифицированные методы исследования качества вод. Часть 1. Методы химического анализа вод. Том 1. Основные методы. - М.: СЭВ,1987. - 830 с.
10. ДСТУ ISO 7393-1-2003 Якість води. Визначення нез'язаного хлору та загального хлору. Частина 1. Титрометричний метод із застосуванням N,N-діетил-1,4-фенілендіаміну.
11. Standart Methods for the Examination of Water and Westewater, APHA, AWWA and WEF, Washington, D.C.(20th Ed., 1998).
12. ДСТУ ISO 10304-4-2003 Якість води. Визначення розчинених аніонів методом рідинного іонного хроматографування. Частина 4. Визначення хлорату, хлориду і хлориту у воді з низьким рівнем забрудненості.
13. Saksa D. J., Smart R. B. Chemiluminescent analysis of chlorine dioxide with a membrane flow cell// Environ Sci and Technol. - 1985. - V.19(5). - P. 450-454.

14. Санітарно-епідеміологічний нагляд за знезараженням води у системах централізованого господарсько-питного водопостачання діоксидом хлору: методичні рекомендації МР 2.2.4-147-2007. - Київ, 2007. - 23 с.
15. Committee Report - Disinfection at Large and Medium-Size Systems. AWWA Water Quality Division Disinfection Systems Committee// J. AWWA. - 2000. - V. 92(1). - P. 32-43.
16. Chiswell B., O'Hailoran K.R., Rauchle G. P. Analysis of oxychlorine species of potable water. Austral. Water and Wastewater Assoc./ 13th Fed Conv., Canberra. Prep. Pap. Barton, 1989. - V. 1,2. - P. 465-469.
17. Gregory D. Dealing With Chlorine Dioxide by-products. Option// AWWA. - 1998. - V.5. - P.6-7.
18. C.Madec, F.Quentel, J.Courtot-Coupez, M.Dore. Principales méthodes analytiques applicables au dosage de traces de chlore, de chlorite et de chlorate lors du traitement oes eaux douées par le dioxyde de chlore// Analisis. - 1987. - V. 15(2). - P. 69-76.
19. Reiß G. Kontinuierliches Meßverfahren zur Chlor-dioxidbestimmung in Wasser// Chem.-Techn. (BRD). - 1990. - V. 19(5). - P. 31-37.
20. W.J.Masschelein, G.Fransolet, P.Ge Lawj, R.Savoir. Determination of residual ozone or chlorine dioxide in water with ACVK-an update version// Ozone Sci. and Eng. - 1989. - V.11(2). - P. 209-215.
21. Kurz D. Kontinuierliche Chlor- und Chlordioxid-Überwachung im Verteilernetz// Gas - Wasser - Abwasser. - 1987. - V. 67(5). - P. 305-308.
22. New technology Instrumentation// Pulp. and Pap. Int. - 1995. - V.37(6). - P. 110.
23. Valente J. Chlorite et chlorate en tant que sous-produits de reaction résultant du traitement des eaux par le bioxyde de chlore et leur surveillance analytique// Water Supply. - 1986. - V.4(3). - P.141-166.
24. Big savings through improved chlorine dioxide analysis// Pulp and Pap. Int. - 1995. - V.37(6). - P.112.

#### References

1. Aieta E.M., Roberts P.V., Hernandez M. Determination of Chlorine Dioxide, Chlorine, Chlorite and Chlorate in Water//J.AWWA. - 1984. - V.76, № 7. - P.64-74.
2. Petrenko N.F., Mokienko A.V. Chlorine Dioxide: Application in Water Treatment Technologies: Monograph. - Odesa: Optimum pub, 2005. - 486 p.
3. Petrenko N.F., Derevianko T.O., Kyzlova M.I. Analytical Methods for Determination of Chlorine Dioxide, Chlorite and Chlorate Anions// Current Problems of Transport Medicine. - 2008. - №4(14). - P.95-102.
4. Mokienko A.V., Petrenko N.F., Gozhenko A.I. Water Disinfection. Hygienic and Health-Environmental Aspects. V. 2. Chlorine Dioxide. - Odesa: TES pub(1), 2012. - 604 p.
5. Mokienko A.V. Chlorine Dioxide: Usage in Water Treatment Technologies. 2nd E. revised and completed. - Odesa: Feniks pub(1). - 2021. - 336 p.
6. Standart Methods for the Examination of Water and Wasterwater, APHA, AWWA and WPCF. - Washington, D.C.(14th Ed., 1976).
7. Duchesne D., Lafrance P. Méthodes d'analyses du bi-oxyde de chlore. Sci. et techn. Eau. - 1986. - 19(1). - P. 73-74, 77-78.
8. Härtung G., Quentin K.-E. Bestimmung von Chlordioxid und Chlorit im Trinkwasser// Z. Wasser- und Abwasser-Forsch. - 1984. - 17(2). - P. 50-62.
9. Unified Methods of Water Quality Investigation. Part 1. Methods of Water Chemical Analysis. Volume 1. Basic Methods. - Moscow: SMEA, 1987. - 830 p.
10. DSTU ISO 7393-1-2003 Water quality — Determination of free chlorine and total chlorine — Part 1: Titrimetric method using N,N-diethyl-1,4-phenylenediamine.
11. Standart Methods for the Examination of Water and Westewater, APHA, AWWA and WEF. - Washington, D.C.(20th Ed., 1998).
12. DSTU ISO 10304-4-2003 Water quality— Determination of dissolved anions by liquid chromatography of ions — Part 4: Determination of chlorate, chloride and chlorite in water with low contamination.
13. Saksa D. J., Smart R. B. Chemiluminescent analysis of chlorine dioxide with a membrane flow cell// Environ Sci and Technol. - 1985. - V.19(5). - P. 450-454.
14. Sanitary-Epidemiological Supervision over Water Disinfection with Chlorine Dioxide in Centralized Systems of Domestic Water Supply: Methodological Recommendations MR 2.2.4-147-2007. - Kyiv, 2007. - 23 p.
15. Committee Report - Disinfection at Large and Medium-Size Systems. AWWA Water Quality Division Disinfection Systems Committee// J. AWWA. - 2000. - V. 92(1). - P. 32-43.
16. Chiswell B., O'Hailoran K.R., Rauchle G. P. Analysis of oxychlorine species of potable water. Austral. Water and Wastewater Assoc./ 13th Fed Conv., Canberra. Prep. Pap. Barton. - 1989. - V. 1,2. - P. 465-469.
17. Gregory D. Dealing With Chlorine Dioxide by-products. Option// AWWA. - 1998. - V.5. - P.6-7.
18. C.Madec, F.Quentel, J.Courtot-Coupez, M.Dore. Principales méthodes analytiques applicables au dosage de traces de chlore, de chlorite et de chlorate lors du traitement oes eaux douées par le dioxyde de chlore// Analisis. - 1987. - V. 15(2). - P. 69-76.
19. Reiß G. Kontinuierliches Meßverfahren zur Chlor-dioxidbestimmung in Wasser// Chem.-Techn. (BRD). - 1990. - V. 19(5). - P. 31-37.
20. W.J.Masschelein, G.Fransolet, P.Ge Lawj, R.Savoir. Determination of residual ozone or chlorine dioxide in water with ACVK-an update version// Ozone Sci. and Eng. - 1989. - V.11(2). - P. 209-215.
21. Kurz D. Kontinuierliche Chlor- und Chlordioxid-Überwachung im Verteilernetz// Gas - Wasser - Abwasser. -1987. - V. 67(5). - P. 305-308.
22. New technology Instrumentation// Pulp. and Pap. Int. - 1995. - V.37(6). - P. 110.
23. Valente J. Chlorite et chlorate en tant que sous-produits de reaction résultant du traitement des eaux par le bioxyde de chlore et leur surveillance analytique// Water Supply. -1986. - V.4(3). - P.141-166.
24. Big savings through improved chlorine dioxide analysis// Pulp and Pap. Int. - 1995. - V.37(6). - P.112.

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-300-309>

УДК 004.93

ЛИСЕНКО Сергій

Хмельницький національний університет  
<https://orcid.org/0000-0001-7243-8747>

АТАМАНЮК Ольга

Хмельницький національний університет

БОХОНЬКО Олександр

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-7228-9195>

ВОРОБІЙОВ Володимир

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7738-1444>

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ КІБЕРЗАГРОЗ ТИПУ RANSOMWARE НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ HONEYPOT

*В роботі представлено метод та програмно-технічний засіб виявлення кіберзагроз типу Ransomware на основі застосування Honeyrot, які є концептуальними пастками, призначеними для блокування несанкціонованого доступу до даних. Honeyrot, також відома як технологія виявлення вторгнень, тип технології безпеки, яка перевіряє пристрої для запобігання небажаним діям. У даній статті буде представлено огляд кібербезпек, кіберзагроз і системних методів. Ця стаття є результатом багатьох досліджень, і, оцінюючи honeypots, дослідники виявили, що це важливий інструмент безпеки, який може обмежити системні атаки та надати аналітикам уявлення про походження і поведінку даних кіберзагроз.*

*Ключові слова: шкідливе програмне забезпечення, кіберзагроза, програми-вимагачі, кібербезпека, кіберпростір.*

LYSENKO Sergii, ATAMANIUK Olga, BOKHONKO Oleksandr, VOROBIIYOV Volodymyr  
Khmelnitskyi National University

### METHOD FOR DETECTION OF RANSOMWARE CYBER THREATS BASED ON HONEYPOT: STATE-OF-ART

*The work presents the research of the methods for detecting cyber threats such as Ransomware based on the use of Honeyrot. Today, lack of awareness allows attacks to bypass basic security mechanisms, security vulnerabilities in the IT systems of small and large corporations are increasingly being used to cause business failures. The cyberattacks continue to expand rapidly as cybercriminals constantly bypass the security tools developed and implemented by organizations. The purpose of attacks is increasingly data that is critical to both individuals and organizations. Attackers use capabilities that can help them seize control of valuable data to demand a ransom from the data owner. Ransomware is a form of malware that infects a computer or multiple computers over a network by encrypting files and folders, making them unusable. The users are then asked to make a ransom. Ransomware is not a new threat, but its use is growing rapidly and causing large financial losses in the world. This is a serious challenge for cybersecurity analysts because typical ransomware is not detected by antivirus software due to its polymorphic nature. There was a sudden surge in extremely dangerous ransomware attacks that harmed most companies and individuals. Ransomware poses a great threat and must be fought at a global level. There is a lack of comprehensive analysis to cover the security issues of individual users and corporations. Ransomware avoidance methods are the most effective and require special attention as the reduction and recovery of ransomware becomes increasingly difficult. The task arises to investigate the effectiveness of known methods in order to assess and identify their advantages and disadvantages, which will allow in the future to develop and implement new effective methods and means of combating Ransomware-type SPZ based on the use of Honeyrot. The study shows that because malware is automated and targets any location arbitrarily, placing the bait anywhere to detect activity is an improvement over the lack of monitoring at all. Experimental studies indicate a high reliability of the proposed methods, in particular the reliability of the detection of cyber threats of the Ransomware type, but the insufficient adaptability of these methods in the evolution of the malware.*

*Keywords: ransomware, honeypot, malware, cyber threat, cyber security.*

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сьогодні недостатня обізнаність дозволяють атакам обходити базові механізми безпеки, уразливі місця безпеки в ІТ-системах малих і великих корпорацій все частіше використовуються, щоб викликати збої в бізнесі. Кібератаки продовжує швидко розширюватися, оскільки кіберзлочинці постійно обходять засоби безпеки, розроблені та впроваджені організаціями. Метою атак все частіше стають дані, які є критично важливими як для окремих осіб, так і для організацій. Зловмисники використовують можливості, які можуть допомогти їм захопити контроль над цінними даними, щоб вимагати викуп від власника даних [1].

Програмне забезпечення-вимагач – це форма шкідливого програмного забезпечення, яке заражає комп'ютер або кілька комп'ютерів через мережу, шифруючи файли та папки, роблячи їх непридатними для використання. Потім користувачам пропонується внести викуп. Програмне забезпечення-вимагач не є новою загрозою, але його використання стрімко зростає та спричиняє великі фінансові втрати в світі. Це серйозний виклик для аналітиків кібербезпеки, оскільки типове програмне забезпечення-вимагач не виявляється антивірусним програмним забезпеченням через його поліморфну природу.

51% організацій у всьому світі у 2021 році постраждали від високотехнологічних атак програм-вимагачів. Ці атаки використовували розширені командні та контрольні сервери, що ускладнювало їх зворотне проектування [2].

Netwalker — одна з найновіших і небезпечних програм-вимагачів. Його популярність полягає в методі розповсюдження, використовуючи фішингові електронні листи, пов'язані з COVID-19, таким чином спонукаючи жертву завантажити вкладені файли, що призводить до виконання портативних двійкових файлів і зараження системи. У лютому 2021 року було випущено останню версію програм-вимагачів Zeotiscus 2.0. Zeotiscus 2.0 може виконуватися повністю в автономному режимі, не вимагаючи жодного сервера керування. Щоб отримати платіж за викуп, Zeotiscus використовує надійно захищені та зашифровані поштові облікові записи Proton, щоб уникнути відстеження [3].

Відбувся раптовий сплеск надзвичайно небезпечних атак програм-вимагачів, які завдали шкоди більшості компаній і окремих осіб. Програми-вимагачі становлять велику загрозу і з ними потрібно боротися на глобальному рівні. Бракує комплексного аналізу, який би охоплював питання безпеки окремих користувачів і корпорацій.

Методи уникнення програм-вимагачів є найефективнішими та потребують спеціальної уваги, оскільки зменшення та відновлення програм-вимагачів стає дедалі складнішим.

Постає задача дослідити ефективність відомих методів з метою здійснення оцінки та виявлення їх переваг та недоліків, що дозволить в майбутньому розробляти та імплементувати нові ефективні методи та засоби боротьби з ЗПЗ типу Ransomware на основі застосування Honeyrot.

Тому метою роботи є дослідження методів виявлення ЗПЗ типу Ransomware на основі застосування Honeyrot з метою надання певних мір безпеки шляхом розроблення методу.

### Поняття ЗПЗ типу Ransomware на основі застосування Honeyrot

ЗПЗ типу Ransomware вважаються одним із найнебезпечніших варіантів шкідливих програм. Це насамперед тому, що для підвищення привілеїв навіть не потрібна активна взаємодія користувача. Навіть використання стандартних інструментів і технологій не змогло стримати програм-вимагачів. Щойно програмне забезпечення-вимагач заражає пристрій, жертва немає можливості отримати доступ до файлів. Через те, що викуп сплачується за допомогою криптовалюти, немає способу відстеження виконавців атак програм-вимагачів. Рисунок 1 ілюструє фінансову шкоду, завдану програмами-вимагачами у 2021 році порівняно з її попередниками [4].

Грошовий збиток

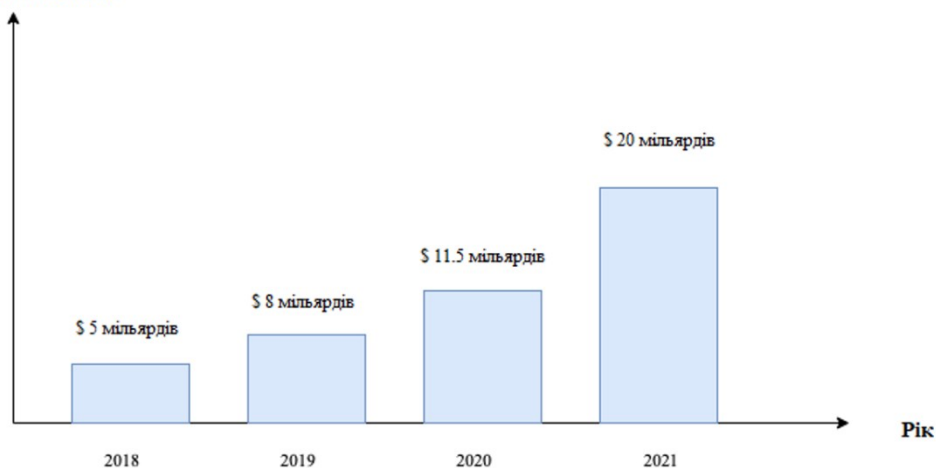


Рис. 1. Збитки програм-вимагачів за останні роки

#### 1.1. Поширення ЗПЗ типу Ransomware на основі застосування Honeyrot

Поширюється програма-вимагач насамперед через відсутність кібергігієни на індивідуальному рівні. Кібергігієна стосується всіх аспектів онлайн-безпеки, включаючи поведінку веб-переглядача, доступність і постійне оновлення антивірусного програмного забезпечення, встановлення стороннього програмного забезпечення та обізнаність користувачів. Необхідно дотримуватися кібергігієни, щоб уникнути програм-вимагачів та інших зловмисних програм. Незважаючи на вдосконалення стандартів безпеки та протоколів, родинам програм-вимагачів вдалося проникнути в системи захисту організацій, урядів та окремих користувачів [5]. Деякі з основних джерел програм-вимагачів включають:

- Додатки електронної пошти

Вкладення електронної пошти зазвичай містять документи у форматі Portable Document Format (PDF), голосові повідомлення, зображення тощо. Програми-вимагачі використовують методи, завдяки яким електронний лист виглядає так, ніби його надіслав надійний відправник.

- Знімний носій

Багато хто не вважає знімний носій порталом для програм-вимагачів. Однак було проведено опитування, яке показало, що люди справді зацікавлені тим, що може бути у випадкових накопичувачах універсальної шини (USB), які лежать у громадському місці.

- Шкідлива реклама

Шкідлива реклама — це організоване зараження рекламної інфраструктури, яку вебсайти використовують для показу онлайн-реклами. Шкідлива реклама виявилася ще одним популярним методом зараження систем програмами-вимагачами.

- Соціальні мережі та SMS

Цей тип розповсюдження програм-вимагачів підпадає під категорію соціальної інженерії, де жертву спонукають перейти за посиланням. Зловмисники використовують техніку скорочення Uniform Resource Locator (URL), щоб додати незрозумілості вихідному посиланню. Користувачів із поганою кібергігієною переходять за цими посиланнями. Іноді користувачі також отримують SMS-повідомлення, які зображують терміновість і змушують їх натискати ці посилання.

- Програми-вимагачі як послуга

Подібно до інших хостингових служб у Dark Web, які пропонують анонімність, Ransomware-as-a-Service (RaaS) з'явився як послуга виключно для зловмисників із недостатніми навичками програмування, щоб легко поширювати програми-вимагачі.

### 2.3. Типи програм-вимагачів

Існує в основному два поширених типи програм-вимагачів, відомих як Crypto Ransomware і Locker Ransomware.

#### 2.3.1. Крипто-вимагач

Crypto Ransomware використовує алгоритми шифрування для шифрування даних жертв за допомогою двох підходів. У випадку симетричного алгоритму існує лише один ключ, який використовується як для шифрування, так і для дешифрування. Другий алгоритм, який є більш поширеним, — це асиметричний алгоритм, за допомогою якого дані шифруються за допомогою відкритого ключа, і жертва може отримати свої дані назад лише тоді, коли вона заплатить за ключ дешифрування. Протягом багатьох років зловмисники ускладнювали роботу реверсивних інженерів, які намагалися розшифрувати дані без сплати викупу. Тепер зловмисники використовують комбінацію симетричних і асиметричних алгоритмів, щоб зробити процес дешифрування більш складним. Дані жертви шифруються за допомогою симетричного алгоритму завдяки його швидкості. Потім використаний ключ шифрується за допомогою відкритого ключа, яким володіє зловмисник.

#### 2.3.2. Locker Ransomware

Як видно з назви, Locker Ransomware блокує пристрій замість шифрування файлів і папок. Після зараження пристрій жертви не може отримати доступ. Цей тип програм-вимагачів є менш ефективним, ніж Crypto Ransomware, оскільки доступ до даних усе ще можна отримати, перемістивши пристрій зберігання на інший комп'ютер.

### 2.4. Операція Ransomware

Різні фази роботи програми-вимагача (показано на рисунку 2) докладно описано нижче:

#### 2.4.1. Поширення програми-вимагача на пристрій жертви

Перший етап – поширення програми-вимагача на пристрій жертви. Є кілька джерел, через які програми-вимагачі знаходять вектор інфекції. На цьому етапі стратегія зловмисника полягає в тому, щоб отримати завантажене програмне забезпечення-вимагач на комп'ютер жертви. Ця стадія значною мірою залежить від діяльності жертви та загальної кібергігієни. Якщо потенційна жертва є кіберобізнаною, тоді дуже ймовірно, що програма-вимагач не зможе заразити систему [6].

#### 2.4.2. Шифрування/Блокування

Після зараження програма-вимагач починає виконувати запрограмовану послідовність дій залежно від свого типу. Властивістю останніх програм-вимагачів є те, що вони зв'язуються з центральним сервером керування (C2C), завдяки чому процес автоматизації для зловмисника стає простим. Сервер C2C також діє як репозиторій, через який різні жертви можуть завантажити свої ключі розшифровки після здійснення платежу. Після першого етапу криптографічні ключі генеруються або на персональному комп'ютері (ПК) жертви, або на сервері C2C. Потім зловмисник блокує файли та папки або може відразу змінити головний завантажувальний запис, щоб жертва не змогла отримати доступ до свого пристрою.

#### 2.4.3. Викуп даних

Під час третього етапу на екрані починає відображатися повідомлення, яке вимагає від жертви суму викупу, щоб вона могла повернути доступ до своєї системи. Зловмисник надає біткойн-адресу для виплати викупу. Це збільшує труднощі для правоохоронних органів відстежити платіж зловмиснику.

#### 2.4.4. Результат функціонування ЗПЗ типу Ransomware

Після третього етапу користувач може заплатити суму викупу. На цьому етапі є три результати. Якщо жертва вирішить заплатити викуп, їй буде надано ключ розшифровки, щоб розблокувати доступ до своїх пристроїв. Інший результат може виникнути, коли жертва має певні технічні навички або може скористатися допомогою реверсивних інженерів, щоб скасувати операції програм-вимагачів і повернути файли. Третій результат виникає в ситуації, коли жертва не може заплатити викуп. Це призводить до незворотного пошкодження та повної втрати даних.

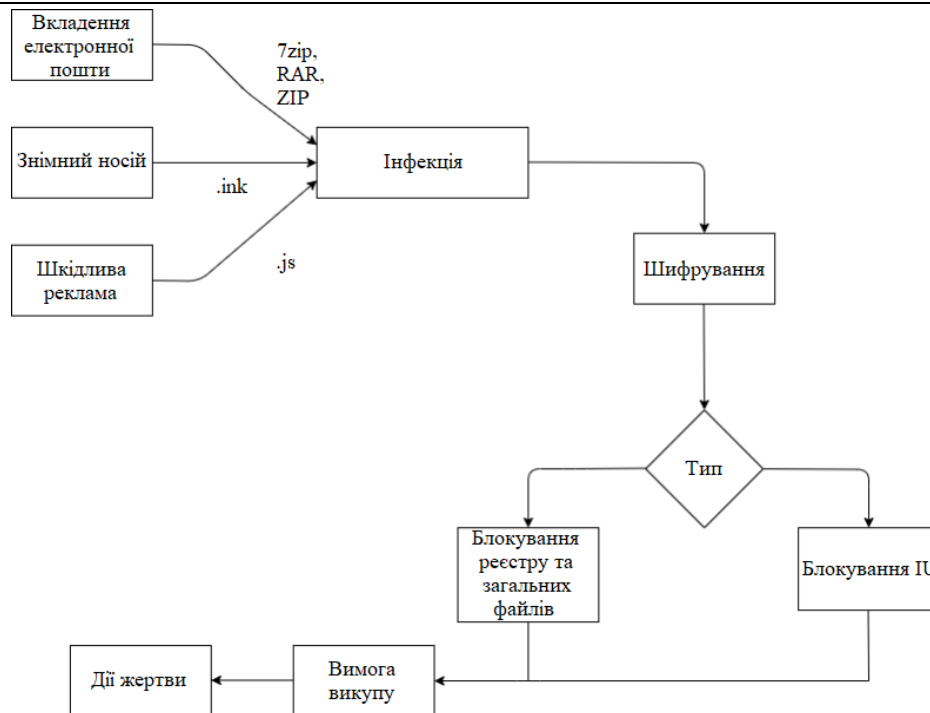


Рис. 2. Типова послідовність операцій програми-вимагача

### 2.5. Роль криптовалют

На початку появи програм-вимагачів зловмисники вимагали гроші у формі прямого банківського депозиту або через агентства з переказу грошей. З моменту появи криптовалют кількість атак програм-вимагачів різко зростає. Це пов'язано з тим, що криптовалюти вводять концепцію анонімності. Криптовалюти сприяють створенню програмного забезпечення-вимагача, яке замість розгортання методу прямої оплати один-на-один використовує платіжний шлюз третьої сторони, щоб мінімізувати ризик виявлення. Зазвичай, коли криптовалюта налаштована як спосіб оплати, зловмисник пасивно спостерігає за блокчейном, який дозволяє криптовалютам перевіряти, чи була сплачена сума викупу чи ні. Після здійснення платежу процес надсилання ключа розшифровки жертві може бути розпочато за допомогою автоматизації. Це застосовує теорію анонімності та неможливості відстеження [7].

## Дослідження методів виявлення Ransomware на основі застосування Noneurop

### 1.2. Методи виявлення

Різні методи виявлення програм-вимагачів були запропоновані як дослідниками, так і експертами з промислової безпеки. Ці методи здебільшого працюють за допомогою статичного або динамічного аналізу. Статичний аналіз виконується шляхом перевірки коду без фактичного запуску виконуваного файлу. Динамічний аналіз виконується після запуску ймовірного програмного забезпечення-вимагача. Під час його виконання дії та системні виклики, здійснені підозрілим файлом, записуються, і на основі цієї інформації створюється остаточний звіт [8].

#### 1.2.1. Статичний аналіз

В [9] представлено метод, який використовуватиме статичний аналіз як підхід до виявлення програм-вимагачів. Метод містив інфраструктуру, яка спочатку сконструювала PE-файл, а потім застосувала динамічну компоновану бібліотеку (DLL) і вилучення викликів функцій до PE-файлу. Автори проаналізували 43 зразки програм-вимагачів, використовуючи різні параметри. У даному методі вдалося відрізнити програми-вимагачі від звичайних програм за допомогою графіка косинусної подібності на основі інструкцій зі складання. Незважаючи на те, що даний метод новий, він не може виявити найновіші сімейства програм-вимагачів, які використовують методи ухилення від сигнатур.

В [10] було розроблено метод GreatEatlon для виявлення програм-вимагачів Android. GreatEatlon використовував чотири етапи, щоб визначити наявність програм-вимагачів на пристрої Android. Перший етап полягав у відстеженні потоків коду виконуваного файлу, підозрюваного як програмне забезпечення-вимагач. GreatEatlon зміг легко визначити шлях програм-вимагачів, який використовується для аналізу потоків коду програм Android. Потім GreatEatlon пройшов виконуваний файл через другий етап, на якому перевірялися API DeviceAdmin, коли виконуваному файлу було дозволено запуснутися. Якщо виконуваний файл неправильно використав API для підвищення своїх привілеїв, він буде позначений як шкідливий. На останніх двох етапах застосовувалися методи статичного та ручного аналізу, щоб остаточно визначити поведінку підозрюваного виконуваного файлу.

В [11] запропоновано метод зі зворотнім проектуванням на WannaCry Ransomware, щоб зрозуміти, як працює шкідливий двійковий файл. Методом аналізу, який використовували автори, був статичний аналіз. IDA Pro використовувався для зворотного проектування, щоб зрозуміти внутрішню роботу програми-вимагача. PE-файл, який спочатку використовувався для першого етапу роботи програми-вимагача, на наступних етапах конвертувався в інші формати. По-перше, файл PE доставляється через експлоїт Eternal Blue, який потім використовує API Windows для вбудовування. На наступному етапі дві служби, mssecsvc.exe і tasksche.exe, відповідають за подальше розповсюдження шляхом зміни налаштувань середовища. Третій етап відповідає за загальне шифрування даних жертви, де taskche.exe завантажує .dll шифрування в пам'ять пристрою. Останній етап підтримується серверами C2C для відстеження платежів і перебігу зараження.

#### 1.2.2. Динамічний аналіз

В [12] подано метод, що включає машинне навчання та динамічний аналіз коду. EldeRan перевіряв зразки додатків за набором параметрів, які могли б визначити, чи є зразок програмним забезпеченням-вимагачем під час фази зараження. EldeRan успішно проаналізував виклики Windows API, операції з ключами реєстру, операції з файлами та каталогами, видалені файли та вбудовані рядки. Далі відбувався вибір функцій, які могли б відрізнити програмне забезпечення-вимагач від звичайного програмного забезпечення за критеріями взаємної інформації і класифікації. Загалом EldeRan досяг високого рівня успіху у виявленні нових сімейств програм-вимагачів.

Автори [13] вперше подали метод, що виявляв вплив програм-вимагачів на клінічне середовище. Автори розробили метод на основі машинного навчання, яка могла виявляти наявність програми-вимагача ще до того, як вона почала поширюватися. Метод виявляє зміни в мережевому трафіку під час запуску програми-вимагача. Потім ці шаблони передає до імовірнісного контрольованого класифікатора програм-вимагачів, щоб нарешті виділити складні характеристики зразка. Запропонований метод мав чотири основні компоненти. Перший модуль відстежує моделі трафіку, отримані в результаті живої вибірки. Наступний модуль потребує нагляду людини для генерації відповідного набору даних, який буде передано в алгоритми машинного навчання для виявлення та класифікації програм-вимагачів. Третій модуль ідентифікує аномальні моделі та позначав їх. Останній модуль зосереджений на методах зменшення за допомогою моделей машинного навчання на основі правил.

В [14] запропоновано метод зворотного проектування WannaCry Ransomware за допомогою динамічного режиму аналізу. У цьому випадку зразок WannaCry був запущений в системі, і його взаємодія з процесами, файловою системою, реєстром і мережевою активністю була записана. Автори використовували інструмент для запису підпису зразка. WannaCry, будучи багатоступеневою програмою-вимагачем, використовує процес для завантаження файлу tasksche.exe, який у свою чергу запускає різні процеси.

В [15] розроблено метод під назвою REDFISH, який стверджував, що виявляє наявність програм-вимагачів в організаційних налаштуваннях раніше за всіх фреймворків за допомогою аналізу мережевого трафіку. Для перевірки свого алгоритму автори використали близько 19 сімей програм-вимагачів. Цей метод розроблено для боротьби з програмами-вимагачами, створеними для шифрування файлів і папок на спільних мережевих дисках у Network Attached Storage. Після ретельної оцінки всіх середовищ, у яких можуть зберігатися програми-вимагачі, автори з'ясували, що існування SMB у мережі вказує на можливе середовище, де можуть перебувати програми-вимагачі. Вони використали пристрій перевірки мережевого трафіку, щоб проаналізувати поведінку вхідного та вихідного трафіку. Вони проаналізували використання команд на основі SMB, щоб знайти аномалії в трафіку. Автори провели кілька тестів алгоритму та повідомили, що REDFISH може виявити програми-вимагачі протягом 20 секунд.

В [16] подано метод раннього виявлення з новою функцією вилучення шаблону. Їхній метод зміг підготувати автоматизований аналітичний звіт. У звіті вдалося представити найбільш унікальні моделі та шляхи поведінки різних сімей програм-вимагачів. За результатами експериментів семи сімейств програм-вимагачів автори змогли з'ясувати ефективність кожного з алгоритмів, що використовуються для виділення патернів. Метод, розроблений авторами, можна використовувати на середніх і великих підприємствах, оскільки він може легко обробляти великі дані і виявляти програмне забезпечення-вимагач перед іншими стандартними галузевими рішеннями.

В [17] подано метод під назвою DeerAMD, що використовував набір даних для вилучення функцій. Очищені дані, отримані в результаті вилучення функцій, аналізувалися як статично, так і динамічно, щоб визначити програму. DeerAMD виявився ефективним підходом для раннього виявлення найдосконаліших сімейств програм-вимагачів. Це пов'язано з високою швидкістю перевірки DeerAMD за допомогою останнього та оновленого набору даних про зловмісне програмне забезпечення Android.

В [18] розроблено метод, який зміг виявити Crypto Ransomware, яке є найпоширенішим типом Ransomware. Він може виявляти майже всі ланцюжки крипто-вимагачів на стадії їх попереднього шифрування. Спочатку він перевіряє підозрілий двійковий файл шляхом порівняння контрольної суми, а потім, за допомогою алгоритму, який контролює попереднє шифрування API. Єдиним обмеженням є висока залежність від Windows API. Отже, якщо метод розгорнуто як єдиний механізм виявлення, він може не виявити останні сімейства.

В [19] представлено метод раннього виявлення Crypto Ransomware, але за допомогою іншого підходу. Модель використовувала два модулі виявлення, один для аналізу поведінки, а другий для оцінки



аномалій. Злиття обох результатів тоді дасть правильне рішення про те, чи є двійковий файл шкідливим. Завдяки результатам, показаним у роботі, модель показала надзвичайно хороші результати у виявленні ланцюгів програм-вимагачів. Даний метод можна використовувати для інших екосистем через надзвичайно низький рівень помилкових позитивних результатів.

Рисунок 4 ілюструє основні методи аналізу для виявлення програм із їхніми підтипами.



Рис. 4. Таксономія методів виявлення програм-вимагачів

Методи виявлення програм-вимагачів стали більш ефективними у боротьбі з великими атаками програм-вимагачів. Незважаючи на прогрес у техніках виявлення, найновіші сімейства програм-вимагачів продовжують уникати їх, оскільки ці методи не розроблені для захисту всіх ланцюгів програм-вимагачів одночасно. Рішення для виявлення створюються здебільшого для виявлення окремого ланцюга або одного типу програм-вимагачів, тому загальних рішень не існує, оскільки їх надзвичайно складно розробити.

#### 4.3. Методи зменшення негативних наслідків впливу ЗПЗ типу Ransomware

З моменту появи програм-вимагачів кіберзахисники намагаються розробити передові рішення безпеки, які б протистояли різним напрямкам програм-вимагачів. З іншого боку, розробники програм-вимагачів використовували нові вразливості, використовуючи недостатню поінформованість переважної більшості населення про кібербезпеку. Тому було запропоновано кілька методів, які можуть забезпечити ефективне видалення програм-вимагачів і відновлення пристроїв.

В [20] представлено метод, який використовує програмно визначену мережу для протидії програмам-вимагачам. Техніка використовувала динамічний чорний список серверів C&C під час виконання зразка. Без C&C сервера заражена машина не може отримати доступ до відкритого ключа, який використовуватиметься для її шифрування. Однак цей метод не міг ідентифікувати сервери, які раніше не використовувалися як сервери C&C. Техніка чорного списку працювала зі списком доступних проксі-серверів. Впровадження такої системи стало можливим завдяки двом додаткам на основі SDN, SDN1 і SDN2. SDN1 оцінив відповіді DNS від вхідного трафіку та перевіряв, чи домен уже присутній у базі даних незаконних проксі-серверів. SDN2 розширив функціональні можливості SDN1, переконфігурувавши всю мережеву інфраструктуру для блокування активності програм-вимагачів. SDN2 використовував протокол OpenFlow для блокування трафіку, пов'язаного зі зловмисним зразком.

В [21] використано метод зворотного проектування, щоб виявити фактичну роботу, за якою йдуть різні версії програм-вимагачів. Підхід, якого дотримувалися автори складався з двох модулів. Перший модуль використовував зворотне проектування, щоб знайти функції для видалення та відновлення даних у вихідному коді шкідливого ПЗ. За допомогою першого модуля автори змогли визначити різні властивості програм-вимагачів. Другий модуль використовував ізольоване програмне середовище для аналізу поведінки програм-вимагачів. За допомогою другого модуля були зібрані різні особливості поведінки вибірки. Потім автори перейшли до обговорення методів приховування файлів, які використовували зловмисники. Вони виявили, що зловмисники не використовують безпечні методи видалення файлів, які унеможливають відновлення файлів. У своєму експерименті вони змогли відновити дані через слабку методологію видалення, яку використовує програма-вимагач.

В [22] Байкара та ін. розробив метод за допомогою програми під назвою Safe Zone, у якій в одному файлі зберігаються всі файли користувача шляхом їх стиснення. Файл, створений авторами, був відомий як safezone.safe і зберігався в режимі безперервного запису, щоб інші джерела не могли його змінити. Програма використовувала систему журналювання під назвою File Watcher, яка реєструвала всі події в безпечній зоні, а також відстежувала зміни, зроблені в батьківських папках файлів, доданих до безпечної зони. Програма

мала ще одну функцію, яка перевіряла цілісність у safezone.safe. У разі атаки програм-вимагачів жертви можуть безпечно повернутися до останньої резервної копії, збереженої в безпечній зоні і відновити систему до попереднього стану.

В [23] Акбанов та ін. використали метод для захисту від програм-вимагачів WannaCry у мережі. У своєму методі автори обмежили поширення програми-вимагача лише на одному пристрої. Спочатку весь зловмисний трафік надсилається до контролера, який потім аналізує всі пакети та порівнює зловмисні пакети з базою даних чорного списку. Потім він перевіряє наявність індикаторів WannaCry. TCP-порт 445 контролюється контролером, і щойно надходить будь-який трафік із цього порту або TCP-порту 139, він обмежується контролером, щоб програми-вимагачі не могли поширюватися далі від зараженого хоста. Однак він не може виявити нові версії WannaCry, які використовують розширені експлойти через механізми ухилення, які вони розгортають.

В [24] Софос розробили метод зменшення кінцевих точок під назвою Intercept X, який стверджує, що усуває сімейства АРТ нульового дня. Intercept X використовує аналіз поведінки, щоб запобігти модифікації сімей програм-вимагачів у реєстрах. Рівень успіху X становить 99,7% у виявленні та зменшенні за допомогою лише однієї помилкової тривоги в реальному тестуванні.

На рисунках 5-8 показані результати аналізу підходів до виявлення ЗПЗ типу Ransomware на основі застосування Honeypot F-score значення.

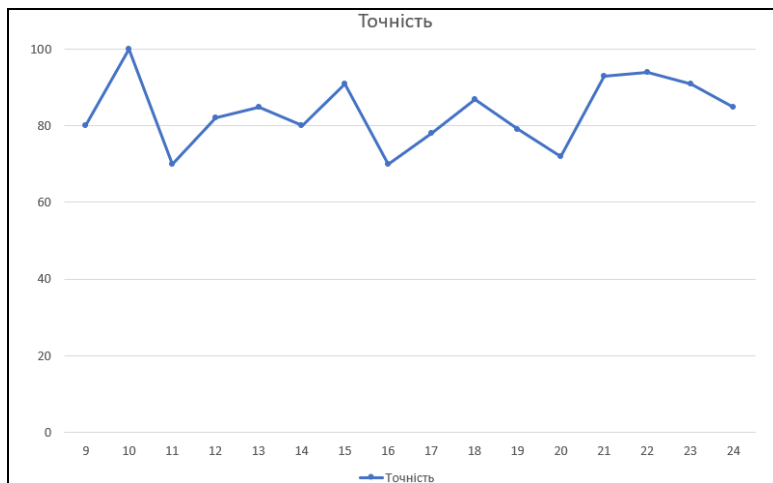


Рис. 5. Результати проаналізованих підходів до виявлення ЗПЗ типу Ransomware на основі застосування Honeypot з точки зору точності



Рис. 6. Результати проаналізованих підходів до виявлення ЗПЗ типу Ransomware на основі застосування Honeypot з точки зору запам'ятовування

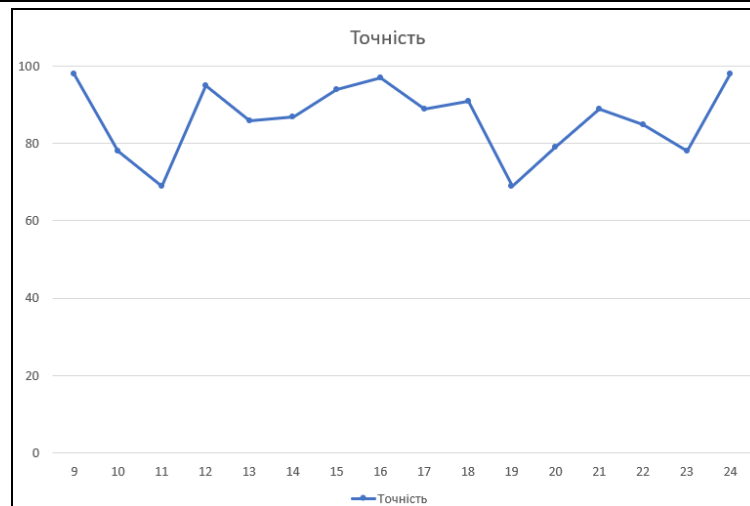


Рис. 7. Результати проаналізованих підходів до виявлення ЗПЗ типу Ransomware на основі застосування Honeyrot з точки зору точності

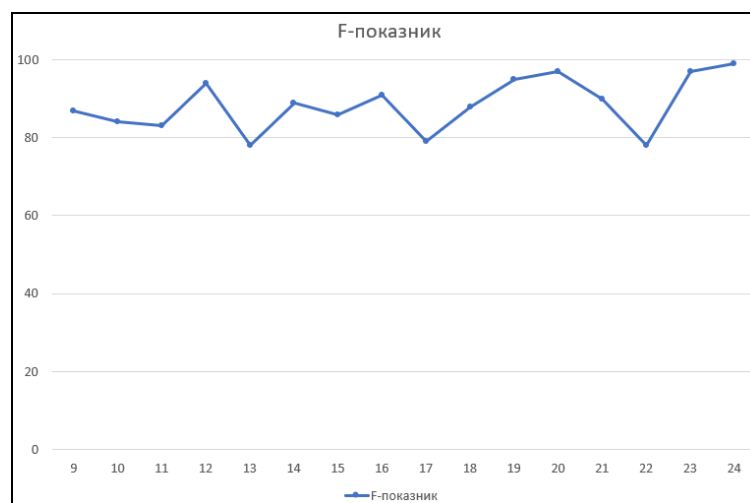


Рис. 8. Результати проаналізованих підходів до виявлення ЗПЗ типу Ransomware на основі застосування Honeyrot з точки зору F-показника

Результати продемонстрували, що метод Зімба та ін. досягає найкращих результатів для виявлення атак Ransomware. Завдяки своєму методу вони змогли відновити дані через слабку методологію видалення, яку використовує програма-вимагач. У зразках, проаналізованих авторами, майже всі зразки видалили тінюві копії, але завдяки своєчасному офлайн-резервному копію цих копій вдалося відновити пристрій користувача. Навіть у тих випадках, коли програми-вимагачі змогли уникнути пісочниці, автори змогли відновити дані, використовуючи методологію генерації пар відкритих ключів на пристрої жертви. Дані дослідження продемонстрували високу достовірність виявлення ЗПЗ типу Ransomware на основі застосування Honeyrot запропонованим методом до 99%.

Таким чином, існує велика кількість методів та засобів виявлення ЗПЗ типу Ransomware на основі застосування Honeyrot, однак основним їх недоліком, як показав аналіз, є їх недостатня адаптивність щодо їх еволюції та недостатня достовірність виявлення, що зумовлює необхідність розроблення нових методів виявлення.

#### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У роботі досліджено методи виявлення кіберзагроз типу Ransomware на основі застосування Honeyrot. Дослідження показує, що оскільки зловмісне програмне забезпечення є автоматизованим і націлюється на будь-яке місце довільно, розміщення приманки будь-де для виявлення активності є покращенням у порівнянні з відсутністю моніторингу взагалі. Експериментальні дослідження свідчать про високу достовірність запропонованих методів, зокрема достовірність виявлення кіберзагрози типу Ransomware, однак недостатню адаптивність вказаних методів при еволюції ЗРЗ.

#### Література

1. Nihad A. Hassan. Ransomware Revealed. 2019. Pp. 12-20.

2. Mark Dunkerley, Matt Tumbarello. *Mastering Windows Security and Hardening: Secure and protect your Windows environment from cyber threats using zero-trust security principles*, 2nd Edition. 2022. Pp. 124-132.
3. What is Netwalker Ransomware? *Attack Methods & Protection Tips*, 2022. URL: <https://www.upguard.com/blog/what-is-netwalker-ransomware>. – 15.09.2022p. (дата звернення: 15.09.2022).
4. Cybercrime To Cost The World \$10.5 Trillion Annually By 2025, 2022. URL: <https://cybersecurityventures.com/cybercrime-damages-6-trillion-by-2021>. – 18.09.2022p. (дата звернення: 18.09.2022).
5. Chee Keong NG, Lei Pan, Yang Xiang. *HoneyPot Frameworks and Their Applications: A New Framework (SpringerBriefs on Cyber Security Systems and Networks)* 1st ed. 2018 Edition. 2018. Pp. 48-61.
6. Allan Liska. *Ransomware: Understand. Prevent. Recover*. 2021. Pp. 238-261.
7. Antony Lewis. *The Basics of Bitcoins and Blockchains: An Introduction to Cryptocurrencies and the Technology that Powers Them (Cryptography, Derivatives Investments, Futures Trading, Digital Assets, NFT)*. 2018. Pp. 123-129.
8. Scott Augenbaum. *The Secret to Cybersecurity: A Simple Plan to Protect Your Family and Business from Cybercrime Hardcover*. 2019. Pp. 78-96.
9. Subedi, K.P.; Budhathoki, D.R.; Dasgupta, D. Forensic analysis of ransomware families using static and dynamic analysis. In *Proceedings of the 2018 IEEE Security and Privacy Workshops (SPW)*, San Francisco, CA, USA, 24 May 2018; pp. 181-185.
10. Zheng, C.; Dellarocca, N.; Andronio, N.; Zanero, S.; Maggi, F. Greateatlon: Fast, static detection of mobile ransomware. In *Proceedings of the International Conference on Security and Privacy in Communication Systems*, Guangzhou, China, 2016; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2016; pp. 619-634.
11. Hsiao, S.C.; Kao, D.Y. The static analysis of WannaCry ransomware. In *Proceedings of the 2018 20th International Conference on Advanced Communication Technology (ICTACT)*, Chuncheon, Korea, 2018; Pp. 157-161.
12. Sgandurra, D.; Muñoz-González, L.; Mohsen, R.; Lupu, E.C. Automated dynamic analysis of ransomware: Benefits, limitations and use for detection. arXiv 2016, arXiv:1609.03020.
13. Fernandez Maimo, L.; Huertas Celdran, A.; Perales Gomez, A.L.; Garcia Clemente, F.J.; Weimer, J.; Lee, I. Intelligent and dynamic ransomware spread detection and mitigation in integrated clinical environments. *Sensors* 2019, 19, 1114. [CrossRef]
14. Kao, D.Y.; Hsiao, S.C. The dynamic analysis of WannaCry ransomware. In *Proceedings of the 2018 20th International Conference on Advanced Communication Technology (ICTACT)*, Chuncheon, Korea, 2018; pp. 160-166.
15. Morato, D.; Berrueta, E.; Magaña, E.; Izal, M. Ransomware early detection by the analysis of file sharing traffic. *J. Netw. Comput. Appl.* 2018, 124, 13-32. [CrossRef]
16. Chen, Q.; Islam, S.R.; Haswell, H.; Bridges, R.A. Automated ransomware behavior analysis: Pattern extraction and early detection. In *Proceedings of the International Conference on Science of Cyber Security*, Nanjing, China, 9–11 August 2019; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2019; pp. 199–214.
17. Imtiaz, S.I.; ur Rehman, S.; Javed, A.R.; Jalil, Z.; Liu, X.; Alnumay, W.S. DeepAMD: Detection and identification of Android malware using high-efficient Deep Artificial Neural Network. *Future Gener. Comput. Syst.* 2021, 115, 846-856. [CrossRef]
18. Kok, S.; Abdullah, A.; Jhanjhi, N. Early detection of crypto-ransomware using pre-encryption detection algorithm. *J. King Saud-Univ.-Comput. Inf. Sci.* 2020, 1–16, Early Access. [CrossRef]
19. Al-rimy, B.A.S.; Maarof, M.A.; Prasetyo, Y.A.; Shaid, S.Z.M.; Ariffin, A.F.M. Zero-day aware decision fusion-based model for crypto-ransomware early detection. *Int. J. Integr. Eng.* 2018, 10, 82–88. [CrossRef]
20. Cabaj, K.; Mazurczyk, W. Using software-defined networking for ransomware mitigation: the case of cryptowall. *IEEE Netw.* 2016, 30, 13-20. [CrossRef]
21. Zimba, A.; Wang, Z.; Simukonda, L. Towards data resilience: The analytical case of crypto-ransomware data recovery techniques. *Int. J. Inf. Technol. Comput. Sci.* 2018, 10, 41-51. [CrossRef] *Sustainability* 2022, 14, 8 24 of 24
22. Baykara, M.; Sekin, B. A novel approach to ransomware: Designing a safe zone system. In *Proceedings of the 2018 6th International Symposium on Digital Forensic and Security (ISDFS)*, Antalya, Turkey, 21-25 March 2018. Pp. 1–5.
23. Akbanov, M.; Vassilakis, V.G.; Logothetis, M.D. Ransomware detection and mitigation using software-defined networking: The case of WannaCry. *Comput. Electr. Eng.* 2019, 76, 111-121. [CrossRef]
24. Sophos. *Endpoint Security Buyers Guide*. Available online: <https://www.enterpriseav.com/datasheets/endpointbuyersguide.pdf> (дата звернення 20.09.2022).

#### References

1. Nihad A. Hassan. *Ransomware Revealed*. 2019. Pp. 12-20.
2. Mark Dunkerley, Matt Tumbarello. *Mastering Windows Security and Hardening: Secure and protect your Windows environment from cyber threats using zero-trust security principles*, 2nd Edition. 2022. Pp. 124-132.
3. What is Netwalker Ransomware? *Attack Methods & Protection Tips*, 2022. URL: <https://www.upguard.com/blog/what-is-netwalker-ransomware>. – 15.09.2022p. (application date: 15.09.2022).

4. Cybercrime To Cost The World \$10.5 Trillion Annually By 2025, 2022. URL: <https://cybersecurityventures.com/cybercrime-damages-6-trillion-by-2021>. – 18.09.2022p. (application date: 18.09.2022).
5. Chee Keong NG, Lei Pan, Yang Xiang. HoneyPot Frameworks and Their Applications: A New Framework (SpringerBriefs on Cyber Security Systems and Networks) 1st ed. 2018 Edition. 2018. Pp. 48-61.
6. Allan Liska. Ransomware: Understand. Prevent. Recover. 2021. Pp. 238-261.
7. Antony Lewis. The Basics of Bitcoins and Blockchains: An Introduction to Cryptocurrencies and the Technology that Powers Them (Cryptography, Derivatives Investments, Futures Trading, Digital Assets, NFT). 2018. Pp. 123-129.
8. Scott Augenbaum. The Secret to Cybersecurity: A Simple Plan to Protect Your Family and Business from Cybercrime Hardcover. 2019. Pp. 78-96.
9. Subedi, K.P.; Budhathoki, D.R.; Dasgupta, D. Forensic analysis of ransomware families using static and dynamic analysis. In Proceedings of the 2018 IEEE Security and Privacy Workshops (SPW), San Francisco, CA, USA, 24 May 2018; pp. 181-185.
10. Zheng, C.; Dellarocca, N.; Andronio, N.; Zanero, S.; Maggi, F. Greateatlon: Fast, static detection of mobile ransomware. In Proceedings of the International Conference on Security and Privacy in Communication Systems, Guangzhou, China, 2016; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2016; pp. 619-634.
11. Hsiao, S.C.; Kao, D.Y. The static analysis of WannaCry ransomware. In Proceedings of the 2018 20th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), Chuncheon, Korea, 2018; Pp. 157-161.
12. Sgandurra, D.; Muñoz-González, L.; Mohsen, R.; Lupu, E.C. Automated dynamic analysis of ransomware: Benefits, limitations and use for detection. arXiv 2016, arXiv:1609.03020.
13. Fernandez Maimo, L.; Huertas Celdran, A.; Perales Gomez, A.L.; Garcia Clemente, F.J.; Weimer, J.; Lee, I. Intelligent and dynamic ransomware spread detection and mitigation in integrated clinical environments. Sensors 2019, 19, 1114. [CrossRef]
14. Kao, D.Y.; Hsiao, S.C. The dynamic analysis of WannaCry ransomware. In Proceedings of the 2018 20th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), Chuncheon, Korea, 2018; pp. 160-166.
15. Morato, D.; Berrueta, E.; Magaña, E.; Izal, M. Ransomware early detection by the analysis of file sharing traffic. J. Netw. Comput. Appl. 2018, 124, 13-32. [CrossRef]
16. Chen, Q.; Islam, S.R.; Haswell, H.; Bridges, R.A. Automated ransomware behavior analysis: Pattern extraction and early detection. In Proceedings of the International Conference on Science of Cyber Security, Nanjing, China, 9–11 August 2019; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2019; pp. 199–214.
17. Imtiaz, S.I.; ur Rehman, S.; Javed, A.R.; Jalil, Z.; Liu, X.; Alnumay, W.S. DeepAMD: Detection and identification of Android malware using high-efficient Deep Artificial Neural Network. Future Gener. Comput. Syst. 2021, 115, 846-856. [CrossRef]
18. Kok, S.; Abdullah, A.; Jhanjhi, N. Early detection of crypto-ransomware using pre-encryption detection algorithm. J. King Saud-Univ.-Comput. Inf. Sci. 2020, 1–16, Early Access. [CrossRef]
19. Al-rimy, B.A.S.; Maarof, M.A.; Prasetyo, Y.A.; Shaid, S.Z.M.; Ariffin, A.F.M. Zero-day aware decision fusion-based model for crypto-ransomware early detection. Int. J. Integr. Eng. 2018, 10, 82–88. [CrossRef]
20. Cabaj, K.; Mazurczyk, W. Using software-defined networking for ransomware mitigation: the case of cryptowall. IEEE Netw. 2016, 30, 13-20. [CrossRef]
21. Zimba, A.; Wang, Z.; Simukonda, L. Towards data resilience: The analytical case of crypto-ransomware data recovery techniques. Int. J. Inf. Technol. Comput. Sci. 2018, 10, 41-51. [CrossRef] Sustainability 2022, 14, 8 24 of 24
22. Baykara, M.; Sekin, B. A novel approach to ransomware: Designing a safe zone system. In Proceedings of the 2018 6th International Symposium on Digital Forensic and Security (ISDFS), Antalya, Turkey, 21-25 March 2018. Pp. 1–5.
23. Akbanov, M.; Vassilakis, V.G.; Logothetis, M.D. Ransomware detection and mitigation using software-defined networking: The case of WannaCry. Comput. Electr. Eng. 2019, 76, 111-121. [CrossRef]
24. Sophos. Endpoint Security Buyers Guide. Available online: <https://www.enterpriseav.com/datasheets/endpointbuyersguide.pdf> (application date: 20.09.2022).

---

За зміст повідомлень редакція відповідальності не несе

**Повні вимоги до оформлення рукопису**  
**[http://journals.khnu.km.ua/vestnik/?page\\_id=37](http://journals.khnu.km.ua/vestnik/?page_id=37)**

**Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету,  
протокол № 08 від 23.02.2023 р.**

Підп. до друку 23.02.2022 р. Ум.друк.арк. 54,31 Обл.-вид.арк. 51,67  
Формат 30x42/4, папір офсетний. Друк різнографією.  
Наклад 100, зам. № \_\_\_\_\_

---

Тиражування здійснено з оригінал-макету, виготовленого  
редакцією журналу “Вісник Хмельницького національного університету”  
редакційно-видавничим центром Хмельницького національного університету  
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1. тел (0382) 72-83-63