

ISSN 2307-5732

DOI 10.31891/2307-5732

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

5.2022

---

# ВІСНИК

**Хмельницького  
національного  
університету**

**Технічні науки**

---

**Technical sciences**

SCIENTIFIC JOURNAL

HERALD OF KHMELNYTSKYI NATIONAL UNIVERSITY

2022, Issue 5, Volume 313

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, 2022, № 5(313)**

---

**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=aUP9OYAAAAJ">http://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&amp;user=aUP9OYAAAAJ</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., Зацепкіна Н.М., д.т.н., Рубаненко О. О., д.т.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., Малогулко Ю. В., к.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), Кальчинські Томаш, доктор наук (Польща), Лунтовський Андрій, д.т.н. (Німеччина), Матушевський Мацей, доктор наук (Польща), Мушлевський Лукаш, доктор наук (Польща), Мушял Януш, доктор наук (Польща), Натріашвілі Тамаз Мамієвич, д.т.н., (Грузія), Попов Валентин, доктор природничих наук (Німеччина)

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

**Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету,  
протокол № 3 від 27.10.2022 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="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.  
Свідцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації  
**Серія KB № 24922-14862ПР від 12 липня 2021 року**

© Хмельницький національний університет, 2022  
© Редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету", 2022

## ЗМІСТ

<b>ОЛІЙНИК Г.</b> ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ЛАКОФАРБОВОЇ ПРОДУКЦІЇ МАРКИ «BECKERS» .....	9
<b>БОЙКО С., КОТОВ О., ВИШНЕВСЬКИЙ С., ЩОКІН В., ГУСАРОВА О.</b> АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В УМОВАХ АВІАЦІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВ .....	13
<b>ГУНЬКО І.В., ГРИБИК Р.І.</b> МОДЕЛЮВАННЯ ҐРУНТООБРОБНОГО АГРЕГАТУ З РОЗРОБКОЮ РЕКОМЕНДАЦІЇ ПІДБОРУ РОБОЧИХ ОРГАНІВ .....	18
<b>БАСИСТЮК О., МЕЛЬНИКОВА Н.</b> МУЛЬТИМОДАЛЬНЕ РОЗПІЗНАВАННЯ МОВЛЕННЯ НА ОСНОВІ ЗВУКОВИХ І ТЕКСТОВИХ ДАНИХ .....	22
<b>ЄФРЕМОВА О., ІВАНІШЕНА Т., ІЩУК Т., ТРУХІНА О., ЄФРЕМОВА Ю.</b> СУЧАСНИЙ СТАН ПОВОДЖЕННЯ З ПОЛІМЕРНИМИ ВІДХОДАМИ .....	26
<b>БАБИЧ А., КЕРНЕС В., ТКАЧЕНКО Д.</b> ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ 3D ДРУКУ В ДИЗАЙНІ ЧОЛОВІЧОГО КОСТЮМУ .....	32
<b>БАБИЧ А., ГАРАНІНА О., МОСКОВА О.</b> ФОРМУВАННЯ АСОРТИМЕНТУ ЧОЛОВІЧОГО ВЗУТТЯ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМИ І КОЛЬОРУ НА ОСНОВІ МАРКЕТИНГОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	37
<b>КАМІНСЬКИЙ Р., ШАХОВСЬКА Н., ХУДОБА Б.</b> ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ГРУПУВАННЯ ОПЕРАТОРСЬКОГО ПЕРСОНАЛУ ПОШУКОВИХ СИСТЕМ В СЕНСІ СТРЕСОСТІЙКОСТІ .....	42
<b>МИРОНЮК О., БАКЛАН Д., ГЛУХОВСЬКИЙ В.</b> ОСОБЛИВОСТІ ЗМОЧУВАННЯ ГІДРОФОБІЗОВАНИХ ПОВЕРХОНЬ ТЕКСТУРОВАНИХ ФЕМТОСЕКУНДНИМ ЛАЗЕРОМ .....	52
<b>НОВОСАД М.-Р.</b> АСИСТЕНТ ПАРКУВАННЯ ЯК МОДУЛЬ СИСТЕМИ РОЗУМНОГО МІСТА .....	56
<b>ПЕДЯШ В.</b> МОДЕЛЮВАННЯ КАНАЛУ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАВАННЯ ОТН З КВАДРАТУРНОЮ АМПЛІТУДНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ .....	61
<b>МИХАЙЛОВА Н., ПРИВАЛА В.</b> ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР В УМОВАХ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА СПЕЦІАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ІЗОЛЮЮЧИХ КОСТЮМІВ .....	66
<b>БОЛОТІНА В.</b> АНАЛІЗ НАЯВНИХ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ НАУКОВОЇ ДІЯЛЬНОСТІ СПІВРОБІТНИКІВ ВИЩИХ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДІВ .....	71
<b>ДАНИЛКОВИЧ А., САНГІНОВА О.</b> ЕКОЛОГІЧНО ОРІЄНТОВАНЕ ФОРМУВАННЯ ЛИМАРНО-СІДЕЛЬНОЇ ШКІРИ .....	77
<b>СОКОЛАН Ю., МІЛЬКО В., ТКАЧУК В., СОКОЛАН К.</b> РОЗРОБКА САЕ-СИСТЕМИ АНАЛІЗУ ЗНОШУВАННЯ ПІДШИПНИКІВ В УМОВАХ ПЕРЕКОСУ ОСЕЙ ВАЛА І ВТУЛКИ .....	82
<b>КАТЕНІН В., САМОЙЛЕНКО Н.</b> СУЧАСНИЙ СТАН ОПЕРАЦІЙ ПОВОДЖЕННЯ З ВІДХОДАМИ СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ В УКРАЇНІ .....	89

<b>ШІЛІНГ А., ПАСЬКО А.</b> РОЗРОБКА СТРУКТУРИ СЛОВНИКА ДЛЯ ЧАТ-БОТУ КАТАЛОГУ ОСВІТНІХ ПОСЛУГ ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ .....	94
<b>БАБІЙ С., МОШНОРІЗ М., ПРОЦЕНКО Д., ПАЯНОК О., ЖУКОВ О.</b> МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПІДЙОМНОЇ ЛЕБІДКИ КРАНА В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB .....	99
<b>БАГРІЙ О.</b> ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ІТЕРАЦІЙНИХ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ПЛОСКОЇ ФІЗИЧНО НЕЛІНІЙНОЇ ЗАДАЧІ .....	108
<b>БОЙКО Ю., ПЯТІН І., МОКРИЦЬКИЙ А.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ КІЛ СИНХРОНІЗАЦІЇ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ .....	113
<b>КРИЛИК Л.</b> ЗАСТОСУВАННЯ БАГАТОФАКТОРНОГО ДИСПЕРСІЙНОГО АНАЛІЗУ З МЕТОЮ ЯКІСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ФАКТОРІВ НА ЧУТЛИВІСТЬ ЄМНІСНОГО СЕНСОРА ВОЛОГОСТІ .....	122
<b>ГАЛИШ В., РАДОВЕНЧИК Я., ГОМЕЛЯ М., РАДОВЕНЧИК В.</b> ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ОЧИЩЕННЯ ПІДСІТКОВИХ ВОД ДЛЯ ПОВТОРНОГО ВИКОРИСТАННЯ В ЦЕЛЮЛОЗНО-ПАПЕРОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ .....	128
<b>ГОРДІЄНКО К., РАДОВЕНЧИК Я., КРИСЕНКО Т., РАДОВЕНЧИК В.</b> ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИСАДЖЕННЯ ІОНІВ КАЛЬЦІЮ З РОЗВЕДЕНИХ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ У ВИГЛЯДІ ФОСФАТІВ .....	134
<b>ГОРОХОВ І., КУЛІШ І., АСАУЛЮК Т., САРІБЄКОВА Ю.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ АНТИМІКРОБНОЇ ОБРОБКИ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРИГНІЧУВАННЯ БАКТЕРІАЛЬНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ІЗ ДОВКІЛЛЯ .....	141
<b>ГОРОХОВ І., КУЛІШ І., АСАУЛЮК Т., САРІБЄКОВА Ю.</b> ЕФЕКТИВНІСТЬ ОБРОБКИ АНТИМІКРОБНИМИ СКЛАДАМИ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ, ПРИЗНАЧЕНИХ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ У ПОБУТІ ТА ГРОМАДСЬКИХ ПРИМІЩЕННЯХ .....	146
<b>ЗАЛЮБОВСЬКИЙ М., ПАНАСЮК І.</b> РОЗРОБКА ВИСОКОПРОДУКТИВНОЇ ГАЛТУВАЛЬНОЇ МАШИНИ ЗІ СКЛАДНИМ ПРОСТОРОВИМ РУХОМ ДВОХ РОБОЧИХ ЄМКОСТЕЙ .....	152
<b>ЗАСПА Ю.</b> АНТИСИМЕТРИЯ ТА КАВІТАЦІЙНІ ТОПОЛОГІЧНІ РОЗРИВИ КОМПЛЕКСНОГО ПРОСТОРУ Й ІНЕРТНОЇ МАСИ В ОСНОВІ ЕКСИМЕРНИХ СИСТЕМ КВАНТОВОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ОБМІННОГО ІНЕРЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ. МОНОМЕРНА РІВНОВАГА ТА УТВОРЕННЯ РЕЧОВИНИ ....	159
<b>КОВАЛЬ В., ОРОБЧУК Б., ОСАДЦА Я., КОСТИК Л.</b> АВТОМАТИЗОВАНА ВИМІРЮВАЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ .....	168
<b>КРИВЕНЧУК Ю., ВАСИЛИК Р.</b> РОЗРОБЛЕННЯ ІНТЕРАКТИВНОГО ГРАФІЧНОГО ЗАСТОСУНКУ КОЛЬОРИЗАЦІЇ ЗОБРАЖЕННЯ	174
<b>КУДЛАЙ С., БОНДАРЕНКО Н., БОНДАРЕНКО В.</b> ПОБУДОВА ТА ВЕРІФІКАЦІЯ МОДЕЛІ ЦИФРОВОГО ЕКВАЛАЙЗЕРА .....	178
<b>ПЕЛИК Л., ОСТАПЧУК О., ПЕЛЕХ Ю.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНИХ ТА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗМІШАНИХ ТКАНИН ДЛЯ СПЕЦОДЯГУ ТИПУ «RIPSTOP» .....	185
<b>РУТКЕВИЧ В., КУШНІР В., ГАНЖА В.</b> МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГІДРАВЛІЧНОГО ПРИВОДА РІЗАКА ДЛЯ ВІДОКРЕМЛЕННЯ ТА ВИВАНТАЖЕННЯ БЛОК-ПОРЦІЇ КОРМУ ВІД КОРМОВОГО МОНОЛІТУ .....	189



<b>СТРЕЛЬБИЦЬКИЙ В.</b> ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ МЕХАНІЗМІВ ПОРТАЛЬНИХ КРАНІВ АЛЬБАТРОС .....	196
<b>ХОРОЛЬСЬКИЙ В., КОРЕНЕЦЬ Ю., ОМЕЛЬЧЕНКО О., ГОНЧАРЕНКО В.</b> ХОЛОДИЛЬНІ МАШИНИ В СИСТЕМІ УЗГОДЖЕНОГО УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯМ КОМПЛЕКСУ ПІДПРИЄМСТВО – ПРОМИСЛОВИЙ ХОЛОДИЛЬНИК .....	200
<b>ЩЕРБАНЬ В., ПЩЕНКО В., КОЛИСКО О., ГОЛЬДБЕРГ М., ЩЕРБАНЬ Ю.</b> ВПЛИВ ГРАНИЧНИХ УМОВ НА ЦІЛЬОВУ ФУНКЦІЮ ПРИ КОМП'ЮТЕРНОМУ ВИЗНАЧЕННІ ОПТИМАЛЬНОГО ШЛЯХУ ДЛЯ НЕОРІЄНТОВАНОГО ГРАФА .....	213
<b>БОЙКО Ю., СВАЧІЙ О.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ІНЕРЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ВІДХИЛЕННЯ ВАНТАЖУ БПЛА ВІД НУЛЬОВОЇ ТОЧКИ .....	218
<b>КОПИТІНА І., АНДРЕЄВА О., МОКРОУСОВА О., ОХМАТ О.</b> ФЕРМЕНТИ ТА ПІДХОДИ ДО ЇХ ВИКОРИСТАННЯ У ВИРОБНИЦТВІ НАТУРАЛЬНОЇ ШКІРИ .....	227
<b>СІНЧУК І., КОТЯКОВА М.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМІВ ТРИФАЗНИХ ЧОТИРИПРОВІДНИХ МЕРЕЖ З РОЗОСЕРЕДЖЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ .....	233
<b>ФРИШЕВ С., ЛУКАЧ В., ІКАЛЬЧИК М., ВАСИЛЮК В.</b> УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ТРАНСПОРТУВАННЯ ЗЕРНА ВІД КОМБАЙНІВ .....	238
<b>АНТОНЕНКО А., БРОВЕНКО Т., КРИВОРУЧКО М., СТУКАЛЬСЬКА Н., ТОЛОК Г., ТОНКИХ О.</b> МОДЕЛЮВАННЯ РЕЦЕПТУРНОГО СКЛАДУ ОЗДОРОВЧИХ ПРОДУКТІВ ХАРЧУВАННЯ НА ОСНОВІ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ КОМПОЗИЦІЙ .....	243
<b>ВАСИЛЬЧЕНКО І., КУПРІЙ Я., СЕМЕШКО О.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОСМЕТИЧНИХ ЕМУЛЬСІЙ ПРЯМОГО ТИПУ, РОЗРОБЛЕНИХ НА ОСНОВІ КОМПОЗИЦІЙ СИЛІКОНІВ .....	251
<b>МАЄВСЬКИЙ Я., ПРАВОРСЬКА Н.</b> ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЗАЦІЇ МАСШТАБУВАННЯ МІКРОСЕРВІСІВ У СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ КОНТЕЙНЕРИЗОВАНИМИ ЗАСТОСУНКАМИ KUBERNETES .....	260
<b>ПАШКЕВИЧ О., ВАЩИЩАК С., БОЙЧУК А., СТИСЛО Т., ДЕМЧИНА М.</b> ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЦІН НА РИНКУ НЕРУХОМОСТІ .....	265
<b>ГОРЯЩЕНКО С., ГОЛІНКА Є., ДРАПАК Г., ГОРЯЩЕНКО К., ПОЛІЩУК О.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ПОПЕРЕДНЬОГО СКЛЕЮВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ ПОЛІМЕРНИМИ МАТЕРІАЛАМИ .....	274
<b>ЛП'ЯНИНА-ГОНЧАРЕНКО Х., КОМАР М., САЧЕНКО А., ЛЕНДЮК Т.</b> МЕТОД ФОРМУВАННЯ КОНТЕКСТУ РЕКЛАМИ ТА ЦІЛЬОВОЇ АУДИТОРІЇ НА ОСНОВІ НАВЧАННЯ АСОЦІАТИВНИХ ПРАВИЛ .....	279
<b>МЄШКОВ Ю., ВОЙТОВИЧ О.</b> ПОРІВНЯННЯ МЕХАНІЧНИХ І ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПІДІЙМАЧІВ «LAUNCH» ТА «PEAK» .....	288
<b>ДЖУЛІЙ В., ПЕТЛЯК Н., ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ Ю., ПАХАР О.</b> МОДЕЛЬ ПОТОКУ ТЕКСТОВИХ ПОВІДОМЛЕНЬ ТЕМАТИЧНИХ ІНТЕРНЕТ-РЕСУРСІВ СИСТЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ .....	294
<b>ГОРОШКО А.В., КОВТУН І.І., ЗЕМБИЦЬКА М.В.</b> ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВІБРАЦІЙНОГО АНАЛІЗУ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ БОРТОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ .....	301

# CONTENT

<b>OLIJNYK H.</b> TECHNOLOGICAL FEATURES OF BECKERS BRAND PAINT PRODUCTS .....	9
<b>BOYKO S., KOTOV O., VYSHNEVSKY S., SHKOKIN V., HUSAROVA O.,</b> ASPECTS OF THE IMPLEMENTATION OF SOLAR ENERGY IN THE CONDITIONS OF AVIATION ENTERPRISES .....	13
<b>HUNKO I., HRYBYK R.</b> SIMULATION OF A GROUND PROCESSING UNIT WITH THE DEVELOPMENT OF RECOMMENDATIONS FOR THE SELECTION OF WORKING BODIES .....	18
<b>BASYSTIUK O., MELNYKOVA N.</b> MULTIMODAL SPEECH RECOGNITION BASED ON AUDIO AND TEXT DATA .....	22
<b>YEFREMOVA O., IVANISHENA T., ISHCHUK T., TRUKHINA O., YEFREMOVA Y.</b> THE CURRENT STATE OF POLYMER WASTE MANAGEMENT .....	26
<b>BABYCH A. , KERNESH V., TKACHENKO D.</b> USE OF ELEMENTS OF 3D PRINTING IN MEN'S SUIT DESIGN .....	32
<b>BABYCH A. , GARANINA O., MOSKOVA O.</b> FORMATION OF THE RANGE OF MEN'S SHOES TAKING INTO ACCOUNT THE CHARACTERISTICS OF SHAPE AND COLOR ON THE BASIS OF MARKETING RESEARCH .....	37
<b>KAMINSKY R., SHAKHOVSKA N., KHUDOBA B.</b> EXPERIMENTAL RESEARCH AND GROUPING OF OPERATING STAFF OF SEARCH SYSTEMS IN THE SENSE OF STRESS RESISTANCE ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ .....	42
<b>MYRONYUK O., BAKLAN D., GLUKHOVSKY V.</b> ASPECTS OF WETTING OF HYDROPHOBIZED SURFACES TEXTURED BY A FEMTOSECOND LASER .....	52
<b>NOVOSAD M.-R.</b> MULTISOURCE INTELLIGENT PARKING ASSISTANT .....	56
<b>PEDYASH V.</b> CHANNEL MODELING OF THE OTH OPTICAL TRANSMISSION SYSTEM WITH QUADRATURE AMPLITUDE MODULATION .....	61
<b>MIHAILOVA N., PRIVALA V.</b> STUDY OF THE INFLUENCE OF LOW TEMPERATURES IN DYNAMIC CONDITIONS ON SPECIAL MATERIALS FOR INSULATING SUITS OF CHEMICAL ENTERPRISES .....	66
<b>BOLOTINA V.</b> ANALYSIS OF THE AVAILABLE SYSTEMS OF SUPPORTING THE SCIENTIFIC ACTIVITIES OF EMPLOYEES OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS .....	71
<b>DANYLKO VYCH A., SANGINOVA O.</b> ENVIRONMENTALLY FRIENDLY PROCESSING OF HARNESS LEATHER .....	77
<b>SOKOLAN I., MYLKO V., TKACHUK V., SOKOLAN K.</b> PROJECT CONCEPTION OF CAE-SYSTEM FOR WEAR ANALYSIS OF FRICTION BEARING UNDER CONDITIONS OF SHAFT AND LINER AXIS MISALIGNMENT .....	82
<b>KATENIN V., SAMOILENKO N.</b> CURRENT STATE OF SOLAR PHOTOVOLTAIC PANELS WASTE MANAGEMENT OPERATIONS IN UKRAINE СУЧАСНИЙ .....	89

<b>SHILINH A., PASKO A.</b> DEVELOPMENT OF THE DICTIONARY STRUCTURE FOR THE CHAT-BOT OF EDUCATIONAL SERVICES CATALOG OF THE HIGHER EDUCATION INSTITUTION .....	94
<b>BABIY S., MOSHNORIZ M., PROCENKO D., PAYANOK O., ZHUKOV O.</b> SIMULATION OF WORKING MODES OF THE ELECTRICAL DRIVE OF A LIFTING CRANE WINCHES IN MATLAB .....	99
<b>BAHRII O.</b> SOFTWARE IMPLEMENTATION OF ITERATIVE ALGORITHMS FOR SOLVING A PLANAR PHYSICALLY NONLINEAR PROBLEM .....	108
<b>BOIKO J., MOKRYTSKY A., PYATIN I.</b> RESEARCH OF SYNCHRONIZATION CIRCUITS FOR DIGITAL COMMUNICATION SYSTEMS .....	113
<b>KRYLIK L.</b> APPLICATION OF MULTIFACTOR DISPERSION ANALYSIS WITH THE PURPOSE OF QUALITATIVE ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF FACTORS ON THE SENSITIVITY OF THE CAPACITIVE HUMIDITY SENSOR .....	122
<b>HALYSH V., RADOVENCHYK I., GOMELYA M., RADOVENCHYK V.</b> STUDY OF THE PROCESSES OF WASTEWATER TREATMENT FOR REUSE IN THE PULP AND PAPER INDUSTRY .....	128
<b>GORDIENKO K., RADOVENCHYK Y., KRYSENKO T., RADOVENCHYK V..</b> EFFICIENCY OF PLANTING CALCIUM IONS FROM DILUTE AQUEOUS SOLUTIONS IN THE FORM OF PHOSPHATES .....	134
<b>HOROKHOV I., KULISH I., ASAULYUK T., SARIBYEKOVA Y.</b> INVESTIGATION OF ANTIMICROBIAL TREATMENT OF TEXTILE MATERIALS ON THE EFFECTIVENESS OF INHIBITION OF BACTERIAL CONTAMINATION FROM THE ENVIRONMENT ...	141
<b>HOROKHOV I., KULISH I., ASAULYUK T., SARIBYEKOVA Y.</b> EFFECTIVENESS OF THE ANTIMICROBIAL TREATMENT OF TEXTILE MATERIALS FOR USE AT HOME AND IN PUBLIC SPACES .....	146
<b>ZALYUBOVSKIY M., PANASYUK I.</b> DEVELOPMENT OF A HIGH-PERFORMANCE HOLDING MACHINE WITH COMPLEX SPATIAL MOVEMENT OF TWO WORKING CAPACITIES .....	152
<b>ZASPA Y.</b> ANTI-SYMMETRY AND CAVITATION TOPOLOGICAL DISRUPTIONS OF COMPLEX SPACE AND INERT MASS ON THE BASIS OF EXCIMER SYSTEMS OF QUANTUM GENERATION OF EXCHANGE INERTIAL RADIATION. MONOMER EQUILIBRIUM AND MATTER FORMATION .....	159
<b>KOVAL V., OROBCHUK B., OSADTSA Y., KOSTYK L.</b> AUTOMATICAL MEASURING DEVICE FOR RESEARCHING THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF PHOTOELECTRIC MODULES .....	168
<b>KRYVENCHUK Y., VASYLYK R.</b> INTERACTIVE GRAPHIC APPLICATION FOR IMAGE COLORATION .....	174
<b>KUDLAI V., BONDARENKO N., BONDARENKO V.</b> CONSTRUCTION AND VERIFICATION OF A DIGITAL EQUALIZER MODEL .....	178
<b>PELYK L., OSTAPCHUK O., PELEH Y.</b> STUDY OF STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF MIXED FABRICS FOR SPECIAL CLOTHING TYPE «RIPSTOP» .....	185
<b>VRUTKEVYCH V., KUSHNIR V., GANZHA V.</b> MATHEMATICAL MODEL OF THE HYDRAULIC CUTTER DRIVE FOR CUTTING AND UNLOADING THE BLOCK-PORTION OF FEED FROM THE FEED MONOLITH .....	189

<b>STRELBITSKIY V.</b> EVALUATION OF THE RELIABILITY OF ALBATROSS GANTRY CRANE MECHANISMS .....	196
<b>KHOROLSKY V., KORENETS Y., OMELCHENKO O., HONCHARENKO V.</b> REFRIGERATION MACHINES IN THE SYSTEM OF CONSISTENT MANAGEMENT OF ELECTRIC ENERGY CONSUMPTION OF THE COMPLEX ENTERPRISE-INDUSTRIAL REFRIGERATOR.....	200
<b>SHCHERBAN V., ISHCHEENKO V., KOLISKO O., GOLDBERG M., SHCHERBAN Y.</b> INFLUENCE OF BOUNDARY CONDITIONS ON THE OBJECTIVE FUNCTION IN THE COMPUTER DETERMINATION OF THE OPTIMAL PATH FOR AN UNDIRECTED GRAPH .....	213
<b>BOIKO J., SVACHII O.</b> RESEARCH OF THE INERTIAL DEVIATION MEASUREMENT SYSTEM UAV CARGO FROM ZERO POINT .....	218
<b>KOPYTINA I., ANDREYEVA O., MOKROUSOVA O., OKHMAT O.</b> ENZYMES AND APPROACHES TO THEIR APPLICATION IN THE LEATHER PRODUCTION .....	227
<b>SINCHUK I., KOTIAKOVA M.</b> STUDY OF NON-SYMMETRICAL MODES OF THREE-PHASE FOUR-WIRE NETWORKS WITH DISTRIBUTED GENERATION .....	233
<b>FRYSHEV S., LUKACH V., IKALCHYK M., VASYLYUK V.</b> IMPROVEMENT OF GRAIN TRANSPORTATION TECHNOLOGY FROM COMBINES .....	238
<b>ANTONENKO A., BROVENKO T., KRYVORUCHKO M., STUKALSKA N., TOLOK G., TONKYKH O.</b> SIMULATION OF THE RECIPE COMPOSITION OF HEALTHY FOOD PRODUCTS BASED ON FUNCTIONAL COMPOSITIONS .....	243
<b>VASYLCHENKO I., KUPRIY Y., SEMESHKO O.</b> STUDY OF THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF DIRECT TYPE COSMETIC EMULSIONS DEVELOPED ON THE BASIS OF THE COMPOSITIONS OF SILICONES.....	251
<b>MAYEVSKIY Y., PRAVORSKA N.</b> IMPROVING THE EFFICIENCY OF AUTOMATION THE SCALING OF MICROSERVICES IN THE KUBERNETES CONTAINERIZED APPLICATION MANAGEMENT SYSTEM .....	260
<b>PASHKEVYCH O., VAHSCHYSHCHAK S., BOICHUK A., STYSLO T., DEMCHYNA M.</b> APPLICATION OF MACHINE LEARNING MODELS FOR PREDICTING PRICES ON THE REAL ESTATE MARKET .....	265
<b>HORIASHCHENKO S., HOLINKA Y., DRAPAK G., HORIASHCHENKO K., POLISHCHUK O.</b> RESEARCH OF TRANSVERSE GLUING OF LIGHTINDUSTRY PARTS WITH POLIMERIC MATERIALS .....	274
<b>LIPIANINA-HONCHARENKO K., KOMAR M., SACHENKO A., LENDIUK T.</b> METHOD OF FORMING THE CONTEXT OF ADVERTISING AND TARGET AUDIENCE BASED ON ASSOCIATIVE RULES LEARNING .....	279
<b>MIESHKOV Y., VOYTOVICH O.</b> CORRECT MECHANIC AND TECHNICAL CHARACTERISTICS OF «LAUNCH» AND «PEAK».....	288
<b>DZHULIY V., PETLIAK N., KHMELNYTSKYI Y., PAKHAR O.</b> TEXT MESSAGE FLOW MODEL OF THEMATIC INTERNET RESOURCES INFORMATION SECURITY FORECASTING SYSTEMS.....	294
<b>GOROSHKO A., KOVTUN I., ZEMBYTSKA M.</b> IMPROVING THE ACCURACY OF THE VIBRATION ANALYSIS OF ON-BOARD ELECTRONICS PRINTED BOARDS.....	301

ОЛІЙНИК Галина

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-6519-7938>e-mail: [galina\\_olijnyk@ukr.net](mailto:galina_olijnyk@ukr.net)

## ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ЛАКОФАРБОВОЇ ПРОДУКЦІЇ МАРКИ «BECKERS»

*В роботі наведено результати досліджень, що пов'язані з лакофарбовою продукцією торгової марки «BECKERS». Розглянуто асортимент лакофарбової продукції. Досліджено особливості застосування продукції, її технологічні та екологічні характеристики.*

*Ключові слова: лакофарбова продукція, торгова марка, «BECKERS», технологічні характеристики.*

OLIJNYK Halina  
Khmelnytskyi National University

### TECHNOLOGICAL FEATURES OF BECKERS BRAND PAINT PRODUCTS

*The work presents the results of research related to the use of paint and varnish products of the "BECKERS" brand in a modern interior. The technological characteristics of the products were studied. Specific features of product application are determined. Today, paint and varnish products of the "BECKERS" brand are a leading trade and retail network that offers high-quality imported varnishes, paints and other paint and varnish materials. Turning to the "BECKERS" brand, you can get high-quality products, which today are presented in a fairly wide range. These are varnishes, paints, antiseptics, primers, putties for finishing all types of internal and external surfaces. The full range of products includes varnishes, paints and other paint and varnish materials of more than four thousand items. The offered varnishes and paints satisfy the most demanding taste. You can not only choose suitable varnishes or paints, but also get technical assistance on how to correctly apply and combine varnishes, paints and other paint and varnish materials.*

*The "BECKERS" trademark has a comprehensive approach to the formation of an assortment policy. Therefore, the trade network offers not only varnishes and paints, but also related materials, such as painting tool ANZA (Anza, Sweden), abrasive materials KA.ER (KA.EF, Germany), personal protective equipment MSA-Auer (MCA-Auer, USA).*

*With the help of "BECKERS" paint and varnish products, you can professionally paint a wooden house and give it an aesthetic appeal and protect it from various external adverse environmental factors. The "BECKERS" brand offers the most modern varnishes, paints and other paint and varnish materials and technologies in the most optimal ratio of price and quality and maximally meet modern demands and key trends in woodworking.*

*The use of "Beckers" brand products in a modern interior requires compliance with a special material application technology, use of special equipment, etc.*

*Those who want to keep up with the times should pay attention to the most modern European materials for furnishing interiors. An example of such an application is the products of the "Beckers" trademark. It does not contain toxic impurities and can be used for processing almost any premises. VAGTLAZUR decorative paint creates a unique visual sensation of velvet fabric. The paint has pastel-sand halftones and is produced in a wide variety of colors and shades. VAGTLAZUR provides impeccable reliability, high impact and scratch resistance, adds uniqueness, refinement and elegance to the interior.*

*Key words: paint products, trademark, "BECKERS", technological characteristics.*

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

Попит на використання лакофарбової продукції в сучасному інтер'єрі на сьогоднішній день є великим. Пропозиції ринку настільки різнобарвні, що важко зразу визначитись у виборі. Продукція європейських виробників продовжує утримувати лідируючі позиції. На сьогоднішній день попитом у споживачів користується лакофарбова продукція виробництва Швеції торгової марки «BECKERS». Проте, мало відомостей, що стосується особливостей використання даної продукції, а саме технології використання, наявність відповідного обладнання чи інструментів для роботи, наявність професійних навиків тощо.

### Аналіз досліджень та публікацій

Великий попит лакофарбових матеріалів на споживчому ринку зумовлює актуальність організації їх виробництва у необхідних кількостях, а також необхідність використання спеціалізованого обладнання та висококваліфікованих фахівців викликає потребу в систематизації даної продукції.

На сьогоднішній день виробництво фарби в промислових масштабах являє собою складний процес з використанням великої кількості різних штучних компонентів, багато з яких токсичні і шкідливі для здоров'я та навколишнього середовища. В роботі [1-2] наведено дані про лакофарбову продукцію торгової МАРКИ «BECKERS», а також про те, що вся продукція сертифікована і рекомендована шведської асоціацією з боротьби проти астми та алергії.

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є систематизація даних про лакофарбову продукцію торгової марки «BECKERS», з ціллю визначення технологічних особливостей використання продукції в сучасному інтер'єрі та укомплектування інформативного ринку.

### Виклад основного матеріалу

На сьогоднішній день лакофарбова продукція торгової марки «BECKERS» є провідною торгово-роздрібною мережею, що пропонує високоякісні імпорتنі лаки, фарби та інші лакофарбові матеріали. Звертаючись до марки «BECKERS», можна отримати високоякісну продукцію, яка на сьогоднішній день представлена в досить широкому асортименті. Це лаки, фарби, антисептики, ґрунтовки, шпаклівки для обробки всіх видів внутрішніх і зовнішніх поверхонь. Повний асортимент продукції включає лаки, фарби та інші лакофарбові матеріали більш ніж чотирьох тисяч найменувань. Пропоновані лаки і фарби задовольняють найвибагливіший смак. Можна не тільки вибрати відповідні лаки або фарби, а й також отримати технічну допомогу як правильно застосовувати і поєднувати лаки, фарби та інші лакофарбові матеріали [2].

Торгова марка «BECKERS» комплексно підходить до формування асортиментної політики. Тому в торговельній мережі пропонуються не тільки лаки і фарби, а й супутні матеріали, такі як малярський інструмент ANZA (Анза, Швеція), абразивні матеріали KA.PP (KA.EP, Німеччина) засоби індивідуального захисту MSA-Auer (MCA-Auer, США).

За допомогою лакофарбової продукції торгової марки «BECKERS» можна професійно пофарбувати дерев'яний будинок, надати йому естетичної привабливості і захистити від різних зовнішніх несприятливих факторів впливу навколишнього середовища. Торгова марка «BECKERS» пропонує найсучасніші лаки, фарби та інші лакофарбові матеріали і технології в найбільш оптимальному співвідношенні ціни та якості і які максимально відповідають сучасним запитам і ключовим тенденціям деревообробки [3].

Використання в сучасному інтер'єрі продукції торгової марки «Beckers» потребує дотримуватись спеціальної технології застосування матеріалів, використання спеціального обладнання тощо.

Результати дослідження особливостей використання продукції торгової марки «Beckers» (Фарби) наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

#### Продукція торгової марки «Beckers». Фарби

Назва	Тип матеріалу	Застосування	Теоретичний розрахунок	Розріджувач	Засіб нанесення	Час висихання при +23°C		Ступінь блиску	Екологічність
						На відліпання	Наступний шар		
БЕККЕР-ПЛАСТ 3	Вододисперсійна латексна фарба, призначена для фарбування стін і стелі у приміщенні, де потрібно отримати м'яку поверхню	Для нанесення майже на усі види покриття, такі як паперові, вінілові шпалери, ДСП та ДВП, оштукатурені, бетонні плити та стіни.	6-8	Вода	Пензлик, валик, розпилювач	30 хв.	3 год.	Зовсім матова	-
ДЕКОР ВАГТЛАЗУР	Матова акрилова латексна декоративна фарба на водній основі. Призначена для нанесення на різні види покриття стін, такі як шпалери, бетонні та оштукатурені поверхні. Створює яскраву поверхню із красивим насиченим кольором.	Для нанесення майже на усі види покриття, такі як паперові, вінілові шпалери, ДСП та ДВП, оштукатурені, бетонні плити та стіни.	15	Вода	Пензлик, валик	-	3 год.	Матова	-
ДЕКОР МЕТАЛІ	Вододисперсійна акрилова фарба на водній основі для внутрішніх робіт. Вона добре підходить для декоративного пофарбування стін, стель, колон, елементів декору, меблів. Дана фарба створює красиве металеве покриття.	Застосовується у якості ґрунтовки та оздоблюючого покриття. У своєму складі не містить уайт-спірит або інший розчинник.	7-8	Вода	Пензлик, валик	12 год.	48 год.	Напів-глянцева	-
СКОТТЕ 3	Матова водорозбавляюча латексна фарба, до складу якої не входить органічні розчинники. Призначена для пофарбування стін та стелі, де потрібно отримати матову поверхню.	Для оздоблення нових непофарбованих поверхонь або поверхонь, раніше пофарбованих латексною фарбою.	6-8	Вода	Пензлик, валик, розпилювач	30 хв.	3 год.	Зовсім матова	Є

Результати дослідження особливостей використання продукції торгової марки «Beckers» (Лаки) наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

## Продукція торгової марки «Beckers». Лаки

Назва	Тип матеріалу	Застосування	Теоретичний розрахунок	Розріджувач	Засіб нанесення	Час висихання при +23°C		Ступінь блиску	Еко-позначки
						На відліпання	Наступний шар		
ДЕКОР КЛАРЛАК, БЛАНК, МАТТ, ХАЛВБЛАНК	Водорозчинний лак, призначений для оздоблення меблів та внутрішніх дерев'яних поверхонь.	Для нанесення на поверхні більшості порід деревини. Можна використовувати для обробки раніше лакованих поверхонь.	5-12	Вода	Пензлик	2 год.	16 год.	Глянцева, матова, напівглянцева	-
ОКСАЛАККА	Лак для обробки сучків.	Внутрішні та зовнішні роботи ізоляція сучків і смол на дерев'яних поверхнях хвойних порід.	0,8	-	Пензлик	-	-	-	-
УНИКА СУПЕР	Швидкосохнучий уретан-алкідний лак. Має речовини, які уповільнюють процес пожовтіння у результаті дії УФ-випромінювання.	Для лакованих внутрішніх та зовнішніх дерев'яних поверхонь.	12-14	Уайт-спірит 1050	Пензлик, розпилювач	6 год.	24 год.	Глянцева, напів-глянцева, напівматова	-
ЛЮОТЕН	Однокомпонентний водорозбавляючий меблевий лак на основі акрил-поліуретанової дисперсії. Формує тверде зносостійке напівматове покриття, яке є стійким до періодичної дії побутових миючих речовин.	Лак спеціального застосування для внутрішніх та зовнішніх робіт, призначений для уповільнення переходу смоли скрізь пофарбовану поверхню.	8-10	Вода	Пензлик, валик, розпилювач	2 год.	Згод	Глянцева, напівматова	-

Відчуває ринок лакофарбової продукції і вплив моди в ремонтних роботах. Зокрема, прагнення підкреслити натуральність дерев'яних вікон і дверей знижує попит на фарби для внутрішніх робіт по дереву і підвищення попиту на столярні лаки. А в галузі євроремонтів зростає популярність текстурного покриття стін, а отже, і відповідних дорогих фарб.

Тим, хто хоче йти в ногу з часом, необхідно звернути увагу на найсучасніші європейські матеріали для облаштування інтер'єрів. Прикладом такого застосування є продукція торгової марки «Beckers». Вона не містить токсичних домішок і може використовуватися для обробки практично будь-яких приміщень. Декоративна фарба ВАГТЛАЗУР торгової марки «Beckers» створює неповторне зорове відчуття оксамитової тканини. Фарба має пастельно - піскові півтони і випускається найрізноманітніших кольорів і відтінків. ВАГТЛАЗУР забезпечує бездоганну надійність, високу опірність ударам і подряпинам, додає інтер'єру неповторність, вишуканість і елегантність. За допомогою лаку ЛЮОТЕН торгової марки «Beckers» можна повторити будь-яке поєднання забарвлень килимів, занавісок та меблів, виконати стіни кімнати у вигляді улюбленої картини, морських хвиль або будь-якого іншого вподобаного вами образу чи малюнка. Покриття не має запаху, легко миється, володіє підвищеною зносостійкістю і є екологічно чистим. ЛЮОТЕН з білою базою буде ідеальним обробним матеріалом для дитячої кімнати. Безумовно, вище перелічені фарби та лаки - лише мала частина нескінченної різноманітності сучасних оброблювальних матеріалів, які можна підібрати для будь-якого приміщення [4].

Крім того, лакофарбові матеріали торгової марки «Beckers», в порівнянні з вітчизняними, мають кращу покривну здатність і відповідно менший розхід матеріалу, не потребують спеціальних розчинників, менш вибагливі до поверхні нанесення матеріалу.

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

Проведені дослідження показали, що лакофарбова продукція торгової марки «Beckers» володіє хорошими технологічними та естетичними характеристиками, є екологічним та якісним матеріалом, чим заслужила прихильність вітчизняного споживача та продовжує утримувати лідируючі позиції. Даний матеріал можна використати для упорядкування інформативного ринку лакофарбової продукції.

**Література**

1. Ринок лакофарбових матеріалів в Україні. URL: <https://ua-referat.com/> (дата звернення 14.07.2022).
2. Фарба, ґрунтівка продукцію торгової марки «Beckers». URL: [www.economy.nayka.com.ua](http://www.economy.nayka.com.ua) – (дата звернення 16.07.2022 р.).
3. Лакофарбова продукція продукцію торгової марки «Beckers». URL: <http://profbud.zp.ua/category/lakofarbova-produkcija/> (дата звернення 18.07.2022 р.).
4. Фарбування стін продукцією продукцію торгової марки «Beckers». URL: <https://uk.thebest-home.com/14266274-priming-paint-for-walls-types-prices-opinions-advice> (дата звернення 18.07.2022 р.).

**References**

1. Market of paints and varnishes in Ukraine. URL: <https://ua-referat.com/> (access date 07/14/2022).
2. Paint, primer products of the trade mark "Beckers". URL: [www.economy.nayka.com.ua](http://www.economy.nayka.com.ua) - (date of application 07/16/2022).
3. Paint products of the "Beckers" brand. URL: <http://profbud.zp.ua/category/lakofarbova-produkcija/> (date of application 07/18/2022).
4. Wall painting with Beckers brand products. URL: <https://uk.thebest-home.com/14266274-priming-paint-for-walls-types-prices-opinions-advice> (access date 07/18/2022).

Надійшла/Paper received : 16.09.2022 р. Надрукована/Printed : 01.11.2022 р.



БОЙКО Сергій

Національний університет Запорізька політехніка

[boiko\\_s\\_n@ukr.net](mailto:boiko_s_n@ukr.net)

КОТОВ Олексій

Національний університет Запорізька політехніка

<https://orcid.org/0000-0003-2856-1072>[kab2611@ukr.net](mailto:kab2611@ukr.net)

ВИШНЕВСЬКИЙ Святослав

Національний університет Запорізька політехніка

[svyato.vish.ua@gmail.com](mailto:svyato.vish.ua@gmail.com)

ЩОКІН Вадим

Національний університет Запорізька політехніка

ГУСАРОВА Оксана

Національний університет Запорізька політехніка

<https://orcid.org/0000-0002-9823-0044>[o\\_v.gusarova@ukr.net](mailto:o_v.gusarova@ukr.net)

## АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В УМОВАХ АВІАЦІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВ

Враховуючи сучасні реалії та важливість авіаційної складової у транспортно-логістичній системі України, важливим чинником на сьогоднішній день є підтримання на належному рівні авіаційної безпеки підприємств авіаційної галузі України. Однією із важливих складових при цьому є електропостачання вказаних об'єктів. Між тим, у межах приаеродромної території можуть бути деякі перешкоди: природні - рельєф місцевості (височини, гори) і висока рослинність; штучні - будівлі, споруди, висота яких обмежується умовними горизонтальними і похилими площинами. Тому можна розглядати при аеродромну територію, як потенційний полігон для встановлення сонячних фотоелектричних установок. З метою вирішення завдання підвищення авіаційної безпеки об'єктів авіаційної галузі України, проаналізовано можливість та особливості впровадження сонячної енергетики в мовах підприємств вказаної галузі. Запропоновано математичну модель сонячної фотоелектричної установки, що дає можливість оцінити вплив енергетичні характеристики в залежності від зовнішніх факторів.

**Ключові слова:** розосереджена генерація, електропостачання, аеродром, аеропорт, сонячна енергетика.

BOYKO Serhiy, KOTOV Olesiy, VYSHNEVSKY Svyatoslav,

SHKOKIN Vadim, HUSAROVA Oksana

National University Zaporizhzhia Polytechnic

## ASPECTS OF THE IMPLEMENTATION OF SOLAR ENERGY IN THE CONDITIONS OF AVIATION ENTERPRISES

Taking into account modern realities and the importance of the aviation component in the transport and logistics system of Ukraine, an important factor today is the maintenance of aviation security at the appropriate level of the enterprises of the aviation industry of Ukraine. The research results of various industrial facilities showed that they have different specifics of the technological process and their unique features of the implementation of distributed generation sources. One of the important components in this case is the electricity supply of the specified objects. Meanwhile, there may be some obstacles within the airport territory: natural - terrain relief (highlands, mountains) and high vegetation; artificial - buildings, structures, the height of which is limited by conventional horizontal and inclined planes. The main reason for the growing interest in solar energy is the falling cost of generated electricity. 20 years ago, the production of one kilowatt cost 1 euro. Today, in countries rich in the sun, 1 kW costs less than 10 euro cents, and in some regions 6-7 cents. The possibility and specifics of the operation of a solar power plant (SPP) in the conditions of operating aviation enterprises were analyzed. Therefore, it is possible to consider the airfield area as a potential training ground for the installation of solar photo-electric installations. In order to solve the problem of improving the aviation safety of the objects of the aviation industry of Ukraine, the possibility and peculiarities of the introduction of solar energy in the languages of enterprises of the specified industry were analyzed. A mathematical model of a solar photovoltaic installation was proposed, which makes it possible to evaluate the influence of energy characteristics depending on external factors.

**Keywords:** decentralized generation, power supply, airfield, airport, solar energy.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

Одним з основних елементів авіатранспортної системи країни, є аеропорт, що в свою чергу поділяються на місцеві і міжнародні.

Аеропорт це транспортне підприємство цивільної авіації, що здійснює регулярні повітряні перевезення пасажирів, багажу, вантажів і пошти, та виконує обслуговування польотів повітряних суден [1].

Для виконання зазначених цілей сучасний аеропорт складається з великого числа будівель і споруд, найголовнішими з яких є система злітно-посадкових смуг, рульових доріжок, перони, місця стоянок, аеровокзали, ангари та інші будівлі. У аеропортах є автоматизовані системи управління, комплексні засоби вбудованої і пересувної механізації, розгалужена мережа інженерних комунікацій, що забезпечує експлуатаційне утримання споруд та обслуговування авіаційної техніки [1].

Аеродром - основна частина аеропорту, що представляє собою спеціально підготовлену земельну ділянку з комплексом споруд і устаткування, що забезпечують зльоти, рулювання, зберігання і

обслуговування повітряних суден. У межах аеродрому на ділянці розташування перону, що зазвичай прилегло до аеровокзалу, виконуються посадка пасажирів у повітряні судна та висадка з них, транспортування або переміщення пасажирів з аеровокзалу і назад, вантажно-розвантажувальні операції з вантажем, багажем і поштою [1, 2].

Між тим, до аеродрому прилягає приаеродромна територія, у повітряному просторі якої проводиться маневрування повітряних суден.

Враховуючи сучасні реалії та важливість авіаційної складової у транспортно-логістичній системі України, важливим чинником на сьогоднішній день є підтримання на належному рівні авіаційної безпеки підприємств авіаційної галузі України. Однією із важливих складових при цьому є електропостачання вказаних об'єктів.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У ряді попередніх досліджень автори обґрунтовують позитивний ефект від впровадження джерел розосередженої генерації в умовах різних промислових підприємств. Але, результати досліджень різних промислових об'єктів показали, що вони мають різну специфіку технологічного процесу та свої унікальні особливості впровадження джерел розосередженої генерації [2-10].

Між тим, актуальною науково-практичною задачею є дослідження принципів та механізму впровадження в системи електропостачання авіаційних підприємств джерел РГ.

### Формулювання цілей статті

Метою цієї роботи аналіз можливості та особливостей впровадження сонячної енергетики в системи електропостачання авіаційних підприємств в аспекті впровадження джерел розосередженої генерації.

### Виклад основного матеріалу

Приаеродромна територія являє собою прямокутник, розміри якої залежать від класу аеродрому. Ширина прямокутника змінюється від 25 до 40 км. Крайні частини можуть мати довжину від 25 до 30 км, а середні - 20-60 км. Таким чином, довжина приаеродромної території може складати 100 км і більше, а ширина до 1/3 від загальної довжини [1].

У межах середньої частини приаеродромної території перш за все забезпечується безпека польотів повітряних суден з одним непрацюючим двигуном, відходу на друге коло, заходження на посадку з розворотом і виходом на посадковий курс, заходу на посадку по прямокутними маршрутами; в межах крайніх частин - безпека повітряних суден при заході на посадку по прямій [1].

Між тим, у межах приаеродромної території можуть бути деякі перешкоди: природні - рельєф місцевості (височини, гори) і висока рослинність; штучні - будівлі, споруди, висота яких обмежується умовними горизонтальними і похилими площинами. Тому можна розглядати при аеродромну територію, як потенційний полігон для встановлення сонячних фотоелектричних установок [1].

Як відомо, для обґрунтування параметрів і режимів енергетичних установок сонячної енергетики, працюючих в невеликих локальних енергосистемах (встановленою потужністю до декількох МВт або сотень кВт), або на автономного споживача (встановлена потужність, як правило не більше 100 – 200 кВт), необхідними даними при неперервному графіку зміни сонячного випромінювання в часі (для особливо відповідальних споживачів) або, що найбільш розповсюдженно в енергетичних режимах, – середньогодинні данні про прихід сонячного випромінювання на задану сприймаючу площадку [5].

У таких випадках не обов'язково розробляти спеціальну методику розрахунку середньогодинного приходу сонячного випромінювання на довільно орієнтовану приймальну площадку [6].

При цьому для збільшення значення приходу сонячного випромінювання на приймаючу площадку остання повинна мати неперервну орієнтацію на Сонце шляхом зміни кута нахилу її поверхні відносно горизонту  $\beta$ , а також азимута приємної площі  $\gamma$ .

Значення потоку суммарного сонячного випромінювання можна одержати на основі перерахунку аналогічних складових приходу сонячного випромінювання на горизонтальну приймаючу площадку.

Час буде вибиратися як істинний сонячний час без врахування часових поясів, враховуючи той факт, що подібне допущення прийняте і для всіх довідників і спеціальних баз даних. Врахування часу слід проводити уже на рівні безпосередніх розрахунків по балансу потужності споживача в часі [7].

Для відбитої радіації при  $0 \leq \beta \leq 90^\circ$  вказане розходження не перевищує 20%, а при  $\beta=90^\circ$  розходження може досягати 100% ( $\beta=180^\circ$ ).

Основна причина зростаючого інтересу до сонячної енергетики - падаюча собівартість з генерованої електроенергії. 20-ть років тому виробництво одного кіловата коштувало 1 євро. Сьогодні ж в країнах, багатих сонцем, 1 кВт обходиться менш ніж в 10 євроцентів, а в деяких регіонах в 6-7 центів.

Була проаналізована можливість і специфіка роботи сонячної електростанції (СЕС) в умовах діючих авіаційних підприємств.

Якщо розглядати фотоелектричну установку (ФЕУ) то можна враховувати послідовне  $R_n$  і паралельне  $R_{ш}$  опір сонячних фотоелементів. Послідовний опір включає опір самого напівпровідникового матеріалу, з якого виготовлений сонячний фотоелемент, перехідний опір напівпровідник – метал, опір контактів. Шунтуючі опори утворюються за рахунок наявності зворотного опору р–п переходу, різних провідних плівок або забруднень [7].

При експлуатації СФУ в умовах авіаційних підприємств, є велика вірогідність повітряних збурень,

що піднімуть в атмосферу пил, що відкладуться на прилеглих до її джерел територіях [8].

Враховуючи умови оточуючого середовища, є доцільним введення додаткового коефіцієнту запиленості поверхні скла –  $k_{зан}$ . Значення даного коефіцієнту залежить від коефіцієнту корисної дії номінального сонячного елемента відносно ККД розрахункового.

$$\eta_{розр.(ФЕУ)} \leq \eta_{ном.(ФЕУ)}$$

тобто

$$K_{зан} = (0 \dots \eta_{розр.(ФЕУ)})$$

При різних значеннях  $k_{зан}$  необхідно проводити певні дії, щодо обслуговування сонячних панелей, з метою підвищення їх віддачі [8, 9]:

- якщо  $k_{зан}=0$  то необхідно проводити непланову очистку СФУ, або висилати бригаду для перевірки стану СФУ;

- якщо  $k_{зан}=0,25$  то рівень генерації електричної енергії знаходиться на низькому рівні, необхідно проводити додаткову очистку СФУ;

- якщо  $k_{зан}=0,5$  то для підтримки номінальної генерації, необхідно проводити планову очистку СФУ;

- якщо  $k_{зан}=0,75$  то необхідності в проведенні очистки СФУ не виникає оскільки в цьому діапазоні генерація є стабільною і близькою до номіналу, при такому значенні коефіцієнту запиленості виникає;

- якщо  $k_{зан}=1$  то необхідності в проведенні очистки СФУ не виникає оскільки в цьому діапазоні генерація є близькою до номіналу.

З урахуванням всіх вище наведених коефіцієнтів  $\tau_{пр}$  і  $\tau_{пра}$  дійсний коефіцієнт пропускання визначається за формулою:

$$\tau_{прон} = \tau_{пр} \cdot \tau_{пол} \cdot K_{зан}$$

З урахуванням всіх вище наведених залежностей була складена математична модель СФУ, в загальному вигляді, яку можна представити системою рівнянь [8-10]:

$$\left\{ \begin{aligned} U_{СФЕ}(T, I, J) &= \frac{A \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln \left[ \frac{(I \cdot z - J) e^{\frac{q}{A \cdot k \cdot T} \left[ U_{оxx} - \left( \frac{I - I_0}{I_0} \right) J_{оКЗ} \cdot R_{II} + \kappa \cdot \lg \left( \frac{I}{I_0} \right) + U_{оxx} \cdot \beta_U (T - T_0) \right] - 1}}{I \cdot z} + 1 \right] - J R_{II} \\ J_{КЗ}(I, T) &= J_{оКЗ} + \frac{I - I_0}{I_0} J_{оКЗ} + \beta_I \cdot J_{оКЗ} (T - T_0) \\ T(I, T_B, \nu) &= \frac{I' [\mu - \eta_0 (1 + \chi \cdot T_0)] + [(5,7 + 3,8\nu) + 4\varepsilon \cdot \sigma \cdot T_B^3(n, t)] F \cdot T_B(n, t)}{[(5,7 + 3,8\nu) + 4\varepsilon \cdot \sigma \cdot T_B^3(n, t)] F - I' \cdot \eta_0 \cdot \chi} \\ I(I_{II}, I_D, \rho, \Lambda, Y, \Omega, \tau_{прон}) &= \left[ I_{II} \frac{\cos \Lambda}{\cos \Omega} + I_D \frac{(1 + \cos Y)}{2} + \rho(n) [(I_{II} + I_D)] \frac{(1 - \cos Y)}{2} \right] \tau_{прон} \\ \tau_{прон}(\Lambda) &= (1 - \rho_{отр}(\Lambda)) \exp \left( -K \frac{B}{\cos \Lambda} \right) \\ U_{СФУ} &= N_{ПС} \cdot U_{СФЕ}(T, I, J) \\ J_{СФУ} &= N_{ПР} \cdot J \cdot S_{СФЕ} \\ P_{СФУ} &= U_{СФУ} \cdot J_{СФУ} \\ \tau_{прон} &= \tau_{пр} \cdot \tau_{пол} \cdot K_{зан} \end{aligned} \right.$$

де  $U_{СФЕ}$  – напруга сонячних фотоелементів, В;  $B$  – безрозмірний параметр кривизни ВАХ;  $k$  – постійна Больцмана, Дж/°К;  $q$  – заряд електрона, Кл;  $T$  – температура сонячних фотоелементів, К;  $I, I'$  – інтенсивність сонячного випромінювання, падаючого на поверхню сонячних фотоелементів і віднесена до одиниці поверхні СФУ, Вт/м²;  $z$  – коефіцієнт пропорційності густини фотопотоку до інтенсивності сонячного випромінювання, А·м²/Вт·см²;  $J$  – густина струму, А/см²;  $U_0, J_0$  – напруга холостого ходу (В) і густина струму короткого замикання (А/см²) сонячних фотоелементів, зміни при стандартних умовах освітленості АМ1 ( $I_0=1000$  Вт/м²;  $T_0=298,15$  °К);  $R_{II}$  – внутрішній електричний опір (послідовне), Ом·см²;  $\kappa$  – безрозмірний коефіцієнт освітленості;  $\beta_I, \beta_U$  – температурні коефіцієнти струму і напруги, К⁻¹;  $J_{КЗ}$  – густина струму короткого замикання, А/см²;  $\mu$  – інтегральний коефіцієнт поглинання сонячного випромінювання сонячних фотоелементів;  $\eta_0$  – коефіцієнт корисної дії сонячних фотоелементів одержаний при стандартних умовах випробувань;  $\chi$  – температурний градієнт, залежний в основному від типу і конструкції сонячних фотоелементів, К⁻¹;  $(5,7 + 3,8\nu)$  – розмірне співвідношення Мак-Адамса для розрахунку коефіцієнта конвекції, Вт/(м²·°К), де  $\nu$  – швидкість вітру, м/с;  $\varepsilon$  – інтегральний коефіцієнт випромінювання сонячних фотоелементів;  $\sigma$  – постійна Стефана – Больцмана, Вт/(м²·°К⁴);  $T_B$  – температура оточуючого повітря, °К;  $n$  –

порядковий номер дня року, відлічуваний від 01 січня;  $t$  – час, год.;  $F$  – відношення площі плоскої сонячних фотоелементів до площі освітлювальної поверхні;  $I_{\text{п}}$ ,  $I_{\text{д}}$  – інтенсивність прямого і дифузного (розсіяного) сонячного випромінювання на горизонтальну поверхню, Вт/м<sup>2</sup>;  $\Lambda$ ,  $\Omega$ ,  $\gamma$  – кути, визначаючи просторову орієнтацію наземних СФУ, град.;  $\rho$  – коефіцієнт відбивання сонячних променів від земної поверхні (альbedo);  $\tau_{\text{проп}}$ ,  $\rho_{\text{отр}}$  – коефіцієнт пропускання і відбивання сонячного випромінювання захисної поверхні сонячних фотоелементів;  $K$  – показник поглинання сонячного випромінювання захисною поверхнею сонячних фотоелементів, см<sup>-1</sup>;  $B$  – товщина захисної поверхні сонячних фотоелементів, см;  $U_{\text{СФУ}}$  – напруга СФУ, В;  $J_{\text{СФУ}}$  – струм навантаження СФУ, А;  $N_{\text{ПС}}$ ,  $N_{\text{ПР}}$  – число послідовно і паралельно з'єднаних сонячних фотоелементів в СФУ;  $S_{\text{СФЕ}}$  – площа сонячних фотоелементів, см<sup>2</sup>;  $P_{\text{СФЕ}}$  – потужність сонячних фотоелементів в СФУ, Вт.

Такі припущення в розробленій, математичній моделі, прийняті наступні [8-10]:

- послідовний опір сонячних фотоелементів не залежить від інтенсивності сонячного випромінювання і температури сонячних фотоелементів;
- величина фотоструму пропорційна інтенсивності сонячного випромінювання і не залежить від температури;
- спектральна чутливість сонячних фотоелементів і внутрішні втрати енергії, пов'язані з можливим затінюванням сонячних фотоелементів або їх частин не враховуються.
- розподіл сонячного випромінювання по поверхні СФУ рівномірний;
- температура по всьому об'єму СФУ однакова, з відсутністю перепадів температур уздовж її поверхні;
- значення швидкості вітру для лицьової і тильної поверхні СФУ однакове, напрямком вітру не враховується, тобто розмір обдувається поверхні СФУ не змінений.

Розроблена математична модель СФУ дозволяє оцінити вплив на вихідні енергетичні характеристики СФУ, як внутрішніх, так і зовнішніх чинників (інтенсивності сонячного випромінювання, температури повітря, швидкості вітру, ступеня орієнтації СФУ на Сонці залежно від пори року і доби) [20].

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

З метою вирішення завдання підвищення авіаційної безпеки об'єктів авіаційної галузі України, проаналізовано можливість та особливості впровадження сонячної енергетики в мовах підприємств вказаної галузі.

Запропоновано математичну модель сонячної фотоелектричної установки, що дає можливість оцінити вплив енергетичні характеристики в залежності від зовнішніх факторів.

### Література

1. Бабак В. П., Харченко В. П., Максимов В. О. та ін. Безпека авіації К., 2004. 584 с.
2. World Energy Outlook –2021, OECD/IEA, Paris.
3. Smart Power Grids – Talking about a Revolution // IEEE Emerging Technology portal, 2009.
4. Реєстр альтернативних видів палива Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України (Держенергоефективності). – Київ, 2011. – 42 с.
5. НЕК «Укренерго»: Офіційний сайт [Електронний ресурс]: <http://www.ukrenergo.energy.gov.ua>.
6. Gorodniy O. Impact of Supply Voltage Change on the Energy Performance of Boost Quasi-Resonant Converter for Radioelectronic Equipment Power Supplies / Gorodniy O., Gordienko V., Stepenko S., Boyko S., Sereda O. // Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2017. - P. 232-235.
7. Sinchuk, O.M. Aspects of the problem of applying distributed energy in iron ore enterprises' electricity supply systems. Multi-authored monograph / O.M. Sinchuk, S.M. Boiko, I.O. Sinchuk, F.I. Karamanyts, I.A. Kozakevych, M.L. Baranovska, O.M. Yalova; Edited by DSc., Prof. O.M. Sinchuk. – Warsaw: iScience Sp. z o. o. – 2018. – 77 p.
8. Бойко С.М. Теоретичні засади формування електроенергетичних систем з джерелами розосередженої генерації в умовах гірничорудних підприємств. / С. М. Бойко // Монографія, під редакцією доктора техн. наук, професора О.М. Сінчука. – Кременчук, 2020. – 263с.
9. Праховник А.В. Малая энергетика: распределенная генерация в системах энергоснабжения – К.: «Освіта України», 2007. – 464с.
10. Кирик В.В. Дослідження впливу джерел розподіленої генерації на режим роботи електричної системи / В.В.Кирик, О.С.Губатюк, В.І.Моссаковський. // Матеріали XIV Міжнар. конф. «Відновлювана енергетика XXI століття». – Крим, 2013. – С. 141–143.

### References

1. Бабак В. П., Харченко В. П., Максимов В. О. та ін. Безпека авіації К., 2004. 584 с.
2. World Energy Outlook –2021, OECD/IEA, Paris.
3. Smart Power Grids – Talking about a Revolution // IEEE Emerging Technology portal, 2009.
4. Реєстр альтернативних видів палива Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України (Держенергоефективності). – Київ, 2011. – 42 с.
5. НЕК «Укренерго»: Офіційний сайт [Електронний ресурс]: <http://www.ukrenergo.energy.gov.ua>.
6. Gorodniy O. Impact of Supply Voltage Change on the Energy Performance of Boost Quasi-Resonant Converter for Radioelectronic Equipment Power Supplies / Gorodniy O., Gordienko V., Stepenko S., Boyko S., Sereda O. // Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2017. - P. 232-235.

7. Sinchuk, O.M. Aspects of the problem of applying distributed energy in iron ore enterprises' electricity supply systems. Multi-authored monograph / O.M. Sinchuk, S.M. Boiko, I.O. Sinchuk, F.I. Karamanyts, I.A. Kozakevych, M.L. Baranovska, O.M. Yalova; Edited by DSc., Prof. O.M. Sinchuk. – Warsaw: iScience Sp. z o. o. – 2018. – 77 p.
8. Бойко С.М. Теоретичні засади формування електроенергетичних систем з джерелами розосередженої генерації в умовах гірничорудних підприємств. / С. М. Бойко // Монографія, під редакцією доктора техн. наук, професора О.М. Сінчука. – Кременчук, 2020. – 263с.
9. Праховник А.В. Малая энергетика: распределенная генерация в системах энергоснабжения – К.: «Освіта України», 2007. – 464с.
10. Кирик В.В. Дослідження впливу джерел розподіленої генерації на режим роботи електричної системи / В.В.Кирик, О.С.Губатюк, В.І.Моссаковський. // Матеріали XIV Міжнар. конф. «Відновлювана енергетика XXI століття». – Крим, 2013. – С. 141–143.

Надійшла/Paper received : 12.09.2022 р.    Надрукована/Printed :01.11.2022 р.

ГУНЬКО Ірина

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0001-5470-7413>e-mail: [maniy@ukr.net](mailto:maniy@ukr.net)

ГРИБИК Роман

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4238-8257>e-mail: [gribikroman@gmail.com](mailto:gribikroman@gmail.com)

## МОДЕЛЮВАННЯ ГРУНТООБРОБНОГО АГРЕГАТУ З РОЗРОБКОЮ РЕКОМЕНДАЦІЙ ПІДБОРУ РОБОЧИХ ОРГАНІВ

*В роботі наведено математичне обґрунтування підбору кількості робочих органів комбінованого ґрунтообробного агрегату в залежності від фізико-механічних параметрів ґрунту, рельєфу поля, агротехнічних вимог сівби та садіння сільськогосподарських культур, екологічних та енергетичних показників операцій передпосівного обробітку ґрунту.*

*Ключові слова:* котки, лапи, ґрунт, агрегат, робочі органи, комбінування.

HUNKO Iryna, HRYBYK Roman

Vinnytsia National Agrarian University

## SIMULATION OF A GROUND PROCESSING UNIT WITH THE DEVELOPMENT OF RECOMMENDATIONS FOR THE SELECTION OF WORKING BODIES

*The paper provides a mathematical rationale for selecting the number of working bodies of the combined tillage unit depending on the physical and mechanical parameters of the soil, the topography of the field, agrotechnical requirements for sowing and planting agricultural crops, ecological and energy indicators of pre-sowing tillage operations.*

*Improving the quality of terrain use, soil compaction, reducing energy costs, and improving environmental performance during pre-sowing cultivation can be achieved by determining the optimal combination of working bodies in a combined tillage unit. As a rule, pre-sowing treatment is carried out in the state of physical maturity of the soil and in the shortest possible time, not allowing a gap between pre-sowing treatment and sowing, as this leads to loss of soil moisture and a decrease in yield. It has been established that a one-day delay in closing moisture leads to unproductive moisture losses and reduced yield. Therefore, closing moisture is an extremely urgent component of a complete system of pre-sowing field cultivation. In order to protect the soil from excessive destruction and compaction (and, therefore, to preserve moisture in it), the optimal solution is to carry out only one working pass of the equipment immediately before sowing. At the same time, the combined action of various working bodies can both increase and reduce the total traction resistance of agricultural machinery, so the final choice of the composition of the working bodies and the width of the grip can be made only on this basis. Results of field studies of the test model.*

*Based on the analysis of the structure of the tillage unit, a structural and technical drawing of a multifunctional tillage unit with a variable working body for tractors from 90 to 340 hp is presented. for forming a seed bed and leveling the ground. A thin sowing layer of blocks thanks to the optimal combination of arrow jaws, lamellas and ring tips in the machine. Recommendations on the composition of joint farms have been developed.*

*Key words:* rollers, paws, soil, aggregate, working bodies, combining.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

Основними завданнями ґрунтообробки є оптимізація фракційного складу ґрунту, регулювання водно-повітряного, теплового та живильного балансу, створення сприятливих умов розвитку культивованих рослин фітосанітарних умов, зниження негативних наслідків водної та вітрової ерозії ґрунту. Вибір системи ґрунтообробки при вирощуванні сільськогосподарських культур безпосередньо залежить від ґрунтових та кліматичних умов сільськогосподарського виробництва, а також від його рівня інтенсифікації. Для природно-кліматичних умов України, з переважанням північних ділянок лісостепу, доцільно застосування комбінованої системи ґрунтообробки, яка передбачає чергування безвідвальної та відвальної обробки ґрунту. Частота та послідовність зміни виду обробки залежить від прийнятої сівозміни, засміченості ріллі бур'янами тощо.

### Аналіз досліджень та публікацій

Сучасні завдання підвищення ефективності ґрунтообробки також неодмінно включають зниження енерго- та трудовитрат. Найважливішим напрямом у цьому аспекті є суміщення технологічних операцій, яке раціонально застосовувати при доповненні плоскорізної обробки, як виду основної обробки ґрунту, операціями з розпушування верхнього шару ґрунту, а також у разі одноразового виконання завершеного комплексу операцій передпосівної обробки. При цьому суміщення операцій крім виконання основного завдання суттєво знижує енерго- та трудовитрати на проведення ґрунтообробки, що підвищує її якість, дозволяє більш раціонально використовувати капіталовкладення. Широке застосування оранки в комбінованій системі основної обробки ґрунту зумовлює використання традиційних прийомів передпосівної ґрунтообробки, що включає послідовне виконання весняного боронування, дискування або культивування зябки та прикочування, а також культивування чистої пари. До їх недоліків слід віднести високу енерговитратність та трудомісткість, необхідність значної номенклатури технічних засобів, що можливо мінімізувати шляхом



виконання всього комплексу даних технологічних операцій багатофункціональними комбінованими агрегатами. Вибір раціонального поєднання технологічних операцій визначається таким факторами:

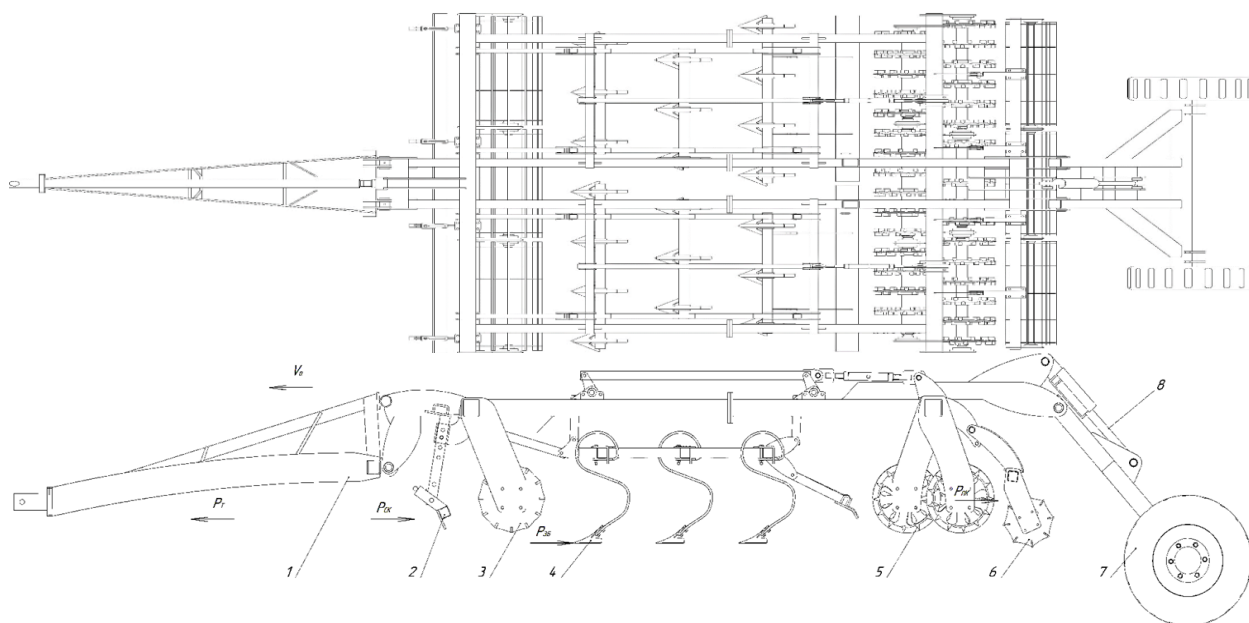
- 1) дотримання оптимальних агрономічних термінів проведення операцій та зменшення залежності якості обробки ґрунту від метеоумов;
- 2) зменшення переуцільнення ґрунту через негативний вплив ходових систем МТА за рахунок скорочення числа технологічних ходів;
- 3) можливість використання енергонасичених тракторів на дрібноконтурних полях з нерівним рельєфом за рахунок їх повного завантаження.

### Формулювання цілей статті

**Мета роботи** – обґрунтування конструктивно-технологічної схеми та основних параметрів багатофункціонального агрегату зі змінними робочими органами, здатного виконувати основну безвідвальну обробку ґрунту зі створенням мульчуючого шару і комплекс операцій передпосівної обробки ґрунту.

### Виклад основного матеріалу

Для визначення параметрів ґрунтообробного агрегату проведено дослідження функціонування дошки, планчастого барабана, стрілкової лапи, зубчасто-кільчастого котка Crosskill та пластинчастого котка [3]. Аналіз результатів експерименту показав, що для компактності конструкції, що актуально при розробці причіпного ґрунтообробного агрегату, найбільш кращий варіант розміщення зубчасто-кільчастої секції на мінімальній відстані 0,4 ... 0,5 м (рис. 4) від заднього пластинчастого котка.



**Рис. 1. Конструктивно-технологічна схема причіпного комбінованого ґрунтообробного агрегату**  
 1 – рама; 2 – дошка; 3 – планчастий барабан; 4 – стрічасті лапи; 5 – зубчасто-кільчастий коток Crosskill; 6 – пластинчастий коток; 7 – колесо; 8 – гідроциліндр;  $P_T$  – тягове зусилля трактора, Н;  $P_{СК}$  – опір ґрунту переміщенню стрілкової лапи, Н;  $P_{ПК}$  – опір ґрунту переміщенню прикатуючого котка, Н;  $P_{ЗБ}$  – опір ґрунту переміщенню зубової борони, Н;  $V_A$  – швидкість руху агрегату

Відстань між стрічастими лапами та котковою секцією. Робота стрічастих лап являє собою вплив тригранних і прямих двограних клинів на оброблюваний шар ґрунту. Під час роботи відбувається рух частинок ґрунту по поверхні стрічастих лап. Визначивши відстань, яку пролетить частка ґрунту після його сходження з лапи, можна визначити мінімально допустиму відстань між лапами та котками. У цьому випадку траєкторія руху частинки ґрунту визначається з використанням методики оберненості, при якому вважається, що робочий орган перебуває у нерухомому стані, а частинки ґрунту переміщуються по поверхні лапи вгору і після сходження з неї перебувають у фазі польоту до опускання на дно борозни. Початкова швидкість частки  $M$  при сходженні з крила стрілкової лапи:

$$\mathcal{G}_0 = \mathcal{G}_a / \cos \beta_k \quad (1)$$

$\mathcal{G}_a$  – швидкість агрегату, м/с; максимальна швидкість  $\mathcal{G}_a = 3$  м/с.

Вектор початкової швидкості  $\mathcal{G}_0$  відхиляється від горизонталі на кут  $\beta_k$

$$\beta_k = \beta - \varphi \quad (2)$$

де  $\beta$  – кут кришення ґрунту, рівний куту нахилу лапи,  $\beta = 20^\circ$ ;  $\varphi$  – кут тертя ґрунту по сталі, для легко- та середньосуглинистих ґрунтів  $\varphi = 20-27^\circ$ .

Диференціальні рівняння для частки ґрунту М, на який впливає сила тяжіння  $G = mg$ , мають вигляд:

$$\frac{md\vartheta_x}{dt} = 0; \quad \frac{md\vartheta_y}{dt} = -mg \quad (3)$$

Після інтегрування та подальших перетворень кінцеве рівняння для визначення відстані  $x_{\max} = S$ , на яку віддаляється лапа за час польоту частинки ґрунту набуде вигляду:

$$x_{\max} = S = \frac{-tg\beta_k + \sqrt{tg^2\beta_k + 2gH/\vartheta_A^2}}{g} \quad (4)$$

При підстановці числових значень отримаємо  $S = 0,4$  м. У цьому випадку розглянуто рух частки ґрунту по поверхні лапи. У дійсності висота оброблюваного пласта ґрунту максимально може досягати 0,25 м. Вважаючи, що частки верхнього шару ґрунту рухаються по параболічній траєкторії паралельно розглянутому випадку, можна припустити, що мінімально можлива відстань між рядами лап і коткових секцій, дорівнюватиме сумі відстані польоту частинки ґрунту, після сходження з лапи, і висоті оброблюваного пласта ґрунту. Мінімально допустима відстань від задньої частини лапи до точки заглиблення котків борони, при якому не відбуватиметься нагромадження ґрунту після його сходження з лап перед котковою секцією, має бути не менше 0,65 метра або при переведенні у відстань від крайньої задньої точки лапи до найближчої точки на передній частині котка – не менше ніж 0,55 метра.

Кількість робочих органів, що входять у склад комбінованого ґрунтообробного агрегату під час передпосівної обробки ґрунту знаходимо з використанням коефіцієнта уточнення кількості робочих органів  $\theta$ , значення якого отримані на основі експериментів та розраховується за формулою (5):

$$\theta = \begin{cases} 1 & \text{при } \varpi = 0 \\ 0,97 \exp(-0,0987) & \text{при } \varpi > 0 \end{cases} \quad (5)$$

де  $\theta$  – коефіцієнт уточнення кількості робочих органів;

$\varpi$  – найбільш вагомий фактор при підготовці поля до посіву різних сільськогосподарських культур (вологість, твердість, глибина обробки, гребінчастість, розмір грудки), %, можливе використання середнього значення декількох показників.

Знайдемо кількість робочих органів виходячи з  $P_{кр}$  сили опору ґрунтообробної машини (сила тяги на кроку трактора), що визначається за формулою.

$$P_{кр} = K_c B h i \quad (6)$$

Таблиці 1

### Рекомендації щодо складу комбінованого ґрунтообробного агрегату

Фізико-технічні показники				Компонування	Енергетичні показники			Екологічні показники	
Глибина обробітку, h, см	Вологість ґрунту, V, %	Розмір грудки, b, см	Величина гребнів, G, см	Склад агрегату (стрілчаті лапи+ барабан+ коток+ вирівнююча дошка+ пластинчастий коток)	Необхідна та тягова потужність енергозасобу No, кВт	Показники тягового опору, T, кН	Загальна енергосмістність, Eo, Мдж/га	Викиди CO <sub>2</sub> , %	Ущільнення ґрунту, г/см <sup>3</sup>
16	23	1,5	2	стрілчаті лапи+ барабан+коток+ вирівнююча дошка+ пластинчастий коток	158	47	121	91	1,3
12	18,5	2,5	2	стрілчаті лапи+барабан+ коток+вирівнююча дошка	131	34	108	88	1,23
9	15,5	2,5	3,5	стрілчаті лапи+ коток+ вирівнююча дошка+ пластинчастий коток	128	38	111	81	1,15
9	16	5	3,5	коток+ вирівнююча дошка+ пластинчастий коток	103	31	104	78	1,1
7,5	15,5	2,5	2	барабан+коток+ вирівнююча дошка	141	40	116	73	1,2
6	18,5	4	4	барабан+коток+ вирівнююча дошка	98	37	99	71	1,1
3,5	15	5	3,5	барабан+ вирівнююча дошка+ пластинчастий коток	95	35	89	70	1,17

де  $K_c$  – питомий опір робочого органу ґрунтообробної машини;  $B$  – ширина захвату



робочого органу машини;  $h$  – глибина обробки ґрунту;  $i$  – кількість робочих органів ґрунтообробної машини.

Перетворивши формулу з урахуванням коефіцієнта уточнення кількості робочих органів знайдемо кількість робочих органів ґрунтообробної машини:

$$i = \frac{P_{кр}}{K_c B h \theta} \quad (7)$$

На базі отриманих математичних залежностей розроблені відповідні рекомендації для підбору кількості робочих органів комбінованого ґрунтообробного агрегату (табл. 1)

Разом з тим, спільне функціонування різних робочих органів може як підвищувати, так і знижувати загальний тяговий опір ґрунтообробного агрегату, тому остаточний вибір складу робочих органів та ширини захоплення може бути зроблено лише на підставі результатів польових досліджень дослідного зразка агрегату.

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

В результаті проведеного аналізу конструкцій ґрунтообробних агрегатів запропоновано конструктивно-технологічна схема багатофункціонального ґрунтообробного агрегату з змінними робочими органами для тракторів від 90 до 340 кінських сил, призначена для утворення насіннєвого ложа і вирівнювання дрібно грудочкуватого посівного шару ґрунту, що створюється завдяки оптимальному поєднанню у машині стрілочастих лап, планкових та кільчасто-шпорових котків. Розроблені рекомендації щодо складу комбінованого ґрунтообробного агрегату

### Література

1. Адамчук В.В., Булгаков В.М., Іванишин В.В. Про розробку і створення в Україні сільськогосподарських машин сучасного рівня : зб. наук. праць Вінницького націон. аграрн. ун-ту. Серія: Технічні науки. 2012. Вип. 11. Т. 2 (66). С. 8–14.
2. 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.
3. Kaletnik H., Adamchuk V., Bulgakov V., Kyurchev V., Nadykto V. Main problems in the field of agricultural mechanization in Ukraine. Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК». № 3 (95). 2016.
4. Грибик Р.І. Аналіз комбінованих агрегатів для передпосівного обробітку ґрунту. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2019. № 2(105). С. 93–99.
5. Мельника І.І. Практикум із машиновикористання в рослинництві : навч. посіб. К. : Кондор. 2004. 284 с.
6. Бурлака С.А., Яропуд В.М., Здирко Н.Г. Рекомендації щодо оцінки та діагностування дизельного двигуна при використанні біопалива. Вісник Хмельницького національного університету. 2021. № 4 (299). С. 169-174.
7. Ярошук Р.О., Гунько І.В., Бурлака С.А. Вибір оптимальної методики покращення складу сумішевого біопалива з рослинних олій. Вісник Хмельницького національного університету. 2018. № 4 (263). С. 123-128.
8. Погорілий В.В., Шустік Л.П. Перспективне знаряддя для обробітку ґрунту та догляду за рослинами. Техніка АПК. 2002. № 1. С. 16–27.
9. Войтюк Д.Г., Барановський М.В., Булгаков В.М. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку. К. : Вища освіта, 2005. 464 с.
10. Мельника І.І. Практикум із машиновикористання в рослинництві : навч. посіб. К. : Кондор. 2004. 284 с.

### References

1. Adamchuk V.V., Bulhakov V.M., Ivanyshyn V.V. Pro rozrobku i stvorennia v Ukraini silskohospodarskykh mashyn suchasnoho rivnia : zb. nauk. prats Vinnytskoho natsion. ahrarn. un-tu. Serii: Tekhnichni nauky. 2012. Vyp. 11. T. 2 (66). S. 8–14.
2. 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.
3. Kaletnik H., Adamchuk V., Bulgakov V., Kyurchev V., Nadykto V. Main problems in the field of agricultural mechanization in Ukraine. Vseukrainskyi naukovy-tekhnichnyi zhurnal «Tekhnika, enerhetyka, transport APK». № 3 (95). 2016.
4. Hrybyk R.I. Analiz kombinovanykh ahrehativ dlia передposivnoho obrobittu ґрунту. Tekhnika, enerhetyka, transport APK. 2019. № 2(105). С. 93–99.
5. Melnyka I.I. Praktykum iz mashynovykorystannia v roslynnytstvi: navch. posib. K.: Kondor. 2004. 284 s.
6. Burlaka S.A., Yaropud V.M., Zdyrko N.H. Rekomendatsii shchodo otsinky ta diahnostuvannia dyzelnoho dvyhuna pry vykorystanni biopalyva. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. 2021. № 4 (299). S. 169-174.
7. Iaroshchuk R.O., Hunko I.V., Burlaka S.A. Vybir optymalnoi metodyky pokrashchennia skladu sumishevoho biopalyva z roslynnykh olii. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. 2018. № 4 (263). S. 123-128.
8. Pohoriliy V.V., Shustik L.P. Perspektyvne znariaddia dlia obrobittu ґрунту ta dohliadu za roslynamy. Tekhnika APK. 2002. № 1. С. 16–27.
9. Voitiuk D.H., Baranovskyi M.V., Bulhakov V.M. Silskohospodarski mashyny. Osnovy teorii ta rozrakhunku. K.: Vyshcha osvita, 2005. 464 s.
10. Melnyka I.I. Praktykum iz mashynovykorystannia v roslynnytstvi: navch. posib. K.: Kondor. 2004. 284 s.

Надійшла/Paper received : 09.10.2022 р.    Надрукована/Printed : 01.11.2022 р.

БАСИСТЮК Олег

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0003-0064-6584>e-mail: [oleh.a.basystiuk@lpnu.com](mailto:oleh.a.basystiuk@lpnu.com)

МЕЛЬНИКОВА Наталія

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-2114-3436>e-mail: [natalia.i.melnykova@lpnu.ua](mailto:natalia.i.melnykova@lpnu.ua)

## МУЛЬТИМОДАЛЬНЕ РОЗПІЗНАВАННЯ МОВЛЕННЯ НА ОСНОВІ ЗВУКОВИХ І ТЕКСТОВИХ ДАНИХ

Глибоке навчання повністю змінило підхід до машинного перекладу. Дослідники в галузі глибокого навчання створили прості рішення на основі машинного навчання, які перевершують найкращі експертні системи. У цій роботі розглянуто основні особливості машинного перекладу на основі рекурентних нейронних мереж. У статті також висвітлено переваги систем на основі RNN, що використовують модель послідовності до послідовності, порівняно зі статистичними системами трансляції. Дві системи машинного перекладу, засновані на моделі послідовності до послідовності, були створені з використанням бібліотек машинного навчання Keras і PyTorch. На основі отриманих результатів проведено аналіз бібліотек та порівняння їх продуктивності.

Ключові слова: машинний переклад, глибоке навчання, рекурентні нейронні мережі, продуктивність, keras, pytorch, sequence-to-sequence.

BASYSYTIUK Oleh, MELNYKOVA Nataliia

Lviv Polytechnic National University

## MULTIMODAL SPEECH RECOGNITION BASED ON AUDIO AND TEXT DATA

Systems of machine translation of texts from one language to another simulate the work of a human translator. Their performance depends on the ability to understand the grammar rules of the language. In translation, the basic units are not individual words, but word combinations or phraseological units that express different concepts. Only by using them, more complex ideas can be expressed through the translated text.

The main feature of machine translation is different length for input and output. The ability to work with different lengths of input and output provides us with the approach of recurrent neural networks.

A recurrent neural network (RNN) is a class of artificial neural network that has connections between nodes. In this case, a connection refers to a connection from a more distant node to a less distant node. The presence of connections allows the RNN to remember and reproduce the entire sequence of reactions to one stimulus. From the point of view of programming, such networks are analogous to cyclic execution, and from the point of view of the system, such networks are equivalent to a state machine. RNNs are commonly used to process word sequences in natural language processing. Usually, a hidden Markov model (HMM) and an N-program language model are used to process a sequence of words.

Deep learning has completely changed the approach to machine translation. Researchers in the deep learning field has created simple solutions based on machine learning that outperform the best expert systems. In this paper we reviewed the main features of machine translation based on recurrent neural networks. The advantages of systems based on RNN using the sequence-to-sequence model against statistical translation systems are also highlighted in the article. Two machine translation systems based on the sequence-to-sequence model were constructed using Keras and PyTorch machine learning libraries. Based on the obtained results, libraries analysis was done, and their performance comparison.

Keywords: machine translation, deep learning, recurrent neural networks, performance, keras, pytorch, sequence-to-sequence.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

Системи машинного перекладу текстів з однієї мови на іншу моделюють роботу людини-перекладача. Їхня продуктивність залежить від здатності розуміти правила граматики мови. У перекладі основними одиницями є не окремі слова, а словосполучення або фразеологізми, що виражають різні поняття. Тільки використовуючи їх, через текст перекладу можна висловити більш складні ідеї [1].

Головною особливістю машинного перекладу є різна довжина для введення та виведення. Можливість працювати з різною довжиною входу та виходу надає нам підхід рекурентних нейронних мереж [1–5].

Рекурентна нейронна мережа (RNN) – це клас штучної нейронної мережі, яка має зв'язки між вузлами. У цьому випадку з'єднання відноситься до з'єднання від більш віддаленого вузла до менш віддаленого вузла. Наявність зв'язків дозволяє РНН запам'ятовувати і відтворювати всю послідовність реакцій на один стимул. З точки зору програмування в таких мережах є аналог циклічного виконання, а з точки зору системи – такі мережі еквівалентні кінцевому автомату. RNN зазвичай використовуються для обробки послідовності слів у обробці природної мови [4–7]. Зазвичай для обробки послідовності слів використовують приховану модель Маркова (НММ) і модель мови N-програми.

Прихована модель Маркова (НММ) – статистична модель, яка імітує роботу процесу, схожого на процес Маркова з невідомими параметрами, і завдання полягає в тому, щоб вгадати невідомі параметри на основі спостережуваних. Отримані параметри можна використовувати в подальший аналіз. У нормальній моделі Маркова стан відомий спостерігачеві, тому ймовірність переходів є одним з параметрів. У НММ

можна спостерігати лише змінні, на які впливає цей стан. Кожен стан має ймовірнісний розподіл серед усіх можливих вихідних значень. Тому послідовність слів, згенерована NMM, дає інформацію про послідовність станів. NMM можна вважати найпростішою байєсівською мережею.

Байєсова мережа – графічна модель у вигляді спрямованого ациклічного графа, кожна вершина якого відповідає випадковій величині, а дуги графа кодують відносини умовної незалежності між цими змінними. Вершини можуть представляти змінні будь-якого типу, бути зваженими параметрами, прихованими змінними або гіпотезами. Існують ефективні методи, які використовуються для розрахунку та дослідження байєсівських мереж. Для проведення ймовірнісного виведення в байєсівських мережах використовуються як точні, так і наближені алгоритми [8, 9].

### Виклад основного матеріалу

Основна ідея RNN полягає у використанні рекурсії для формування вектора фіксованої розмірності з вхідної послідовності символів. Припустимо, що на кроці  $t$  вектор  $h_{t-1}$  (його історію всіх попередніх слів. RNN обчислить новий вектор  $h_t$  (його внутрішній стан), який поєднує всі попередні слова  $(x_1, x_2, \dots, x_{t-1})$   $(x_1, x_2, \dots, x_{t-1})$  і новий символ  $x_t$  за допомогою:

$$h_t = \varphi_\theta(x_t, h_{t-1}), \quad (1)$$

У цьому рівнянні присутні наступні параметри:  $\varphi_\theta$  – функція, параметризована  $\theta$ , яка отримує нове вхідне слово  $x_t$  та історію слів  $h_{t-1}$  до  $(t-1)$ -N слова. По-перше, можна вважати, що  $h_0$  – нульовий вектор. Рекурентна функція активації  $\varphi$  зазвичай реалізується як афінне перетворення, за яким слідує нелінійна функція:

$$h_t = \tanh(Wx_t + Uh_{t-1} + b), \quad (2)$$

У цьому рівнянні присутні такі параметри: вхідна вагова матриця  $W$ , рекурентна вагова матриця  $U$  та вектор зміщення  $b$ . Зверніть увагу, що це не єдиний варіант. Існує широкий простір для розробки нових повторюваних функцій активації.

Детальніше про роботу методу перекладу тексту на основі нейронних мереж. Ідея цього алгоритму, по суті, проста і складається з наступних кроків:

1. Кодування вхідного тексту мови  $A$  в набір даних;
2. Декодування набору даних мовою  $B$ .

Розглянемо алгоритм кодування тексту на прикладі пропозиції: «Приклад нейронної мережі»:

Виконавши таку просту операцію, ми отримуємо закодований текст, який виглядає як набір числових даних. На початковому етапі навчання ці числа є випадковими і генеруються алгоритмом також випадково. Наступне проходження тексту, який уже закодовано, RNN буде оцінюватися до того самого числового набору даних. Алгоритм декодування тексту працює як кодування, тільки навпаки – на вхід надходить набір числових даних і виводиться ймовірний текст, який відповідає цим даним [5–7].

Після того як ми зрозуміли суть кодування і декодування тексту, переходимо до самої суті нашого завдання – машинного перекладу і його загального алгоритму. Для цього нам просто потрібно поєднати ці дві RNN – для кодування та декодування – і отримати наступний результат:

Таким чином, ми отримуємо загальний спосіб перетворення послідовності українських слів на еквівалентну послідовність англійських слів, це так званий, послідовний метод мовного перекладу Sequence-to-Sequence. Основними перевагами методу є [3–6]:

- цей підхід обмежений обсягом набору навчальних даних і обчислювальною потужністю, яку ви можете виділити для перекладу. Дослідники машинного навчання винайшли цей метод лише кілька років тому, але такі системи вже працюють краще, ніж статистичні системи машинного перекладу, які розвивалися протягом останніх 20 років;
- система не залежить від знання будь-яких правил мови. Алгоритм сам визначає ці правила і постійно адаптується.

### Експерименти

Давайте проведемо експерименти на основі двох бібліотек машинного навчання, написаних на Python — PyTorch і Keras. Основою алгоритму є метод послідовного навчання. Отже, ми маємо навчити нашу майбутню модель, яка перекладатиме наш текст. Для цього давайте створимо простий набір даних для навчання:

Таблиця 1

Набір даних для навчання RNN

English	Українська
An example of a neural network .	Приклад нейронної мережі .
Hello !	Привіт !
How are you ?	Як справи ?
I'm fine !	Все добре !

Thank you !	Дякую !
Fine .	Добре .
Good .	Добре .
What are you waiting for ?	Чого ти чекаєш ?
Recurrent neural network .	Рекурентна нейронна мережа .
Success !	Успіх !

Як бачите, навчальний набір даних складається з 10 фраз, ми проведемо ці дані через наші моделі, після чого оцінимо швидкість і точність моделей [10].

В результаті цих двох алгоритмів ми отримуємо такі дані:

Таблиця 2

### Порівняння результатів Keras та PyTorch

Назва бібліотеки	Час навчання	Цикли навчання	Коефіцієнти втрат	Точність перекладу
Keras	4150millis	400	0.0027	100%
PyTorch	5800millis	650	0.0021	100%

Розглянемо ці дані детальніше:

- Час навчання. Значення, яке показує час навчання моделі. Головним чином залежить від середовища, де запускався сценарій. Середовище означає поточні характеристики ПК; обчислювальна потужність процесора та її завантаження іншими процесами.
- Тренувальні петлі. Значення, яке показує цикли навчання моделі. Ми самі даємо.
- Коефіцієнт втрат. Значення, яке показує точність навченої моделі. Це показник того, наскільки хороша ваша модель.
- Точність перекладу. Значення, яке показує у відсотках термін значення речень правильного перекладу.

Таким чином, збірка моделі на основі бібліотеки Keras виявилася ефективнішою, ніж модель PyTorch, порівняння базується на часу навчання, циклах навчання та частоті помилок. Через невеликий набір навчальних даних обидва алгоритми демонструють максимальну точність перекладу. У разі збільшення обсягу навчального набору даних, моделі забезпечать зовсім інший коефіцієнт втрат і точність перекладу, час навчання і коефіцієнт втрат збільшаться, а точність зменшиться.

### Результати

У статті описано проектування та створення двох систем перекладу тексту з однієї мови на іншу на основі бібліотек Keras та PyTorch ML. Результат роботи можна побачити на рисунку. 3, де алгоритм правильно розпізнавав (переклав) речення в кожному випадку.

```

Input text: Приклад нейронної мережі .
Decoded text: Example of the neural network .

-
Input text: Привіт !
Decoded text: Hello !

-
Input text: Як справи ?
Decoded text: How are you ?

-
Input text: Все добре !
Decoded text: Everything is good !

-
Input text: Дякую !
Decoded text: Thank you !

-
Input text: Добре .
Decoded text: Fine .

-
Input text: Класно .
Decoded text: Cool .

-
Input text: Чого ти чекаєш ?
Decoded text: What are you waiting for ?

-
Input text: Рекурентна нейронна мережа .
Decoded text: Recurrent neural network .

-
Input text: Успіх !
Decoded text: Success !

```

Рис. 3. Результати перекладу

RNN, як й інші класи нейронних мереж, розвиваються настільки швидко, що стає все важче відслідковувати нові, більш цікаві та складніші моделі для вирішення більш складних і заплутаних завдань. Ці послідовні методи навчання нейронних мереж можуть бути використані в інших сферах, не тільки в машинному перекладі. Простими прикладами є моделі, які можуть створювати словесні описи зображення, розпізнавати голос і підтримувати розмову. На нашу думку, розвиток RNN призведе до появи розумних помічників, здатних розпізнавати голос власника і правильно сприймати завдання. На даний момент RNN є найбільш часто використовуваними в машинному перекладі, і ми думаємо, що ця сфера також буде модернізована найближчим часом.

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

Згідно з результатами експерименту, модель на основі бібліотеки Keras більш ефективна для поточного набору навчальних даних. Зауважте, що результати дослідження можна вважати релевантними лише для невеликих наборів даних, а якість перекладу та час навчання будуть змінені після збільшення обсягу набору навчальних даних. Наступний етап цього дослідження може складатися з навчання моделі у великих обсягах даних з аналізом і порівнянням якості та швидкості її роботи.

### **References**

1. Yu D., Deng L. Automatic Speech Recognition: A Deep Learning Approach. Springer-Verlag Longon, 2015. DOI: 10.1007/978-1-4471-5779-3.
2. Dey N. Intelligent Speech Signal Processing Academic Press, 2019. DOI: 10.1016/C2018-0-03271-5.
3. Shakhovska N., Basystiuk O., Shakhovska K. Development of the speech-to-text chatbot interface based on Google API. In: CEUR Workshop Proceedings, 2019, vol. 2386, pp. 212–221.
4. Melnykova N. Semantic search personalized data as special method of processing medical information. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2017: 315-325.
5. Basystiuk O., Shakhovska N., Bilynska V., Syvokon O., Shamuratov O., Kuchkovskiy V. The Developing of the System for Automatic Audio to Text Conversion. IT&AS'2021: Symposium on Information Technologies & Applied Sciences, March 5–6, 2021, Bratislava, Slovak Republic.
6. Buss E., Leibold L. J., Porter H. L., Grose J. H. Speech recognition in one- and two-talker maskers in school-age children and adults: Development of perceptual masking and glimpsing. The Journal of the Acoustical Society of America, 2017. DOI: 10.1121/1.4979936.
7. Nataliya Boyko, Lesya Mochurad, Uliana Parpan, Oleh Basystiuk. Usage of Machine-based Translation Methods for Analyzing Open Data in Legal Cases. In: Proc. of the Intl Workshop on Cyber Hygiene (CybHyg-2019) co-located with 1st International Conference on Cyber Hygiene and Conflict Management in Global Information Networks (CyberConf, 2019), Kyiv, Ukraine, November 30, 2019, pp. 328–338. CEUR-WS.org, online CEUR-WS.org/Vol-2654/paper26.pdf.
8. Melnykova N., Shakhovska N., Gregušml M., & Melnykov V. (2019). Using big data for formalization the patient's personalized data. Paper presented at the Procedia Computer Science, 155 624-629.
9. Zoryana Rybchak, Oleh Basystiuk. (2017). Analysis of methods and means of text mining. ECONTechMOD. AN INTERNATIONAL QUARTERLY JOURNAL, 6(2), 73-78.
10. GitHub Repository "Speech recognition algorithms". <https://github.com/obasys/speech-recognition-algorithms>. (accessed Aug. 15, 2022)

Надійшла/Paper received : 10.09.2022 р. Надрукована/Printed : 01.11.2022 р.

**ЄФРЕМОВА Ольга**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-8153-1150>e-mail: [yefremovao@khmnu.edu.ua](mailto:yefremovao@khmnu.edu.ua)**ІВАНІШЕНА Тетяна**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-3206-9307>e-mail: [ivanishenat@khmnu.edu.ua](mailto:ivanishenat@khmnu.edu.ua)**ІЩУК Тетяна**

Хмельницький національний університет

e-mail: [tetiana\\_ischuk@ukr.net](mailto:tetiana_ischuk@ukr.net)**ТРУХІНА Оксана**

Хмельницький національний університет

e-mail: [oksana.ivanishena2014@gmail.com](mailto:oksana.ivanishena2014@gmail.com)**ЄФРЕМОВА Юлія**

Хмельницький національний університет

e-mail: [yefremova@khmnu.edu.ua](mailto:yefremova@khmnu.edu.ua)

## СУЧАСНИЙ СТАН ПОВОДЖЕННЯ З ПОЛІМЕРНИМИ ВІДХОДАМИ

В роботі наведено результати аналізу сучасного стану поводження з полімерними відходами в Україні та світі. Державне регулювання в цій сфері є важливою ініціативою щодо поліпшення управління пластиковими відходами. Проаналізовано кількісний та якісний склад таких відходів. Здійснено оцінку можливих шляхів утилізації полімерних відходів задля вирішення проблеми дефіциту полімерної сировини. Досліджено основні методи їх переробки та напрямки використання отриманих продуктів.

Ключові слова: поводження з відходами, полімерні відходи, методи переробки відходів.

YEFREMOVA Olha, IVANISHENA Tetiana, ISHCHUK Tetiana,

TRUKHINA Oksana, YEFREMOVA Yuliia

Khmelnitskyi National University

## THE CURRENT STATE OF POLYMER WASTE MANAGEMENT

In the work presents the results of the analysis of the current state of polymer waste management in Ukraine and the world. It is known that the vast majority of such waste accumulates in landfills or enters the natural environment. Such a threatening situation requires the search for an effective solution to the problem of polymer waste management, since its processing contributes to the preservation of natural resources and the solution to the problem of the shortage of polymer raw materials. The quantitative and qualitative composition of such waste was analyzed and it was established that the most frequently used types of plastic are polyolefins. Since the management of a large amount of plastic waste is a difficult task, the state regulation of the polymer waste management system is of great importance in this area. In Ukraine, this is being implemented thanks to the adoption of the National Waste Management Strategy in 2017. An assessment of possible ways of recycling polymer waste was carried out in order to solve the problem of shortage of polymer raw materials. Today, polymer waste can be disposed of in three directions: material (polymer-raw material); raw materials and energy. The main methods of their processing and directions of use of the obtained products were studied. The most popular methods are physical, chemical and thermal. It has been established that the recycles obtained in this way can most often be used in the food, processing, construction industries, as well as in automobile and aircraft construction. A fairly promising direction of using recycled products is light industry products with additional hydrophobic, fire-resistant, flame-retardant, conductive, heat-insulating, anti-corrosion, airtight and other operational properties.

Keywords: polymer waste management, polymer waste, methods of waste processing

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

Проблема поводження з полімерними (пластиковими) відходами за своєю актуальністю та складністю займає одне з провідних місць у наукових та практичних дослідженнях. Адже пластикові вироби, завдяки своїм властивостям (легкість, доступність через низьку собівартість, довговічність та міцність) не втрачають своєї популярності і їх виробництво та використання останні десятиріччя лише зростає. Відповідно, зростає і кількість полімерних відходів. Згідно з [1] за останні 70 років було вироблено 8,3 мільярда метричних тонн пластику, з яких приблизно 6,3 мільярда метричних тонн стали відходами і лише 9 % від них було перероблено. Переважна більшість таких відходів накопичується на сміттєзвалищах або потрапляє в природне середовище. Якщо теперішня тенденція збережеться, то до 2050 року на звалищах буде 12 мільярдів метричних тонн пластику. І, якщо наприкінці другого тисячоліття основною проблемою вважалося забруднення полімерними відходами суходолу, то згодом стрімкими темпами почалося забруднення і світового океану [2]. Така загрозлива ситуація вимагає пошуку ефективного вирішення проблеми поводження з полімерними відходами. Їх переробка сприяє збереженню природних ресурсів, оскільки полімерні матеріали виробляються з нафти і газу і, в умовах дефіциту полімерної сировини, полімерні відходи стають потужним сировинним і енергетичним ресурсом. Отже переробка полімерних відходів може стати високоприбутковим видом економічної діяльності, в тому числі в галузі легкої промисловості, та забезпечить покращення екологічної ситуації в країні. Нагальним є пошук

ефективних шляхів поводження з полімерними відходами для вирішення проблеми дефіциту полімерної сировини.

### Аналіз досліджень та публікацій

Вивченню проблем поводження з побутовими та промисловими відходами, в тому числі полімерними присвятили свої дослідження такі вітчизняні вчені, як В.М. Шмандій, І.П. Крайнов, М.С. Мальований, А.Г. Картавий, Л.В. Дергачова, В.Г. Петрук, О.В. Харламова, Г.Д. Гуменюк, Г.В. Войтюк, О.В. Медведєва, Т.Б. Шилович, О.М. Синюк, І.О. Мікульонюк, Мандзюк І.А. Разом з тим, проблема поводження з полімерними відходами залишається не вирішеною і потребує постійного вдосконалення, оскільки виробництво полімервмісної продукції зростає, причому змінюється якісно (винайдення нових, більш експлуатаційно-привабливих полімерних матеріалів).

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є аналіз сучасного стану поводження з полімерними відходами в Україні та світі, методів перероблення та утилізації пластикових відходів для вирішення проблеми дефіциту полімерної сировини, в тому числі у галузі легкої промисловості.

### Виклад основного матеріалу








Експоненційно зростаючі обсяги утворення пластикових відходів є загрозою для таких цілей сталого розвитку ООН, як: сталий розвиток міст та спільнот, відповідальне споживання та виробництво, захист та збереження екосистем. Соціальна обізнаність, політика та переробка пластикових відходів є основою на шляху до зміни поводження з такими відходами [4].

За дослідженнями авторів [5] у 2019 році в усьому світі було вироблено 368 мільйонів тонн (Мт) пластику, з них 57,9 Мт у Європі, а попит переробників ЄС склав близько 50,7 Мт. В Україні за даними Держкомстату в 2019 р. обсяг утворених пластикових відходів становив 4 тис. т, з яких тільки 0,9 тис. т утилізовано, 0,1 тис. т спалено [6].

Зараз у світі використовується 7 груп пластикових полімерів, кожна з яких має певні властивості [7], що наведено у таблиці 1. Де також представлена можливість їх переробки на теперішній час [8].

Таблиця 1

Основні групи пластикових полімерів, їх характеристика та можливість переробки

Маркування	Групи пластикових полімерів	Чи підлягає переробці?
	поліетилентерефталат (PET або ПЕТ) являє собою складний термопластичний полієфір терефталевої кислоти і етиленгліколя. ПЕТ володіє такими властивостями як: міцність та зносостійкість, зберігає високу ударостійкість і міцність в діапазоні температур від мінус 40 °С до плюс 60 °С, є гарним діелектриком. Фізичні властивості ПЕТ роблять його ідеальним матеріалом для використання в різних сферах: виготовлення тари (пляшок), волокон, деталей машин. Методом екструзії з ПЕТ виготовляють термоусадочні і багатошарові плівки, що використовуються в пакувальній галузі, а також листи;	Так
	поліетилен високого тиску (PEHD (HDPE) або ПВТ) – сировина для виготовлення плівок та пакетів;	Так
	полівінілхлорид (PVC або ПВХ) – полімер, з якого виробляють лінолеум, металопластикові віконні профілі, меблі, штучну шкіру, плівки для натяжних стель, труби, ізоляцію дротів та кабелів;	Ні
	поліетилен низького тиску (PELD (LDPE) або ПНТ) – полімер, що використовується, переважно, для виробництва пляшок та пакетів для молочних продуктів, косметичних засобів (шампуні), кришечок від пляшок, одноразового посуду, контейнерів для продуктів харчування, іграшок;	Здебільшого ні
	поліпропілен (PP або ПП) – пластик, з якого виготовляють бампери, корпуси акумуляторів, деякі деталі двигуна, блоки запобіжників, деталі салону, і кузова автомобілів, кришки пластикових пляшок;	Іноді
	полістирол (PS або ПС) – полімер, з якого отримують одноразовий посуд, стаканчики для йогуртів, упаковку, іграшки, теплоізоляційні та пакувальні пінопластові вироби;	Іноді
	полікарбонат та інші пластмаси (O, OTHER або ІНШЕ) – застосовується для виробництва посуду для холодної їжі та води, багатошарової упаковки, комбінованого пластику.	Ні



Найбільш часто використовуваними типами пластику є поліолефіни (ПО) (поліетилен-PE; поліпропілен-PP) – близько 50 % [5]. Вони в основному використовуються в пакувальному секторі, наприклад, для упаковки харчових продуктів, кришок, мішків, лотків, плівок та пляшок, а також для труб, автомобільних деталей, сільськогосподарських плівок, деталей посуду тощо. Іншими поширеними пакувальними пластиками є поліетилентерефталат (ПЕТФ) – близько 8 % та полістирол (ПС) – близько 6,5 % [5].

Управління надзвичайно великою кількістю пластикових відходів є складним завданням, особливо в регіонах швидкого економічного розвитку та зростання населення. Так, згідно [8] у період з 1950 до 2015 р. приблизно 8 % коли-небудь виробленого пластику було спалено і лише 7 % було перероблено. Більшість виробленого пластику (близько 55 %) було викинуто та накопичено на звалищах або в природному середовищі, а решта зараз використовується, тобто близько 30 %.

Із загального об'єму полімерних відходів основна маса припадає на ПЕТ – 25 %, на поліетилен низького (ПЕТ) і поліетилен високого тиску (ПВТ) – по 15 %, поліпропілен (ПП) – 13 %, полістирол (ПС) – 6 %, полівінілхлорид (ПВХ) – 5 % і на інші полімерні матеріали – 21 %. Однак, на сьогоднішній день тільки 10 % відходів полімерних матеріалів піддаються рециклінгу, а ті полімерні відходи, що залишаються в багатьох країнах, включаючи і Україну, компостуються на полігонах, або накопичуються на місцевих сміттєзвалищах і несанкціонованих звалищах.

З розвитком переробних технологій та системи поводження з відходами відсоток переробленого пластику поступово зростає і європейські країни досягли значних результатів: в Англії переробляється 70 % ПЕТ-пляшок, в Німеччині — 80–85 %, в Швеції — 90–95 %. Країни знайшли спосіб, як перетворити використані полімерні відходи в такі готові продукти, як штапельні волокна, неткані матеріали, плівки, щітки, одноразовий посуд, пляшки харчового і нехарчового призначення, а також еко-одяг, основною тканиною якого є поліестер (тканина отримана із продуктів переробки ПЕТ-пляшок) [9]. Основою високого рівня утилізації відходів є державне регулювання системи поводження з полімерними відходами. Наприклад, принцип державного регулювання переробки ПЕТ-тари полягає в тому, що її виробники платять спеціальний податок, в який закладено вартість майбутньої переробки. З цих грошей держава фінансує утилізацію. Важливою ініціативою щодо поліпшення управління пластиковими відходами є введення обмеження державами-членами ЄС використання пластикових пакетів, поступове збільшення рециркуляції і відмови від поховання таких відходів. Передбачається, що до 2030 року вся пластикова упаковка повинна перероблятися [10].

Прийнята у 2017 році Національна стратегія управління відходами до 2030 року передбачає імплементацію в Україні найкращих європейських практик в сфері поводження з різними видами відходів (промисловими, твердими побутовими, відходами АПК, будівельними, небезпечними, пластиковими). Національна стратегія встановлює конкретні завдання і заходи, які дозволять Україні до 2030 року перейти до нової моделі поводження з відходами, до економіки замкнутого циклу, яку застосовують провідні європейські країни. Реалізація наведених заходів покликана адаптувати національне законодавство у сфері управління відходами до європейського [10]. Використовуючи досвід країн ЄС, потрібно розробити ефективну законодавчу і нормативно-правову базу функціонування циркулярної економіки; переходити до нових більш ефективних бізнес-моделей (еко-дизайну, ремонту, повторного використання, відновлення і обміну продукції та максимального запобігання утворенню відходів) і стимулювати розвиток екологічно чистих технологій; доцільно розробити цільові програми фінансування проектів у сфері циркулярної економіки; необхідно змінити спосіб виробництва і споживання товарів з короткотермінового до довготермінового, а також заохочувати галузі економіки, підприємства і споживачів до максимальної переробки відходів [10].

На сьогодні полімерні відходи піддаються утилізації за трьома напрямками [2]: матеріальним (полімерно-сировинним); сировинним та енергетичним. Або за чотирма групами методів:

- 1) використання для виготовлення аналогічної продукції (тобто використання як первинної полімерної сировини);
- 2) використання для виготовлення іншої продукції, зазвичай зі зниженими експлуатаційними властивостями (тобто використання як вторинної полімерної сировини; рециклінг);
- 3) перероблення на хімічну сировину;
- 4) спалювання для одержання здебільшого теплової енергії.

Вторинна полімерна сировина може застосовуватися для виробництва термопластичних композиційних матеріалів; нових пластикових виробів; палива для сільськогосподарської техніки; деталей для сільськогосподарських машин і агрегатів; елементів споруд тваринницьких ферм; виробничого та експлуатаційного обладнання [11].

Серед методів переробки можна виділити наступні [12]:

- фізичні (механічний рециклінг, радіаційний метод);
- хімічні (сольволіз, матеноліз, термокаталіз, гідроліз і гліколіз);
- термічні (газифікація, спалювання, піроліз (FBR-метод, деполімеризація)).

В процесі термічного піролізу утворюються напівфабрикати-мономери, які в подальшому можуть бути використані при синтезі нових полімерних матеріалів. При розкладанні матеріалів до низькомолекулярних продуктів отримують сировину, що може бути використана для виготовлення ливарних пластмас і легкорозчинних клеїв. В Україні найбільшого поширення набув метод вторинної переробки полімерних матеріалів, який називається механічним рециклінгом, в результаті якого може бути отриманий гранулят, придатний для вторинного виробництва пластмас. У більшості європейських країн, а також в США і Японії механічному рециклінгу піддаються 90 % пластикових відходів, а отримані інгредієнти йдуть на вторинне виготовлення виробів із пластику [11].



Практично усі відходи, що складаються з одного типу полімерів, можуть бути механічно перероблені з незначною або з повною відсутністю погіршення якості. Однак механічна переробка стикається з різними проблемами, такими як термомеханічне розкладання і не змішуваності різних полімерів [12]. Тому механічна переробка відпрацьованих пластмас має передбачати наступні стадії [13, 14]:

1) сортування відходів (в тому числі первинне) за типом полімеру, кольором, станом матеріалу і ступенем забрудненості;

2) попереднє подрібнення відходів до крихти з розмірами 10–30 мм залежно від подальшого оброблення матеріалу;

3) повторне сортування, видалення різних домішок, в тому числі паперових етикеток, миття і сушіння матеріалу;

4) агломерація – спікання відмитої полімерної крихти в грудки невеликих розмірів;

5) гранулювання маси – виробництво гранул різної фракції з розплаву полімерної крихти в спеціальному обладнанні.

Сучасні лінії механічного перероблення можуть утилізувати побутові і промислові полімерні відходи, виробничий брак, неліквіди, використану тару і упаковку [13].

Механічно перероблений пластик використовується для виготовлення нових виробів, але рідко у чистому вигляді, частіше, як добавка до первинної сировини. Як вторинна сировина пластик може перероблятися не більше 4–5 разів через термічний вплив під час перероблення. Після останнього циклу пластик може бути використаний у будівництві доріг. Основними перевагами механічного рециклінгу є досить простий технологічний процес, універсальність, відсутність забруднення довкілля викидами шкідливих речовин. Недоліками методу є висока енергоємність процесу, складність регулювання розмірів подрібнення, необхідність ретельного сортування і очищення відходів [13].

Радіаційний метод є перспективним для переробки відпрацьованих пластмас, зокрема армованих пластиків (композити з полімерної матриці у вигляді терморезистивних і термопластичних полімерів, армованих волокнистими і листовими матеріалами зі скла, полімерів, базальту, вуглецю та інших матеріалів). Метод передбачає руйнування молекул полімерів під дією високоенергетичного випромінювання нейтронів, бета-частинок та гамма-випромінювань з утворенням низькомолекулярних продуктів. Перевагою методу є його універсальність, оскільки під дією випромінювання руйнуються практично усі полімерні матриці з одночасним збереженням незмінними фізичних характеристик наповнювача, насамперед вуглецевих волокон. Недоліки – підвищене радіаційне навантаження на людину і довкілля та можливість утилізації, в основному, відходів тонкошарових армованих пластмас [13].

Для пластикових відходів, які не можуть бути перероблені через технічні або економічні причини за допомогою фізичних методів, використовують хімічні технології. Під час хімічного перероблення полімерні відходи розкладаються на вихідні молекули – мономери, олігомери або їх суміші з іншими вуглеводнями, з яких потім знову можна виготовити пластикову продукцію з тими ж властивостями. Хімічний метод дозволяє розбивати пластикові відходи на складові компоненти, згодом їх змішують і обробляють для створення нових матеріалів (пластику або синтетичних тканин).

Серед хімічних методів утилізації пластмас виділяють процес сольволізу, який також називають хемолізом. Сутність методу полягає в розщепленні (деполімеризації) відходів полімерів у присутності різноманітних хімічних сполук (води, кислот, лугів, гліколю, метанолу). Вибір відповідного реагенту залежить від якості вихідного матеріалу. Залежно від природи розчинника виділяють такі види сольволізу: гідроліз, гліколіз, метаноліз.

Встановлено, що процес сольволізу дозволяє розщепити на мономери до 90 % пластику, в результаті чого утворюється рідинна фракція, яка містить такі речовини, як бензойна кислота, бензальдегід, ізопропілфенілкетон, метилетіловий ефір, метілізобутіловий ефір, бензол і ацетальдегід [13, 15]. Отже, методи сольволізу не завжди екологічно безпечні, енергоємні, вимагають використання високотехнологічного обладнання, певних хімічних реагентів, і тому досить дорогі, що є недоліками хімічного методу переробки полімерів. Перевагою методу є можливість переробки пластикових відходів нижчої якості через додаткове очищення пластмас під час хімічних процесів. Одним із перспективних шляхів вирішення проблеми утилізації відпрацьованих полімерних матеріалів є використання методу конверсії. Процес відбувається шляхом термохімічного розкладання відходів на первинні мономери та інші корисні речовини за допомогою процесів піролізу або газифікації [13]. Завдяки піролізу може вироблятися ряд корисних вуглеводнів, потенційно використовуваних як хімічна сировина або енергія [12, 16].

Піроліз пластикових відходів – це добре контрольований процес, який дозволяє отримати різноманітні вторинні матеріали, що потім можуть використовуватися за призначенням. Під час піролізу полімерів утворюється синтетична нафта, яку за аналогією з природною сировиною можна переробляти на продукти нафтохімії, включаючи нові пластмаси, або застосовувати як дизельне паливо за рахунок наявності в її складі ароматичних вуглеводнів з високою теплотворною здатністю. Газоподібні продукти піролізу, що містять вуглеводні  $C_2$ – $C_4$ , також володіють високою теплотворною здатністю, а, отже, можуть застосовуватися у газових двигунах [13]. Відходи зазвичай містять суміші органічних, полімерних і паперових забруднень, що вводять небажані гетероеlementи (азот, кисень, сірка, фосфор ін.) у сировину для піролізу, що, в свою чергу, призводить до експлуатаційних проблем: корозії технологічного обладнання та реакторів галогенами і сіркою, забруднення каталізаторів і коксування в реакторі через присутність металів, утворення сажі через присутність кисню, а також наявність хлору в продукті піролізу перешкоджає його використанню як паливо або сировину для нафтохімії [12].

Ще одним методом термічної переробки полімерних відходів є газифікація (більш високотехнологічний вид утилізації твердих відходів порівняно з поширеним у світі їх спалюванням у

сміттєспалювальних печах). Сутність процесу полягає у термічному розкладанні полімерів при температурах від 800 °С до 1500 °С за допомогою нестачі кисню і водяної пари. Газифікацію проводять у газогенераторних установках з використанням атмосферного повітря як джерела кисню. В результаті цього процесу утворюється генераторний газ або, так званий, синтез-газ, який складається з карбон (II) і (IV) оксидів, водню і метану. Ці гази можна використовувати у хімічній промисловості, а також для опалення та генерація електроенергії. Для підвищення ефективності газифікації та питомої теплоти згорання отриманої газової суміші процес ліпше проводити з використанням попередньо отриманих агломератів або гранул полімерних матеріалів [13, 15].

Газифікація полімерних відходів – це достатньо простий з технологічної точки зору процес. Ведення процесу при високих температурах та при низькій концентрації кисню призводить до того, що токсини, такі як діоксини та фурані, практично не утворюються. До недоліків газифікації належить наявність азоту в повітрі, як баластової речовини. Це може знижувати теплотворну здатність генераторного газу через його розбавлення. За даних умов генераторні установки поки не конкурентоспроможні, оскільки отриманий газ виходить значно дорожчим ніж природна сировина [13].

Не зважаючи на методи переробки, для вторинного використання полімерів потрібно перетворити некондиційну полімерну сировину в напівфабрикат (гранулу), придатний для подальшої переробки у виробі. Вибір технології первинної обробки залежить від джерела утворення відходів та ступеня їх забруднення [11].

Широкий спектр методів переробки полімермістких відходів дозволяє використовувати отримані рециклати у різних галузях промисловості, таких як харчова (тара і упаковка, ящики та палети), будівельна (виробництво кабельно-провідникової продукції, облицювальних панелей, покрівлі та інших будівельних матеріалів), автомобіле- і авіабудування (деталі та запчастини), переробна промисловість (виробництво посуду, меблів, предметів інтер'єру) [17].

Нового тренду набуває використання переробленої полімерної сировини у дорожньому будівництві. «Пластикова» дорога є «зеленою» технологією, яка зроблена повністю з полімермістких відходів. В основному при будівництві таких доріг використовували використанні сумки (з полімерної сировини), одноразові чашки, пляшки з поліетилентерафталату тощо [18].

Крім того, полімермісткі відходи застосовуються у легкій промисловості, так рециклінг поліетилентерафталату дасть змогу отримати взуттєву підшву з покращеними експлуатаційними властивостями. Полімерна композиція, яка містить перероблений пластик може виявляти вогнезахисні властивості при нанесенні на тканину або ж антибактеріальну дію при нанесенні на бавовняні, лляні та інші тканини. Залежно від складу полімерної композиції та умов нанесення властивість може бути гідрофобна, вогнетривка, вогнезахисна, струмопровідна, теплоізоляційна, антикорозійна, повітронепроникна тощо.

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

Отже, на сьогодні проблема утилізації пластикових відходів залишається актуальною і має глобальне значення. Виробництво пластмас зростає, кількість відходів відповідно теж зростає, універсального методу переробки полімерних відходів не існує. Проаналізовано різні методи переробки полімермістких продуктів, які дозволяють отримувати широкий спектр продуктів для подальшого використання у різних галузях промисловості. Під час вибору методу необхідно враховувати всі вихідні компоненти, речовини і елементи, які потім перейдуть в новий продукт або будуть виділятися під час самого процесу переробки чи утилізації.

Враховуючи необхідність збереження природних ресурсів, їх вичерпність та зростаючий дефіцит полімерної сировини, актуальним завданням є пошук ефективних методів переробки полімерних відходів з отриманням вторинної сировини, що може бути використана у легкій промисловості.

### **Література**

1. The Complete Plastics Recycling Process. BLOG|RECYCLING, TYPES OF WASTE. October 12, 2020. <https://www.rts.com/blog/the-complete-plastics-recycling-process-rts>.
2. Мікульонек І.О. Поводження з полімер-, скло- і металовмісними побутовими відходами [Електронний ресурс] : монографія / І.О. Мікульонек. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – С. 86–110.
3. Синюк О.М. Наукові основи проектування обладнання для переробки полімерних відходів у виробі легкої промисловості : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.10 / О.М. Синюк, Київ. нац. ун-т технологій та дизайну. – Київ : [б.в.], 2018. – 44 с.
4. Catalytic processing of plastic waste on the rise Antonio. Martín Cecilia Mondelli Shibashish D. Jaydev Javier Pérez-Ramírez. Volume 7, Issue 6, 10 June 2021, Pages 1487-1533. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2020.12.006>.
5. Möllnitz S., Feuchter M., Duretek I., Schmidt G., Pomberger R., Sarc R. Processability of Different Polymer Fractions Recovered from Mixed Wastes and Determination of Material Properties for Recycling. *Polymers*. 2021; 13(3):457. <https://doi.org/10.3390/polym13030457>.
6. Проект Програми розвитку ООН в Україні «Поводження з пластиковими відходами на місцевому рівні». Виконавець звіту: «Україна – де Лаге Ланден Консалтинг Груп» в консорціумі з ГО «Інститут зеленої економіки», 2021. 44 с.
7. Утилізація та рекуперація відходів : навчальний посібник / В.М. Кропивний, О.В. Медведева, А.В. Кропивна, О.В. Кузик. – Кропивницький : ЦНТУ, Електронне видання, 2020. – 440 с.
8. Miao Y., von Jouanne A., Yokochi A. Current Technologies in Depolymerization Process and the Road Ahead. *Polymers (Basel)*. 2021 Jan 30;13(3):449. doi: 10.3390/polym13030449. PMID: 33573290; PMCID: PMC7866858.
9. Лупінос А. Аналіз тенденцій розвитку підприємницької діяльності у сфері утилізації полімерних відходів в Україні / А. Лупінос, Н. Нуржії // Менеджмент і підприємництво: тенденції розвитку. – 2018. –

Випуск 2, № 04. – С. 55-63. – DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.26661/2522-1566-2018-2/04-06>.

10. Руда М. В. Циркулярна економіка в Україні: адаптація європейського досвіду / М. В. Руда, Т. С. Яремчук, М.Г. Бортнікова // Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення і проблеми розвитку. – Львів, № 3 (1), 2021. – С. 212–222. – DOI: <https://doi.org/10.23939/smeu2021.01.212>

11. Паладійчук Ю. Обґрунтування способів переробки полімерних відходів сільськогосподарського виробництва / Ю. Паладійчук, І. Телятник // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – ВНАУ : Вінниця, 2021. – № 4 (115). – С. 97-108. – DOI: 10.37128/2520-6168-2021-4-11.

12. Маркіна Л.М. Визначення небезпеки пластикових відходів для дослідження можливості їх утилізації термічними методами / Л.М. Маркіна, С.Ю. Ушкац, Н.Ю. Жолобенко // Проблеми охорони праці в Україні. – Комунальне агентство «Національний науково-дослідний інститут промислової безпеки та охорони праці». – 2021. – Том 37 № 2. – С. 25-37. – DOI: 10.36804/ndipbop.37-2.2021.25–37.

13. Михайлова Є. О. Аналіз методів перероблення пластикових відходів / Є. О. Михайлова, Д. М. Дейнека, Г. М. Панчева // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер.: Нові рішення в сучасних технологіях : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2021. – № 1 (7). – С. 80-89.

14. Arun Kumar. Awasthi et al. Plastic solid waste utilization technologies: A Review. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. 263 022024. doi:10.1088/1757-899X/263/2/022024.

15. Mădălina Elena Grigore. Methods of Recycling, Properties and Applications of Recycled Thermoplastic Polymers. Recycling, 2017, Vol. 2, issue 24. doi: 10.3390/recycling 2040024.

16. Маркіна Л. М., Крива М. С. Вивчення технологічних параметрів піролізу відпрацьованих шин при статичному навантаженні. Наука та інновації. 2018, 14(6): 35–49. <https://doi.org/10.15407/scin14.06.038>.

17. Плаван В. П. Переробка полімерних відходів: сучасний стан та перспективи розвитку [Електронний ресурс] / В. П. Плаван, Б. М. Савченко, В. В. Денисюк // Київський національний університет технологій і дизайну. – 2020. – Режим доступу : <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/ecology/ecology2021/paper/viewFile/13658/11491>.

18. Term Paper on Sustainable Plastic Waste Management [Електронний ресурс] / [А. Дхакал, Н. Гурунг, М. Кафле та ін.] // Університет Катманду. – 2021. – Режим доступу : [https://www.researchgate.net/publication/353820805\\_Term\\_Paper\\_on\\_Sustainable\\_Plastic\\_Waste\\_Management](https://www.researchgate.net/publication/353820805_Term_Paper_on_Sustainable_Plastic_Waste_Management).

#### References

1. The Complete Plastics Recycling Process. BLOG|RECYCLING, TYPES OF WASTE. October 12, 2020. <https://www.rts.com/blog/the-complete-plastics-recycling-process-rts>.

2. Mikulonok I.O. Povodzhennia z polimer-, sklo- i metalovmisnymi pobutovymi vidkhodamy [Elektronnyi resurs] : monografia / I.O. Mikulonok. – Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2022. – S. 86–110.

3. Syniuk O.M. Naukovi osnovy proektuvannia obladnannia dlia pererobky polimernykh vidkhodiv u vyrobky lehkoiu promyslovosti : avtoref. dys. ... d-ra tekhn. nauk : 05.05.10 / O.M. Syniuk, Kyiv. nats. un-t tekhnolohii ta dyzainu. – Kyiv : [b.v.], 2018. – 44 s.

4. Catalytic processing of plastic waste on the rise Antonio. Martinl Cecilia Mondelli Shibashish D. Jaydev Javier Pérez-Ramírez. Volume 7, Issue 6, 10 June 2021, Pages 1487-1533. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2020.12.006>.

5. Möllnitz S., Feuchter M., Duretek I., Schmidt G., Pomberger R., Sarc R. Processability of Different Polymer Fractions Recovered from Mixed Wastes and Determination of Material Properties for Recycling. Polymers. 2021; 13(3):457. <https://doi.org/10.3390/polym13030457>.

6. Proekt Prohramy rozvytku OON v Ukraini «Povodzhennia z plastykovymi vidkhodamy na mistsevomu rivni». Vykonavets zvituv: «Ukraina – de Lahe Landen Konsaltnykh Hrup» v konsortsiiumi z HO «Instytut zelenoi ekonomiky», 2021. 44 s.

7. Utylizatsiia ta rekuperatsiia vidkhodiv : navchalnyi posibnyk / V.M. Kropivnyi, O.V. Medvedeva, A.V. Kropivna, O.V. Kuzyk. – Kropyvnytskyi : TsNTU, Elektronne vydannia, 2020. – 440 s.

8. Miao Y., von Jouanne A., Yokochi A. Current Technologies in Depolymerization Process and the Road Ahead. Polymers (Basel). 2021 Jan 30;13(3):449. doi: 10.3390/polym13030449. PMID: 33573290; PMCID: PMC7866858.

9. Lupinos A. Analiz tendentsii rozvytku pidpriemnytskoi diialnosti u sferi utylizatsii polimernykh vidkhodiv v Ukraini / A. Lupinos, N. Nurzhii // Menedzhment i pidpriemnytsstvo: tendentsii rozvytku. – 2018. – Vypusk 2, № 04. – С. 55-63. – DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.26661/2522-1566-2018-2/04-06>.

10. Ruda M. V. Tsykuliarna ekonomika v Ukraini: adaptatsiia yevropeiskoho dosvidu / M. V. Ruda, T. S. Yaremchuk, M.H. Bortnikova // Menedzhment ta pidpriemnytsstvo v Ukraini: etapy stanovlennia i problemy rozvytku. – Lviv, № 3 (1), 2021. – С. 212–222. – DOI: <https://doi.org/10.23939/smeu2021.01.212>

11. Paladiichuk Yu. Obgruntuvannia sposobiv pererobky polimernykh vidkhodiv silskohospodarskoho vyrobnytstva / Yu. Paladiichuk, I. Teliatnik // Tekhnika, enerhetyka, transport APK. – VNAU : Vinnytsia, 2021. – № 4 (115). – С. 97-108. – DOI: 10.37128/2520-6168-2021-4-11.

12. Markina L.M. Vyznachennia nebezpeky plastykovykh vidkhodiv dlia doslidzhennia mozhlyvosti yikh utylizatsii termichnymi metodamy / L.M. Markina, S.Iu. Ushkats, N.Iu. Zholobenko // Problemy okhorony pratsi v Ukraini. – Komunalne ahentstvo «Natsionalnyi nauково-doslidnyi instytut promyslovoi bezpeky ta okhorony pratsi». – 2021. – Том 37 № 2. – С. 25-37. – DOI: 10.36804/ndipbop.37-2.2021.25–37.

13. Mykhailova Ye. O. Analiz metodiv pereroblennia plastykovykh vidkhodiv / Ye. O. Mykhailova, D. M. Deineka, H. M. Pancheva // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Ser.: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh : zb. nauk. pr. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2021. – № 1 (7). – С. 80-89.

14. Arun Kumar. Awasthi et al. Plastic solid waste utilization technologies: A Review. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. 263 022024. doi:10.1088/1757-899X/263/2/022024.

15. Mădălina Elena Grigore. Methods of Recycling, Properties and Applications of Recycled Thermoplastic Polymers. Recycling, 2017, Vol. 2, issue 24. doi: 10.3390/recycling 2040024.

16. Markina L. M., Kryva M. S. Vyvchennia tekhnolohichnykh parametriv pirolizu vidpratsovanykh shyn pry statychnomu navantazhenni. Nauka ta innovatsii. 2018, 14(6): 35–49. <https://doi.org/10.15407/scin14.06.038>.

17. Plavan V. P. Pererobka polimernykh vidkhodiv: suchasnyi stan ta perspektyvy rozvytku [Elektronnyi resurs] / V. P. Plavan, B. M. Savchenko, V. V. Denysiuk // Kyivskyi natsionalnyi universytet tekhnolohii i dyzainu. – 2020. – Rezhym dostupu : <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/ecology/ecology2021/paper/viewFile/13658/11491>.

18. Term Paper on Sustainable Plastic Waste Management [Elektronnyi resurs] / [A. Dkhakal, N. Hurunh, M. Kafle ta in.] // Universytet Katmandu. – 2021. – Rezhym dostupu : [https://www.researchgate.net/publication/353820805\\_Term\\_Paper\\_on\\_Sustainable\\_Plastic\\_Waste\\_Management](https://www.researchgate.net/publication/353820805_Term_Paper_on_Sustainable_Plastic_Waste_Management).

Надійшла/Paper received : 09.08.2022 p. Надрукована/Printed : 01.11.2022 p.

БАБИЧ Антоніна

Київський національний університет технологій та дизайну

<https://orcid.org/0000-0001-5061-3292>e-mail: [basienka@ukr.net](mailto:basienka@ukr.net)

КЕРНЕСШ Вікторія

Київський національний університет технологій та дизайну

<https://orcid.org/0000-0003-0572-4107>e-mail: [kiefvoot@ukr.net](mailto:kiefvoot@ukr.net)

ТКАЧЕНКО Данііл

Київський національний університет технологій та дизайну

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

## ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ 3D ДРУКУ В ДИЗАЙНІ ЧОЛОВІЧОГО КОСТЮМУ

Використання інноваційних методів і конструктивних рішень, не типових фактурних і структурних матеріалів та елементів 3D друку при розробці дизайну моделей виробів індустрії моди і зокрема одягу, привертає увагу фахівців модної індустрії починаючи від цікавих і креативних ідей, створенні колажів натхнення, виконанні швидких чорно-білих ескізів замальовок виробів, підбори матеріалів та комплектуючих, а також в детальній розробці елементів конструкцій чоловічого костюму. Розробка асортименту сучасного і креативного чоловічого костюму з різних не типових матеріалів і елементів для галузі – це сміливий виклик дизайнера суспільству, його ідея, бачення світу емоцій, моди і краси. Це частково можливість заощадження природних ресурсів і використання у якості оздоблювальних елементів костюму деталей 3D друку, що імітують металеві ланцюжки. В статті досліджено і проаналізовано питання актуальності і технологічної можливості використання елементів 3D друку у вигляді ланцюжків різних переплетень для розробки дизайну колекції чоловічого костюму промислових і індивідуальних колекцій. Досліджено і проаналізовано питання тенденцій моди в дизайні чоловічого костюму. Проведено аналіз світових брендів виробників одягу, доведено теоретично доцільність даної розробки. Наведено результати теоретико-аналітичних досліджень щодо можливості використання сміливих конструктивних ідей і рішень у костюмах чоловічого асортименту. Розроблено ескізний проєкт, 3D моделі ланцюжків, виготовлено за допомогою 3D принтера «Prusa» зразки ланцюжків для використання в колекції чоловічого костюму. Виготовлено зразки-модулі виробів в матеріалі для візуалізації задуму. Дану розробку представлено на конкурсі стартапів робіт молодих дизайнерів, м. Київ КНУТД (2022). Доведено теоретично доцільність даної розробки. Колекція виробів буде представлена на конкурсі «Печерські каштани», м. Київ.

**Ключові слова:** костюм, колір, форма, конструкція, технологічність моделі, 3D модель, мода, інновації, попит, виріб.

BABYCH Antonina, KERNESH Viktoriia, TKACHENKO Daniil  
National University of Technology and Design

## USE OF ELEMENTS OF 3D PRINTING IN MEN'S SUIT DESIGN

The use of innovative methods and constructive solutions, non-typical textural and structural materials and elements of 3D printing in the development of the design of models of products of the fashion industry, and in particular clothes, attracts the attention of fashion industry specialists, starting from interesting and creative ideas, creating collages of inspiration, performing quick black and white sketches of products, selection of materials and components, as well as in the detailed development of elements of men's suit constructions. Development of an assortment of modern and creative men's suits from various non-typical materials and elements for the industry is a bold challenge of the designer to society, his idea, vision of the world of emotions, fashion and beauty. This is partly an opportunity to save natural resources and use as decorative elements of the suit 3D printing details imitating metal chains. The article investigates and analyzes the relevance and technological possibility of using 3D printing elements in the form of chains of various weaves for the design of a collection of men's suits for industrial and individual collections.

The issue of fashion trends in the design of men's suits has been studied and analyzed. An analysis of world brands of clothing manufacturers was conducted, the theoretical feasibility of this development was proved. The results of theoretical and analytical research on the possibility of using bold constructive ideas and solutions in men's suits are presented. Developed a sketch project, 3D models of chains, made with the help of a 3D printer "Prusa" chain samples for use in the men's suit collection. Samples-modules of products were made in the material for visualization of the idea. This development was presented at the startup competition of works of young designers, Kyiv KNUITD (2022). The feasibility of this development has been proven theoretically. The collection of products will be presented at the competition "Cave Chestnuts", Kyiv.

**Key words:** suit, color, shape, construction, manufacturability of the model, 3D model, fashion, innovation, demand, product.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

Костюм – це система не випадкових предметів, які вдягає на себе людина маючи на меті задовольнити особисті утилітарні і інформаційно-естетичні потреби.

Одяг узагальнено є предметом першої необхідності для сучасної людини і може використовуватись тільки для захисту тіла від холоду, бруду та пошкоджень. В такому випадку естетика, конструкція і вид матеріалу не має особливого значення для споживача. Якщо ж мова йде про сучасного, креативного і не стандартно мислячого споживача, який крім утилітарних потреб має на меті виділитись у суспільстві, тоді

першочергово постають питання естетики, кольору, фактури матеріалу, креативного фасону і використання інноваційних деталей чи технологій у виготовленні виробу (3D елементи, сітки, ланцюги, світловідбиваючі тканини тощо) [1, 2].

Мода постійно змінюється і створює тимчасове умовне уявлення про красу і актуальну форму одягу. Прагнення дизайнерів до періодичної зміни зовнішньої форми виробу призводить до одноманітності в одязі і врешті безперспективною заміною існуючої форми на іншу. Яка б не була вдала з естетичної точки зору форма чи конструкція одягу, матеріал, кольорова гамма, методика виготовлення і технологія обробки чи оздоблення виробу, їх чекає заміна на іншу, коли товар стає не актуальним у наступному сезоні. Тому при розробці моделей чоловічого костюму дуже важливо відшукати модну родзинку даного часу і втілити її елементи у колекції виробів [3, 4].

Виготовляють сучасні вироби індустрії моди як з класичних (натуральна шкіра, текстиль тощо) так і з інноваційних (еко-шкіра, нано-текстиль, пластик, метал тощо) матеріалів, функціонал і естетична складова виробів є не змінними. Однак питання переробки відходів і виготовлення з них нових виробів є на часі. Одним з таких напрямів в науці є використання технологій 3D друку виробів або окремих деталей(елементів) виробів різних за призначенням, що має практичне застосування і величезне значення в масштабах планети щодо збереження екології і зменшення кількості відходів. Тому в даній розробці при проектуванні чоловічого костюму повинні бути максимально використані інновації в секторі науки, техніки, прикладного мистецтва, обрані оптимальні конструктивні та композиційні рішення, відповідно концепції створення виробів з екологічно направленою складовою [5, 6].

### Аналіз досліджень та публікацій

Дослідженням питань сучасного класичного і креативного дизайну, питань удосконалення конструкції та технології складання виробів індустрії моди, оздоблення виробів шляхом використання не типових матеріалів для галузі, як наприклад 3D друк, присвячені роботи відомих вчених, таких як М. Колосніченко, Н. Чупріна, Т. Ніколаєва, Ю. Постушна, С. Березненко, Л. Зубкова, Л. Білоцька, Б. Злотенко, В. Чупринка, А. Бабич, В. Кернеш, Л. Чертенко [7, 8] і молодих вчених М. Лещишин, Н. Борщевська, Т. Липський, М. Яценко [9, 10]. Проте використання не стандартних колористичних та конструктивних рішень, креативних технологій та обладнання щодо виготовлення і оздоблення виробів на даний час потребує подальшого дослідження, зокрема в індустрії моди, що обумовлює доцільність і актуальність даного дослідження.

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є розробка дизайну колекції чоловічого костюму на основі теоретико-практичних дослідження питань моди, особливостей конструкції чоловічого костюму, матеріалів та комплектуючих для виготовлення виробів, а також можливості використання елементів 3D друку для оздоблення і отримання функціоналу у виробах індустрії моди, що дасть можливість спрогнозувати і отримати позитивний результат [11, 2].

### Виклад основного матеріалу

Основним завданням дизайнерів є створення багатофункціональних чи предметно направлених, носибельних, креативних виробів, що відповідають сучасним тенденціям моди, мають високі естетичні та утилітарні властивості, відповідають потребам і смакам споживачів.

Створення креативного дизайну чоловічого костюму передбачає не тільки зміну зовнішньої форми об'єкту, але і впровадження не звичних для даного сегменту виробів оздоблювальних та функціональних елементів (деталей) таких як 3D сітки, ланцюжки, накладки, кишені, манжети чи комірці тощо.

Впровадження не стандартних рішень та інноваційних технологій створення і оздоблення виробу дозволяє дизайнеру створити власний стиль, як відображення внутрішнього світу, мрії, вподобання і прагнень.

Проаналізувавши результати пошукового дослідження щодо викликів і тенденцій сучасної модної індустрії можна зробити висновок про те, що сучасні не типові матеріали (прутковий пластик – філомент), технології 3D друку різних елементів і деталей, що використовуються сучасною людиною, різко виріс. Тому ідея авторів роботи щодо застосування елементів 3D друку для оздоблення піджаків колекції чоловічого костюму у вигляді ланцюжків чи сіток, що імітують металеві ланцюжки або створюють ефект «кольчуги» є актуальним і цікавим проектом дослідження з подальшою розробкою дизайну колекції чоловічого костюму і створенні оригінальних виробів [12, 2].

Ідея розробки, яка представлена як візуалізація елементів натхнення (рис. 1), полягає у відображенні в матеріалі поєднання емоцій і відчуттів. Це яскрава Іспанія. Танок Кармен, як відображення кохання і пристрасті. Корида, як відображення сміливості і легкості тореадора. Це мікс кольорів, матеріалів і фактур.

Для втілення ідеї було створено ескізний проект колекції з елементами 3D друку, який частково представлений в даній статті (рис. 2), за ескізами костюму розроблено варіанти вставок 3D моделей для друку (рис. 3, 4), підібрано технологічні нормативи (температура стола 60°C, температура сопла 225°C, товщина стінки виробу 0,8 мм, заповнення 20%, час друку 2 год. 10 хв) і надруковано зразки елементів костюму на 3D принтері «Prusa» в умовах лабораторії кафедри технологій моди КНУТД (рис. 5), виготовлено пробні зразки виробів.



Рис. 1. Візуалізація творчого джерела ідеї проєкту колекції чоловічого костюму «Пристрасть»



Рис. 2. Ескізний дизайн-проект колекції чоловічого костюму з елементами 3D друку (колекція «Пристрасть», автор Д. Ткаченко)

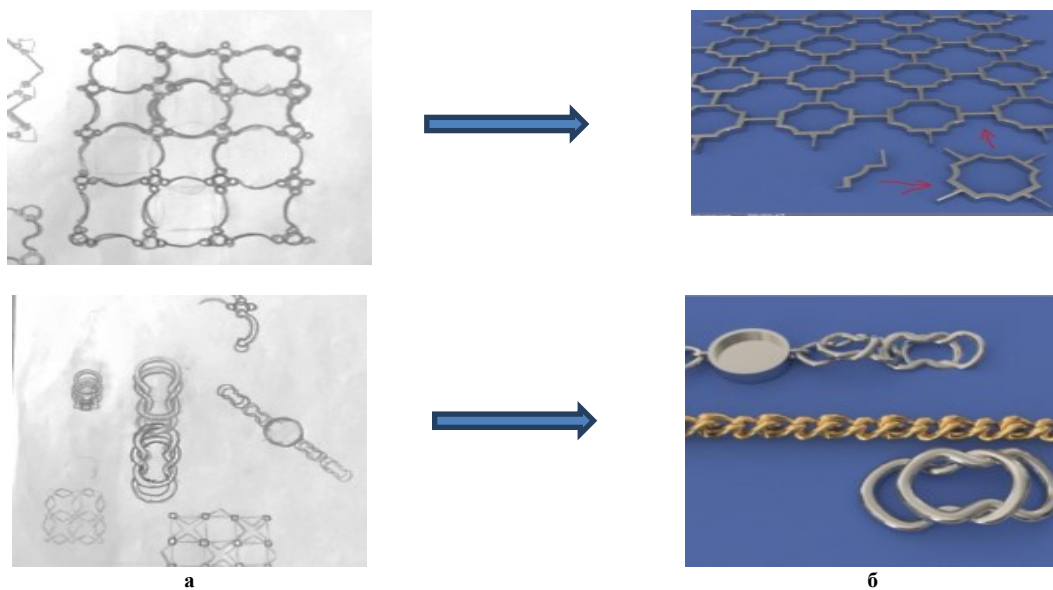


Рис. 3. Візуалізація елементів 3D друку колекції чоловічого костюму  
а – ескіз моделі друкованого елемента; б – 3D модель друкованого елемента



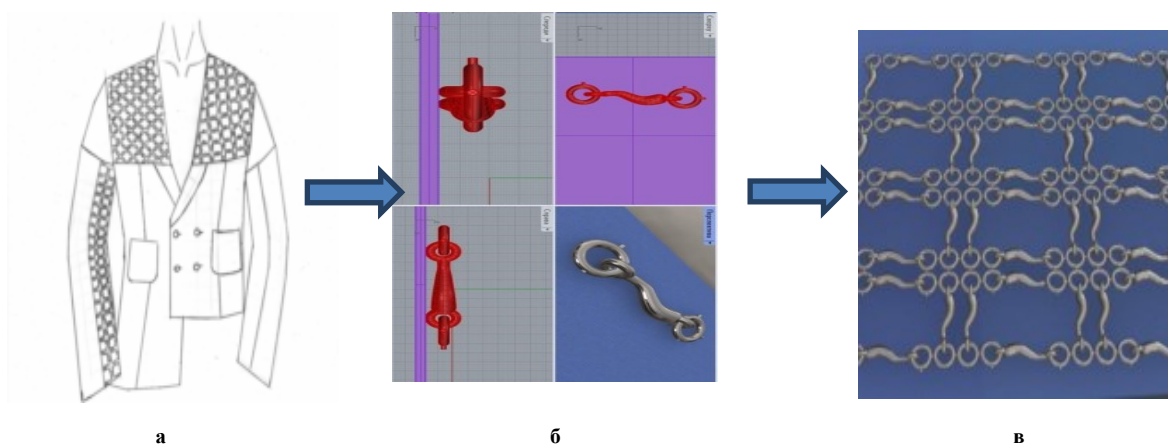


Рис. 4. Візуалізація елементів 3D друку для піджака колекції чоловічого костюму  
а – ескіз моделі піджака з елементами 3D; б – 3D модель елемента костюму;  
в – візуалізація сітки елемента костюму

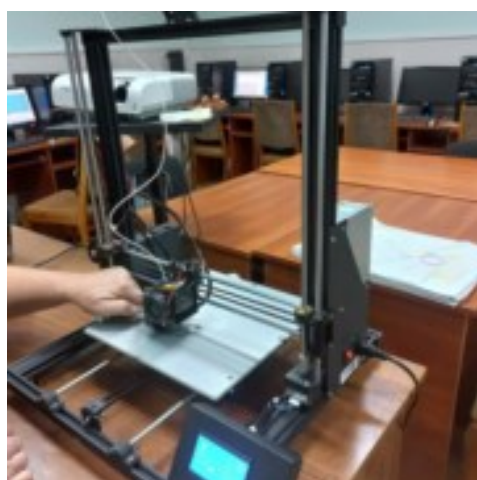


Рис. 5. 3D принтер «Prusa»  
(лабораторія кафедри технологій моди, КНУТД)

Отже, для впровадження сміливих ідей дизайнера практично немає меж для польоту його фантазії і виготовлення колекції виробів для показу на подіумі [13–17]. Тому яскраві кольори, цікаві матеріали і форми деталей конструкції виробу, інноваційні підходи і технології є актуальними з точки зору розробки і втілення науково орієнтованої розробки дизайну проекту чоловічого костюму з елементами 3D друку. Робота є актуальною і потребує подальших досліджень щодо вдосконалення моделей і технологій друку елементів костюму.

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

Постановка задач і втілення креативних ідей, що стоять перед науковцями індустрії моди вимагає не тільки креативу, творчої фантазії та відчуття потреб модної індустрії, а й глибоких знань щодо дизайну та технологій виробництва виробів даного сегменту. Без цих знань неможливо реалізувати нові ідеї та створювати ексклюзивні вироби.

Досягти позитивного результату роботи можна тільки розвиваючись і експериментуючи з матеріалами, конструкціями виробів та технологіями.

В даній роботі досліджено і проаналізовано питання актуальності і технологічної можливості використання елементів 3D друку у вигляді ланцюжків різних переплетень для розробки дизайну колекції чоловічого костюму промислових і індивідуальних колекцій.

Розроблено лінійку ескізів та 3D моделей колекції чоловічого костюму різних конструкцій з використанням сучасних конструктивних і колористичних рішень.

Виготовлено за допомогою 3D принтера «Prusa» в умовах лабораторії кафедри технологій моди (КНУТД) зразки ланцюжків для використання в колекції чоловічого костюму. Виготовлено зразки-модулі виробів в матеріалі для візуалізації задуму. Спрогнозовано використання деталей 3D друку в колекціях сучасних виробів індустрії моди.

Дану розробку представлено на конкурсі стартапів робіт молодих дизайнерів, м. Київ КНУТД (2022). Доведено теоретично доцільність даної розробки. Колекція виробів буде представлена на конкурсі «Печерські каштани», м. Київ. Колекція виробів буде представлена на конкурсі «Печерські каштани», м. Київ. Перспективами подальших розвідок у даному напрямі є поглиблене вивчення даного питання і практична реалізація ідей.

#### Література

1. Івасенко М. В., Гврітішвілі А. В., Савіна М. І., Гаркава Т. С., Колле С. М. Адаптація fashion-індустрії до глобальних світових процесів. Науково-виробничий журнал «Індустрія моди. Fashion Industry». 2020, № 3. С. 36-40.
2. Сфера застосування 3D-друку. <https://anrotech.ru/blog/primenenie-tehnologii-3d-pechati/>
3. Огляд ринку. Вітчизняна індустрія моди. Мій бізнес. <https://msb.aval.ua/ru/news/?id=24843>
4. Українські еко-бренди. <https://shotam.info/top-10-ukrains-ki-eko-brendy-i-aki-pikluiut-sia-pro-dovkillia/>
5. Ніколаєва Т. В., Шафранська Т. В., Ніколаєва Т. І. Національні традиції як основа підготовки фахівця з дизайну одягу. Науковий фаховий журнал Art and Design. 2019, № 1. С. 140-149.
6. Колосніченко М. В. Ніколаєва Т. В. Становлення та розвиток моди на зламі століть: український концепт. Легка промисловість. Індустрія моди. 2017. № , С. 20-24.

7. Кулешова С.Г., Найчук Д.П. Використання інноваційних технологій декорування у fashion дизайні одягу. Advanced chemical technologies and materials for industry and the environment: Conference Proceedings. International Scientific and Technical Conference, 22-23 October 2020, Khmelnytskyi (Ukraine). Khmelnytskyi National University. 2020. P. 67–71.
8. Чупріна Н. В. Постушна Ю.О. Трансформація форми, структури та колориту традиційного вбрання народів Скандинавії з метою розробки колекції актуального одягу. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки. 2017, № 6. С. 206–214.
9. Борщевська Н. М. Дослідження впливу лазерного гравірування на фізико-механічні властивості натуральних шкір для верху взуття та шкіргалантерейних виробів. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки. 2020. № 5 (150). С. 46–55.
10. Prybeha D., Julia Koshevko, Svitlana Smutko, Volodymyr Onofriichuk, Mykola Skyba, Oleg Synyuk, Svetlana Kuleshova, Svitlana Pidhaichuk and Borys Zlotenko. Analysis of methods of printing images on textile materials and evaluation of their quality. *Vlakna a Textil*. 2021. Volume 82(2). P. 63–74. URL: [http://vat.ft.tul.cz/2021/2/VaT\\_2021\\_2\\_8.pdf](http://vat.ft.tul.cz/2021/2/VaT_2021_2_8.pdf)
11. Остапенко Н.В., Верба С.В., Луцкер Т.В., Антонюженко А.Ю., Авраменко Т.В. Дизайн-розробка колекції жіночого одягу з використанням авторських принтів. *Art and Design*. 2018. № 1 (01). С. 114–125.
12. Очеретна Н. А., Григорова Л. С. Застосування фактур в дизайні одягу. Час мистецької освіти. Теорія і методика виховання художньо-обдарованої особистості у закладах мистецької освіти : зб. ст. VII Всеукр. наук.-практ. конф., 17–18 жовт. 2019 р. : [у 2 ч.] / Харків. нац. пед. ун-т ім. Г. С. Сковороди ; [редкол.: В. В. Фомін (голов. ред.) та ін.]. Харків : ХНПУ, 2019. Ч. 2. С. 231–237.
13. Ніколаєва Т.В., Ніколаєва Т. І., Дяченко Ю. В. Визначення прийомів та принципів параметричного дизайну в проектуванні колекцій молодіжного одягу. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки. 2017. № 5. С. 216–223.
14. Чупріна Н. В. Роль сучасних технологій дизайн-діяльності у формуванні компетентностей дизайнера одягу в сучасній індустрії моди. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія "Технічні науки". 2015. № 5 (90). С. 233–238.
15. Гардабхадзе І. А., Кротова Т. Ф. Сучасні тенденції у дизайні одягу та їх відображення в освітньому процесі. Вісник КНУКіМ, 2010. С. 39–46. Серія «Мистецтвознавство».
16. Чупріна Н. В. Сегментація ліній модного одягу в структурі індустрії моди. ВІСНИК ХДАДМ, 2014. № 1. С. 33–37.

#### References

1. Ivasenko M. V., Hvirishvili A. V., Savina M. I., Harkava T. S., Kollie S. M. Adaptatsiia fashion-industrii do hlobalnykh svitovykh protsesiv. *Naukovo-vyrobnychiy zhurnal «Industriia mody. Fashion Industry»*. 2020, № 3. S. 36–40.
2. Sfera zastosuvannia 3D-druku. <https://anrotech.ru/blog/primenenie-tehnologii-3d-pechati/>
3. Ohliad rynku. Vitchyzniana industriia mody. Mii biznes. <https://msb.aval.ua/ru/news/?id=24843>
4. Ukrainski eko-brendy. <https://shotam.info/top-10-ukrains-ki-eko-brendy-i-aki-pikluiut-sia-pro-dovkillia/>
5. Nikolaieva T. V., Shafranska T. V., Nikolaieva T. I. Natsionalni traditsii yak osnova pidhotovky fakhivtsia z dizainu odiahu. *Naukovyi fakhovyi zhurnal Art and Design*. 2019, № 1. S. 140–149.
6. Kolosnichenko M. V. Nikolaieva T. V. Stanovlennia ta rozvytok mody na zlomy stolit: ukrainskyi kontsept. *Lehka promyslovist. Industriia mody*. 2017. № , S. 20–24.
7. Kuleshova S.H., Naichuk D.P. Vykorystannia innovatsiinykh tekhnolohii dekoruvannia u fashion dyzaini odiahu. Advanced chemical technologies and materials for industry and the environment: Conference Proceedings. International Scientific and Technical Conference, 22-23 October 2020, Khmelnytskyi (Ukraine). Khmelnytskyi National University. 2020. P. 67–71.
8. Chuprina N. V. Postushna Yu.O. Transformatsiia formy, struktury ta kolorytu tradytsiinoho vbrannia narodiv Skandynavii z metoiu rozrobky koleksii aktualnogo odiahu. *Visnyk Kyivskoho natsionalnogo universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Serii: Tekhnichni nauky*. 2017, № 6. S. 206–214.
9. Borshchevska N. M. Doslidzhennia vplyvu lazernoho hraviruvannia na fizyko-mekhanichni vlastyvoli naturalnykh shkir dlia verkhuzutia ta shkirhalantereynykh vyrobiv. *Visnyk Kyivskoho natsionalnogo universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Serii: Tekhnichni nauky*. 2020. № 5 (150). S. 46–55.
10. Prybeha D., Julia Koshevko, Svitlana Smutko, Volodymyr Onofriichuk, Mykola Skyba, Oleg Synyuk, Svetlana Kuleshova, Svitlana Pidhaichuk and Borys Zlotenko. Analysis of methods of printing images on textile materials and evaluation of their quality. *Vlakna a Textil*. 2021. Volume 82(2). R. 63–74. URL: [http://vat.ft.tul.cz/2021/2/VaT\\_2021\\_2\\_8.pdf](http://vat.ft.tul.cz/2021/2/VaT_2021_2_8.pdf)
11. Ostapenko N.V., Verba S.V., Lutsker T.V., Antoniuzenko A.Iu., Avramenko T.V. Dyza-in-rozrobka koleksii zhinochoho odiahu z vykorystanniam avtorskykh pryntiv. *Art and Design*. 2018. № 1 (01). S. 114–125.
12. Ocheretna N. A., Hryhorova L. S. Zastosuvannia faktur v dyzaini odiahu. Chas mystetskoï osvity. Teoriia i metodyka vykhovannia khudozhno-obdarovanoi osobystosti u zakladakh mystetskoï osvity : zb. st. VII Vseukr. nauk.-prakt. konf., 17–18 zhovt. 2019 r. : [u 2 ch.] / Kharkiv. nats. ped. un-t im. H. S. Skovorody ; [redkol.: V. V. Fomin (holov. red.) ta in.]. Kharkiv : KhNPU, 2019. Ch. 2. S. 231–237.
13. Nikolaieva T. V., Diachenko Yu. V. Vyznachennia pryimiv ta pryntsyv parametrychnoho dyzainu v proektuvanni koleksii molodizhnogo odiahu. *Visnyk Kyivskoho natsionalnogo universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Serii: Tekhnichni nauky*. 2017. № 5. S. 216–223.
14. Chuprina N. V. Rol suchasnykh tekhnolohii dyzain-diialnosti u formuvanni kompetentnosti dyzainera odiahu v suchasniï industrii mody. *Visnyk Kyivskoho natsionalnogo universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Serii "Tekhnichni nauky"*. 2015. № 5 (90). S. 233–238.
15. Hardabkhadze I. A., Krotova T. F. Suchasni tendentsii u dyzaini odiahu ta yikh vidobrazhennia v osvithomu protsesi. *Visnyk KNUKIM*, 2010. S. 39–46. Serii «Mystetstvoznavstvo».
16. Chuprina N. V. Sehmentatsiia liniï modnogo odiahu v strukturi industrii mody. *VISNYK KhDADM*, 2014. № 1. S. 33–37.

Надійшла/Paper received : 21.09.2022 р. Надрукована/Printed : 01.01.2022 р.



БАБИЧ Антоніна

Київський національний університет технологій та дизайну

<https://orcid.org/0000-0001-5061-3292>e-mail: [basienka@ukr.net](mailto:basienka@ukr.net)

ГАРАНІНА Ольга

Київський національний університет технологій та дизайну

<https://orcid.org/0000-0002-4715-3851>e-mail: [helgaranina@gmail.com](mailto:helgaranina@gmail.com)

МОСКОВА Ольга

Київський національний університет технологій та дизайну

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

## ФОРМУВАННЯ АСОРТИМЕНТУ ЧОЛОВІЧОГО ВЗУТТЯ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМИ І КОЛЬОРУ НА ОСНОВІ МАРКЕТИНГОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Колористика та конструктивізм у виробках індустрії моди, і зокрема у взутті, є не новим явищем, однак воно все частіше з'являється в роботах сучасних дизайнерів, все активніше впливає на моду і свідомість споживачів завдяки можливості подорожувати і споглядати світ, вивчати особливості виробів різних культур підсвідомо «приміряючи» їх на себе. Цікаві колористичні та конструктивні рішення у взутті надають виробам функціональної повноти та виразності, а носієві – неповторних відчуттів і приємних вражень. Використання не стандартних колористичних і конструктивних рішень при розробці моделей взуття привертає увагу фахівців модної індустрії, простежується ланцюжком конкретних дій в «народженні» ідеї, створенні творчого джерела, виконанні ескізів, підборі матеріалів і палітри кольорів та в детальній розробці конструкцій об'єктів. В статті досліджено і проаналізовано питання створення асортименту сучасного повсякденного чоловічого взуття з різних матеріалів, питання можливості використання натуральної шкіри «Краст» та фінішних композицій для колористичного оздоблення виробу у створенні сучасних промислових і індивідуальних колекцій взуття. Досліджено і проаналізовано питання конструктивізму в дизайні взуття. Проведено аналіз українських брендів виробників взуття за допомогою google анкетування споживачів різної вікової аудиторії. Теоретично доведено доцільність даної розробки. Наведено результати маркетингових досліджень щодо можливості використання сміливих конструктивних ідей і колористичних рішень у взутті чоловічого асортименту. Розроблено ескізний проект, 3D моделі асортиментного ряду колекції повсякденного чоловічого взуття. Розроблено конструкторсько-технологічну документацію на вироби. Виготовлено промислові зразки колекції чоловічого взуття. Впроваджено розробку у виробництво на ТОВ «Прайм Шуз», м. Бровари. Доведено теоретично доцільність даної розробки.

**Ключові слова:** асортимент, колір, форма, конструкція, технологічність моделі, маркетингові дослідження, респондент, чинники впливу, попит, виріб.

BABYCH Antonina, GARANINA Olha, MOSKOVA Olha  
National University of Technology and Design

## FORMATION OF THE RANGE OF MEN'S SHOES TAKING INTO ACCOUNT THE CHARACTERISTICS OF SHAPE AND COLOR ON THE BASIS OF MARKETING RESEARCH

Colorism and constructivism in the products of the fashion industry, and in particular in shoes, is not a new phenomenon, but it appears more and more often in the works of modern designers, it increasingly affects fashion and the consciousness of consumers thanks to the opportunity to travel and contemplate the world, to study the peculiarities of different cultures subconsciously trying them on. Interesting color and design solutions in shoes give the products functional completeness and expressiveness, and the wearer unique feelings and pleasant impressions.

The use of non-standard color and design solutions in the development of shoe models attracts the attention of fashion industry specialists, is traced by a chain of specific actions in the "birth" of an idea, creation of a creative source, sketching, selection of materials and color palette, and in the detailed development of object structures.

Development of an assortment of men's shoes taking into account the features of shape and color due to the use of color accents, compositional and structural elements of shoes.

The research used a theoretical-analytical approach to the review and analysis of scientific and technical literature by direction. Marketing research was experimentally conducted to determine the most important forms, functions and color solutions of products in the opinion of consumers, which will make it possible to analyze the results of research and predict a successful and profitable assortment of men's shoes.

The classic designs of men's shoes have been studied and analyzed. The peculiarities of the technology of manufacturing products, materials, color solutions, innovative techniques, technologies and tools for applying color to materials, individual parts and finished products have been studied. Factors influencing the formation of the assortment of men's shoes were studied experimentally. The results of marketing research on the possibility of using bold constructive ideas and color solutions in men's shoes are given.

A line of sketches of men's shoes of various designs using modern constructive and color solutions has been developed, which includes an assessment by experts regarding the relevance of its use in the formation of the assortment and production of products. Samples of shoes were produced and tested. The use of classic and modern non-standard accent color techniques on the finished product for the production of shoes of this segment is predicted, the increase in the manufacturability of the model due to the successful shapes of the parts of the workpiece, the quality of the products as a whole and the increase in demand for shoes by creative Ukrainian designers.

**Key words:** assortment, color, shape, design, manufacturability of the model, marketing research, respondent, influencing factors, demand, product.

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

Вироби індустрії моди, зокрема взуття, є предметом першої необхідності для сучасної людини. Вони можуть бути за бажанням споживача класичними і старомодними, сучасними і креативними, але актуальними і затребуваними споживачем вони є завжди, оскільки саме взуття допомагає людині долати відстані не пошкоджуючи стопи ніг, зігріває, створює комфорт і профілактику захворювань нижніх кінцівок, є не змінним «компаньйоном» людини по життю, доповнює її образ створюючи відповідні акценти, підтримуючи неповторний стиль [1].

Виготовляють сучасне взуття як з класичних (натуральна шкіра, текстиль тощо) так і з інноваційних (еко-шкіра, нано-текстиль, пластик, метал тощо) матеріалів, різних розмірів і призначення, однак функціонал і естетика виробів даного сегменту є не змінними вимогами.

Розвиток людства, виробничий і науково-технічний прогрес дозволив створити у свій час великі підприємства, які задовольняли потреби населення у виробі індустрії моди виготовляючи їх масово великими виробничими партіями. Однак часи змінились і вже сьогодні ми маємо потребу не стільки у кількості виробів, як у їх якості та індивідуальності. Тому на даний момент випуск взуття в Україні переорієнтовується і здійснюється як масово не великими партіями так і індивідуально в умовах дизайн студій та майстерень.

Змінились часи, змінились конструктивно вироби, розширився спектр матеріалів, інструментів та обладнання, удосконалюються технології обробки та складання виробів, змінились і вимоги споживачів щодо призначення і функціоналу виробів [2–4].

Станом на 2022 рік можна впевнено сказати, що індивідуальне та багатофункціональне взуття полюбують усі [5]. Однак у суспільстві існує хибна думка про те, що тільки жінки слідкують за модою, а звичайні пересічні українці чоловіки нею не цікавляться, тому взуття обирають суто з міркувань функціоналу і помірної ціни. Насправді це не так. Сьогодні вже не є рідкістю бачити чоловіків у взутті яскравих кольорів та не звичайних конструкцій. Безумовно вік споживача і його соціальний статус та спосіб життя впливають на вибір виробу, однак мрії і бажання можуть бути не реально яскравими в кожного з нас.

При створенні асортименту сучасних виробів, зокрема чоловічого побутового взуття, їх естетичну привабливість та індивідуальність, підвищену комфортність та функціональність, прийнятну собівартість і попит можна прогнозувати і досягнути мети теоретично вже на етапі розробки ескізного проекту, шляхом видозміни форми і кольору виробу в цілому чи його окремих елементів, а також вибору матеріалів та технологій їх фінішного оздоблення [6, 7]. В цілому питання конкурентоспроможності виробів, виробництва і реалізації на внутрішньому і зовнішньому ринках сучасних виробів з помірною ціною, привабливою естетичною складовою, що виготовлені з класичних або інноваційних вітчизняних матеріалів є актуальним завданням науковців і виробничників усіх країн світу [8, 9].

### **Аналіз досліджень та публікацій**

Дослідженням проблем удосконалення конструкції та технології виготовлення і оздоблення виробів індустрії моди, і зокрема взуття, формуванням асортименту виробів на основі маркетингових досліджень присвячені роботи відомих вчених класиків, таких як В. Коновал, С. Гаркавенко, А. Бабич, О. Михайловська, О. Козар, В. Кернеш, Н. Первая [11–13, 7] і молодих вчених, таких як Т. Липський, Н. Борщевська, М. Лещишин та інші [11, 14]. Проте використання не стандартних колористичних та конструктивних рішень, креативних технологій та обладнання щодо виготовлення і суцільного чи точкового оздоблення матеріалів і готового взуття на сьогодні потребує подальшого дослідження, зокрема в індустрії моди, що обумовлює доцільність і актуальність даного дослідження.

### **Формулювання цілей статті**

Метою роботи є дослідження і аналіз особливостей конструкції взуття, матеріалів для виготовлення виробів та вимог до них. Вивчення технік та особливостей технології виготовлення та оздоблення виробів і як результат досліджень розробка асортименту чоловічого взуття за рахунок використання композиційно-конструктивних елементів, колористичних акцентів і сучасної палітри кольорів, які можна додавати до виробу чи замінювати, враховуючи визначені шляхом аналізу проведених в роботі маркетингових досліджень найвагоміших думок споживачів щодо можливості втілення у вироби чоловічого асортименту сміливої колористики і форми взуття, матеріалів і технологій оздоблення виробів, що дасть можливість спрогнозувати позитивний результат [15, 16].

### **Виклад основного матеріалу**

З урахуванням специфіки активного використання взуття у ході їх щоденного носіння потенційними споживачами, науковцями проведено пошукові теоретико-аналітичного дослідження виробів і вимог до них за НТД [15–17]. Виходячи з цих конкретизованих відомостей в даній роботі з урахуванням потреб і вимог споживачів чоловіків різного віку і соціального статусу, згідно аналізу результатів попереднього опитування споживачів шляхом google-анкетування, розроблено лінійку ескізів моделей чоловічого взуття з елементами конструктивних змін і колірних акцентів (рис. 1), згідно яких розроблено лінійку ескізів, 3D моделі асортиментного ряду колекції повсякденного чоловічого взуття та спроектовано конструкції виробів для виготовлення дослідних зразків.

На основі 3D моделей та виготовлених зразків взуття на виробництві «Прайм Шуз», м. Бровари проведено маркетингові польові дослідження [16] в мережі магазинів роздрібної торгівлі м. Києва і м. Бровари методом анкетування для прогнозування високого попиту на розроблені моделі взуття і можливості їх реалізації [18, 19].



Рис. 1. Ескізи моделей чоловічого взуття

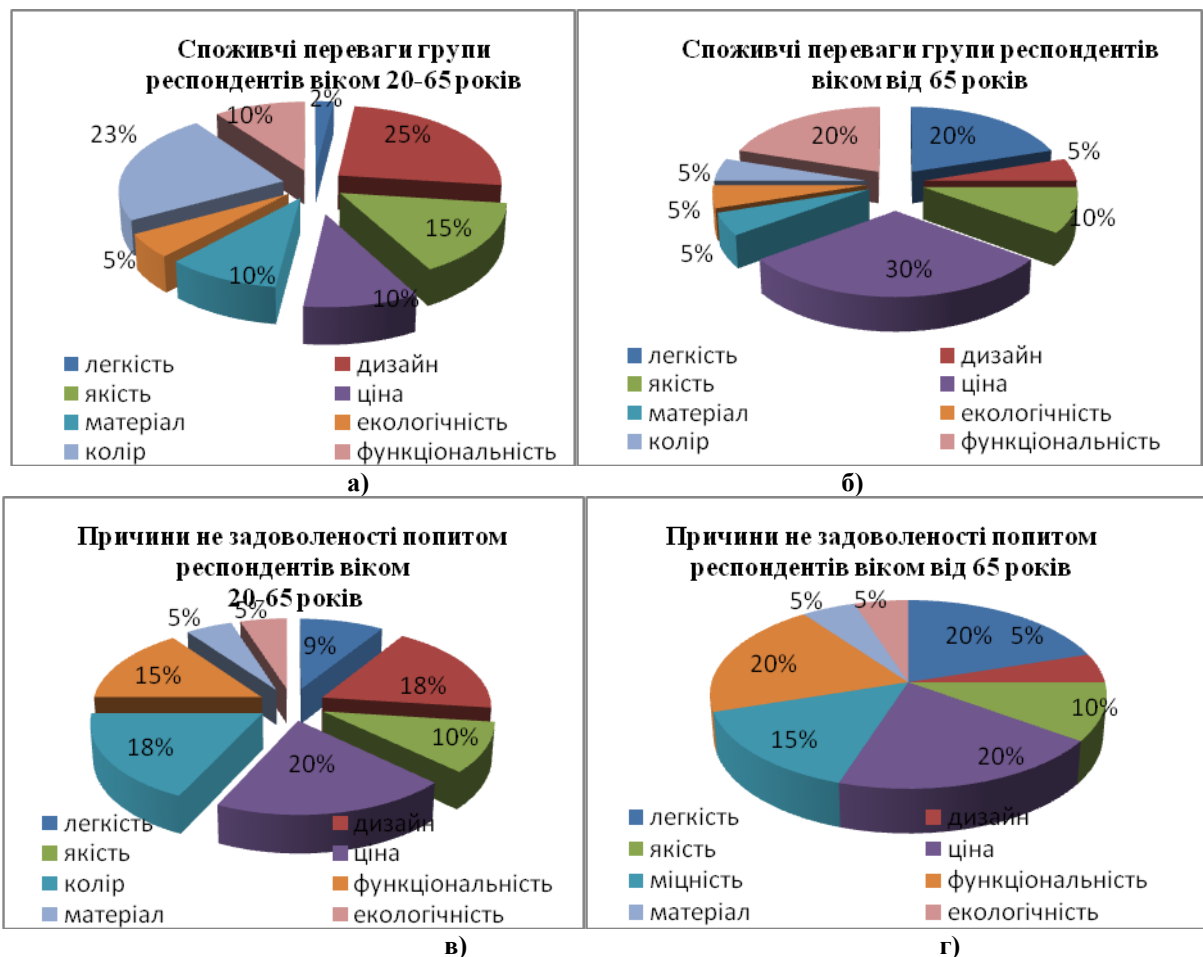


Рис. 2. Результати опитування респондентів при виборі жіночих аксесуарів за критеріями вагомості  
а, в – споживчі переваги респондентів різних вікових груп;  
б, г – причини не задоволеного попиту респондентів різних вікових груп

Анкета складалась з однакових для усіх респондентів критеріїв. Споживчі переваги і причини не задоволеності попитом визначались респондентами у відсотках. Результати дослідження оброблені математично з похибкою 4%. Всього було опитано 380 осіб, з них у м. Київ та у м. Бровари постійно проживає 78%, у передмісті та інших містах України – 22%. За отриманими даними, найбільша група

опитаних споживачів – це чоловіки віком від 20 до 65 років – 70% та чоловіки старшого покоління віком від 65 років – 30%. Жінки, що самостійно купують взуття для чоловіків участі в опитуванні не брали. Серед питань анкети було враховано: середній загальний дохід на одного члена сім'ї становить 6000 грн; освіта респондента (з вищою освітою – 50%, не закінчена вища – 12%, середньо-спеціальна освіта – 25%, середня освіта – 13%); рід занять респондентів (держслужбовці – 14 %, офісні працівники – 25%, студенти – 27%, робочі спеціалісти – 25%, безробітні – 9%); місце покупки взуття ( ринок, торговельна мережа, інтернет магазин); ціна покупки (500-3000); матеріал (натуральна шкіра, штучні матеріали, текстиль, не суттєво); вид і конструкція взуття (напівчеревики, кросівки, черевики тощо); споживчі переваги (легкість, комфорт, дизайн, колір, ціна, якість); причини не задоволеного попиту (розмір, колір, конструкція, вага, ціна тощо) .

Результати опитування респондентів при виборі взуття за критеріями вагомості споживчого вибору представлені на діаграмах (рис. 2 а, б) та критеріями не задоволеності попитом представлені на діаграмах (рис. 2 в, г).

За результатами аналізу вибірки даних експериментальних досліджень виявлено, що до частих змін моди прислухається більше молодь і люди середнього віку, тому для цих виробів креативна колористика і елементи сучасного конструктивізму є цікавими. Людям старшого покоління важлива функціональність, вага виробу, міцність і низька ціна, тому питання моди, кольору і форми з позиції естетики не є актуальними.

Орієнтуючись на сучасного споживача при розробці моделей взуття необхідно враховувати функціональну виразність форми, колір і відтінок, матеріал і фактуру, стилєву спрямованість, гармонійну цілісність композиційної структури і досконалість та якість виконання операцій по виготовленню виробу.

Отже, підсумовуючи сказане хочеться зазначити, що використання сміливої палітри кольорів і принципів формоутворення має фундаментальне значення у створенні сучасного асортименту взуття [2–4], а суто колористика і конструктивізм, як явище, існує і як частина художньої складової моделі виробу [6], і як одна з ланок творчого процесу виробництва виробів [7, 12, 13].

Узагальнення ідей модельєра-дизайнера і впровадження їх у виробництво з чітко зазначеним кольором моделі, переліком деталей і вузлів на робочих кресленнях, викликано виробничою необхідністю, орієнтуючись суто на показники якості, естетики, ергономіки і економічної привабливості [8, 17, 18]. Для виготовлення взуття за індивідуальним замовленням практично не має меж для втілення в «життя» сміливих ідей замовника, тому яскраві кольори, цікаві матеріали і форми деталей конструкції виробу є актуальними з точки зору споживача і є на часі.

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

В сучасних умовах господарювання виробництво може бути прогресивним за умов активної та своєчасної реакції на потреби ринку, а саме: активна робота маркетингового відділу підприємства по дослідженню і вивченню думок споживачів та потреб ринку, швидка адаптація підприємства до потреб ринку, випуск взуття не великими партіями з частою зміною асортименту, професійна і своєчасна реклама - все це етапи успішної роботи підприємства. Маємо працювати за принципом «виготовляти тільки те, що потрібно, тоді, коли потрібно, і стільки, скільки потрібно». При такій умові підприємство буде мати постійних покупців і шанувальників продукції конкретної торгової марки. Досягти позитивного результату згідно таких умов можливо при перегляді сегменту матеріалів, видозміні конструкцій виробів і наданні їм технологічності, а також зменшенні кількісної складової відходів виробництва шляхом оновлення конструктиву, використання сучасних матеріалів (наприклад, натуральна шкіра Крест), технологій покривного фарбування та фінішного оздоблення матеріалів і готових виробів [11].

В даній роботі висвітлено і обґрунтовано результати маркетингових досліджень по визначенню критеріїв вагомості споживчих переваг і причин не задоволеності попиту споживачів за показниками, завдяки чому сформовано асортимент чоловічого взуття з урахуванням результатів дослідження.

Досліджено експериментально чинники впливу на формування асортименту чоловічого взуття. Наведено результати маркетингових досліджень щодо можливості використання сміливих конструктивних ідей і колористичних рішень у взутті чоловічого асортименту.

Розроблено лінійку ескізів та 3D моделей чоловічого взуття різних конструкцій з використанням сучасних конструктивних і колористичних рішень, що включає оцінку експертів щодо актуальності його використання при формуванні асортименту і виробництві виробів.

Виготовлено і протестовано зразки взуття. Спрогнозовано використання класичних і сучасних не стандартних технік акцентного нанесення кольору на готовий виріб для виробництва взуття даного сегменту, підвищення технологічності моделі за рахунок вдалив форм деталей заготовки, якості виробів в цілому і збільшення попиту на взуття креативних українських дизайнерів.

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

### **Література**

1. Історія взуття: від давнини до наших днів. URL: <https://www.poznavayka.org/uk/nauka-i-svit/istoriya-vzuttia-vid-davnini-do-nashih-dniv/>
2. Івасенко М. В., Гврітішвілі А. В., Савіна М. І., Гаркава Т. С., Колле С. М. Адаптація fashion-індустрії до глобальних світових процесів. Індустрія моди. Fashion Industry : науково-виробничий журнал. 2020, № 3. С. 36-40.

3. Семенова В. В. Ломакина Н.А. История формообразования обуви и кожгалантерейных изделий. Дизайн. Материалы. Технология. СПб : СПГУТД. 2008, № 4(7). С. 69–75.
4. Чуприна Н. В. Постушна Ю.О. Трансформація форми, структури та колориту традиційного вбрання народів Скандинавії з метою розробки колекції актуального одягу. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки. 2017, № 6. С. 206–214.
5. Сайт державного комітету статистики України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення 18.04.21)
6. Бастов Г. А. Художественное проектирование базовой формы обуви и изделий из кожи в условиях унификации и стандартизации конструктивных элементов : учебное пособие. М. : МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2012. 32 с.
7. Михайловська О. А., Домбровський А.Б. Художньо-конструктивні ознаки та параметри формотворення модульного взуття. Легка промисловість. Індустрія моди. 2018, № 2. С. 48–52.
8. Магомедов Ш. П. Определение показателей конкурентоспособности товаров. СТК. 2000, № 9. С. 78–79.
9. Обзор рынка. Вітчизняне взуття. Мій бізнес. URL: <https://msb.aval.ua/ru/news/?id=24843>
10. Українські еко-бренди. URL: <https://shotam.info/top-10-ukrains-ki-eko-brendy-iaki-pikluiut-sia-pro-dovkillia/>
11. Lipskyi T., Pervaia N., Okhmat O., Mokrousova O., Babych A. Assessment of performance using compositions in crust leather decoration. Eastern-European journal of enterprise technologies ISSN 1729-3774, Том 6, № 1/6 (109) 2021, 57–63 (2021); DOI: 10.15587/1729-4061.2021.224226
12. Гаркавенко С.С., Бабич А.І., Охмат О.А., Липський Т.М. Дослідження показників якості композицій для оздоблювання шкіряного напівфабрикату Краст. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2020. № 5. С. 117–126.
13. Бабич А. І., Мирошниченко І. М. Вплив факторів споживчого вибору на формування спектру послуг з ремонту взуття. Технології та дизайн. 2018. № 3, 8 с.
14. Leshchyshyn M.M., Garkavenko S.S., Babich, A.I. ICAMS Proceedings of the International Conference on Advanced Materials and Systems, 2020, P. 83–88. URL: [http://icams.ro/icamsresurse/2020/files/VOLUM\\_ICAMS\\_2020\\_FINAL.pdf](http://icams.ro/icamsresurse/2020/files/VOLUM_ICAMS_2020_FINAL.pdf)
15. ДСТУ ISO 5404:2007. Шкіра. Фізико-механічні випробування.
16. ДСТУ EN ISO 20344: 2009. Взуття. Метод випробування взуття на дослідне носіння.
17. Засоби індивідуального захисту. Взуття побутового призначення. Технічні умови (EN ISO 20345:2004/AS:2007/A1:2007, IDT) : ДСТУ EN ISO 20345:2009. – [Чинний від 2012-01-01] – К. : Держспоживстандарт України, 2012. – 11 с. – (Національний стандарт України).
18. Макквейр Э. Методы маркетингового исследования. М. : Око, 2014. 176 с.
19. Грабовецький Б.Є. Методи експертних оцінок: теорія, методологія, напрямки використання : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2010. 171 с.

#### References

1. Istoriia vzuttia: vid davnykh dniv. URL: <https://www.poznavayka.org/uk/nauka-i-svit/istoriya-vzuttia-vid-davnini-do-nashih-dniv/>
2. Ivasenko M. V., Hvritishvili A. V., Savina M. I., Harkava T. S., Kollie S. M. Adaptatsiia fashion-industrii do hlobalnykh svitovykh protsesiv. Industriia mody. Fashion Industry : naukovo-vyrobnychyi zhurnal. 2020, № 3. S. 36–40.
3. Semenova V. V. Lomakina N.A. Istoriya formoobrazovaniya obuvi i kozhgalantereynykh izdelij. Dizajn. Materialy. Tehnologiya. SPb : SPGUTD. 2008, № 4(7). S. 69–75.
4. Chuprina N. V. Postushna Yu.O. Transformatsiia formy, struktury ta kolorytu tradytsiinoho vbrannia narodiv Skandynavii z metoiu rozrobky koleksii aktualnogo odiahu. Visnyk Kyivskoho natsionalnogo universytetu tekhnologii ta dyzainu. Seriya: Tekhnichni nauky. 2017, № 6. S. 206–214.
5. Sait derzhavnoho komitetu statystyky Ukrainy. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua> (data zvernennia 18.04.21)
6. Bastov G. A. Hudozhestvennoe proektirovanie bazovoy formy obuvi i izdelij iz kozhi v usloviyah unifikatsii i standartizatsii konstruktivnykh elementov : uchebnoe posobie. M. : MG TU im. A.N. Kosygina, 2012. 32 s.
7. Mykhailovska O. A., Dombrovskiy A.B. Khudozhno-konstruktivni oznaky ta parametry formotvorennia modulnogo vzuttia. Lehka promyslovist. Industriia mody. 2018, № 2. S. 48–52.
8. Mahomedov Sh. P. Opredelenie pokazatelei konkurentosposobnosti tovarov. STK. 2000, № 9. S. 78–79.
9. Ohliad rynku. Vitchyzniane vzuttia. Mii biznes. URL: <https://msb.aval.ua/ru/news/?id=24843>
10. Ukrainski eko-brendy. URL: <https://shotam.info/top-10-ukrains-ki-eko-brendy-iaki-pikluiut-sia-pro-dovkillia/>
11. Lipskyi T., Pervaia N., Okhmat O., Mokrousova O., Babych A. Assessment of performance using compositions in crust leather decoration. Eastern-European journal of enterprise technologies ISSN 1729-3774, Tom 6, № 1/6 (109) 2021, 57–63 (2021); DOI: 10.15587/1729-4061.2021.224226
12. Harkavenko S.S., Babych A.I., Okhmat O.A., Lypskyi T.M. Doslidzhennia pokaznykiv yakosti kompozitsii dlia ozdoblivannia shkirianoho napivfabrykatu Krast. Herald Khmelnytskyi National University. Tekhnichni nauky. 2020. № 5. S. 117–126.
13. Babych A. I., Myroshnychenko I. M. Vplyv faktoriv spozhyvchoho vyboru na formuvannia spektru posluh z remontu vzuttia. Tekhnologii ta dyzain. 2018. № 3, 8 s.
14. Leshchyshyn M.M., Garkavenko S.S., Babich, A.I. ICAMS Proceedings of the International Conference on Advanced Materials and Systems, 2020, P. 83–88. URL: [http://icams.ro/icamsresurse/2020/files/VOLUM\\_ICAMS\\_2020\\_FINAL.pdf](http://icams.ro/icamsresurse/2020/files/VOLUM_ICAMS_2020_FINAL.pdf)
15. DSTU ISO 5404:2007. Shkira. Fyzyko-mekhanichni vyprobuvannia.
16. DSTU EN ISO 20344: 2009. Vzuttia. Metod vyprobuvannia vzuttia na doslidne nosinnia.
17. Zasoby individualnogo zakhystu. Vzuttia pobutovoho pryznachennia. Tekhnichni umovy (EN ISO 20345:2004/AS:2007/A1:2007, IDT) : DSTU EN ISO 20345:2009. – [Chynnyi vid 2012-01-01] – K. : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2012. – 11 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy).
18. Makkvayr E. Metody marketingovogo issledovaniya. M. : Oco, 2014. 176 s.
19. Hrabovetskyi B.I.e. Metody ekspertnykh otsinok: teoriia, metodolohiia, napriamky vykorystannia : monohrafiia. Vinnytsia : VNTU, 2010. 171 s.

Надійшла/Paper received : 10.08.2022 p. Надрукована/Printed : 01.11.2022 p.

КАМІНСЬКИЙ Роман

Національний університет "Львівська політехніка"

ORCID ID: [0000-0002-0563-5748](https://orcid.org/0000-0002-0563-5748)e-mail: [kaminsky.roman@gmail.com](mailto:kaminsky.roman@gmail.com)

ШАХОВСЬКА Наталія

Національний університет "Львівська політехніка"

ORCID ID: [0000-0002-6875-8534](https://orcid.org/0000-0002-6875-8534)e-mail: [natalya233@gmail.com](mailto:natalya233@gmail.com)

ХУДОБА Богдан

Національний університет "Львівська політехніка"

ORCID ID: [0000-0001-5983-1042](https://orcid.org/0000-0001-5983-1042)e-mail: [bohdan.khudoba@gmail.com](mailto:bohdan.khudoba@gmail.com)

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ГРУПУВАННЯ ОПЕРАТОРСЬКОГО ПЕРСОНАЛУ ПОШУКОВИХ СИСТЕМ В СЕНСІ СТРЕСОСТІЙКОСТІ

Основною метою даного дослідження є розроблення методології організації експериментального відбору операторського персоналу на основі дослідження його поведінки від впливу мікростресів. Розроблено модель людино-машинного інтерфейсу, яка враховує зміну функціонального стану людини-оператора.

Ключові слова: операторська діяльність, часові ряди, стресостійкість.

KAMINSKY Roman, SHAKHOVSKA Nataliya, KHUDOBA Bohdan

Lviv Polytechnic National University

## EXPERIMENTAL RESEARCH AND GROUPING OF OPERATING STAFF OF SEARCH SYSTEMS IN THE SENSE OF STRESS RESISTANCE

In modern information and search automated systems, the main role is played by the human-machine interface for decision-making based on the detection of objects of a given class in the information field. The human operator, as an element of such an interface, carefully reviews the provided information on the information field - the monitor screen, analyzing images of scenes, for example, pictures of territories, economic tables, abstract data, etc. Based on the received results of the analysis, the operator forms or chooses from a set of alternatives the appropriate decision, for which he mostly bears some responsibility. Such, let's call them primary solutions, can be both final and the basis for further functions of this search engine. However, among the factors that in one way or another can negatively affect the quality of work of this interface, one of the first places is stress in the form of a collection of micro stresses. The main goal of this study is to develop a methodology for the organization of experimental selection of operator personnel based on the study of their behavior under the influence of micro-stresses. A human-machine interface model has been developed, which takes into account the change in the functional state of the human operator. The presented concept of the difficulty of detecting the object of attention contributed to the development of a special sequence of ordinary test images with stressor images included in it, and presented models of the flow of presenting test images to the recipient. With the help of descriptive statistics, the parameters of individual boxplot diagrams were determined and the recipient group was clustered. Overall, the proposed approach based on the example of the conducted grouping makes it possible to ensure the objectivity and efficiency of the professional selection of applicants for operator specialties. The developed methodology is of practical importance and can be used in systems of training, certification and professional selection of operator personnel.

Keywords: operator activity, time series, stress resistance.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

У сучасних інформаційно-пошукових автоматизованих системах основну роль відіграє людино-машинний інтерфейс прийняття рішень на основі виявлення на інформаційному полі виявлення об'єктів заданого класу. Людина-оператор як елемент такого інтерфейсу уважно переглядає на інформаційному полі – екрані монітору – надану інформацію, аналізуючи зображення сцен, наприклад, знімки територій, економічні таблиці, реферативні дані тощо. На основі отриманих результатів аналізу оператор формує або вибирає з множини альтернатив відповідне рішення, за яке, переважно несе певну відповідальність. Такі, назвемо їх первинними рішеннями можуть бути як остаточними, так і бути основою для подальших функцій даної пошукової систем. Однак, серед чинників, що в той чи інший спосіб можуть негативно впливати на якість роботи цього інтерфейсу, одне з перших місць займає стрес у вигляді сукупності мікро стресів.

Зміст роботи операторського персоналу такого інтерфейсу, що уособлює собою пару людина-комп'ютер, полягає в тому, що людина-оператор протягом робочого часу переглядає послідовність зображень сцен реальної робочої ситуації, на моніторі та має виявити на них об'єкти уваги заданого класу. Виявлення цих об'єктів та визначення їх координат стосовно зображення є основною його задачею. Послідовність цих зображень є єдиним інформаційним джерелом даних для нього. На основі результату – визначених координат положення виявленого об'єкта – оператор приймає відповідне рішення. В процесі спостереження за розвитком реальної робочої ситуації оператор несе певну відповідальність за виявлення об'єкта, оскільки не виявлення або несвоєчасне його виявлення може призвести до вельми негативних наслідків.

За певної складності наданих зображень та їх великої кількості і різноманітності функціональний стан людини стає нервово напруженим, близьким до стресу і в більшості випадків цей стан і є мікростресом.



Мікростреси поодиночки можуть бути невідчутні для людини, але в сукупності їх ефект може бути досить помітним.

Одним з таких джерел мікро стресу в галузі інформаційно-пошукових може бути різка зміна інформаційного потоку, зумовлена відсутністю негайно потрібної додаткової інформації або значного маскуванню шуканого об'єкта.

Відповідальність людини-оператора щодо опрацювання наданих зображень реальних ситуацій, досить часто організованих у послідовність і прив'язаних до моментів біжучого часу створює небажаний чинник дефіциту часу. Тому, основною вимогою до оператора є – «виявити на цих зображеннях об'єкт заданого класу за мінімальний час і з максимальною вірогідністю». Тому методи відбору та навчання операторського у своїй практичній, тобто експериментальній, частині мають забезпечити визначення здатності оператора в сенсі стресостійкості. Дійсно, створити такі умови експерименту, які б викликали у людини значний стрес є недопустимим, як з біологічної, так і юридичної (кримінальної) точок зору, хоча є описані експерименти, в яких для створення стресу використовували несильний удар електричним струмом. Очевидно, що такі експерименти проводять в спеціалізованих закладах, і вони, швидше за все, є забороненими.

Метою даного експериментального дослідження є розробка методики організації експериментів з відбору претендентів на операторські посади в інформаційно-пошукових та аналогічних системах опрацювання зображень сцен реальних робочих ситуацій.

### Аналіз досліджень та публікацій

Вплив на реакцію людини-оператора дефіциту або надлишку наданої інформації при прийнятті відповідальних рішень досліджується в [1]. Модель перебування та виходу зі стресу людини оператора розглянуто в роботі [2], а також тут пояснене настання нервово-психічного перенапруження. Теоретичні основи психодіагностики стресу та методики, що стосуються психологічної діагностичної процедури, етики та етапи психологічного та діагностичного обстеження приведені в [3]. Різні аспекти впливу на формування надійності операторської діяльності, включаючи робоче середовище, функціональний стан оператора та напруженість праці приведено в [4]. В статті [5] обговорюються особливості комп'ютерного тренінгу операторів безперервних технологічних процесів у порівнянні з іншими предметними галузями. Можливість автоматизації вимірювання властивостей уваги людини-оператора за допомогою таблиць Шульте підтверджена в [6]. В [7] розглянуто статистичні методи аналізу результатів тестування, а також представлено найпростіші та необхідні процедури статистичної обробки результатів тестування знань і методи оцінки якості тесту. Дослідженням, проведеним в [8], узагальнено структуру стрес-тесту та проаналізовано методи генерації шоківих сценаріїв. Метою статті [9] є дослідження організаційних аспектів проведення стрес-тестування, визначення місця та функцій наглядового органу в процесі проведення стрес-тестування. Методи кількісної та інтегральної оцінки стресу персоналу у процесі перевірки знань під час атестації проаналізовано в [11]. В роботі [12] запропоновано три стратегії розробки систем виявлення, які базуються на принципі збалансованості для цілеспрямованого вдосконалення та проектування систем виявлення. Як показано в [13], автоматизація процесу контролю знань, розробка комп'ютерних систем тестування є актуальними завданнями.

В праці [14] виконано аналіз нових інформаційних та комп'ютерно-тренажерних технологій розробки та використання існуючих інтерактивних навчально-тренувальних комплексів стрілецької зброї. У статті [15] розглянуто проблеми впровадження тестування з використанням засобів інформаційно-комунікаційних технологій. Проведено системний аналіз організаційних проблем розробки і застосування технологій комп'ютерного тестування у вищій школі для контролю знань студентів.

В статті [16] обґрунтовані основні теоретичні засади і практичні аспекти застосування психофізіологічного тестування для визначення рівня професійної придатності операторів поліграфа. Опис отриманих даних у вигляді діаграми розмаху – боксплот подано в [17] і показав, що для стислого опису вибірки даних достатньо лише п'ять чисел, а саме значень: медіани, першого і третього кuartилів та мінімального і максимального значень.

Використання діаграми боксплот, як приведено в [18] дає важливу інформацію за рахунок використання першого, другого і третього кuartилів, а також міжкuartильного діапазону і викидів в наборі даних. Авторами У.Т. Уиллиамсом і Дж.Н. Лансом розроблено і запропоновано теорію і приклад методу ієрархічного кластерного аналізу.

Аналіз літературних джерел стосовно стресу показав практично повну відсутність експериментальних досліджень стресових станів людини в процесі його роботи. В основному дослідження проводились вже після того, як реципієнт завершив роботу. Зіставляючи процес роботи і психофізіологічні показники дослідники роблять висновки щодо існування стресового стану людини та проводять аналіз результатів впливу на неї існуючих подразників – стресорів, вже після завершення нею роботи.

### Загальна модель пошукової операторської діяльності

Однією з великої кількості різноманітних задач операторської діяльності в комп'ютеризованих робочих місцях є задача пошуку об'єктів заданого класу на зображеннях наданих на моніторі та прийняття відповідних рішень при їх виявленні. При цьому людина і комп'ютер функціонують як цілісна система в існуючому робочому середовищі. З точки зору загальної математичної теорії систем її описову модель можна подати так.

Нехай  $P(t)$  – деякий технологічний процес, яким керує людина-оператор протягом часу  $[0, T_0]$

де час  $T_0 = \{t_i: t_1 < t_2 < \dots < t_N \mid i \in T\}$ , а  $T$  – біжучий час. Суть його керування зводиться до функцій вирішення оператором конкретних задач, наприклад, виявивши деякий об'єкта на пред'явленому зображенні сцени прийняти відповідне рішення. Прикладом таких процесів є: пошук об'єктів уваги заданого класу на зображенні контрольованої території, в послідовності зображень сцен, усунення відхилень в параметрах керованого процесу, пошук потрібних даних в базах документів, редагування текстів і т.п., представлених своїм виглядом на моніторі.

Зміна інформації про процес  $P(t)$  відбувається на екрані монітору в моменти  $t_i \in T_0$ . Оператор шляхом концентрації уваги та візуального аналізу наданої множини зображень  $X = \{x_i: x_1, x_2, \dots, x_N \mid i \in N\}$ , використовуючи свої навички, досвід і знання намагається виявити на цих зображеннях потрібний об'єкт уваги. В результаті пошуку і виявлення такого об'єкта він далі вибирає, враховуючи можливі наслідки від прийнятого рішення, приймає відповідне рішення з множини рішень  $Y = \{y_j: y_1, y_2, \dots, y_M \mid j \in M\}$ , реалізуючи його з допомогою пульта управління. Зображення ситуацій на моніторі містять усю інформацію про стан спостережуваного за допомогою монітора і очевидно відповідних технічних засобів керованого процесу  $P(t)$ .

В процесі своєї діяльності оператор може перебувати в різних функціональних станах  $C = C(c_i)$ , а саме, в психофізіологічних станах від нормального до нервово-перенапруженого. Ці стани можуть бути зумовлені, як впливом зовнішнього середовища, так і наданою інформацією, особливо за складної ситуації, в якій може знаходитися керований процес. Іншими словами, за відсутності впливу з боку робочого середовища, функціональний стан оператора є функцією наданого зображення ситуації, що виникла в процесі  $P(t)$ , тобто є функцією  $C = C(x_i)$ .

Саме ця функція відображає в моделі людину оператора і використана для дослідження діяльності оператора в його перебуванні в стані мікро стресу.

В основі даного процесу лежить поняття системи, тобто ланка: «процес  $\rightarrow$  монітор  $\rightarrow$  оператор  $\rightarrow$  комп'ютер  $\rightarrow$  рішення», які в цілому, складають разом, систему  $S$ . В теоретико-множинних термінах на цьому рівні система  $S$  може бути просто і цілком природно, визначена як добуток

$$S \subset X \times Y.$$

В сенсі розвитку моделі цього плану множини  $X$  і  $Y$  різняться між собою положенням на осі часу, тобто вони є підпорядковані моментам часу їх реалізації. Елементи  $x \in X$  є залежними від часу величинами  $X = \{x: x_i \equiv x(t_i), t_i \in T, i = \overline{1, N}\}$ , проте елементи множини рішень  $Y = \{y: y_j \equiv y(t_j), t_j \in T, j = \overline{1, M}\}$  завжди запізнюються на час  $\Delta t_i$ , який відповідає сумарній тривалості пошуку, виявлення, аналізу, вибору та прийняття рішення до моменту його реалізації відповідною командою, тобто  $t_j = t_i + \Delta t_i$ .

Середній час цієї затримки може бути використаний в якості оцінки оперативності конкретного оператора протягом його зміни. Варта зауважити, що коли оператор тривалий час – тижні і місяці виконує подібні завдання така зміна показника оперативності може слугувати додатком до діагностики його функціонального стану на даний момент. Іншими словами, при зростанні цього часу від умовної індивідуальної «норми» можна діагностувати його здоров'я.

Оскільки людино-машинний інтерфейс є динамічною системою, то є сенс розглянути поведінку оператора в залежності від вхідної інформації. В цьому загальному плані мова йде про його реакцію на виявлений об'єкт, точніше оперативність виявлення об'єкта та прийняття рішення. Для встановлення взаємозв'язку між входом і виходом системи, які відносяться до різних моментів часу, в загальній математичній теорії систем вводяться поняття реакції системи на вхідний подразник. Іншими словами, для кожної робочої ситуації, тобто для кожного зображення на екрані для оператора, який перебуває в нормальному функціональному стані, існує два таких відображення:

- прийняття рішення

$$\bar{\rho} = \{\rho_t: C_t \times X_t \rightarrow Y_t \text{ \& } t \in T\}$$

i - переходу в інший стан

$$\bar{\varphi} = \{\varphi_{tt'}: C_t \times X_{tt'} \rightarrow C_{t'} \text{ \& } t, t' \in T \text{ \& } t' > t\}.$$

Ці відображення можна пояснити так. Перебуваючи в момент часу  $t \in T$  в стані  $C_t$  оператор сприймає зображення  $x_t \in X$  і виявляє на ньому потрібний об'єкт, аналізує ситуацію і приймає рішення  $y_t \in Y$ , витрачаючи на це нормально потрібний час, не змінюючи при цьому свій функціональний стан



(відсутня будь-яка нервово-психічна напруженість).

Якщо, надане зображення виявляється таким, що відразу знайти шуканий об'єкт не вдається, а на пошук ліміт часу обмежений, оператор може перейти з нормального стану в нервово-напружений, продовжуючи пошук об'єкта. Якщо припустити, що в момент  $t \in T$  оператор не виявив об'єкт і відчуває, що час експозиції закінчується він усвідомлює усю складності ситуації, і в цей момент він може отримати шок. Цей шок можна інтерпретувати як стрес або мікро стрес. Подвійний часовий індекс означає інтервал часу  $t' > t$ , за який оператор перейшов з нормального у нервово-психічний стан.

В загальному, модель людино-машинного інтерфейсу як такої інформаційно-пошукової системи, можна подати кортежем

$$S = \langle X, Y, C, \rho, \varphi, T \rangle.$$

Використання математичного апарату теорії множин надає можливість оптимізувати організацію досліджень, оскільки в кількісному плані подані множини, відображення яких розглядаються функціонально і всі вони розглядаються в часі. Крім того, виходячи з такої моделі можна створити достатню кількість зображень, які імітують сцени практично будь-якої реальної операторської діяльності.

#### Відбір зображень-тестів

Нехай дослідженню підлягає група операторів, а метою дослідження є визначення індивідуальної стресостійкості. Підготовку та проведення експерименту здійснено так.

**1. Створення базової послідовності зображень тестів.** На цьому етапі формують створюють зображення-тести і формують їх у послідовність. Зображення в даній послідовності імітують тло робочої сцени, на яке дослідник в ручну або за допомогою випадкових чисел визначають координати місць, в яких будуть локалізовані об'єкти. Розміщення об'єкта на одних зображеннях має бути досить легким для виявлення, а на інших складним, тобто прихованим, але так щоб його можна було знайти. Важливим моментом тут є те, що усі деталі об'єкта не були закриті, тобто об'єкт має виглядати цілим.

Після розміщення об'єктів, отримані зображення-тести, тепер вони мають такий статус, формують у послідовність сцен, переважно випадковим чином. Цю послідовність демонструють кожному з групи реципієнтів, фіксуючи час опрацювання кожного з зображень кожним реципієнтом. На цьому етапі визначають тривалість експерименту, кількість зображень-тестів в послідовності з чого визначають час експозиції зображень.

Тривалість такого експерименту можна визначити в залежності від контингенту реципієнтів, наприклад для професійних операторів це тривалість зміни або її частини (друга половина), а для молодих людей – тривалість однієї або двох академічних годин. В залежності від складності зображень сцен експозиція зображення-тесту до однієї – двох хвилин.

У проведених авторами експериментах послідовність включала 180 зображень-тестів з експозицією кожного з них 30 сек.

**2. Визначення пошукової складності зображень-тестів.** Сформовану в такий спосіб послідовність включають в процес профвідбору чи навчання групи реципієнтів. попередньо перед ними поставлена і пояснена задача, за можливості здійснено імітацію реального робочого місця і середовища. За командою «пуск» на екрані монітору з'являються зображення-тести, оператор виявивши заданий об'єкт натискає відповідну клавішу. В момент появи зображення-тесту включається секундомір, а в момент натискання клавіші оператор його зупиняє. В результаті комп'ютер фіксує час опрацювання даного зображення оператором і обнулює секундомір.



Рис. 1. Час пошуку об'єктів в базовій послідовності

Усі претенденти працюють з однією і тією ж послідовністю. В результаті, для кожного зображення-тесту буде отримана вибірка значень часу витрачених на них кожним оператором (реципієнтом). Середнє значення часу, витраченого ними на опрацювання конкретного тесту, є фактично часовим показником їх пошукової складності. Оскільки ці часові показники є кількісними величинами, для них можна ввести відповідну шкалу пошукової складності для зображень-тестів лише цієї послідовності і даної групи реципієнтів. Таким чином, кожне зображення буде характеризуватися своїм показником. На рис. 1 зображено діаграму часів пошуку об'єкта уваги на деякій підмножині зображень-тестів.

**3. Формування послідовності стресових подій.** Якщо припустити, що оператор якийсь час опрацює зображення досить малої складності, виявлення об'єкта дається легко і він пристосувався (звик) до такого режиму подання зображень-тестів. Якщо ж раптом з'явиться зображення високої складності і відразу виявити об'єкт не вдалося він буде змушений активізувати і сконцентрувати увагу на пошуку, що в режимі дефіциту часу, наприклад обмеження експозиції в 20 секунд, спричинить (хоча, може, і ні) йому мікро стресову ситуацію. В цьому плані представляє інтерес формування такої послідовності, яка буде складатися з зображень-тестів низької складності і в неї включені кілька зображень високої складності.

Отже, після того, як визначено пошукову складність зображень базової послідовності, відбирають зображення з найменшою пошуковою складністю, наприклад, зображення-тести, час пошуку яких є найменшим – менше 2 секунд і час для яких є найбільшим – більше 18 секунд. Далі з зображень, що мають мінімальну складність, (їх можна повторювати, але не один за одним) укладають нову базову послідовність. В цю нову послідовність включають, дотримуючись принципу рідкісних подій, зображення-тести, пошукова складність яких перевищує 18 секунд. Очевидно, що усі зображення цієї послідовності мають бути розташовані випадковим чином. Вигляд фрагмента такої послідовності зображено на рис. 2. Значення тривалостей такого мікро стресу можна подати відповідною математичною моделлю загального стресу.

### Варіанти подання тестових зображень

В загальному, організацію експериментального досліджень можна подати так.

Нехай людині-оператору на екрані монітору експонується послідовність зображень-тестів з об'єктами уваги заданого класу і, які оператор має виявити та реалізувати відповідне рішення. Моменти часу їхньої експозиції та прийнятих оператором рішень фіксуються, а їхні значення включаються в протокол дослідження.

Основним моментом тут є спосіб експозиції зображень-тестів. Отже, для організації експериментальних досліджень спосіб надання зображень-тестів операторові на моніторі можна вказати такі три варіанти. Кожен з них включає по два потоки прямокутних імпульсів, синхронізованих в часі по фронту імпульсів.

У першому варіанті на рис. 3 верхня послідовність відповідає регулярному потоку зображень-тестів, що позначено світлими прямокутними імпульсами однакової тривалості і амплітуди. Тут експозиція тестів здійснюється через однакові інтервали часу, тобто зображення ситуацій подаються регулярно послідовністю.

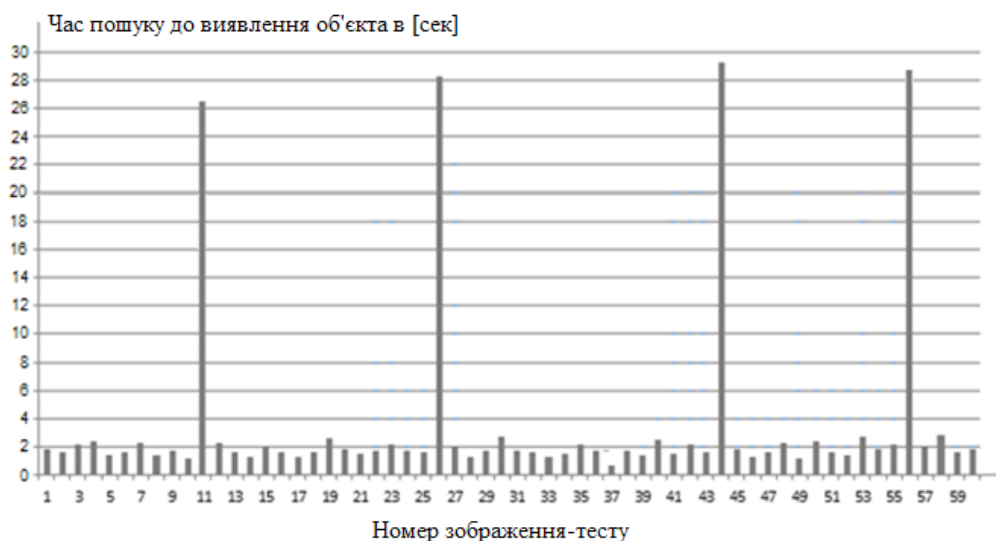


Рис. 2. Вигляд експериментальної послідовності

Нижня послідовність темних імпульсів відповідає тривалості пошуку об'єкта уваги, його виявлення як саме шуканого об'єкта та прийняття рішення. Іншими словами, ця послідовність відображає результати діяльності людини-оператора, тобто кожному зрізу імпульсу цього потоку відповідає реакція-результат як момент прийняття рішення оператором. Якщо оператор не знайшов на зображенні шуканий об'єкт, то в нижній послідовності темний імпульс буде відсутній. В такому графічному поданні верхні і нижні імпульси

синхронізовані по фронту, тобто в момент появи зображення-тесту включається секундомір, який автоматично виключається в момент прийняття рішення оператором.

У другому варіанті, зображеному на рис. 4 експозиція зображень-тестів є нерегулярною і має різну тривалість, проте фронти імпульсів верхньої і нижньої послідовностей також синхронізовані. В загальному випадку при використанні нерегулярного потоку тривалість паузи між верхніми імпульсами може бути різною. Крім того можливий варіант, коли тривалість імпульсів верхньої і нижньої послідовностей є однакові, а тривалості пауз можуть бути різними. Це означає те, що після прийняття оператором рішення зображення-тест зникає, і в наступний момент часу появляється наступне.

У третьому варіанті, зображеному на рис. 5, експозиція зображення триває до моменту прийняття рішення, після чого на екран подається наступне зображення. Останній варіант сильно скорочує тривалість дослідження за обмеженої бази зображень, оскільки тривалість експозиції рівна тривалості пошуку. В певному сенсі, цей варіант має позитивне значення, особливо для лабораторного дослідження, оскільки за один і той самий термін експерименту дозволяє опрацювати більше зображень-тестів.

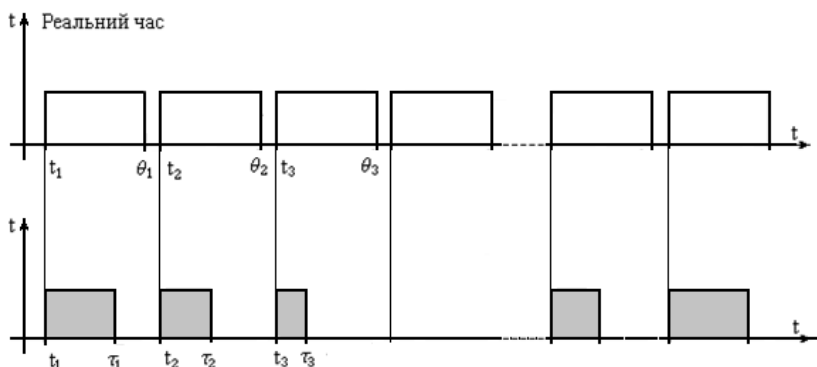


Рис. 3. Регулярний потік зображень тестів. Тут  $t_1, t_2, \dots$  – момент початку, а  $\theta_1, \theta_2, \dots$  – моменти припинення експозиції;  $\tau_1, \tau_2, \dots$  – моменти прийняття рішення оператором

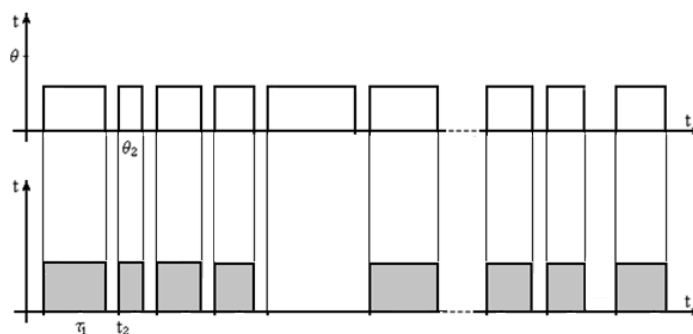


Рис. 4. Нерегулярний потік зображень тестів

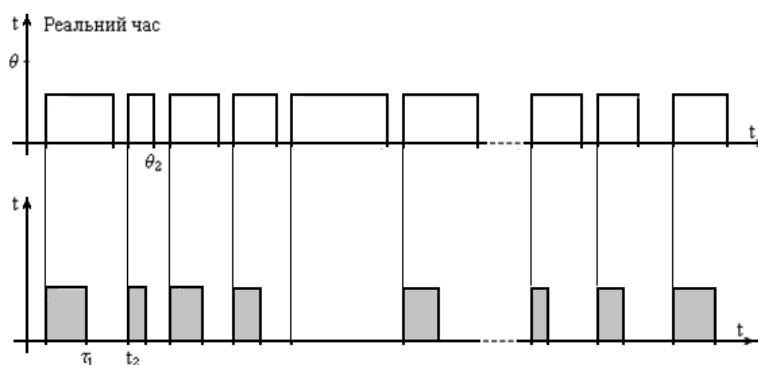


Рис. 5. Нерегулярний потік зображень-тестів, керованих прийняттям рішень

Розглянуті варіанти надання зображень-тестів і фіксації рішень з психологічної точки зору не є еквівалентними. Справа в тому, що за регулярної експозиції, коли оператор дуже швидко виявив об'єкт і прийняв рішення, в нього залишається деякий час до завершення експозиції цього зображення. Це спричинює певне розслаблення і в момент появи нового зображення оператор різко мобілізує увагу і переходить в напружений стан. Така нерегулярна зміна концентрації уваги і розслаблення є негативним елементом в операторській діяльності. З іншої сторони, коли після прийняття рішення зразу подається

наступне зображення, для оператора створюється постійне нервово напруження через необхідність весь час підтримувати концентрацію уваги, що також є негативним. Отже, вибір того чи іншого режиму надання зображень-тестів на екран монітору має не тривіальне значення, особливо для тривалих експериментів.

Відображення експериментального дослідження за допомогою імпульсних потоків забезпечує математичну постановку експериментів та подання результатів математичними моделями часових рядів, зокрема експозиції зображень-тестів та виявлення об'єкта і прийняття рішення.

#### Експериментальне дослідження.

В експериментальних дослідженнях брали участь дев'ять реципієнтів – операторів з числа студентів. Експеримент проведено в два етапи: на першому етапі було визначено пошукову складність наданого набору зображень-тестів, а на другому – було побудовано нову послідовність. Початковий обсяг послідовності становив 180 зображень тестів, які експонувались на екрані монітору з максимальною тривалістю 30 секунд за таким правилом. Якщо оператор виявив на зображенні-тесті заданий об'єкт менш як за 30 секунд дане зображення-тест відразу замінювалося наступним. У випадку, коли об'єкт протягом 30 секунд не був виявлений на даному зображенні-тесті, тоді його змінювало наступне з цієї послідовності.

В сенсі стресостійкості зроблено припущення – якщо час виявлення перевищує 2/3 від часу експозиції або якщо протягом часу експозиції зображення-тесту оператор не виявив об'єкт, то можна припустити, що він перебував в стані мікро стресу. Хоча така категоричність може бути хибною, проте, в даному випадку, автори вважають її допустимою.

В якості оцінки пошукової діяльності оператора використано значення часу з моменту появи зображення-тесту до моменту прийняття рішення. Крім того, для розуміння стресового стану, час експозиції зображень-тестів є поділений на дві частини: перша 1 – 20 секунд і друга – 20 – 30 секунд. Реєстрація часу пошуку здійснювалась в мілісекундах. Процедура надання зображень відповідала третьому варіанту моделі імпульсного потоку, тобто, як тільки оператор прийняв рішення про виявлений об'єкт, зразу було експоноване наступне з даної послідовності. Обсяг наданої послідовності становив 180 зображень-тестів.

Індивідуальні результати експериментального дослідження наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри	Оператори								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>a</i>	10	16	11	18	10	15	11	8	15
<i>b</i>	17	10	14	13	11	9	7	13	77
<i>x</i>	24.8	24.1	23.2	23.9	24.2	24.5	24.0	24.4	24.8
<i>min</i>	20.9	20.3	20.2	20.5	20.2	20.2	20.6	20.9	20.1
<i>q1</i>	23.2	21.6	20.6	22.4	23.2	21.9	21.6	21.8	23.8
<i>mode</i>	24.5	24.3	22.6	23.0	24.2	25.2	24.7	23.5	25.0
<i>q3</i>	26.2	26.1	24.7	25.6	25.9	26.4	26.0	27.8	26.5
<i>max</i>	29.1	29.3	29.6	29.8	27.7	29.4	26.9	28.4	28.3

В якості параметрів тут використано такі: *a* – кількість виявлених об'єктів в межах стресового часу; *b* – кількість пропущених об'єктів; *x* – середнє значення стресового часу. Показники: *min*, *q1*, *mode*, *q2*, *max* є параметрами діаграми boxplot стресового інтервалу часу, а саме екстремуми, квартилі, мода.

За допомогою параметрів описової статистики результатів експериментів для кожного з реципієнтів на рис. 6 зображені побудовані боксплот-діаграми для досліджуваної групи реципієнтів, в результаті чого визначено загальну структуру розподілу індивідуальних даних.

Як показують отримані діаграми, за винятком реципієнта 3-го і майже 9-го, в межах міжквартильного розмаху є симетричними, причому реципієнти 1, 4, 5 і 8, а реципієнти 2, 6 і 7 мають лівосторонню і правосторонню асиметрії відповідно. Це означає те, що більша частина прямокутника має більшу дисперсію, тобто можна припустити, що інтуїтивно відчуючи завершення експозиції зображення-тесту зростає хвилювання і певне, переважно суттєве, нервово напруження. Автори припускають стосовно асиметрії розподілів таке. Для лівостороннього розподілу верхня частина прямокутника є більшою і їй відповідають значення більші за значення моди, їх розкид між модою і третім квартилем є більший, а тому можна припустити що для цих реципієнтів характерна запізнілість реакції. Для правосторонньої асиметрії навпаки, нижня частина прямокутника відповідає значенням часу пошуку, що є меншими за значення моди, для них характерною є поквпливість реакції.

Отримані боксплот діаграми є індивідуальними статистичними відображеннями характеристик операторів в межах інтервалу стресового часу. Ці індивідуальні характеристики згідно з приведеною таблицею з одного боку показують якість пошукової діяльності операторів, а саме кількість пропущених та виявлених в стресовій часовій зоні заданих об'єктів.

При побудові боксплот діаграми розрахунок викидів не проводився оскільки інтервал значень тут обмежений умовою від 20 до 30 секунд. З рис. 6 можна вказати на таке, якщо розмістити індивідуальні боксплоти відносно моди в зростаючому порядку, отримаємо їх рейтинг.

При лабораторному дослідженні сформованої групи операторів виникає задача поділу їх на

підгрупи за близькими індивідуальними показниками. Враховуючи невелику кількість класифікаційних ознак та кількість реципієнтів для визначення підгруп застосовано ієрархічний агломеративний кластерний аналіз. За ознаки були взяті такі індивідуальні значення реципієнтів: кількість виявлених об'єктів в межах стресового часу; кількість пропущених об'єктів; середнє значення стресового часу, а також найменше та найбільше значення часу в стресовому часовому інтервалі, значення першого і третього кuartилів та значення моди. Отже, за значення класифікаційних ознак взято параметри діаграми boxplot стресового інтервалу часу.

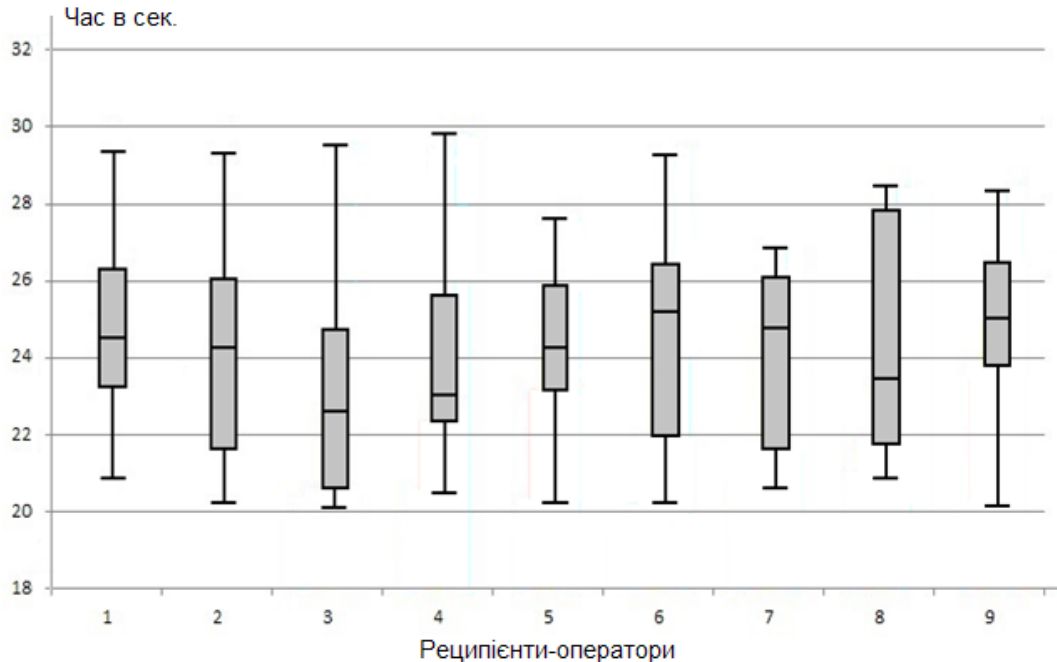


Рис. 6. Зображення індивідуальних діаграм boxplot

Для процедури кластеризації значення класифікаційних ознак були приведені до інтервалу  $[0, 1]$  та вибрана гнучка стратегія, а для побудови матриці близькості використано метрику Евкліда.

Результат кластерного аналізу, у вигляді параметрів дендрограми приведені в таблиці на рис. 7 зліва, у якій подані результати об'єднань об'єктів та відстані, за якими проведено об'єднання, а сама дендрограма кластерного аналізу приведена на цьому рисунку справа.

Візуальний аналіз дендрограми дає такий результат.

1. На рівні 1.5 візуально можна виділити три кластери, які включають таких реципієнтів:

- кластер 1; в нього входять реципієнти 2, 6, 4, 3;
- кластер 2; включає реципієнтів 5, 7, 1, 8;
- кластер 3; утворений лише одним реципієнтом 9.

Причому, перший і другий кластери за однорідністю реципієнтів подібні між собою, про що свідчить відстань об'єднань між об'єктами в них, яка лежить в межах 0,6 – 1,4.

Параметри дендрограми		
Об'єднання об'єктів	Номер об'єднання	Відстань між об'єктами
2 + 6	10	0,494
5 + 7	11	0,746
1 + 8	12	0,883
10 + 4	13	1,000
12 + 11	14	1,158
13 + 3	15	1,384
14 + 9	16	1,822
5 + 16	17	1,974

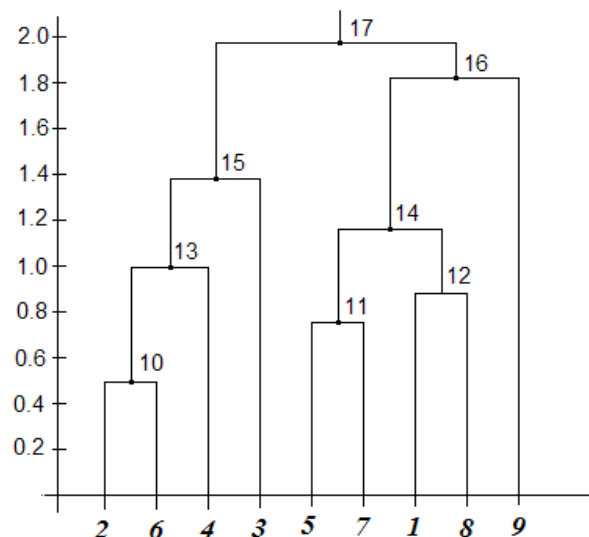


Рис. 7. Результати кластерного аналізу групи реципієнтів-операторів

2. Реципієнти досить сильно різняться за своїми індивідуальними характеристиками.

Наприклад, найменша відстань між операторами 2 і 6, яка рівна 0,5 за шкалою дендрограми і становить 25% відсотків від загальної шкали. Пари 5 і 7 та 1 і 8 ще більше різняться між собою та від пари 2 і 6. Реципієнти 4 і 3 дуже сильно відрізняються від пари 2 і 6, хоча усі вони входять в один кластер.

3. Кластер 3 знаходиться окремо і максимально далеко від перших двох, що досить зрозумілим є з аналізу показників його роботи.

4. Відстань між цими кластерами практично однакова і знаходиться в межах 1,822 – 1,974, тобто можна стверджувати, що підгрупи суттєво різняться між собою.

5. Якщо поділ на кластери провести на рівні 0,9 – 0,95 можна виділити три кластери по два оператори і три кластери по одному оператору, хоча і в цих парах оператори різняться між собою досить помітно.

Таким чином поділ групи операторів на професійно однорідні групи за допомогою комп'ютерного тренажера, розробка зображень-тестів, сценаріїв забезпечує достатньо об'єктивну оцінку результатів професійного відбору, проведення відповідних навчань. Крім того, в такий самий спосіб може бути проведена атестація персоналу з використанням контрольних матеріалів.

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

Проведення експериментальних досліджень, особливо з метою вивчення властивостей людини є вельми складною процедурою, яка вимагає суттєвої підготовки та організації, включаючи розробку завдань і постановку задач. Це, в свою чергу, потребує глибоких знань про дану реальну операторську діяльність, зведення до мінімуму різниці між реальною операторською діяльністю і відтворенням її на тренажері. Крім того, важливим моментом є повнота отриманої інформації (даних) та їх докладна інтерпретація.

Приведена математична модель операторської діяльності в інформаційно пошукових системах формально описує роботу оператора, зокрема функцією переходу в інший функціональний стан, оскільки оператор знаходиться з тим самим зображенням, яке призвело до його стресу.

Проведене експериментальне дослідження з дев'ятьма реципієнтами-операторами, за сценарієм у формі послідовності зображень-тестів, наданих на екрані монітору забезпечила отримання результату у вигляді реакцій на мікро стреси. За допомогою математичної обробки методами: описової статистики, визначення квантилів, побудови діаграм боксплот та ієрархічного агломеративного кластерного аналізу, отримано об'єктивне групування даної групи реципієнтів. В даному дослідженні кожен оператор представлений індивідуальною діаграмою боксплот, а група операторів за індивідуальними показниками тестування поділена на підгрупи. Це дало можливість здійснити об'єктивний професійний відбір для формування операторського персоналу.

Отже, в результаті проведеного дослідження розроблена і експериментально перевірена методика організації та проведення експериментів з вивчення впливу потоку мікро стресорів на практичну операторську діяльність, отримати кількісні та якісні оцінки цього явища та теоретичного підкріплення отриманих результатів розробленими математичними моделями.

### **Література**

1. Пріснякова Л. До моделювання поведінки людини / Людмила Пріснякова, Володимир Прісняков // Психологія і суспільство. – 2004. – № 3. – С. 91–98.
2. Мочурад Л.І. Моделювання стресової ситуації людини в автоматизованих системах управління технологічними процесами / Л.І. Мочурад, Н.І. Бойко, М.В. Яцків // Науковий вісник НЛТУ України. – 2020. – Т. 30, № 1. – С. 152–157.
3. Mathematical modeling of learning. Peter F. W. PREECE The School of Education, University of Exeter, St. Luke 3, Exeter, EX 1 2L U, England. JOURNAL OF RESEARCH IN SCIENCE TEACHING VOL. 21, NO. 9, PP. 953-955 (1984).
4. Learning Rate Sensitivity Model Nichols F. Brown System of Systems Engineering Office Systems Engineering Division Timothy P. Anderson Integrated Cost and Schedule Analysis Department Systems Engineering Division. Presented at the 2018 ICEAA Professional Development & Training Workshop. [www.iceaaonline.com](http://www.iceaaonline.com)
5. Josiah Dykstra, Celeste Lyn Pau. Cyber Operations Stress Survey (COSS): Studying fatigue, frustration, and cognitive workload in cybersecurity operations. CSET'18: Proceedings of the 11th USENIX Conference on Cyber Security Experimentation and TestAugust 2018 Pages 1. <https://www.usenix.org/conference/cset18/presentation/dykstra>
6. Yurii Kryvenchuk, Ihor Helzynskyy, Tetiana Helzhynska, Nataliya Boyko, Roman Danel. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2488/paper26.pdf>.
7. Workplace Stress: A collective challenge – Report, 04 April 2016, 978-92-2-130642-9[ISBN]. URL: [https://www.ilo.org/safework/info/publications/WCMS\\_466547/lang--en/index.htm](https://www.ilo.org/safework/info/publications/WCMS_466547/lang--en/index.htm)
8. Ліндер Є. Стрес-тестування як інструмент аналізу фінансової стійкості банківських установ / Аналітичне забезпечення діяльності бізнесу / Є. Ліндер // Міжнар. наук. журнал. – 2016. – Вип. 4. – С. 73–79.

9. Данілова Л. І. Стрес-тестування в системі ризик-менеджменту банку / Л. І. Данілова, В. В. Савочка // Економічний аналіз. – 2014. – Т. 15, № 1. – С. 244–252. – Режим доступу : [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecan\\_2014\\_15\(1\)\\_27](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecan_2014_15(1)_27).
10. Кошельок Г.В. Методика проведення стрес-тестування ризиків грошових потоків підприємства / Г.В. Кошельок // Приазовський економічний вісник. – 2017. – Випуск 5(05).
11. Мінцер О. П. Інформаційні технології оцінювання впливу стресу на результати тестового контролю знань лікарів. аналітичний огляд. Перше повідомлення / О. П. Мінцер, С. П. Кошова // Медична інформатика та інженерія. – 2017. – № 4. – С. 36–43.
12. Nancy J.M. Allen and Ronald T. Essel. The Roles of Human Operator and Machine in Decision Aid Strategies for Target Detection. URL: [https://www.researchgate.net/publication/235023362\\_The\\_Roles\\_of\\_Human\\_Operator\\_and\\_Machine\\_in\\_Decision\\_Aid\\_Strategies\\_for\\_Target\\_Detection](https://www.researchgate.net/publication/235023362_The_Roles_of_Human_Operator_and_Machine_in_Decision_Aid_Strategies_for_Target_Detection)
13. Фетісов В.С. Комп'ютерні технології в тестуванні / Фетісов В.С. – Ніжин : Видавець ПП Лисенко М.М., 2011. – 140 с.
14. Жуйков Д.Б., Аналіз нових інформаційних та комп'ютерно-тренажерних технологій розробки та використання існуючих інтерактивних навчально-тренувальних комплексів / Д.Б. Жуйков, В.І. Семенюк, О.В. Висоцький, О.Г. Двухіменний, Д.С. Житник, Д.А. Степченко // THEORY AND PRACTICE OF SCIENCE: KEY ASPECTS: SCIENTIFIC COLLECTION «INTERCONF». – № 58. – С. 338–357.
15. Chuanqi Tao, Dongyu Cao, Hongjing Guo, Jerry Gao. A Case Study of Testing an Image Recognition Application. DOI: 10.18293/SEKE2021-194. URL: [https://www.researchgate.net/publication/353609357\\_A\\_Case\\_Study\\_of\\_Testing\\_an\\_Image\\_Recognition\\_Application/link/6105b858169a1a0103cc8eae/download](https://www.researchgate.net/publication/353609357_A_Case_Study_of_Testing_an_Image_Recognition_Application/link/6105b858169a1a0103cc8eae/download)
16. Бутусевич А. Підбираємо персонал: методи і типові помилки // Режим доступу: <https://kadrhelp.com.ua/pidbyrayemo-personal-metody-i-typovi-pomylyky>
17. Підпала Т.В. Сертифікація персоналу : курс лекцій / Т. В. Підпала, І. В. Назаренко. – Миколаїв : МНАУ, 2016. – 57 с.
18. Статистические методы для ЭВМ. – М. : Наука, 1986. – 464 с.

#### References

1. Prisniakova L. Do modeliuvannia povedinky liudyny / Liudmyla Prisniakova, Volodymyr Prisniakov // Psykholohiia i suspilstvo. – 2004. – № 3. – С. 91–98.
2. Mochurad L.I. Modeliuvannia stresovoi situatsii liudyny v avtomatyzovanykh systemakh upravlinnia tekhnolohichnymy protsesamy / L.I. Mochurad, N.I. Boiko, M.V. Yatskiv // Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy. – 2020. – Т. 30, № 1. – С. 152–157.
3. Mathematical modeling of learning. Peter F. W. PREECE The School of Education, University of Exeter, St. Luke 3, Exeter, EX 1 2L U, England. JOURNAL OF RESEARCH IN SCIENCE TEACHING VOL. 21, NO. 9, PP. 953-955 (1984).
4. Learning Rate Sensitivity Model Nichols F. Brown System of Systems Engineering Office Systems Engineering Division Timothy P. Anderson Integrated Cost and Schedule Analysis Department Systems Engineering Division. Presented at the 2018 ICEAA Professional Development & Training Workshop. [www.iceaaonline.com](http://www.iceaaonline.com)
5. Josiah Dykstra, Celeste Lyn Pau. Cyber Operations Stress Survey (COSS): Studying fatigue, frustration, and cognitive workload in cybersecurity operations. CSET18: Proceedings of the 11th USENIX Conference on Cyber Security Experimentation and Test August 2018 Pages 1. <https://www.usenix.org/conference/cset18/presentation/dykstra>
6. Yurii Kryvenchuk, Ihor Helzynskyy, Tetiana Helzhynska, Nataliya Boyko, Roman Danel. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2488/paper26.pdf>.
7. Workplace Stress: A collective challenge – Report, 04 April 2016, 978-92-2-130642-9[ISBN]. URL: [https://www.ilo.org/safework/info/publications/WCMS\\_466547/lang--en/index.htm](https://www.ilo.org/safework/info/publications/WCMS_466547/lang--en/index.htm)
8. Linder Ye. Stres-testuvannia yak instrument analizu finansovoi stiikosti bankivskykh ustanov / Analitichne zabezpechennia diialnosti biznesu / Ye. Linder // Mizhnar. nauk. zhurnal. – 2016. – Vyp. 4. – С. 73–79.
9. Danilova L. I. Stres-testuvannia v systemi ryzik-menedzhmentu банку / L. I. Danilova, V. V. Savochka // Ekonomichnyi analiz. – 2014. – Т. 15, № 1. – С. 244–252. – Режим доступу : [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecan\\_2014\\_15\(1\)\\_27](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecan_2014_15(1)_27).
10. Koshelok H.V. Metodyka provedennia stres-testuvannia ryzikov hroshovykh potokiv pidpriemstva / H.V. Koshelok // Pryazovskiy ekonomichnyi visnyk. – 2017. – Vypusk 5(05).
11. Mintser O. P. Informatsiini tekhnolohii otsiniuvannia vplyvu stresu na rezultaty testovoho kontroliu znan likariv. analitichnyi ohliad. Pershe povidomlennia / O. P. Mintser, S. P. Koshova // Medychna informatyka ta inzheneriia. – 2017. – № 4. – С. 36–43.
12. Nancy J.M. Allen and Ronald T. Essel. The Roles of Human Operator and Machine in Decision Aid Strategies for Target Detection. URL: [https://www.researchgate.net/publication/235023362\\_The\\_Roles\\_of\\_Human\\_Operator\\_and\\_Machine\\_in\\_Decision\\_Aid\\_Strategies\\_for\\_Target\\_Detection](https://www.researchgate.net/publication/235023362_The_Roles_of_Human_Operator_and_Machine_in_Decision_Aid_Strategies_for_Target_Detection)
13. Fetisov V.S. Komp'uterni tekhnolohii v testuvanni / Fetisov V.S. – Nizhyn : Vydavets PP Lysenko M.M., 2011. – 140 s.
14. Zhuikov D.B., Analiz novykh informatsiynykh ta kompiuterno-trenazhemykh tekhnolohii rozrobky ta vykorystannia isnuuychykh interaktyvnykh navchalno-trenuvalnykh kompleksiv / D.B. Zhuikov, V.I. Semeniuk, O.V. Vysotskyi, O.H. Dvukhimennyi, D.S. Zhytnyk, D.A. Stepchenko // THEORY AND PRACTICE OF SCIENCE: KEY ASPECTS: SCIENTIFIC COLLECTION «INTERCONF». – № 58. – С. 338–357.
15. Chuanqi Tao, Dongyu Cao, Hongjing Guo, Jerry Gao. A Case Study of Testing an Image Recognition Application. DOI: 10.18293/SEKE2021-194. URL: [https://www.researchgate.net/publication/353609357\\_A\\_Case\\_Study\\_of\\_Testing\\_an\\_Image\\_Recognition\\_Application/link/6105b858169a1a0103cc8eae/download](https://www.researchgate.net/publication/353609357_A_Case_Study_of_Testing_an_Image_Recognition_Application/link/6105b858169a1a0103cc8eae/download)
16. Butusevych A. Pidbyraiemo personal: metody i typovi pomylyky // Rezhym dostupu: <https://kadrhelp.com.ua/pidbyrayemo-personal-metody-i-typovi-pomylyky>
17. Pidpala T.V. Sertyfikatsiia personalu : kurs lektsii / T. V. Pidpala, I. V. Nazarenko. – Mykolaiv : MNAU, 2016. – 57 s.
18. Statisticheskie metody dlia EVM. – М. : Nauka, 1986. – 464 s.

Надійшла/Paper received : 24.09.2022 р.    Надрукована/Printed : 01.11.2022 р.



MYRONYUK Oleksiy

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ORCID ID: [0000-0003-0499-9491](https://orcid.org/0000-0003-0499-9491)e-mail: [o.myronyuk@kpi.ua](mailto:o.myronyuk@kpi.ua)

BAKLAN Denys

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ORCID ID: [0000-0002-6608-0117](https://orcid.org/0000-0002-6608-0117)e-mail: [d.baklan@kpi.ua](mailto:d.baklan@kpi.ua)

GLUKHOVSKY Vladislav

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ORCID ID: [0000-0003-3917-174X](https://orcid.org/0000-0003-3917-174X)e-mail: [svscomp@ukr.net](mailto:svscomp@ukr.net)

## ASPECTS OF WETTING OF HYDROPHOBIZED SURFACES TEXTURED BY A FEMTOSECOND LASER

*Extractive methods of obtaining textured surfaces to ensure superhydrophobic properties must have chemical treatment. This work is aimed at determining the influence of the chemical class of modifiers (silanes, perfluorosilanes, unsaturated long-chain carboxylic acids and low molecular weight polyethylene wax) and the level of micro- and nanotexture organization on the characteristics of surface wetting. The work involved texturing of anodized aluminum with a femtosecond laser to create structures. As a result, two types of textured surfaces were obtained: with a regular microtexture in the form of columns with a square section, and a disordered fractal nanotexture with a hierarchical structure. Chemical treatment of the obtained surfaces was carried out and their effectiveness was evaluated. The study of wetting properties of surfaces was carried out by the Zisman method both with individual solvents and with the use of mixtures of solvents. As a result of the work, it is shown that the choice of the modifier of aluminum surfaces textured by a femtosecond laser plays a decisive role in determining the wetting properties, namely the values of the water wetting angle and surface tension, at which the loss of stability of the Cassie state is observed. It is shown that the influence of the chemical composition of the modifier is more significant than the dimension of the texture on the surface. In particular, it is shown that in the case of using silanes and fluorosilanes, it is possible to achieve a water contact angle of 155-160° on nanotextures, while the loss of the Cassie state begins below 46-49 mN/m. When using hydrocarbon modifiers, it is possible to achieve the same high contact angles with water - 154° for oleic acid, but the stability of such surfaces is much lower - 55-65 mN/m. The difference in Cassie state stability between micro- and nanostructures was found to be within the measurement error.*

**Keywords:** hydrophobicity, laser texturing, nanotexture, fluorosilane, surface modification.

МИРОНЮК Олексій, БАКЛАН Денис, ГЛУХОВСЬКИЙ Владислав

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

## ОСОБЛИВОСТІ ЗМОЧУВАННЯ ГІДРОФОБІЗОВАНИХ ПОВЕРХОНЬ ТЕКСТУРОВАНИХ ФЕМТОСЕКУНДНИМ ЛАЗЕРОМ

*Дана робота спрямована на визначення впливу хімічного класу модифікаторів та рівня організації мікро- та нанотекстури на особливості змочування поверхонь. У роботі було одержано два типи текстурованих поверхонь шляхом обробки анодованого алюмінію фемтосекундним лазером: з регулярною мікротекстурою у вигляді стовпчиків з квадратним перерізом, та неупорядкованою фрактальною нанотекстурою з ієрархічною структурою. Дослідження змочувальних властивостей отриманих модифікованих поверхонь було проведено методом Зісмана як окремими розчинниками, так і з використанням сумішей розчинників. У результаті роботи показано, що вибір модифікатора, а саме його хімічний склад, відіграє вирішальну роль у визначенні властивостей змочування, а саме значень кута змочування водою та поверхневого натягу, при якому спостерігається втрата стабільності стану Кассі. Зокрема, показано, що у випадку використання силанів та фторсиланів вдається досягти на нанотекстурах кута змочування водою в межах 155-160°, тоді як втрата стану Кассі розпочинається нижче 46-49 мН/м. При використанні вуглеводневих модифікаторів можливе досягнення таких же високих кутів змочування водою - 154° у олеїнової кислоти, але стабільність таких поверхонь значно нижча - 55-65 мН/м. Виявлено, що відмінність у стабільності стану Кассі між мікро- та наноструктурами знаходиться в межах похибки вимірювання.*

**Ключові слова:** гідрофобність, лазерне текстурування, нанотекстура, фторсилани, модифікація поверхні.

### Formulation of the problem

Extractive methods of obtaining textured surfaces, for example, chemical etching, texturing with a femtosecond laser, etc. to ensure superhydrophobic properties of such surfaces should be duplicated by the following chemical treatment [1]. This can be done through a wide range of common modifiers. Despite the large number of works devoted to the preparation of extractable superhydrophobic surfaces, they do not contain a structured comparison of the effectiveness of modifiers. This work is aimed at determining the influence of the chemical class of modifiers (representatives of the class of silanes and perfluorosilanes, unsaturated long-chain carboxylic acids and low molecular weight polyethylene wax) and the level of texture organization (micro and nano) on the characteristics of surface wetting are analyzed.



### Analysis of recent research

The lotus effect is based on the special topography of the wetted surfaces, which is combined with their low self-surface energy [2]. The latter is understood as a relative decrease in the van der Waals potential of the surface due to the minimization of polar interactions in the sense of the Owens-Wendt theory. Solid polymeric materials with their own surface energy in the range up to 20 mJ/m<sup>2</sup>, as well as their corresponding thin layers of modifiers on more polar surfaces, are suitable for this task [3]. The latter is widely used to reduce the surface energy of relatively active materials - metals, oxides, carbonates, silicates, etc., including surfaces obtained by extractive texturing, for example, using laser ablation. Silanes and siloxanes [4] as well as carbon chain reactive modifiers [5] are used to hydrophobize such surfaces. At the same time, the issue of the influence of certain modifiers on the wetting characteristics of hydrophobized structures remains insufficiently studied.

**The aim of this work** is to determine what effect brings the use of different kinds of treatment agents of silane and functionalized hydrocarbon type on the wetting character and properties of femtosecond laser textured surfaces.

The tasks that were solved to achieve the stated aim were: texturing of anodized aluminum with femtosecond laser to obtain micro- and nanoscale structures; chemical treatment of obtained surfaces and determination of its effectiveness; study of wetting properties of surfaces using Zisman technique with the individual solvents and solvents mixtures.

### Presentation of the main material

In the work, substrates made of aluminum alloy brand 7500 were used, which were anodized before applying textures. The process took place in a solution of 2.4 M sulfuric acid with a lead auxiliary electrode. Anodic current parameters: density 2 A/dm<sup>2</sup>, anodizing time 60 min, solution temperature not higher than 10 °C. Next, using a femtosecond laser (CARBIDE built into the FREEZER01 system from Evana Technologies, Lithuania), micro- and nanostructures were obtained. After texturing, the samples were cleaned by washing in an ultrasonic bath in isopropanol.

Silanes were used as modifiers: n-octyltriethoxysilane (Dynasylan OCTEO, Germany) (hereinafter OCTEO) and 1H,1H,2H,2H-Perfluorodecyltrichlorosilane (Alfa Aesar, Germany) (hereinafter POTS) and hydrocarbon modifiers: oleic acid (hereinafter OLA) and microcrystalline polyethylene wax (hereinafter PEW). Treatment with silanes was carried out in two stages: impregnation of the surfaces in a 1% solution for 30 minutes, then evaporation of the solvent and exposure of the plates at a temperature of 135° for 30 minutes. Treatment with hydrocarbon modifiers included only the stage of impregnation in a 1% xylene solution and removal of the solvent at 80 °C in the oven.

The value of the water contact angle was measured by the sessile drop method. Water-ethanol mixtures at different concentrations were used to determine the critical surface tension [6]. To characterize the surface of the sample and determine the value of the contact angle, an optical microscope with a built-in Delta Optical HCDE-50 camera (China) and the corresponding ScopeTek View software (China) were used. For data reproducibility, five points were measured on each sample.

In the work, two types of textured surfaces were obtained (Fig. 1): 1) a regular microtexture in the form of columns with a square cross-section with a side of 30 μm and 15 μm between them, height 15 μm and 2) a disordered fractal nanotexture with the sizes of primary elements within tens of nanometers, and their agglomerates - tens of micrometers, which allows us to consider this structure as hierarchical.

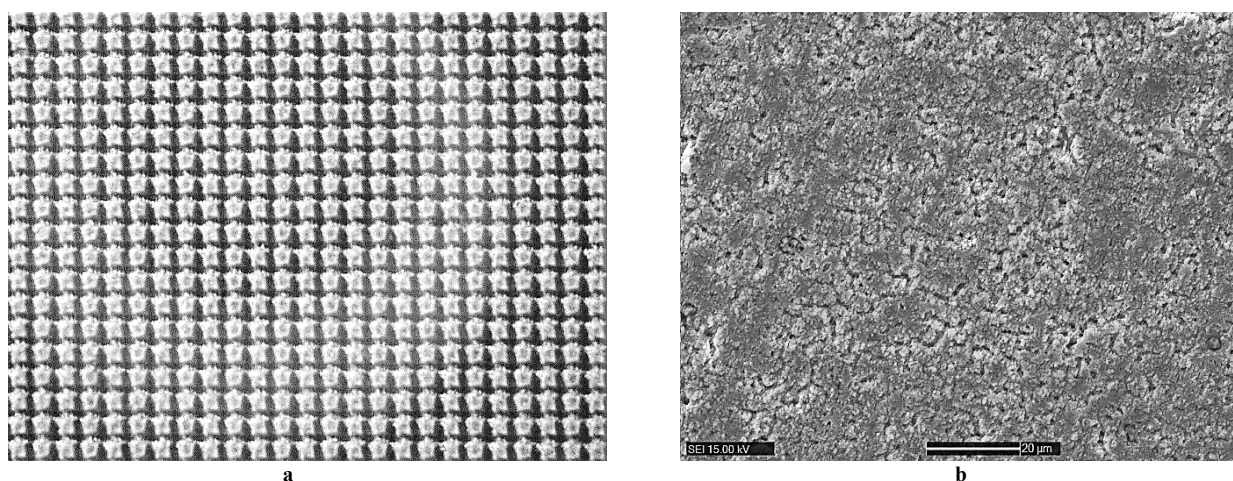


Fig. 1. The surface of samples textured by a femtosecond laser: a) microtexture; b) nanotexture

The quality control of the chemical modification was carried out according to the values of the contact angle of the obtained surfaces with distilled water until stable values were obtained (Table 1). The values of contact angles obtained for all textured samples in the case of using all modifiers are significantly higher than the angles on flat surfaces. The presence of this hysteresis indicates the achievement of the Cassie state, in which part of the solid surface of the contact is replaced by air.

Table 1

Wettability of textured surfaces		
Texture level	Modifier	Contact angle, deg.
-	PEW	106
micro		123
nano		142
-	OIA	42
micro		132
nano		154
-	OCTEO	93
micro		142
nano		160
-	POTS	98
micro		152
nano		160

An obvious fact is the more pronounced water-repellent ability of surfaces with nanotextures compared to microtextures. An unexpected fact is the relatively small difference in the efficiency of silane (OCTEO) and its fluorinated equivalent (POTS) on the nanotexture, which, however, becomes obvious on the microtexture, where the angle difference is  $10^\circ$ . The nanotextured surface wetted with oleic acid also exhibits significant water-repellent properties, inferior to silanes by only  $6^\circ$  and remaining superhydrophobic. Polyethylene wax does not fulfill this condition, although Cassie state is still preserved. A possible explanation for the decrease in indicators in this case may be the fact that this last material is able to change the geometry of the surface of the texture (due to crystallization or the formation of an adsorption layer with a significant thickness) in the direction of lower efficiency. An interesting fact is the reduced values of wetting angles on the flat surface of anodized aluminum coated with oleic acid, which can be explained by the loss of orientation of molecules that are essentially surface-active and contain both polar and non-polar parts.

To establish wetting properties, the Zisman method was used, previously described by us in [7]. In contrast to flat surfaces, in the case of textured surfaces, the character of the curve changes noticeably (Fig. 2). The curve for a textured surface contains a characteristic "shoulder" of hysteresis, which corresponds to the Cassie state, the stability of which begins to be lost at certain values of the surface tension of the test liquid. The position of the shoulder in the work was determined by the tangent method and for PE wax it is 58 mN/m. The critical surface tension of wax is 26 mN/m, which is close to this value in polyethylene [8].

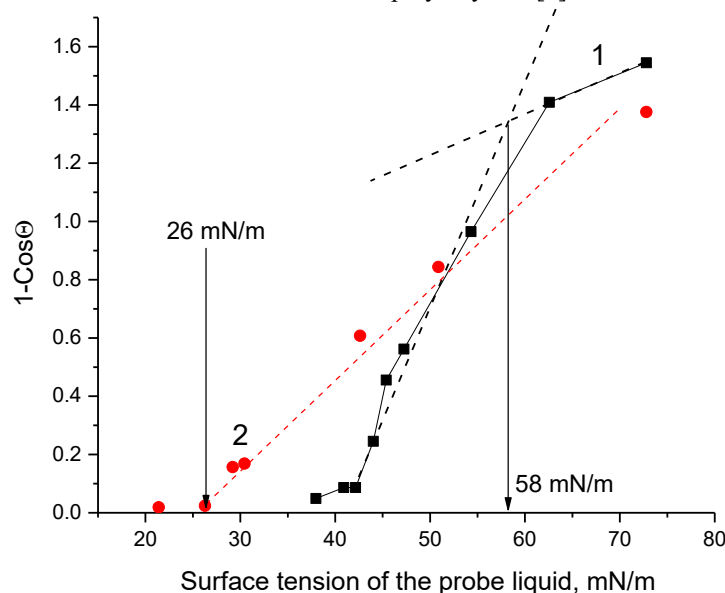


Fig. 2. Zisman plot for: 1) micro-textured Al surface coated with PEW; 2) flat aluminum surface coated with PEW

The presence of hysteresis between the curve of the textured surface and the straight flat one draws attention. The classic Cassie-Baxter equation can be used to describe its upper part, and the Wenzel equation to describe the lower part [9].

The results of determining the point of loss of stability of the Cassie state (Table 2) indicate that the chemical composition of the modifier plays a decisive role in the formation of the stability of the Cassie state on such surfaces. The use of OCTEO and POTS silanes has a relatively close efficiency with a threshold of maintaining stability at the level of 45-50 mN/m regardless of the characteristic size of the structure. The transition to hydrocarbon modifiers reduces stability by increasing these values to 55-65 mN/m.

Table 2

Energy of textured surfaces according to the Zisman method			
Texture level	Modifier	Surface energy on the "shoulder", mH/m	Critical surface energy, mH/m
Micro	PEW	58	42
Nano		56	44
Micro	OIA	65	41
Nano		63	47
Micro	OCTEO	48	38
Nano		49	39
Micro	POTS	46	32
Nano		49	38

An interesting fact is the small difference between the efficiency of micro- and nanostructures in the sense of the stability of the Cassie state, which is within the measurement error.

### Conclusions

It was shown that the choice of modifier of femtosecond laser-textured anodized aluminum surfaces plays a crucial role in determining the wetting properties, namely the values of the water wetting angle and surface tension at which loss of Cassie state stability is observed. The influence of the chemical composition of the modifier is more significant than even the dimension of the texture.

In particular, it is shown that in the case of using silanes and fluorosilanes, it is possible to achieve a water wetting angle of 155-160° on nanotextures, and the loss of the Cassie state begins below 46-49 mN/m. When using hydrocarbon modifiers, it is possible to achieve the same high wetting angles with water - 154° for oleic acid, but the stability of such surfaces is much lower - 55-65 mN/m.

### Acknowledgements

This work was made in the joint Ukrainian-Lithuanian research project "Investigation of the stability of femtosecond laser-formed and organically coated superhydrophobic surfaces in a UV environment" (0122U002645) by № M/28-2022 from 23.05.2022 p.

### References

1. Coblas D. G., Fatu A., Maoui A., Hajjam M. Manufacturing textured surfaces: State of art and recent developments. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 2014. Vol. 229, № 1. P. 3–29. <https://doi.org/10.1177/1350650114542242>
2. Manoharan K., Bhattacharya S. Superhydrophobic Surfaces Review: Functional application, fabrication techniques and limitations. Journal of Micromanufacturing. 2019. Vol. 2, № 1. P. 59–78. <https://doi.org/10.1177/2516598419836345>
3. Carrascosa L. A. M., Zarzuela R., Botana-Galvín M., Botana F. J., Mosquera M. J. Achieving superhydrophobic surfaces with tunable roughness on building materials via nanosecond laser texturing of silane/siloxane coatings. Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 58. P. 104979. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104979>
4. Liu Y., Yuan G., Guo C., Ngo C. V., Li W. Femtosecond laser fabrication and chemical coating of anti-corrosion ethylene-glycol repellent aluminum surfaces. Materials Letters. 2022. Vol. 323. P. 132562. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132562>
5. Chen C., Huang Z., Jiao Y., Shi L. A., Zhang Y., Li J., Li C., Lv X., Wu S., Hu Y., Zhu W., Wu D., Chu J., Jiang L. in situ reversible control between sliding and pinning for diverse liquids under ultra-low voltage. ACS Nano. 2019. Vol. 13, № 5. P. 5742–5752. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b01180>
6. Myronyuk O., Bkalan D., Novoseltsev A. Evaluation of the surface energy of solids using two-component mixtures of test liquids. Herald of Khmelnytskyi National University. 2021. Vol. 297, № 3. P. 81–86. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2021-297-3-81-86>
7. Ebnesajjad S. Surface treatment and bonding of Ceramics. Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding. 2014. P. 283–299. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-26435-8.00011-3>
8. Zeng J. Polymer Surface Modification: Relevance to Adhesion. Zeng, Utrecht: VSP, 2004. 177 p.
9. Mądry K., Nowicki W. Wetting between Cassie–Baxter and wenzel regimes: A cellular model approach. The European Physical Journal E 2021. Vol. 44, № 11. <https://doi.org/10.1140/epje/s10189-021-00140-8>

Надійшла/Paper received : 04.08.2022 p. Надрукована/Printed : 24.10.2022 p.

НОВОСАД Марія-Руслана

Національний університет "Львівська політехніка"

ORCID ID: 0000-0003-3005-6614

e-mail: [ruslana.novosad.3@gmail.com](mailto:ruslana.novosad.3@gmail.com)

## АСИСТЕНТ ПАРКУВАННЯ ЯК МОДУЛЬ СИСТЕМИ РОЗУМНОГО МІСТА

В роботі наведено результати розробки застосунку для швидкого і зручного пошуку місця для паркування. Система є модулем розумного міста та орієнтована на житлові комплекси, опрацьовує дані з різних джерел та відображає статуси паркомісць територій для паркування, здійснює пошук відповідного паркомісця за номером транспортного засобу. Створювана система складається з трьох основних компонентів: зберігання та обробка запитів, коректне відображення даних, обробка зображення.

Ключові слова: розумне місто, паркування, автомобіль, згортоква нейронна мережа, застосунок.

NOVOSAD Mariia-Ruslana  
Lviv Polytechnic National University

### MULTISOURCE INTELLIGENT PARKING ASSISTANT

Problem searching for a parking space is time-consuming and highly relevant both in Ukraine and abroad. Time spent searching for a parking space leads to excessive traffic, more traffic jams, air pollution and increased fuel consumption. These factors also affect the daily stress levels of drivers. Due to this, the process of finding a parking space should be fast and convenient. At the same time, there has been significant development of real estate in Lviv over the past few years. Accordingly, the need for organizing the process of parking cars of residents of residential areas is growing. This paper presents the results of the development of an application for a quick and convenient search for a parking space. A review of similar software applications was conducted. Proposed solutions use various technologies to solve the problem of searching for a free parking space including IoT, sensors, machine learning for image recognition. Even though they solve the problem of searching for a free parking space, most of them can be expensive to implement, maintain, they don't provide the ability to work with different data sources. An activity diagram of system is presented and it shows two main flows of the system: displaying the current state of parking spaces and displaying parking space by the number of the car entering the territory of the complex. System consists of three modules. The first module is responsible for working with different data sources, storing the status of parking spaces, processing requests. Image processing module is responsible for determining the occupied and free parking spaces from the image. The third module is responsible for the correct display of parking spaces and their statuses. It is also demonstrated how the application works with different data sources and how exceptions are handled. The system works correctly and has a clear interface. The parking assistant is a great helper and significantly reduces the time required to find a free parking space.

**Keywords:** smart city, parking, car, convolutional neural network, application.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

Автомобілі пропонують свободу, зручність, комфорт та приносять велику вигоду своїм власникам. Зараз налічується близько 1.4 млрд автомобілів у світі та очікується щорічне збільшення цього числа на 4 відсотки [1]. Зокрема, у Львові кількість авто значно зросла протягом останніх років. Обсяг переміщень автомобілем теж продовжує збільшуватись, що призводить щоразу до триваліших корків.

Спостерігається значний розвиток нерухомості у Львові протягом останніх кількох років. Місто посідає перше місце в Україні за обсягом новобудов у 2019 році. В 2019 році у Львові з'явилося 95 будинків площею понад 1 млн м<sup>2</sup> [2]. Відповідно зростає і потреба у належних місцях для паркування автомобілів мешканців даних житлових масивів.

У Львові виникає постійна проблема недостатньої кількості місць, що значно обмежує водіїв у виборі де залишити транспортний засіб протягом дня, забирає багато часу у пошуках вільного паркомісця. Наявна проблема існує і за межами України, згідно дослідження [3] пошук місць для паркування накладає значне економічне навантаження на водіїв у США, Великобританії та Німеччині, які витрачають 17, 44 та 41 годину на рік відповідно за оціночними витратами в цих країнах 72,7 млрд. доларів, 23,3 млрд. фунтів стерлінгів та 40,4 млрд. євро.

Збільшення часу, витраченого на пошук місця для паркування, призводить до зайвого руху автомобілів, більших заторів, забруднення повітря та збільшення споживання палива. Також дані фактори впливають на щоденний рівень стресу водіїв. Зважаючи на це, процес пошуку місця паркування повинен бути швидким і зручним.

### Аналіз досліджень та публікацій

Зважаючи на актуальність проблеми пошуку місця для паркування, на ринку представлені різноманітні продукти для вирішення даної проблеми. Частина продуктів використовує технології IoT, датчики, інша – машинне навчання для розпізнавання зображень, аналітику або все у комплексі.

Розумна система керування паркуванням ParkSetup [4] розроблена для безпечного паркування власниками транспортних засобів та ефективного використання паркомісць. Система включає такі компоненти, як LED дисплей, ультразвукові датчики паркування, що збирають інформацію про місця для паркування в режимі реального часу, світлодіодні індикатори, які можуть набувати червоний або зелений колір і таким чином повідомляти про стан паркомісця, програмне забезпечення для відслідковування стану

парковки та блок управління. Для встановлення системи ParkSetup потрібно підключити багато компонент, провести кабелі, в той час як створювана в роботі система для паркування не вимагає певних компонент і може інтегруватись з уже існуючими джерелами даних на території для паркування.

Додаток Clevercity [5] використовує розумні датчики паркування для моніторингу простору та збирання даних про вільні місця для паркування в режимі реального часу. Дане інтелектуальне рішення використовує технології IoT та складається з декількох підсистем. Підсистема керування паркуванням ClevercityCirc360 забезпечує вказівки щодо паркування в режимі реального часу. Clevercity система доволі складна та містить багато рішень.

В Україні було представлено систему розумного паркування Smart Parking [6]. Запропоноване рішення складається з мобільного додатку та розміщеного на в'їзді до території паркування LCD дисплея. Система застосовує алгоритми машинного навчання для аналізу зображень отриманих з камер.

Запропоновані рішення відрізняються своїми підходами, однак більшість не є доступні в Україні, можуть бути дорогими в реалізації та обслуговуванні. Виникає потреба у створенні асистента паркування, що орієнтований на житлові комплекси та отримує дані про стан парковок з різних джерел, опрацьовує їх в залежності від їх типу.

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є розробка інформаційної системи для швидкого і зручного пошуку місця для паркування.

### Виклад основного матеріалу

**Опис процесу діяльності та організації даних.** Щодня тисячі мешканців житлових масивів повертається додому та стикається з проблемою пошуку вільного місця для паркування. Зазвичай, єдина система контролю наявності вільних та зайнятих парко місць відсутня, що призводить до зайвого скупчення транспортних засобів.

Було розглянуто процес діяльності системи, що має бути досягнутий при автоматизації. В режимі реального часу до застосунку потрапляють дані про статус паркомісць відповідної території для паркування поточного житлового масиву з різних джерел, а саме: камер відеоспостережень, датчиків, інших систем моніторингу підземного та надземного паркінгу. Дані з камер відеоспостереження опрацьовуються і визначається стан паркомісць використовуючи згорткову нейронну мережу. Після цього, стан паркомісць відображається у зручному вигляді в застосунку. У такий спосіб, коли користувач-мешканець житлового масиву повертається додому, при в'їзді до території житлового масиву камери відеоспостереження фіксують номер автомобіля користувача і здійснюється його ідентифікація системою. Відповідно відображається пропонуване доступне паркомісце для поточного користувача. Відбувається автоматизація процесу пошуку вільного місця для паркування. Відповідна UML-діаграма діяльності наведена на рис. 1. Діаграма відображає два основні потоки системи: режим відображення поточного стану паркомісць та режим відображення паркомісць у відповідності до номеру автомобіля, що здійснює в'їзд на територію комплексу.

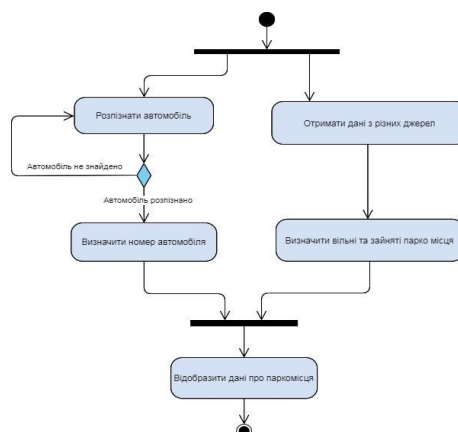


Рис. 1. UML-діаграма діяльності

**Модулі системи.** Створювана система складається з трьох основних модулів: зберігання та обробка запитів, коректне відображення даних, обробка зображення. Здійснення обробки зображення та визначення з нього стану паркомісць відбувається з використанням алгоритмів штучного інтелекту. Модуль обробки запитів та зберігання даних має зберігати дані про житловий комплекс, відповідні території для паркування. Даний модуль має опрацьовувати запити щодо стану території для паркування, відповідного для користувача паркомісця, мати можливість виконувати запити до інших модулів, API. Модуль відображення даних володіє зрозумілим для користувача інтерфейсом, відповідає за коректне відображення паркомісць та їх статусів.

**Вхідні дані.** На вхід системи можуть потрапляти різні формати даних, так як застосунок передбачає роботу з кількома різноманітними ресурсами. При роботі з камерами відеоспостереження системі подається кадр з відеопотоку. Перед подачею на вхід нейронної мережі, виокремлюються регіони зображення для класифікації,

здійснюється перетворення регіонів у відтинки сірого та приведення до одного розміру. Іншим джерелом даних можуть бути датчики, що розташовані на території для паркування. Три типи датчиків, що використовуються сьогодні, включають бокові, наземні та радіолокаційні. Було оглянуто набори даних, що містять записи з датчиків та збережено кілька файлів. Файли включають такі поля, як ідентифікатор території для паркування, ідентифікатор парко місця та статус паркомісця (зайнято, вільно). До вхідних даних також належить зображення, що містить автомобіль, який здійснює в'їзд на територію житлового комплексу.

**Побудова функціональної системи.** Модель функціональної системи показує що повинна робити система та представляється через ієрархію діаграм потоків даних (DFD). DFD описує процеси, які беруть участь у системі та потік даних між ними. Деталізована діаграма потоків даних першого рівня, наведена на рис. 2, визначає основні функції системи.

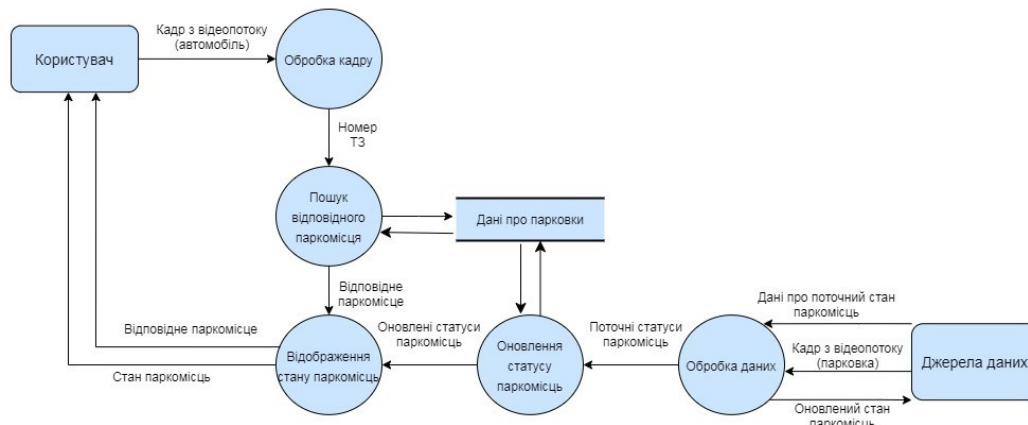


Рис. 2. Деталізована діаграма потоків даних першого рівня

Діаграма потоків даних першого рівня містить дві зовнішні сутності, чотири процеси та одне сховище даних. Базуючись на діаграмі, можна виділити два загальні потоки даних у системі. Перший бере початок, коли користувачем надається “Кадр з відеопотоку (автомобіль)”, що містить зображення транспортного засобу. Відбувається процес “Обробка кадру” результатом якого є визначений номер ТЗ. За номером ТЗ відбувається процес “Пошук відповідного паркомісця”, що використовує сховище даних “Дані про парковки”. Як результат даного процесу є сформоване відповідне паркомісця. Відповідне паркомісця відображаються системою у зручному форматі для користувача. Другий потік відбувається з певною періодичністю. З “Джерел даних” надходять дані про поточний стан паркомісць у різних форматах в залежності від типу джерела та відбувається процес “Обробка даних”. Наступний процес “Оновлення статусу паркомісць” оновлює дані про територію для паркування у сховищі даних. Оновлені статуси паркомісць відображаються системою.

**Модуль обробки зображення.** Створювана система містить модуль обробки зображення, який відповідає за правильне визначення зайнятих та вільних паркомісць із отриманого кадру з відеопотоку. Даний модуль використовує згорткову нейронну мережу. Згорткові нейронні мережі (CNN) є нейронними мережами прямого поширення, що в основному застосовуються в області комп’ютерного зору, наприклад, для класифікації зображень та розпізнавання. У порівнянні з іншими методами CNN досягають кращої точності класифікації у великомасштабних наборах даних [7]. Було використано згорткову нейронну мережу LeNet-5. Архітектура складається з семи шарів: три шари згортки, два агрегувальних шари, два повністю з’єднаних шари та вихідний шар. В даній роботі завдання полягало у класифікації зображення, визначенні чи поточне паркомісця зайняте або вільне, тобто класифікація з наявними двома класами.

Обраний набір даних CNRPark + EXT [8], що містить приблизно 150 000 зображень з різним станом паркомісць. В датасеті наявні зображення, що збирались в сонячну погоду, дощову та похмуру дев’ятьма камерами відеоспостереження, враховуючи різний кут огляду та перспективу. Зображення містять перешкоди у вигляді гілок дерев, ліхтарів та включають різне освітлення. CNRPark + EXT орієнтований для візуального виявлення зайнятості території для паркування. Було обрано дані з камери №5. Розмір датасету становить 6056 зображень, тренувальна вибірка 4523 зображення, для тестування 1533 зображення. Для тренування обрано функцію втрат перехресну ентропію, алгоритм оптимізації Адама з кроком навчання  $1e-3$  [9]. Кількість епох становить 5. Як результат, було досягнуто точності моделі 96 % на тестовій вибірці. Результат роботи моделі на вхідних зображеннях наведені на рис. 3.

**Засоби розробки.** Для розробки системи було використано різні засоби в залежності від створюваних модулів. Основною мовою, що використана для написання серверної частини застосунку (модуля обробки запитів) є Java. Java – найпопулярніша мова веб-програмування, що використовується для розробки вмісту веб-сайтів, ігор, програм та програмного забезпечення. Для додавання, перегляду та обробки даних використано систему управління базами даних MySQL Server. Під час розробки модуля відображення (клієнтської частини застосунку) використано бібліотеку JavaScript для побудови користувацького інтерфейсу – React.js. Бібліотека використовується для створення односторінкових



додатків, дозволяє робити компоненти інтерфейсу користувача для багаторазового використання. Модуль, що відповідає за визначення стану паркомісць із зображення використовує нейронні мережі. Сьогодні є багато бібліотек з відкритим кодом, що дозволяють створювати та тренувати моделі глибокого навчання. Було обрано бібліотеку PyTorch, що розроблена командою із Facebook. API, що повертає передбачення моделі, створено на мові Python з використанням фреймворку Flask для створення веб-додатків.

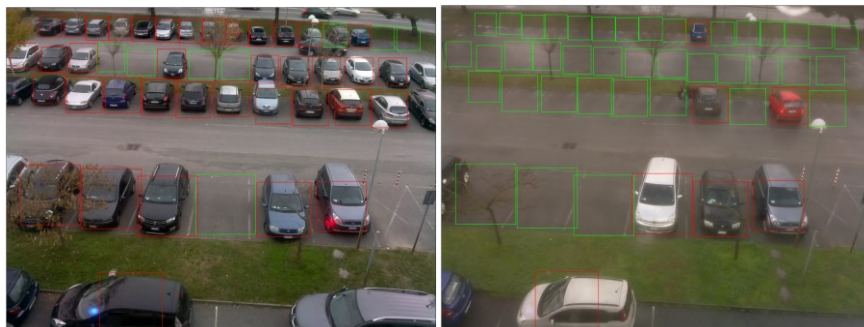


Рис. 3. Результат роботи моделі для вхідних зображень

**Робота системи.** Після запуску системи виконано запит для оновлення стану паркомісць зони паркування № 1, дані про яку надходять з камер відеоспостереження. Як результат, сторінка застосунку оновила і правильно відображає стан паркомісць. Кількість зайнятих місць становить 8, а вільних 38. Відображення повторює карту зони паркування для кращого розуміння користувачем. Інформаційна панель містить додаткову інформацію про номер та тип території для паркування. Іконки машин позначають колір і статус паркомісць для користувача, що ознайомлюється з системою вперше.

Було оглянуто режим системи при періодичному оновленні стану паркомісць джерелами даних. Іншим режимом є в'їзд користувача на територію для паркування, коли у застосунку відображається рекомендоване місце. Якщо номер автомобіля визначено і він знаходиться в базі даних то система відобразить рекомендоване паркомісце як наведено на рис. 4.

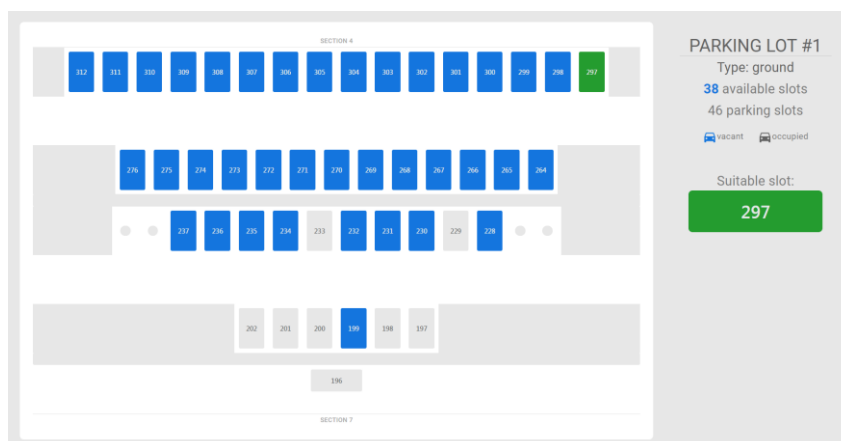


Рис. 4. Інтерфейс системи в режимі відображення рекомендованого місця для паркування

Однак бувають ситуації, що при поганих погодних умовах номер автомобіля не буде розпізнано або в'їзд на територію комплексу може здійснювати автомобіль, що не належить до цього комплексу, в такому випадку системою буде виведено відповідне повідомлення про виключну ситуацію.

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

В результаті виконання роботи було розроблено застосунок для швидкого і зручного пошуку місця для паркування. Створена система “Асистент паркування” складається з трьох модулів та функціонує в двох режимах, орієнтована на житлові комплекси, отримує дані про стан парковок з різних джерел, як камери відеоспостереження та датчики, опрацьовує їх залежно від типу. Практична цінність полягає у можливості використання даної системи для моніторингу стану територій для паркування прилеглих до житлових комплексів, що містять веб-камери, датчики.

#### Література

1. Sperling D., Gordon D. Two billion cars transforming a culture. 2008. P. 9.
2. Брикайло Ю. В 2019 році введено в експлуатацію 775 багатоквартирних будинків площею більше 11 000 000 кв. м / Юрій Брикайло. – 2020.

3. Graham Cookson, Bob Pishue The impact of parking pain in the us, uk and germany. inrix research. 2017. P. 44.
4. ParkSetup - parking guidance systems manufacturer. URL: [http://www.parksetup.com/en\\_us/](http://www.parksetup.com/en_us/)
5. Home - Cleverciti | smart parking for smart cities. URL: <https://www.cleverciti.com>
6. SoftServe is testing a smart parking system. URL: <https://itcluster.lviv.ua/softserve-teste-rozumnu-systemu-parkingu/>
7. Bhandare A., Bhide M. V., Gokhale P., Chandavarkar R. Applications of convolutional neural networks. 2016. Vol. 7. P. 10.
8. Amato G., Carrara F., Falchi F. [et al.] Deep learning for decentralized parking lot occupancy detection. Expert Systems with Applications. 2017. Vol. 72. P. 327–334.
9. Kingma D. P., Ba J. Adam: a method for stochastic optimization. arXiv:1412.6980 [cs]. 2017.

#### References

1. Sperling D., Gordon D. Two billion cars transforming a culture. 2008. P. 9.
2. Brykailo Yu. V 2019 rotsi vvedeno v ekspluatatsiiu 775 bahatokvartyrnykh budynkiv ploshcheiu bilshe 11 000 000 kv. m / Yuriy Brykailo. – 2020.
3. Graham Cookson, Bob Pishue The impact of parking pain in the us, uk and germany. inrix research. 2017. P. 44.
4. ParkSetup - parking guidance systems manufacturer. URL: [http://www.parksetup.com/en\\_us/](http://www.parksetup.com/en_us/)
5. Home - Cleverciti | smart parking for smart cities. URL: <https://www.cleverciti.com>
6. SoftServe is testing a smart parking system. URL: <https://itcluster.lviv.ua/softserve-teste-rozumnu-systemu-parkingu/>
7. Bhandare A., Bhide M. V., Gokhale P., Chandavarkar R. Applications of convolutional neural networks. 2016. Vol. 7. P. 10.
8. Amato G., Carrara F., Falchi F. [et al.] Deep learning for decentralized parking lot occupancy detection. Expert Systems with Applications. 2017. Vol. 72. P. 327–334.
9. Kingma D. P., Ba J. Adam: a method for stochastic optimization. arXiv:1412.6980 [cs]. 2017.

Надійшла/Paper received : 08.09.2022 р.    Надрукована/Printed : 01.11.2022 р.



ПЕДЯШ Володимир

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку

ORCID: [0000-0002-4071-357X](https://orcid.org/0000-0002-4071-357X)e-mail: [vpedyash@gmail.com](mailto:vpedyash@gmail.com)

## МОДЕЛЮВАННЯ КАНАЛУ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАВАННЯ ОТН З КВАДРАТУРНОЮ АМПЛІТУДНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ

В роботі наведено результати дослідження якісних характеристик волоконно-оптичної системи передавання ОТН. Розроблена імітаційна MatLab модель каналу із швидкістю передавання 43,018 Гбіт/с (OTU3) з модуляцією КАМ-4, що дозволяє врахувати лінійні та нелінійні спотворення сигналу в оптичному середовищі розповсюдження, а також параметри функціональних блоків системи. Виконано співставлення отриманих даних з результатами моделювання, отриманих в спеціалізованих програмних продуктах і доведена коректність запропонованої моделі.

Ключові слова: імітаційна модель, спотворення, оптичний канал, квадратурна амплітудна модуляція

PEDYASH Volodymyr

State University of Intellectual Technologies and Communications

## CHANNEL MODELING OF THE OTH OPTICAL TRANSMISSION SYSTEM WITH QUADRATURE AMPLITUDE MODULATION

The rapid development of services for providing broadband access to the Internet and multimedia content delivery services required the widespread use of fiber optic transmission systems (FOTS) for the transmission of digital traffic. The transmitter signal passes through an optical line, which includes optical fiber and optical amplifiers. In the optical fiber, linear and nonlinear distortions are introduced into the signal, and optical amplifiers generate additive noise of amplified spontaneous emission. In this paper, we develop a model of the optical channel of OTH system with QAM modulation, which takes into account linear and nonlinear distortions of the optical propagation medium and additive noise of the amplified spontaneous radiation of optical amplifiers. To obtain accurate results, the method of simulation modeling was used. The block diagram of the developed model contains a transmitter, an optical line and a coherent receiver of the optical signal. The expression for the time form of the electric field intensity of the optical signal at the transmitter output is given. Modeling of the optical fiber was performed by the split step Fourier method. The noise of the amplified spontaneous emission of optical amplifiers was formed in the frequency domain by means of the Fourier transform operation.

The quality of the optical channel was estimated by calculating the average value of the Q-factor of the optical signal at the receiver output. The dependence of the Q-factor from the number of sections of the optical line and the power level of the optical signal was obtained. It is shown that to maximize the quality characteristics of the optical channel, the optimal value of the signal power should be used. The comparison of the obtained results with the data from specialized software products is carried out. Sufficient accuracy of the proposed model was demonstrated. It is recommended to use the developed channel model in the design of new and modernization of existing fragments of networks based on OTH systems with QAM modulation.

Keywords: simulation model, distortion, optical channel, quadrature amplitude modulation

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

Швидкий розвиток послуг з надання широкосмугового доступу до мережі Інтернет та сервісів доставки мультимедійного контенту привів до широкого впровадження волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП) для передавання цифрового трафіку. Сьогодні на ділянці транспортної мережі активно використовуються ВОСП оптичної транспортної ієрархії (ОТН), що дозволяють організувати цифрові тракти із швидкістю від 2,7 Гбіт/с (OTU1) до 111,8 Гбіт/с (OTU4) [1]. Для передачі цифрових потоків OTU1 та OTU2 (10,7 Гбіт/с) застосовують модуляцію по інтенсивності. З метою підвищення завадостійкості ВОСП, цифрові потоки вищих рівнів ієрархії OTU3 (43 Гбіт/с) і OTU4 передаються з використанням методів модуляції, що передбачають когерентний прийом: фазової (ФМ), диференційної фазової (ДФМ) та квадратурної амплітудної (КАМ).

Сигнал передавача транспондера ВОСП проходить через лінійний тракт, що містить оптичне волокно (ОВ) та підсилювачі. Оптичне волокно вносить в сигнал лінійні (дисперсійні) та нелінійні спотворення, а оптичні підсилювачі формують шум посиленого спонтанного випромінювання. Ці ефекти призводять до зменшення відношення сигнал/шум сигналу на вході приймача ВОСП та підвищення ймовірності помилки в оптичному каналі. Тому при проектуванні нових та модернізації існуючих фрагментів транспортних мереж виникає актуальне завдання з визначення якісних характеристик каналу оптичної системи передавання з когерентним прийомом в залежності від конфігурації ВОСП та параметрів оптичного сигналу.

### Аналіз останніх досліджень

Зважаючи на складність фізичних процесів передачі оптичного сигналу по каналу ОТН, коректне вирішення поставленого завдання можливе шляхом застосування одного з методів моделювання систем [2]. Використаний метод дослідження повинен враховувати властивості оптичного сигналу, його спотворення у процесі передачі та взаємодію з шумом. Найбільш розповсюдженими варіантами дослідження систем передачі є методи аналітичного та імітаційного моделювання [3–5], які дозволяють виконувати визначення

параметрів сигналу та окремих блоків системи передачі з метою покращення її якісних характеристик.

Аналітичне моделювання використовується для дослідження систем передачі із середовищем поширення без істотних нелінійних спотворень. Дослідженню робочих параметрів ВОСП, які працюють у лінійному режимі без урахування нелінійних спотворень присвячено низку робіт. У публікаціях [6, 7] виконано узагальнення аналітичних моделей поширення сигналу в системах з прямим детектуванням та когерентним прийомом. Проте отримані аналітичним моделюванням якісні параметри систем передачі є дещо завищеними. Реальні їх значення будуть меншими, оскільки розрахункові вирази не враховують всіх спотворень сигналу в оптичному середовищі розповсюдження. Найбільш важливими є нелінійні спотворення сигналу в оптичному волокні, викликані нелінійністю показника заломлення матеріалу (ефект Керра).

В основу всіх моделей поширення оптичного сигналу в дисперсійному середовищі з нелінійними спотвореннями покладено рівняння Шредінгера [8]. Узагальненого аналітичного вирішення воно немає, тому для отримання результату застосовуються чисельні методи. Найбільш точним з них є метод Фур'є з розщепленням за фізичними факторами.

Перелічені причини зумовили вибір методу імітаційного моделювання у дослідженнях цієї роботи, оскільки він дозволяє врахувати всі спотворення сигналу в середовищі поширення та функціональних блоках станційного обладнання ВОСП.

### Формулювання цілей статті

Метою даної роботи є розробка моделі каналу ВОСП з КАМ модуляцією, що враховує лінійні та нелінійні спотворення оптичного середовища розповсюдження та адитивний шум підсиленого спонтанного випромінювання оптичних підсилювачів.

### Виклад основного матеріалу

При побудові імітаційної моделі слід опиратися на математичну модель сигналу та шуму, а також їх подальшу взаємодію у функціональних блоках системи передавання. В даній роботі виконано дослідження моделі когерентної ВОСП з модуляцією КАМ-4. Її суттєвою перевагою є нульовий пікфактор сигналу передавача (всі точки сигнального сузір'я мають однакову енергію), що зменшує прояв нелінійних спотворень сигналу в ОВ. В подальшому запропонована модель каналу ВОСП може бути модифікована для більшої кількості точок сигнального сузір'я.

Структурна схема моделі каналу (рис. 1) містить передавач, волоконно-оптичний лінійний тракт (ВОЛТ) та приймач оптичного сигналу. Генератори псевдовипадкової послідовності (ГПВП) формують багатопозиційні символи синфазного  $a_i$  та квадратурного  $b_i$  каналів КАМ, які в передавачі перетворюються в модулюючі сигнали NRZ  $a(t)$  та  $b(t)$ . Вихідний сигнал КАМ-4 є сумою двох ортогональних сигналів ФМ-2 з напруженістю електричного поля згідно виразу:

$$E_{\text{пер}}(t) = \frac{\sqrt{P_{\text{ло}}}}{2} \left( \exp \left[ j \left( \omega_{\text{ло}} t + \pi a(t) \right) \right] + \exp \left[ j \left( \omega_{\text{ло}} t + \pi b(t) - \frac{\pi}{2} \right) \right] \right), \quad (1)$$

де  $P_{\text{ло}}$  та  $\omega_{\text{ло}}$  – потужність та частота лазерного випромінювача передавача відповідно.

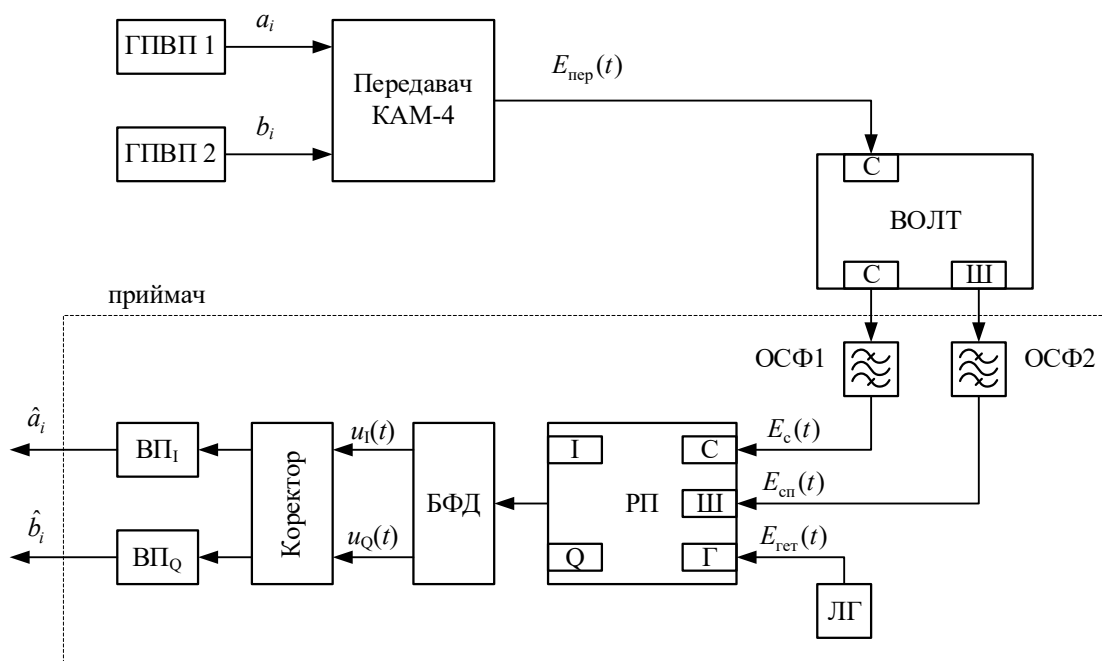


Рис. 1. Структурна схема каналу ВОСП ОТН з КАМ-4

Далі сформований сигнал проходить через блок ВОЛТ, який має вхід та вихід сигналу "С" та окремий вихід "Ш", на якому присутнє коливання  $E_{\text{сп}}(t)$ , що за своїми характеристиками еквівалентне до сумарного шуму спонтанного випромінювання оптичних підсилювачів.

Приймач оптичного сигналу КАМ складається з розділюючого пристрою (РП), балансного фотодетектора (БФД) для оптоелектронного перетворення, коректора та вирішуючих пристроїв (ВП). Приймач також містить лазерний гетеродин (ЛГ), що формує опорне коливання  $E_{\text{гет}}(t)$  для коректної роботи блоків РП та БФД. Для виділення з групового сигналу ВОСП СРК смуги окремого каналу виконується операція фільтрації сигналу та шуму в оптичних смугових фільтрах ОСФ1 та ОСФ2 відповідно.

При визначенні співвідношення сигнал/шум на виході каналу слід виконати аналіз взаємодії коливань лазерного гетеродина та вхідного сигналу  $E_c$  сумісно з шумом оптичних підсилювачів  $E_{\text{сп}}$ . В літературі наводиться ряд стандартних схем для побудови РП та БФД, але в їх основу покладена схема з роботи [9] з чотирма оптичними розгалужувачами 2x2 Р1-Р4 (рис. 2).

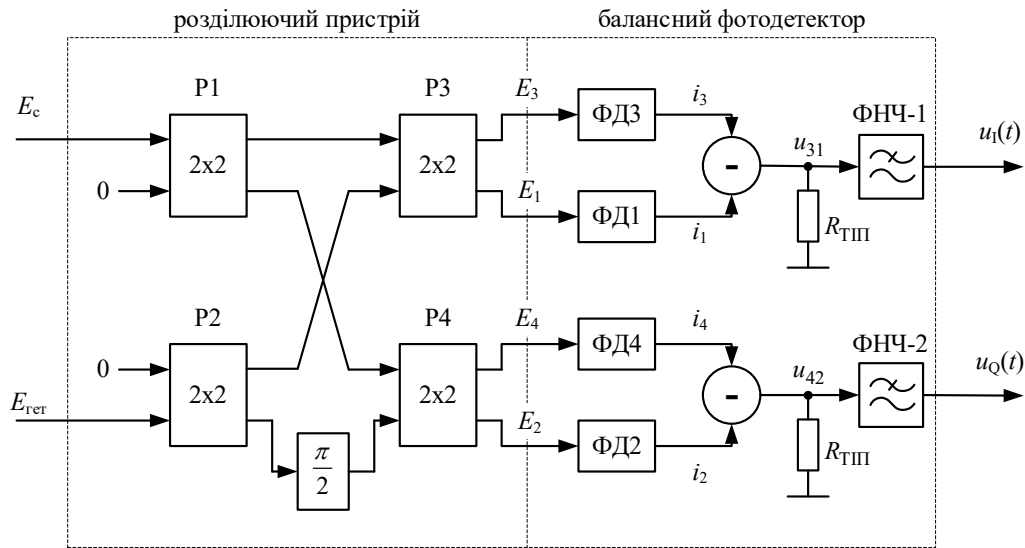


Рис. 2. Функціональна схема приймача когерентної ВОСП

Сигнал на його виході оптичного розгалужувача 2x2 є добутком матриці його передатної функції та вхідного сигналу:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{j}{2} & -\frac{j}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{j}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{j}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_c + E_{\text{сп}} \\ E_{\text{гет}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{j}{2}(E_c + E_{\text{сп}} + E_{\text{гет}}) \\ -\frac{1}{2}(E_c + E_{\text{сп}} - jE_{\text{гет}}) \\ \frac{1}{2}(E_c + E_{\text{сп}} - E_{\text{гет}}) \\ -\frac{1}{2}(jE_c + jE_{\text{сп}} - E_{\text{гет}}) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Вирази для струму на виході фотодіодів ФД1 та ФД3:

$$\begin{aligned} i_1 = R|E_1|^2 &= R \left| -\frac{j}{2}(E_c + E_{\text{сп}} + E_{\text{гет}}) \right|^2 = R \left| -\frac{j}{2} \right|^2 |E_c + E_{\text{сп}} + E_{\text{гет}}|^2 = \\ &= \frac{R}{4} \left[ |E_c|^2 + |E_{\text{сп}}|^2 + |E_{\text{гет}}|^2 + 2|E_c||E_{\text{сп}}|\cos\angle(E_c, E_{\text{сп}}) + \right. \\ &\quad \left. + 2|E_c||E_{\text{гет}}|\cos\angle(E_c, E_{\text{гет}}) + 2|E_{\text{сп}}||E_{\text{гет}}|\cos\angle(E_{\text{сп}}, E_{\text{гет}}) \right], \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} i_3 = R|E_3|^2 &= R \left| \frac{E_c + E_{\text{сп}} - E_{\text{гет}}}{2} \right|^2 = \frac{R}{4} |E_c + E_{\text{сп}} - E_{\text{гет}}|^2 = \\ &= \frac{R}{4} \left[ |E_c|^2 + |E_{\text{сп}}|^2 + |E_{\text{гет}}|^2 + 2|E_c||E_{\text{сп}}|\cos\angle(E_c, E_{\text{сп}}) - \right. \\ &\quad \left. - 2|E_c||E_{\text{гет}}|\cos\angle(E_c, E_{\text{гет}}) - 2|E_{\text{сп}}||E_{\text{гет}}|\cos\angle(E_{\text{сп}}, E_{\text{гет}}) \right], \end{aligned} \quad (4)$$

де  $R$  – чутливість фотодіоду, А/Вт.

Аналізуючи складові у виразах (3) та (4) приходимо до висновку, що вони містять по чотири однакових перших доданки, які компенсуються на виході віднімаючого пристрою. В результаті струм на

виході синфазного каналу матиме тільки два доданки, які є биттями сигнал-гетеродин та шум-гетеродин:

$$i_3 - i_1 = -R|E_c||E_{\text{гет}}|\cos\angle(E_c, E_{\text{гет}}) - R|E_{\text{сп}}||E_{\text{гет}}|\cos\angle(E_{\text{сп}}, E_{\text{гет}}). \quad (5)$$

Далі в балансному фотодетекторі виконується підсилення струму в трансїмпедансному підсилювачі (ТПП), що має опір  $R_{\text{ТПП}}$  і послідовна фільтрація у ФНЧ з імпульсною характеристикою  $h_{\text{фнч}}(t)$ .

Аналогічно, в квадратурному каналі приймача ВОСП отримуємо:

$$i_4 - i_2 = R|jE_c||E_{\text{гет}}|\sin\angle(E_c, E_{\text{гет}}) + R|jE_{\text{сп}}||E_{\text{гет}}|\sin\angle(E_{\text{сп}}, E_{\text{гет}}). \quad (8)$$

В коректорі відбувається формування комплексного сигналу  $i_{\text{вих}}(t) = u_I(t) * h_{\text{фнч}}(t) + ju_Q(t) * h_{\text{фнч}}(t)$  та послідовне відновлення фази і амплітуди прийомного сигналу.

На основі вищенаведеної математичної моделі каналу системи передавання, в середовищі MatLab була розроблена відповідна імітаційна модель. За її допомогою були визначені параметри якості каналу ВОСП ОТУЗ з КАМ-4 (рис. 3) для параметрів функціональних блоків згідно табл. 1. Як вже вказувалося раніше, сигнал КАМ-4 можна розглядати у вигляді суми двох ортогональних сигналів з модуляцією ФМ-2. Тому в даному дослідженні використано метод оцінки якісних характеристик каналу на основі  $Q$ -фактору сигналу на виході коректора [10]. Для перевірки достовірності результатів моделювання була створена контрольна імітаційна модель каналу ВОСП СРК в спеціалізованій програмі Optiwave Optisystem. Оскільки в цій програмі реалізовано два варіанти обробки сигналу у фотодіоді (чисельний та аналітичний), моделювання також проводилося двома вказаними методами.

Таблиця 1

Параметри математичної моделі каналу ВОСП СРК в MatLab

Параметр	Значення	Параметр	Значення
Швидкість передавання $V_{\text{пер}}$	43,018 Гбіт/с	Нелінійність ОВ $n_2$	$2,6 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2/\text{Вт}$
Кількість двійкових символів $N_{\text{симв}}$	10000	Ефективна площа ОВ $A_{\text{эф}}$	$80 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$
Робоча довжина хвилі лазера	1550 нм	Шум-фактор ОП $nf$	6 дБ
Довжина секції $L_{\text{ОВ}}$	100 км	$PSD_{\text{сп}}$	$2,521 \cdot 10^{-16} \text{ Вт/Гц}$
Загасання ОВ $\alpha$	0,2 дБ/км	Смуга пропускання ОСФ	100 ГГц
Дисперсія ОВ $\sigma_{01}$	16,75 пс/(нм*км)	Чутливість ФД $R$	1 А/Вт

Отримані результати показали, що при наявності шумів оптичних підсилювачів ВОЛТ та нелінійних спотворень сигналу в ОВ, залежність  $Q$ -фактору від рівня сигналу передавача  $P_{\text{пер}}$  при фіксованій довжині ВОЛТ в  $N_{\text{секц}}$  має екстремум у вигляді максимуму (рис. 3, а). Це пояснюється тим, що при збільшенні рівня потужності передавача збільшується захищеність від адитивних завад оптичних підсилювачів, але також підвищується і рівень нелінійних спотворень сигналу в ОВ. Збільшення протяжності оптичної лінії призводить до зменшення рівня оптимальної потужності сигналу внаслідок накопичення нелінійних спотворень на кожній секції ВОЛТ.

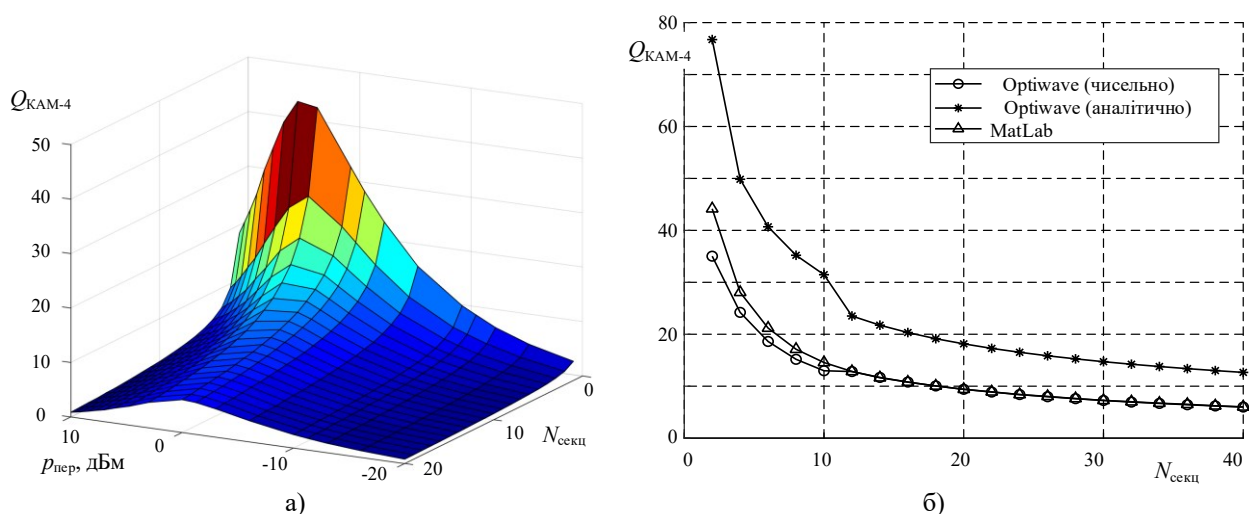


Рис. 3. Характеристики каналу ВОСП СРК ОТУЗ з КАМ-4:

а) залежність  $Q$ -фактору від  $N_{\text{секц}}$  та  $P_{\text{пер}}$ ;

б) максимальне значення  $Q$ -фактора

Дослідження показали, що при збільшенні довжини ВОЛТ, середній показник  $Q$ -фактору сигналу зменшується по експоненціальному закону (рис. 3, б). Результати моделювання в MatLab та Optiwave Optisystem (чисельна модель обробки сигналу в фотодіоді) для протяжних ліній майже збігаються, що підтверджує коректність розробленої імітаційної моделі каналу ВОСП СРК. Аналітична модель фотодіода в Optiwave Optisystem основана на статистичних характеристиках вхідного сигналу та шуму, тому її використання призвело до отримання дещо завищених характеристик якості каналу.

В процесі дослідження також було проведено порівняння потужності биття шум-гетеродин на виході приймача. Як і в попередньому випадку, результати моделювання MatLab досить близькі до чисельної моделі фотодіода в Optiwave Optisystem.

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

В статті запропонована MatLab модель каналу оптичної системи передавання ОТН з квадратурною амплітудною модуляцією. Розроблена її структурна схема та проаналізовано обробку сигналу у відповідних функціональних блоках. Модель враховує параметри оптичного сигналу, його лінійні та нелінійні спотворення в середовищі розповсюдження, а також у функціональних блоках системи передавання. На прикладі оптичного каналу ОТН OTU3 з модуляцією КАМ-4 проведено дослідження його якісних характеристик. Отримана залежність  $Q$ -фактору від рівня потужності сигналу передавача і протяжності лінійного тракту ВОСП. Показано, що підвищення якісних показників каналу зв'язку досягається використанням оптимальної потужності сигналу передавача транспондера. Запропоновану імітаційну модель доцільно використовувати на етапі проектування телекомунікаційних мереж на базі ВОСП з КАМ модуляцією з метою підвищення їх експлуатаційних характеристик. В подальшому розроблену модель доцільно доопрацювати в напрямі використання модуляції з більшою кількістю точок сигнального сузір'я (КАМ-16 і вище).

**Література**

1. Соломенчук В.Д. Оптические транспортные сети / Соломенчук В.Д. – К. : Центр последилоного образования ПАО «Укртелеком», 2014. – 294 с.
2. Стеценко І.В. Моделювання систем : навч. посіб. / Стеценко І.В. – Черкаси : ЧДТУ, 2010. – 399 с.
3. Shaw J.K. Mathematical Principles of Optical Fiber Communication / Shaw J.K. – Blacksburg : Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004. – 103 p.
4. 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.
5. 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.
6. Keang-Po H. Phase-Modulated Optical Communication Systems / Keang-Po H. – Springer, 2005. – 430 p.
7. Seimetz M. High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission / Seimetz M. – Berlin : Springer, 2009. – 252 p.
8. Agrawal G.P. Fiber-Optic Communication Systems / Agrawal G.P. – New York : Wiley-Interscience, 2002. – 580 p.
9. Hoffman D. Integrated optics eight-port 90 degrees hybrid on LiNbO<sub>3</sub> / D. Hoffman; H. Heidrich; G. Wenke; R. Langenhorst; E. Dietrich // Journal of Lightwave Technology. – 1989. – Vol. 7, No 5. – P. 794-798.
10. Kaminow I.P. Optical Fiber Telecommunications IV-A: Components / Kaminow I.P. – Academic Press, 2002. – 876 p.

**References**

1. Solomenchuk V.D. Opticheskie transportnye seti / Solomenchuk V.D. – K. : Centr poslediplomnogo obrazovaniya PАО «Ukrtelekom», 2014. – 294 s.
2. Stetsenko I.V. Modeliuvannia system : navch. posib. / Stetsenko I.V. – Cherkasy : ChDTU, 2010. – 399 s.
3. Shaw J.K. Mathematical Principles of Optical Fiber Communication / Shaw J.K. – Blacksburg : Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004. – 103 p.
4. Pedyash V.V. Vliyanie fazovoy samomodulyacii opticheskogo signala na kachestvo kanalov VOSP SRK / V.V. Pedyash, O.S. Reshetnikova // Naukovi praci UDAZ im. O.S. Popova. – 2010. – № 1. – S. 109-114.
5. Pedyash V.V. Vliyanie nelinejnyh iskazhenij opticheskikh volokon na kachestvo kanalov VOSP SRK / V.V. Pedyash // Naukovi praci UDAZ im. O.S. Popova. – 2010. – № 2. – S. 70-74.
6. Keang-Po H. Phase-Modulated Optical Communication Systems / Keang-Po H. – Springer, 2005. – 430 p.
7. Seimetz M. High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission / Seimetz M. – Berlin : Springer, 2009. – 252 p.
8. Agrawal G.P. Fiber-Optic Communication Systems / Agrawal G.P. – New York : Wiley-Interscience, 2002. – 580 p.
9. Hoffman D. Integrated optics eight-port 90 degrees hybrid on LiNbO<sub>3</sub> / D. Hoffman; H. Heidrich; G. Wenke; R. Langenhorst; E. Dietrich // Journal of Lightwave Technology. – 1989. – Vol. 7, No 5. – P. 794-798.
10. Kaminow I.P. Optical Fiber Telecommunications IV-A: Components / Kaminow I.P. – Academic Press, 2002. – 876 p.

Надійшла/Paper received : 15.08.2022 p.    Надрукована/Printed : 01.11.2022 p.

МИХАЙЛОВА Ніна

Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, м. Сєвєродонецьк

ПРИВАЛА Валерій

Хмельницький національний університет

ORCID ID: [0000-0003-3465-6369](https://orcid.org/0000-0003-3465-6369)[pva2012hnu@gmail.com](mailto:pva2012hnu@gmail.com)

## ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР В УМОВАХ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА СПЕЦІАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ІЗОЛЮЮЧИХ КОСТЮМІВ

*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, що можуть бути використані для роботи слюсарів-апаратників хімічних виробництв. В результаті досліджень встановлено, що найбільш стійкими до впливу низьких температур в умовах постійних динамічних навантажень є матеріали українського виробництва.*

*Ключові слова: хімічна промисловість, захисний одяг, низькі температури, агресивне середовище, ізолюючий костюм.*

MIHAILOVA Nina

Volodymyr Dahl East National University

PRIVALA Valerii

Khmelnytsky National University

## STUDY OF THE INFLUENCE OF LOW TEMPERATURES IN DYNAMIC CONDITIONS ON SPECIAL MATERIALS FOR INSULATING SUITS OF CHEMICAL ENTERPRISES

*Domestic chemical industries urgently need the creation of special high-class protective clothing to allow working in extreme conditions without endangering the lives and health of workers. 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. different concentrations. That is, it is about the creation of special clothing with the necessary level of provision 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.*

*Preparation equipment and fitters for cleaning closed containers for transportation and storage of aggressive environments can simultaneously be exposed not only to mineral acids, alkalis, solutions of salts based on them, but also to the remains of liquid ammonia, the evaporation of which occurs when the temperature drops, which leads to the primary destruction of the polymer coating materials of 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 in an insulating suit, there was a need to study such an indicator as the resistance of materials to dynamic loads in conditions of low temperatures. Research was conducted on samples of materials with a polymer coating, which belong to the class of artificial leathers for special purposes from both foreign and domestic manufacturers.*

**Key words:** chemical industry, protective clothing, low temperatures, aggressive environment, insulating suit.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

На підприємствах хімічної промисловості проблема забезпечення спеціальним одягом, що надійно захищає від агресивних факторів, особливо гостро відчутна в процесі виконання технологічних операцій на апаратах і установках, де вплив речовин, що входять до комплексу небезпечних і шкідливих виробничих факторів (НШВФ) може спричинити не тільки травми та хімічні опіки, але й призвести до летальних наслідків. До таких виробничих об'єктів належать ємності різних геометричних форм та обсягів, призначених як для проведення технологічних процесів та зберігання, так і для транспортування хімічної продукції (рідин). Проведення ремонтно-технологічних робіт у ємностях визначені як небезпечні, тому захист працюючих у цих умовах має бути високоефективним і чітко організованим.

Вітчизняні хімічні виробництва гостро потребують створення спеціального одягу високого класу захисту, щоб дозволило працювати в екстремальних умовах, не наражаючи на небезпеку життя і здоров'я працюючих. В попередніх публікаціях [1, 2] було 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, а значить і впливу мінеральних кислот, лугів, аміаку, розчинів солей, тощо різних концентрацій. Тобто йдеться про створення спеціального одягу з необхідним рівнем забезпечення та збереження таких основних захисних показників як хімічна стійкість (хемостійкість) і непроникність матеріалу при збереженні герметичності виробу в цілому.

### Аналіз досліджень та публікацій

Сучасний світовий ринок з розробки і реалізації виробничого захисного одягу для використання в різноманітних шкідливих умовах праці, постійно розвивається і періодично пропонує нові конструктивні і технічні рішення [4–8]. Проте переважна більшість такого одягу спрямована на створення захисту тільки від вологи та переохолодження. Що стосується комплексного захисту від впливу цілої низки хімічно агресивних речовин, які присутні на хімічних підприємствах, то створення такого одягу вимагає особливих матеріалів і відповідних методів для роботи з ними.

На підставі проведеного аналізу роботи [9, 10], в яких розглянуто класифікацію методичного підходу до процесу вибору спеціальних матеріалів, а також її функціонально-логічної схеми про послідовність вивчення їх захисних властивостей та з урахуванням вихідних вимог, пропонується провести дослідження, мета яких полягає у експериментальній оцінці проб матеріалів із полімерним одно- або двостороннім покриттям на тканин основі (аналог штучної шкіри) в умовах низьких температур.

Слід зазначити, що матеріали з полімерним покриттям, до яких відносять деякі марки штучної шкіри спеціального призначення, мають наступні особливості, які необхідно враховувати при проектуванні ізолюючих костюмів:

- матеріали з полімерним покриттям виключають теплову обробку під час їх використання;
- унеможливується використання деяких видів швів, а фіксація припусків на шви можлива тільки шляхом настрочування (або розстрочування) їх припусків;
- деякі матеріали з полімерним покриттям є нестійкими до дії низьких температур, або до перепаду температур за короткий проміжок часу;
- усі шви ниткового з'єднання у одязі із зазначених матеріалів підлягають обов'язковій герметизації;
- значна ціна на даний сегмент штучних шкір спеціального призначення спричиняє зростання собівартості виготовлення захисних костюмів з них [4, 6, 7, 11, 12].

Зазвичай, в таких спеціальних матеріалах за ткану 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 [13].

### Формулювання цілей статті

**Метою роботи** є апаратники підготовки та слюсарі з очищення закритих ємностей для транспортування та зберігання агресивних середовищ одночасно можуть піддаватися впливу не тільки мінеральних кислот, лугів, розчинів солей на їх основі, а також залишкам 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<sup>0</sup>С) контактної поверхні матеріалу та руйнування полімерного покриття, особливо в процесі роботи (в динаміці), 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 [3], виникла потреба у вивченні в першу чергу такого показника, як стійкість матеріалів до згинання в умовах низьких температурах. Це пов'язано із тим, що захисні ізолюючі костюми можуть піддаватись не тільки статичним, а й активним динамічним навантаженням під час їх експлуатації в умовах хімічних виробництв.

### Викладення основного матеріалу

Для проведення досліджень було обрано матеріали зарубіжного та вітчизняного виробництва, які відносяться до розряду штучних шкір спеціального призначення, що різняться між собою природою полімерного покриття, товщиною, жорсткістю, стійкістю до тертя, тощо (табл. 1).

Таблиця 1

**Деякі фізико-механічні характеристики спеціальних досліджуваних матеріалів із полімерним покриттям**

Найменування матеріалу/ назва фірми-виробника	Товщина проби, мм	Поверхнева щільність, г/м <sup>2</sup>	Жорсткість при згині, сН		Розривне навантаження смужки розміром 50 x 100 мм, Н		Роздиральне навантаження смужки розміром 50 x 100 мм, Н	
			осн.	пітк.	осн.	пітк.	осн.	пітк.
«Треллеборг»	0,5	510,0	4,8	3,2	1230,0	1200,0	64,0	60,0
«Дрегер»	0,8	628,0	6,2	4,3	1642,0	1539,0	53,0	51,0
«ТСК-15»	0,3	420,0	1,9	2,3	552,0	504,0	29,0	27,0
«ПМБК»	0,4	563,0	3,9	4,1	539,0	408,0	27,0	22,0
«БЦК»	0,35	479,0	5,6	3,8	931,0	514,0	43,0	43,0
«ІЗК»	0,5	550,0	9,8	9,8	500,0	500,0	25,0	25,0



Дослідження проб зазначених матеріалів (табл. 1) показало, що фірми «Треллеборг» (Швеція) та «Дрегер» (Німеччина) при виготовленні власних ізолюючих костюмів застосовують практично ідентичні за фізико-механічними, експлуатаційними та захисними властивостями штучні шкіри на тканинній основі, які відносяться до еластоштучшкіри.

Серед зазначених полімерів, як показали лабораторні дослідження, найбільш хімічно стійким полімерним покриттям до дії мінеральних кислот, лугів та аміаку є «вітон», що є композитом на основі фторованого поліетилену. Розривні характеристики зазначених матеріалів дуже високі і при розмірі смужки 50 x 100 мм вони коливаються від 1230 Н до 1642 Н по основі і від 1200 Н до 1539 Н по пітканню. Поверхнева щільність проб змінюється від 510 г/м<sup>2</sup> до 628 г/м<sup>2</sup>, товщина – від 0,5 мм до 0,8 мм, а жорсткість при вигині на основі знаходиться в межах 4,8 – 6,2 сН і по пітканню 3, 2 - 4,3 сН (табл. 1).

Щодо матеріалів вітчизняного виробництва таких як «ТСК-15», «ПМБК-Н», «БЦК» та інші, які належать до асортименту спеціальних штучних шкір особливого призначення, то вони також виготовляються на тканинній основі та з двостороннім полімерним покриттям. Тканину основи для них виготовляють зі 100% поліамідних і бавовняних волокон (або їх сумішей у різному відсотковому співвідношенні), переважно полотняним переплетенням ниток. Як полімерне покриття застосовують бутилові, ізобутилові, неопренові та інші каучуки, або їх суміші. Деякі фізико-механічні характеристики при їх порівнянні показують, що товщина проб спеціальних матеріалів, у разі нанесення двох штрихів на лицьову та виворотну сторону, змінюється від 0,3 мм до 0,4 мм. Поверхнева щільність матеріалів змінюється від 420 г/м<sup>2</sup> для ТСК-15, до 479 г/м<sup>2</sup> для «БЦК» і до 563 г/м<sup>2</sup> для «ПМБК-Н». Що стосується розривних характеристик проб матеріалів розміром 50x100 мм, то найбільше навантаження по основі та качку витримують проби матеріалу «БЦК» – 913 Н і 514 Н відповідно, а найменшу – проби матеріалу «ПМБК-Н», тобто 539 Н основі та 408 Н по пітканню (табл. 1).

Особливу увагу слід звернути і на випробування спеціального вітчизняного матеріалу «ІЗК», розробленого на вітчизняному ВАТ «Лисичанський завод РТИ» за вихідними вимогами відділу розробки та виготовлення спеціального одягу (ВРВСО) ДержНДІТБХВ (м. Сєверодонецьк). Зазначений матеріал є штучною шкірою на тканинній основі з двостороннім полімерним покриттям (ТУ У 25.1-05389942.017-2003) з основою з тканини полотняного переплетення з поліамідних ниток із двостороннім покриттям полімерною композицією СКЕПТ-40 (етилєнпропіленовий каучук). Даний матеріал має товщину 0,5 мм при поверхневій щільності 550 г/м<sup>2</sup>. Розривні характеристики проб матеріалу «ІЗК» як по основі, так і по пітканню (в поздовжньому та поперечному напрямку відповідно) розміром 50 x 100 мм рівномірні і становлять 500 Н, а величина зв'язку полімерного покриття з тканинною основою знаходиться в межах 0,4 Н/мм, що, як свідчить практика застосування ізолюючих костюмів, є достатньою. Крім цього, даний матеріал є повітро- та водонепроникним.

Стійкість при згинанні зазначених спеціальних матеріалів під впливом низьких температур досліджувалася згідно з ГОСТ 20876-75 [12] на приладі МІРМ, відповідно з яким кількість проб для проведення випробувань має бути не менше шести у кожному вибраному напрямку. Розміри проби по довжині повинні дорівнювати  $90 \pm 1$  мм, а по ширині  $60 \pm 1$  мм. Температура для проведення експериментів знаходилася в межах від - 10°C до - 50°C з інтервалом у - 10°C.

Результати експериментів, які отримані при дії температури -10°C, засвідчили високі показники стійкості проб до складних ромбоподібних вигинів. Наприклад, матеріал фірми «Треллеборг» (Швеція) при постійному впливі зазначеної температури зруйнувався за 32400 циклу, матеріал фірми «Дрегер» (Німеччина) зруйнувався за 40352 цикли, матеріал ТСК-15 зруйнувався за 18000 циклів, матеріал «БЦК» зруйнувався, в той час як проба матеріалу «ІЗК» зруйнувалася за 51327 циклів (рис. 1).

При зниженні температури до -20°C, показники згинання різко змінилися. Наприклад, проби матеріалу фірми «Треллеборг» зруйнувалися за 15755 циклу, проби матеріалу фірми «Дрегер» зруйнувалися за 25350 циклів, проби матеріалу «ПМБК-Н» зруйнувалися за 1845 матеріалу «ІЗК» зруйнувалися за 40529 циклів. Що ж стосується проб матеріалів «ТСК-15» і «БЦК», то перші з них зруйнувався за 7266 циклів, а другий – за 6000 циклів (рис. 1, поз. 4 та поз. 5). Істотне зменшення показників згинальної всіх без винятку проб спеціальних матеріалів настає після зниження температури випробувальної камери до -40°C. Так, проби матеріалу фірми «Треллеборг» зменшили показник стійкості до ромбоподібних вигинів на 93,5% і зруйнувалися за 2120 циклів (рис. 1, поз. 1), а проби фірми «Дрегер» – на 88,5% і також зруйнувалися через 4654 цикли складних деформацій (рис. 1, поз. 2). Аналогічні висновки можна зробити і щодо проб матеріалів «ПМБК-Н» і «ТСК-15», оскільки матеріал «БЦК» такого навантаження вже не витримав (рис. 1, поз. 5), тобто зменшення згинальної стійкості на 87,7% і 96,4% відповідно з руйнуванням зразків за 3548 та 652 цикли (рис. 1, поз. 3 та поз. 4).

Що ж до проб матеріалу «ІЗК», то зазначена температура (- 40°C) також сприяє їх руйнуванню за 23710 циклів (53,8 %), а при контакті з -45°C, зразки зруйнувалися за 20405 циклів (рис. 1, поз. 6).

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

Отже, якщо врахувати необхідний показник стійкості при згинанні згідно з вихідними вимогами, а це 20000 циклів при температурі -40°C, то зазначеним нормам відповідає лише спеціальний матеріал вітчизняного виробництва «ІЗК», де в якості полімерного покриття застосовували сумішеву композицію СКЕПТ-40. Інші матеріали, характеристики яких представлені в таблиці 1, після впливу температури -30°C



практично стають непридатними для виготовлення ізолюючих костюмів через недостатню морозостійкість в динамічних умовах випробувань (рис. 1). Тому подальші дослідження планується проводитися саме з пробами матеріалу «ІЗК» та з деякими іншими (на вибір) зразками (табл. 1) з метою порівняння їх показників при впливі НШВФ.

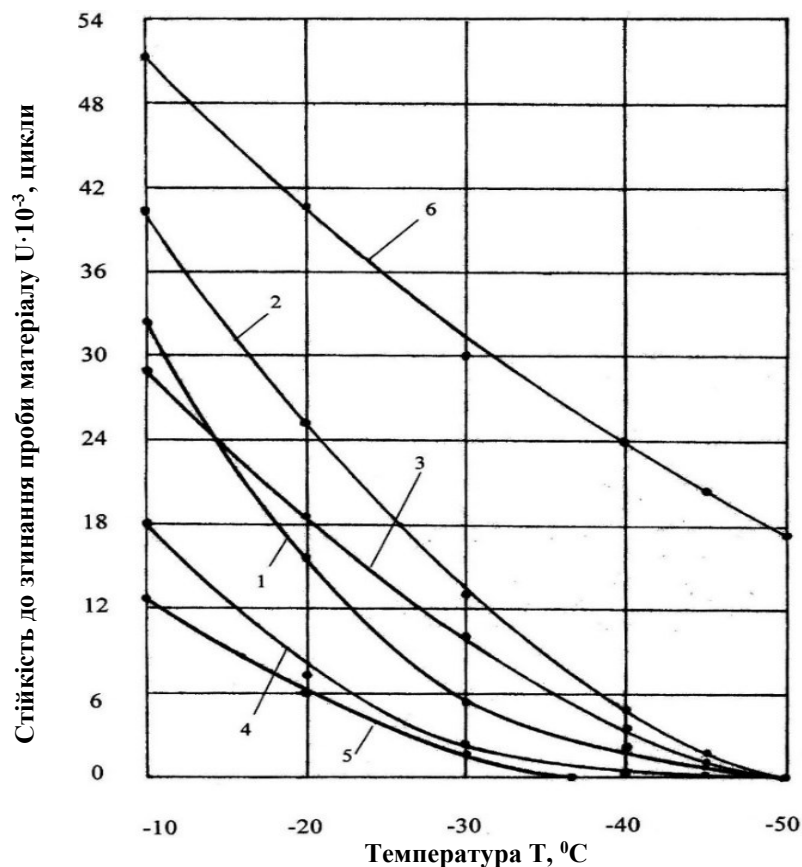


Рис. 1. Залежність згинання стійкості від низьких температур наступних проб спеціальних матеріалів: 1 – «Треллеборг»; 2 – «Дрегер»; 3 – «ПМБК-Н»; 4 – «ТСК-15»; 5 – «БЦК»; 6 – «ІЗК»

### 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. – № 1. – С. 124–129.
2. Михайлова Н.В. Обґрунтування і розробка конструкції ізолюючого костюму для робітників хімічної промисловості / Н.В. Михайлова, В.О. Привала // Вісник Хмельницького національного університету. – 2021. – № 6. – С. 188–195.
3. Обґрунтування вибору показників для вивчення і оцінки захисних властивостей спеціальних матеріалів ізолюючого костюма працівників хімічної промисловості // Вісник Хмельницького національного університету. – 2018. – № 5. – С. 50–54.
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. Galiyeva 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. Issue 8. P. 73–74.
6. Overalls and footwear with protection against chemicals. URL: <https://forma-odezhda.ru/encyclopedia/specodezhda-i-obuv-s-zashtoj-ot-himicheskikh-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. Ukrprofzashchita. URL: <http://ukrprofzahyst.com.ua/ru/odezhda-khimzashchy>.
9. Mychko A.A., Ochurenko V.I. A systematic approach to the problem of choosing materials for personal protective equipment. Izvestiya Vuzov. Light industry technology. 1988. 1. p. 26–30.
10. Михайлова Н.В. Особливості оцінювання захисних властивостей матеріалів для ізолюючого костюма працівників хімічної промисловості / Н.В. Михайлова, В.О. Привала // Вісник Хмельницького національного університету. – 2019. – № 2. – С. 70–76.
11. Захисний костюм Dräger CPS 5800 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [https://www.draeger.com/ru\\_ru/Applications/Products/Personal-Protection-Equipment/Protective-Clothing/Gas-Tight-Suits/CPS-5800](https://www.draeger.com/ru_ru/Applications/Products/Personal-Protection-Equipment/Protective-Clothing/Gas-Tight-Suits/CPS-5800).
12. Костюми захисні в Україні [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://prom.ua/Kostyumu->

izoliruyuschie.html.

13. 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)

#### References

1. Mykhailova N.V. Doslidzhennia materialiv, yaki vykorystovuiut dlia vyhotovlennia zakhysnoho odiahu robitnykiv-aparatnykiv ta sliushariv khimichnoi promyslovosti / N.V. Mykhailova, V.O. Pryvala // Herald Khmelnytskyi National University. – 2018. – № 1. – S. 124–129.
2. Mykhailova N.V. Obgruntuvannia i rozrobka konstrukttsii izoliuiuchoho kostiumu dlia robitnykiv khimichnoi promyslovosti / N.V. Mykhailova, V.O. Pryvala // Herald Khmelnytskyi National University. – 2021. – № 6. – S. 188–195.
3. Obgruntuvannia vyboru pokaznykiv dlia vyvchennia i otsinky zakhysnykh vlastyvostei spetsialnykh materialiv izoliuiuchoho kostiuma pratsivnykiv khimichnoi promyslovosti // Herald Khmelnytskyi National University. – 2018. – № 5. – S. 50–54.
4. Types of overalls for protection against chemically aggressive environments [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <https://pcgroup.ru/blog/vidy-specodezhdy-dlya-zaschity-ot-himicheski-agressivnyh-sred>.
5. Galiyeva 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. Issue 8. P. 73–74.
6. Overalls and footwear with protection against chemicals. URL: <https://forma-odezhda.ru/encyclopedia/specodezhda-i-obuv-s-zaschitoj-ot-himicheskikh-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. Ukrprofzashchita. URL: <http://ukrprofzahyst.com.ua/ru/odezhda-khimzaschity>.
9. Mychko A.A., Ochurenko V.I. A systematic approach to the problem of choosing materials for personal protective equipment. Izvestiya Vuzov. Light industry technology. 1988. 1. r. 26–30.
10. Mykhailova N.V. Osoblyvosti otsiniuvannia zakhysnykh vlastyvostei materialiv dlia izoliuiuchoho kostiuma pratsivnykiv khimichnoi promyslovosti / N.V. Mykhailova, V.O. Pryvala // Herald Khmelnytskyi National University. – 2019. – № 2. – S. 70–76.
11. Zakhysnyi kostium Dräger CPS 5800 [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : [https://www.draeger.com/ru\\_ru/Applications/Products/Personal-Protection-Equipment/Protective-Clothing/Gas-Tight-Suits/CPS-5800](https://www.draeger.com/ru_ru/Applications/Products/Personal-Protection-Equipment/Protective-Clothing/Gas-Tight-Suits/CPS-5800).
12. Kostiumy zakhysni v Ukraini [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <https://prom.ua/Kostyumi-izoliruyuschie.html>.
13. ГОСТ 20876-75. Кожа искусственная. Метод определения морозостойкости в динамических условиях [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : [https://ohranatruda.ru/ot\\_biblio/standart/181960](https://ohranatruda.ru/ot_biblio/standart/181960)

Надійшла/Paper received : 05.10.2022 р. Надрукована/Printed : 01.11.2022 р.

БОЛОТІНА Вікторія

Житомирський національний політехнічний університет

ORCID: [0000-0002-5122-8879](https://orcid.org/0000-0002-5122-8879)[kik.pvv@ztu.edu.ua](mailto:kik.pvv@ztu.edu.ua)

## АНАЛІЗ НАЯВНИХ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ НАУКОВОЇ ДІЯЛЬНОСТІ СПІВРОБІТНИКІВ ВИЩИХ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДІВ

У статті наведено аналіз існуючих систем підтримки наукової діяльності співробітників вищих навчальних закладів. У сучасному світі в умовах дистанціювання освіти, науки та інших сфер людської діяльності, спричинених пандемією та війною, виникає потреба у якісному та багатofункціональному програмному забезпеченні. На основі проаналізованих систем варто зазначити, що функціонал такого типу ресурсів достатньо різноманітний та дозволяє повністю підтримувати організацію та проведення конференції.

Ключові слова: вебсистема, вебтехнології, вебплатформа.

BOLOTINA Viktoriia  
Zhytomyr Polytechnic State University

## ANALYSIS OF THE AVAILABLE SYSTEMS OF SUPPORTING THE SCIENTIFIC ACTIVITIES OF EMPLOYEES OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS

The article provides an analysis of the existing systems of support for the scientific activity of employees of higher educational institutions. In today's world, in the conditions of the distancing of education, science and other industry of human activity caused by the pandemic and war, there is a need for high-quality and multifunctional software. For scientists at all stages of their activity, it is necessary to use modern web technologies and software. Nowadays, during the full-scale war between Russia and Ukraine, higher education institutions are actively practicing the implementation of web technologies for organizing not only online learning of students and pupils, but also implementing distance work of employees of the higher education institutions, a large part of which is scientific work. In the article we analyze the Open Conference System and the Easy Chair for organization and holding scientific conferences. There are a large number of systems that can perform tasks related to the organization of conference stages, materials management and other important tasks. During the research, it was determined that conference support systems are divided into several types depending on the functionality provided to the user. When people choose a web system for organizing scientific activities of employees, the main criteria is the availability of the resource, which includes convenient functionality, easy start in work, protection of personal materials and personal data. We have determined that among the analyzed systems there is a lack of functionality that would allow us to conduct statistics of employees. Systems for conducting conferences should be expanded in the field of supporting the results of scientific activity.

Keywords: websystem, web technology, web platform.

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

У наш час використання сучасних інформаційних технологій набуває широких масштабів. Високого рівня інформатизації також набула і наукова робота співробітників закладів вищої освіти (ЗВО). В умовах пандемії Covid-19, що розпочалася з 2020 року, заклади освіти України та світу змушені були перейти на дистанційне навчання. На момент початку організації дистанційного навчання, віддаленої роботи працівників закладів освіти, організації зворотного зв'язку між студентами та викладачами, між учнями та вчителями свої ресурси надавали всесвітні компанії, такі як Google, Microsoft тощо. Процес дистанційного навчання став буденністю практично для всіх закладів освіти не лише України, а й за її межами. Для організації, на перший погляд, такого складного і багаторівневого процесу, як дистанційне навчання, за участі великої кількості суб'єктів із великою кількістю потреб та вимог, рішенням стали онлайн сервіси для проведення конференцій та вебінарів. Також вебтехнології стали вагомим інструментом у науковій роботі співробітників ЗВО, зокрема в підготовці, проведенні та організації наукових конференцій. На даний час, у період повномасштабної війни Росії проти України, ЗВО останньої активно практикують впровадження веб-технологій для організації не лише дистанційного навчання студентів та учнів, а й реалізують дистанційну роботу співробітників ЗВО, великою частиною якої є наукова робота.

Для науковців на всіх етапах їх діяльності невід'ємним є використання сучасних вебтехнологій, мережа Інтернет стала масштабним майданчиком для вирішення багатьох проблем сучасної науки та організації різних етапів наукової діяльності. Пошук наукових джерел та літератури в наш час реалізований максимально зручно, удосконаленим за рахунок використання систем відкритого пошуку публікацій на різні тематики та є впорядкованим згідно сфер наукових досліджень. Дослідники усього світу можуть вільно спілкуватися між собою, використовуючи Інтернет через спеціалізовані площадки або соціальні мережі. Зникають кордони і у співпраці між людьми, що знаходяться в різних частинах світу і мають можливість у режимі реального часу ділитися результатами власних досліджень. Для співробітників ЗВО важливим є збереження результатів своєї наукової діяльності, ведення статистики, визначення рівня цитування, формування звітів, що є також неможливим без використання вебтехнологій.

Основним і найважливішим процесом наукової діяльності співробітників ЗВО є організація, проведення та участь у наукових конференціях. Процес проведення конференцій у минулому був досить об'ємним важким, багаторівневим, реалізація якого потребувала багато часу, засобів, людських ресурсів.

Найважливішим кроком у спрощенні організації конференцій стала розробка систем управління конференціями. В функціоналі яких передбачається автоматизація та підтримка усіх процесів, що значно полегшують роботу авторів, рецензентів, організаторів. Завдяки таким системам автори і рецензенти можуть

відслідковувати процес надходження їх матеріалів у будь-який час і в будь-якому місці, за умови наявності підключення до мережі Інтернет.

Окрім організації надходження матеріалів та їх рецензування важливим аспектом є і підтримка наукової діяльності користувачів таких систем. Ключовими функціями для підтримки наукової діяльності співробітників ЗВО залишається можливість обміну даними з колегами, введення наукової звітності, відслідковування цитування власних джерел та підтримка участі у конференціях. В умовах тривалого процесу дистанційного навчання науковці стикаються з проблемою віддаленого управління конференціями. Організація процесу включає в себе пошук високотехнологічних, багатофункціональних систем, з можливостями, що здатні повністю повторити, або навіть покращити роботу організаторів та учасників конференцій в онлайн форматі. З появою електронних систем усі науковці виконали перехід до здійснення цифрового управління конференціями, досягнувши високих результатів із мінімальними затратами часового та людського ресурсу, зі зниженням експлуатаційних та комунікаційних витрат, зберігаючи при цьому високу якість роботи з документами та матеріалами конференцій.

Отже, система управління конференціями – програмне забезпечення для організації та адміністрування наукової конференції. Вона допомагає головам комісій, організаторам та авторам доповідей в їх науковій діяльності.

Для визначення основного функціоналу та алгоритмів роботи майбутньої системи підтримки наукової діяльності варто провести аналіз наявних систем.

### Аналіз останніх досліджень.

З дистанціюванням освітнього процесу, а також наукової роботи студентів та працівників вищих навчальних закладів виникла потреба у інформатизації та впровадженні онлайн сервісів у процес навчання та наукової роботи. У праці О. Глазунової, О. Кузьмінської, Т. Волошиної описується компетентнісний підхід до формування та розвитку професійних і особистісних компетентностей студентів університету засобами наукових е-конференцій [1]. Д. Морозов, М. Алійник, В. Зайцев у своїй роботі описують застосування технологій Java, Flash та WebRTC для побудови засобів обміну відео та аудіо повідомлень з використанням браузерного програмного забезпечення [2], що є одним із кроків розширення можливостей доступних наразі технологій для організації дистанційного навчання та наукової діяльності.

Для віддаленої організації та управління науковими конференціями широко використовується така система, як Open Conference System, про використання якої при реалізації сайту OPENEDU.KUBG.EDU.UA було описано в праці І. Степури. Автор продемонстрував, що застосування OCS в реальних умовах, а саме на базі науково-дослідної лабораторії Київського університету імені Бориса Грінченка, показало, що система цілком працездатна [3].

Andrew Glover у своїй роботі продемонстрував як у рамках дистанціювання науковців під час пандемії Covid-19 почали активно впроваджуватись системи для проведення онлайн конференцій, що значно розширило можливості для науковців, незалежно від їх локації [4].

В. Шевченко описує використання університетами України різного типу платформ для організації дистанційної роботи викладачів та студентів в умовах пандемії [5].

**Метою статті є** проведення порівняльного аналізу наявних систем для організації та проведення наукових конференцій, задля визначення основної потреби у функціоналі майбутньої вебсистеми підтримки наукової діяльності співробітників ЗВО.

**Викладення основної частини.** Процес організації конференцій є досить тривалим та багатоетапним. До етапів організації конференції відноситься [6]:

1. Визначення термінів, тематики, переліків напрямків, що будуть розглядатися на науковому заході.
2. Організація роботи вебсайту підтримки наукової конференції.
3. Формування та надсилання інформаційного повідомлення.
4. Забезпечення незалежного рецензування поданих доповідей (тез доповідей) та перевірка поданих матеріалів на наявність ознак академічного плагіату та інших порушень академічної доброчесності.
5. Проведення конференцій у межах робочих секцій.
6. Публікація матеріалів.

Існує велика кількість систем, які можуть виконувати задачі, пов'язані з організацією етапів конференцій, управлінням матеріалами та іншими важливими завданнями. Під час проведення дослідження було визначено, що системи підтримки конференцій поділяються на декілька типів залежно від функціоналу, що надається користувачеві. Першим типом таких систем є ті, які дозволяють створювати свою власну систему на їх базі, встановивши відповідне програмне забезпечення. Іншим варіантом є системи, що дають можливість організувати конференцію, використавши їх послуги.

До ключових функцій, що надаються такими системами можна віднести:

1. Подання авторами матеріалів.
2. Рецензування членами програмного комітету.
3. Додавання документів програмним комітетом.
4. Відстеження обігу матеріалів на різних етапах.
5. Проведення вебінарів.
6. Повідомлення про результат рецензування та прийом матеріалів.

Основною функцією вебсистеми підтримки конференцій є створення своєрідного каналу зв'язку між авторами та організаторами. Кожна із систем передбачає створення облікового запису автора, що дає можливість додавати та змінювати матеріали конференції, отримувати зворотній зв'язок, відслідковувати хід конференції. Кожна з платформ перед початком роботи передбачає авторизацію в системі, що дозволяє

забезпечити захист даних. Також в особистому кабінеті автора відображаються дані про стан проходження рецензування та хід матеріалів.

Першою системою, яку варто розглянути, є **Open Conference System. OCS** [7] – безкоштовна вебплатформа, що являється інструментом для організації, проведення та розміщення матеріалів науково-практичних конференцій.

Основною метою створення OCS було просування ідеї відкритого доступу до результатів наукових конференцій. Процес роботи з системою починається зі встановлення її на локальному сервері. До технічних вимог встановлення OCS важливо використовувати PHP специфікації 4.2.x або більше (Microsoft IIS вимагає PHP 5.x), для роботи з базою даних MySQL 3.23.23 або вище, або PostgreSQL 7.1 і вище. Сервер Apache 1.3.2x або більше, 2.0.4x або більше (або Microsoft IIS 6) [8].

Open Conference System надає можливість створення сайту конференції. На сайті передбачається дистанційна реєстрація учасників конференції, електронна подача дублікатів паперових документів. У процесі роботи в електронному кабінеті передбачена можливість редагування вже поданого контенту. Також на сайті реалізовано модуль для публікації матеріалів конференції та доповідей, реалізовано їх пошук, цитування та подальша індексація. За бажанням є можливість проведення онлайн-дискусій учасників вже після офіційного проведення конференції.

На базі Open Conference System велика кількість ЗВО реалізувала проведення конференції, розгорнувши свої веб сайти, використовуючи надані можливості OCS (рис. 1).

Рис. 1. Використання OCS Тернопільським національним медичним університетом

Відповідно до технічних характеристик, Open Conference System – це вебплатформа з відкритим програмним кодом, реалізована на мові PHP. OCS відповідає стандартам політики відкритого доступу та забезпечує якісну індексацію метаданих опублікованих матеріалів.

Завдяки реалізованій демо-версії системи організатори можуть бачити попередній вигляд продукту ще до запуску. Інтерфейс системи є досить зручним, вона легка у встановлення та дозволяє новим користувачам з легкістю почати роботу, завдяки представленій покроковій інструкції. OCS має мультимовний інтерфейс. Система підтримує функцію автоматичного надсилання документів на рецензування, також є можливість обговорення представлених матеріалів між рецензентами.

OCS також допомагає керувати людьми, які беруть участь в організації конференції, включаючи відстеження роботи організаційного комітету, рецензентів і авторів, виконує сповіщення читачів і зареєстрованих осіб, а також допомагає з кореспонденцією.

OCS є гнучкою і масштабованою. Одна інсталяція OCS може підтримувати роботу одночасно кількох конференцій, підтримка однієї конференції може тривати кілька років. Кожна конференція має свою унікальну URL-адресу, а також свій власний інтерфейс. OCS може дати можливість одному модератору керувати всіма аспектами конференції, або OCS буде надана можливість керувати групою людей, котрим надані різні обов'язки щодо організації процесу. Система управління конференціями підтримує принцип розширення доступу. Ця система призначена не лише для надання допомоги у публікації конференцій, а й для демонстрації того, як можна зменшити витрати на публікацію конференції до такої міри, коли надання читачам «відкритого доступу» до змісту матеріалів може бути життєздатним варіантом.

Open Conference System надає можливість створення веб-сайту конференції, формування основної документації, прийом в електронному вигляді заявок та реферативних матеріалів, дозволяє тим, хто подає документи, редагувати свою роботу. Матеріали та документи після конференції у онлайн форматі з можливістю пошуку.

У більш новіших версіях OCS було значно розширено функціонал:

1. Управління конференціями, що відбуваються певною періодичністю (наприклад, щорічно)
2. Система огляду матеріалів стає розширеною та багаторазовою.
3. З'явилась система шаблонів електронної пошти.
4. Додаються інструменти локалізації та перекладу.

5. Оплата платіжними системами за реєстрацію.
6. Ліцензування презентацій Creative Commons.
7. Програмний код стає більш масштабованим і захищеним.
8. Додано планувальник заходів.
9. Додано адаптивну форму рецензента.
10. Багатомовний інтерфейс.

У функціоналі Open Conference System чітко відбувається розподіл задач між ролями користувачів. Усі користувачі поділяються на менеджерів конференції, керівників конференції, авторів, рецензентів, учасників.

Робота менеджерів конференції полягає у наступних етапах:

- менеджер налаштовує вебсайт і створює конференції;
- призначення керівників, налаштування роботи секцій, встановлення термінів та типів подання матеріалів;
- керування реєстраціями, надання членства;
- налаштування індексації (Google Scholar), коментування, збір коштів, політики доступу до сайту;
- проведення конференції;
- налаштування доступу та керування архівними матеріалами;

У свою чергу, керівниками конференції проводиться ряд паралельних з менеджерами конференції процесів:

- прийняття рішення про прийняття матеріалів, організація секцій, терміни та правила подачі, призначення керівників секції, рецензентів;
- підготовка інформаційних листів;
- вибір рецензентів;
- проведення конференцій;

Авторам надається можливість для подачі матеріалів. Рецензенти за допомогою системи готують відгуки та подають їх для організаційного комітету. Читачі, в залежності від політики доступу, можуть шукати та переглядати контент.

Наступною вебсистемою управління конференціями є система *Easy Chair*.

**Електронна система EasyChair** – широко розповсюджена онлайн платформа для організації, управління, проведення наукових конференцій. Метою створення її була оптимізація усіх етапів проведення наукових конференцій, удосконалення подачі, рецензування, затвердження матеріалів конференцій. EasyChair багатифункціональна, гнучка та зручна у використанні система, використання якої можливе для різних моделей конференції.

Це онлайн база даних, в якій автори можуть подавати доповіді на конференцію, а члени експертної групи – рецензувати їх. Коли доповідь подається, вона може бути позначена як така, що відноситься до певної теми.

EasyChair підтримує велику кількість моделей конференцій і, судячи з веб-трафіку, є однією з найбільших у світі систем управління конференціями. На рисунку 2 зображено головний екран системи EasyChair.

Серед послуг, що надає вебсистема проведення та організації конференцій виділимо основні. Головною послугою є створення конференції, управління, включаючи подачу матеріалів, рецензування, створення програмного комітету. В системі передбачено розгортання VCS (Virtual Conference System) для організації конференцій у віртуальному чи гібридному форматі. Реєстрація учасників реалізована на платній або безоплатній основі онлайн. Також реалізовані функції CFP для публікації запрошень до участі в конференції, Smart Slide для розміщення презентацій конференції. По завершенню конференції на сайті передбачено розміщення та публікація матеріалів конференції. Платформа для рецензування та публікації журналів. Також надається управління ролями, реєстрація згідно ролей.

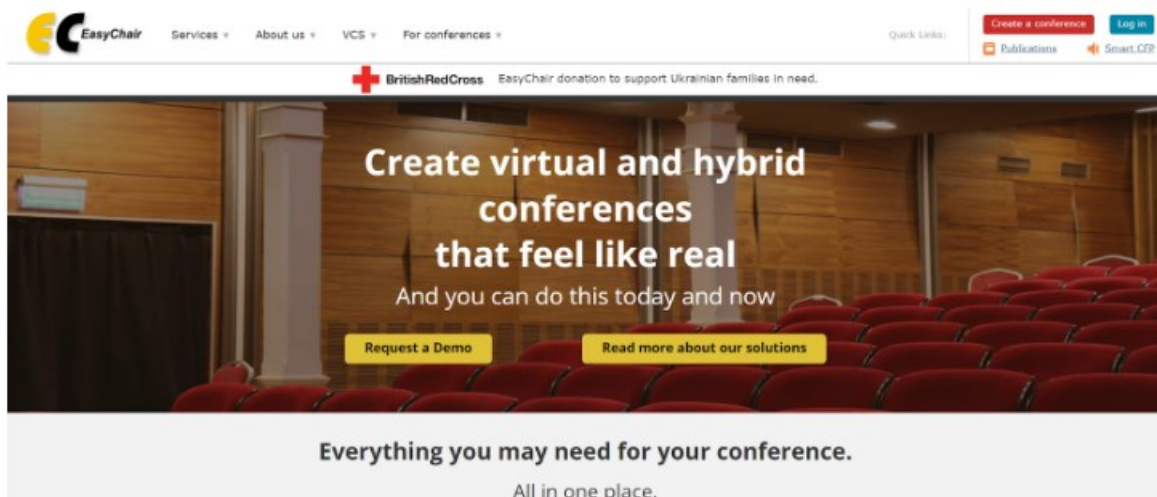


Рис. 2. Головний екран EasyChair



Сучасна версія програми підтримує:

- Відправлення запрошення до подачі заявки чи участі (Smart CFP).
- Адаптивні форми подачі матеріалів.
- Підтримка різних типів завантаження файлів.
- Моніторинг роботи програмного комітету, управління рецензентами.
- Гнучке управління доступом членів програмного комітету і рецензентів до робіт і управління конфліктами інтересів.
- Онлайн обговорення статей.
- Можливість відповіді автора на рецензування.
- Редагування і публікація програми (за допомогою Smart Program)
- Підготовка матеріалів конференції.

Всі сторінки вебсистеми, крім невеликої кількості винятків мають однакову архітектуру, кожна з них містить головне меню, контекстне меню, заголовок сторінки, панель ролей, підсумок і вміст. Найголовнішою частиною є рольова, адже саме від неї залежить набір доступного вам функціоналу.



Рис. 3. Перегляд доступних ролей користувача

Рольова частина це панель, на якій відображаються конференції на яких ви зараз працюєте, або працювали раніше. Роль користувача у конференції може бути одна або декілька. Головне меню вебсистеми Easy Chair залежить від ліцензії конференції її поточного стану та ролі користувача. Набір функціоналу тієї чи іншої сторінки залежить від статусу користувача у конкретній конференції, а також від ліцензії останньої. Наприклад, якщо конференція закінчилась, то більшість функцій, таких як подати матеріал чи інше не будуть доступними. Якщо ліцензія на конференцію закінчилась, система перенаправить вас на сторінку, де члени програмного комітету, об'єднавшись, матимуть змогу її продовжити.

Інтерфейс вебсистеми має набір своїх функцій залежно від ролей.

1. My EasyChair - використовується головна роль.
2. Conference - використовується роль голови, керуючого треком, старшого члена ПК, субрецензента, автора.
3. Proceedings - використовується роль керівника впровадження та автора.
4. Smart program - використовуються ролі менеджера програми та автора програми, а також головуєного на сесії.
5. Registration - використовуються ролі менеджера реєстрації та того, хто реєструється.
6. Smart CFP - використовуються ролі менеджера CFP та користувача CFP.

Доступ до ресурсів системи є безперервним завдяки розміщенню її на комерційному сервері. Швидкість роботи серверу є достатньо високою. EasyChair використовує мережу зі швидкістю 1 Гбіт/с, для прикладу користувачі мають змогу завантажити 7500 документів за одну хвилину. Навантаженість системи становить 5000 заявок у найбільш навантажені дні [10].

Розробники EasyChair за допомогою реплікації бази даних мають надійне збереження трьох резервних реплік на віддалених серверах, що дозволить зберегти дані користувачів у разі несправності головного сервера, відновлення роботи системи можливе протягом кількох годин зі збереження всіх даних.

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

Проаналізувавши системи проведення конференцій та всебічної підтримки наукової діяльності співробітників ЗВО, можна зробити висновок, що функціонал досліджуваних систем є широко профільний, повністю задовольняє потреби користувачів. Такі системи пропонують широкий набір функцій для організації, проведення конференцій, підтримки роботи організаційного комітету та рецензентів, публікації матеріалів. Open Conference System надає безкоштовний доступ до ресурсів для розгортання конференції з усіма процесами. Easy Chair пропонує можливості роботи в залежності від ролей як на платній та безоплатній основі.

Використання систем наведеного типу значно полегшує процес проведення наукових конференцій в режимі онлайн, що є досить актуальним у сучасних реаліях. Працюючи, в більшості часу дистанційно, виникає потреба у розширенні функціоналу наявних систем у питаннях підтримки наукової діяльності, шляхом ведення статистики публікацій, зручного зв'язку з колегами та розміщенні власних матеріалів у свої особистих кабінетах.



При виборі вебсистеми для організації наукової діяльності співробітників основним із критеріїв є доступність ресурсу, що включає в собі зручний функціонал, легкий старт в роботі, захист особистих матеріалів та персональних даних.

Щодо перспектив подальших досліджень, то вважаємо, що варто розширити дослідження у напрямку вдосконалення функціоналу існуючих систем для організації та проведення конференцій. Також вимогою сьогодення є підтримка наукової діяльності працівників навчальних закладів в онлайн форматі.

### Література

1. Глазунова О. Наукова е-конференція як інструмент розвитку професійних і особистісних компетентностей студентів університету [Електронний ресурс] / О. Глазунова, О. Кузьмінська, Т. Волошина // Інноваційні комп'ютерні технології у вищій школі: Матеріали 9-ї науково практичної конференції. – 2017. – Режим доступу : <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2017/sep/6297/ist-2017-zbirnik-pracfinal1.pdf#page=66>
2. Морозов Д. Впровадження синхронних засобів комунікацій в формі онлайн конференцій та вебінарів в платформах дистанційної освіти в Україні / Д. Морозов, М. Аліїник, В. Зайцев // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – Харків, 2014. – С. 62–66.
3. Степура І. Особливості використання платформи open conference systems при реалізації сайту [openedu.kubg.edu.ua](http://openedu.kubg.edu.ua) [Електронний ресурс] / Іван Степура // International scientific conference “Open educational e-environment of modern University”. – 2015. – Режим доступу : <https://www.openedu.kubg.edu.ua/journal/index.php/openedu/article/view/14/17>
4. Glover A. Online conferencing in the midst of COVID-19: an “already existing experiment” in academic internationalization without air travel. Sustainability: Science, Practice and Policy. 2021. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15487733.2021.1946297?scroll=top&needAccess=true>
5. Шевченко В. Організація онлайн-навчання під час карантину ЧЕПЕЗ COVID19 [Електронний ресурс] / В. Шевченко // Технологія і техніка друкарства. – 2020. – ISSN 20777264. – Режим доступу : [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/38923/1/09\\_shevchenko\\_ve\\_organization\\_online.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/38923/1/09_shevchenko_ve_organization_online.pdf).
6. Положення про порядок організації і проведення наукових заходів у Сумському державному університеті [Електронний ресурс]. – 2020. – Режим доступу : <https://normative.sumdu.edu.ua/?task=getfile&tmpl=component&id=bc28942a-543d-e211-bc3e-001a4be6d04a&kind=1>.
7. Степура І. С. Використання платформи open conference systems для проведення електронних конференцій на базі вищого навчального закладу [Електронний ресурс] / Іван Сергійович Степура // Освітнологічний дискурс. – 2014. – ISSN Online: 2312-5829. – Режим доступу : [https://elibrary.kubg.edu.ua/id/eprint/3807/1/I\\_Stepura\\_OD\\_6\\_NDLIO.pdf](https://elibrary.kubg.edu.ua/id/eprint/3807/1/I_Stepura_OD_6_NDLIO.pdf).
8. Open Conference System [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://pkp.sfu.ca/ocs/>
9. EasyChair [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://easychair.org/>
10. System information and performance [Електронний ресурс] / – Режим доступу : <https://easychair.org/help/system>.

### References

1. Hlazonova O. Naukova e-konferentsiia yak instrument rozvytku profesiinykh i osobystisnykh kompetentnostei studentiv universytetu [Elektronnyi resurs] / O. Hlazonova, O. Kuzminska, T. Voloshyna // Innovatsiini kompiuterni tekhnologii u vyshchii shkoli: Materialy 9-yi naukovykh praktichnoi konferentsii. – 2017. – Rezhym dostupu : <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2017/sep/6297/ist-2017-zbirnik-pracfinal1.pdf#page=66>
2. Morozov D. Vprovadzhennia synkhronnykh zasobiv komunikatsii v formi onlain konferentsii ta vebinariv v platformakh dystantsiinoi osvity v Ukraini / D. Morozov, M. Aliinyk, V. Zaitsev // Naukovi zapysky Ukrainskoho naukovo-doslidnoho instytutu v'iazku. – Kharkiv, 2014. – S. 62–66.
3. Stepura I. Osoblyvosti vykorystannia platformy open conference systems pry realizatsii сайту [openedu.kubg.edu.ua](http://openedu.kubg.edu.ua) [Elektronnyi resurs] / Ivan Stepura // International scientific conference “Open educational e-environment of modern University”. – 2015. – Rezhym dostupu : <https://www.openedu.kubg.edu.ua/journal/index.php/openedu/article/view/14/17>
4. Glover A. Online conferencing in the midst of COVID-19: an “already existing experiment” in academic internationalization without air travel. Sustainability: Science, Practice and Policy. 2021. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15487733.2021.1946297?scroll=top&needAccess=true>
5. Shevchenko V. Orhanizatsiia onlain-navchannia pid chas karantynu cherez COVID19 [Elektronnyi resurs] / V. Shevchenko // Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva. – 2020. – ISSN 20777264. – Rezhym dostupu : [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/38923/1/09\\_shevchenko\\_ve\\_organization\\_online.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/38923/1/09_shevchenko_ve_organization_online.pdf).
6. Polozhennia pro poriadok orhanizatsii i provedennia naukovykh zakhodiv u Sums'komu derzhavnomu universyteti [Elektronnyi resurs]. – 2020. – Rezhym dostupu : <https://normative.sumdu.edu.ua/?task=getfile&tmpl=component&id=bc28942a-543d-e211-bc3e-001a4be6d04a&kind=1>.
7. Stepura I. S. Vykorystannia platformy open conference systems dlia provedennia elektronnykh konferentsii na bazi vyshchoho navchalnoho zakladu [Elektronnyi resurs] / Ivan Serhiiovych Stepura // Osvitologichnyi dyskurs. – 2014. – ISSN Online: 2312-5829. – Rezhym dostupu : [https://elibrary.kubg.edu.ua/id/eprint/3807/1/I\\_Stepura\\_OD\\_6\\_NDLIO.pdf](https://elibrary.kubg.edu.ua/id/eprint/3807/1/I_Stepura_OD_6_NDLIO.pdf).
8. Open Conference System [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <https://pkp.sfu.ca/ocs/>
9. EasyChair [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <https://easychair.org/>
10. System information and performance [Elektronnyi resurs] / – Rezhym dostupu : <https://easychair.org/help/system>.

Надійшла/Paper received : 15.10.2022 р. Надрукована/Printed : 01.11.2022 р.

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»

e-mail: [sanginova@xtf.kpi.ua](mailto:sanginova@xtf.kpi.ua)

## ЕКОЛОГІЧНО ОРІЄНТОВАНЕ ФОРМУВАННЯ ЛИМАРНО-СІДЕЛЬНОЇ ШКІРИ

У роботі наводяться результати розроблення технології синтанно-танідного дублення голини, отриманої зі шкур великої рогатої худоби – яловиці важкої з кислотним знезолуванням, при формуванні лимарно-сідельної шкіри без використання сполук хрому. Використання гексаметафосфату натрію і формальдегіду замість сполук хрому перед синтанно-танідним дубленням дозволяє скоротити тривалість технології на 18 год, зменшити витрати води в 1,6–2,2 рази. При використанні тільки гексаметафосфату натрію на стадії переддубильно-дубильного оброблення напівфабрикату розробленої технології суттєво скорочується вміст токсичних речовин у стічних водах шкіряного виробництва. Лимарно-сідельна шкіра, що виробляється за розробленою технологією безхромового дублення за своєю якістю відповідає технічним вимогам діючого стандарту.

Ключові слова: яловиця важка, голина, додублювання-наповнювання, дифузія танідів, лимарно-сідельна шкіра, фізико-хімічні властивості.

DANYLKOYCH Anatoliy

Kyiv National University of Technologies and Design

SANGINOVA Olga

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

## ENVIRONMENTALLY FRIENDLY PROCESSING OF HARNESS LEATHER

The paper presents the results of the development of the technology of sintal-tanid tanning of unhaird hide obtained from the skins of cattle - heavy beef with acid deaeration, in the formation of harness skin without the use of chromium compounds. For this, the samples of the unhaird hide are thoroughly washed with water according to the usual method, and soaking is performed on the residual liquid after draining (20%) in a drum for 2 hours at a temperature of 19–20 °C in the presence of 0.5% ammonium sulfate and 0.6% lactic acid mixture and sulfuric at a ratio of 1:1 based on 100% concentration. Reagent consumption are set based on the previous studies. Sodium hexametaphosphate in the presence of 100% water by weight of the semi-finished product (PK 1) for the same temperature is used to transform the unhaird hide into pre-tanning components. After 15 minutes of mixing in a drum 0.6% of the sulfuric acid diluted with water 1: 5 are added. For 30 minutes external layers of a branch are preliminary fixed. Then a second pre-tanning is performed due to the addition of 1.5% formalin. After 4 hours of continuous rotation of the drum, for the next 12 hours the system is set in motion for 2-3 minutes every 2 hours. During this time, the pH value of the cut of the semi-finished product is 4.6. To reduce the content of environmentally hazardous reagents, formalin is excluded from the technological process. The use of sodium hexametaphosphate and formaldehyde instead of chromium compounds before syntane-tanide tanning allows to reduce the duration of the technology by 18 hours, to reduce water consumption by 1.6–2.2 times. When using only sodium hexametaphosphate at the stage of pre-tanning and tanning of the semi-finished product of the developed technology, the toxic substances content in wastewater of leather production is significantly reduced. Harness leather produced using the developed chrome-free tanning technology meets the technical requirements of the current standard in terms of its quality. Tested chemical materials can be effectively used for the development of alternative chrome, environmentally safer, resource-saving technologies to produce leather materials for general purposes.

Key words: heavy beef, shaving, tanning, diffusion of tannins, harness leather, physicochemical properties.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

При розробленні інноваційних і удосконаленні існуючих технологій важливе значення має пошук і ефективне використання екологічно безпечних хімічних реагентів. Зокрема це стосується виробництва шкіряних матеріалів при виготовленні яких на підготовчих стадіях до дублення і в процесі самого дублення кількість екологічних забруднень може досягти 80–90 % загальної їх кількості [1]. При цьому в процесі зоління виділяються токсичні гази – аміак, сірководень та утворюється значна кількість твердих відходів – вапняний і хромовий шлам, а після дублення канцерогенні речовини. Оброблення зневолошеного напівфабрикату розчинами кислот в присутності нейтральних солей супроводжується утворенням хлоридів і сульфатів, концентрація яких в стічних водах досягає відповідно 30 і 22 г/дм<sup>3</sup> при виготовленні еластичних шкір [2]. Враховуючи багато стадійність такої технології актуальним є проведення досліджень спрямованих на зменшення витрат чи відмова від використання екологічно небезпечних реагентів, а також скорочення тривалості процесів.

### Аналіз досліджень та публікацій

При формуванні еластичних шкір автори [3] рекомендують замість хромового дублення використовувати синтезований алюмоцирконієвий дубитель при мольному співвідношенні компонентів 9:1 з полікарбонатовими кислотами. При цьому отриманий напівфабрикат безхромового дублення за термостійкістю відповідає вимогам фарбувально-жирувальних процесів. На фінішній стадії проведено, так

зване, зворотне дублення з використанням 0,5–1,0 % хромового дубителя. Отримана шкіряний напівфабрикат характеризується гідротермічною стійкістю близькою до 110 °C і відповідає вимогам до шкір, отриманих за технологією хромового дублення. Отже, розглянута технологія передбачає використання сполук хрому на завершальній стадії при зменшенні їх витрат до 8 раз.

Для додублювання шкіряного напівфабрикату автори роботи [4] використовують акрилові полімери різної середньої вагової маси  $5 \cdot 10^3$ – $200 \cdot 10^3$ . При цьому встановлено, що вирішальний вплив на дифузію акрилових полімерів в структуру напівфабрикату має їх концентрація і заряд матеріалу. Поряд з цим у роботі [5] на стадії додублювання досліджено вплив акрилових полімерів на основі акрилової кислоти і акрилатних мономерів різного хімічного складу на еластичні властивості шкіряного матеріалу. Використання водних емульсій кополімерів бутилакрилату і стиролу різної молекулярної маси дало можливість отримати шкіри підвищеної гідротермічної стійкості [6]. У роботі [7] для дублення напівфабрикату овчини використано конденсовані таніди гамбіру. При цьому фізико-хімічні властивості шкіри визначались попереднім структуруючим реагентом – алюмокалієвий галун, глутаровий альдегід. У першому випадку шкіра набувала вищої пластичності й гідротермічної стійкості, у другому – підвищувалась міцність і ступінь зв'язування танідів з колагеном дерми. Аналогічним чином для дублення шкіряного напівфабрикату використано сполуки алюмінію і таніди сумаху [8, 9] ІЧ-спектроскопічними дослідженнями встановлено, що взаємодія танідів з колагеном дерми відбувається шляхом утворення водневих і координаційних зв'язків між взаємодіючими компонентами системи. Використання танідів білої акації при без хромовому дубленні шкіряного напівфабрикату дає можливість отримати матеріал підвищеної міцності, що відповідає вимогам стандарту. Досліджено вплив ВЧ-плазмової модифікації екстракту квебрахо на його дубильну здатність [10]. Встановлено, що модифікація екстракту сприяє підвищенню наповненості структури дерми напівфабрикату, але ефективна взаємодія танідів з поверхневими шарами дерми вимагає оптимізації процесу.

Таким чином, для формування шкіряного матеріалу різного призначення за відсутності дубильних сполук хрому використовуються рослинні дубителі сумісно з мінеральними і органічними реагентами різного хімічного складу. При цьому розглянуті роботи переважно емпіричного характеру і тільки в деяких з них звертається увага на особливості взаємодії реагентів функціонального призначення з колагеном дерми. У зв'язку з цим виникає необхідність у науковому підході до розроблення нових ефективних технологій, зокрема, переддубильно-дубильних процесів формування шкір безхромового дублення.

#### Формулювання мети дослідження

Метою роботи є розроблення технології синтанно-танідного дублення зневолошеного напівфабрикату при формуванні лимарно-сідельних шкір.

#### Матеріали і методи дослідження

В роботі використано шкіряну сировину мокросолоного консервування яловиці важкої після зоління в умовах приватного АТ «Чинбар». У переддубильно-дубильних процесах застосовані наступні реагенти:

- ✓ синтетичний дубитель БНС ТУ 17-06-165-89 – продукт синтезу 2-нафтолсульфокислоти з діоксидифенілсульфоном;
- ✓ екстракт акації чорнодеревної з вмістом танідів 78,6 %;
- ✓ екстракт верби з вмістом танідів 49,5 %;
- ✓ хромовий дубитель ТУ 2141-033-541386-2003 основністю 35–42 % – основний сульфат хрому;
- ✓ гексаметафосфат натрію технічний з щільністю 2,484 г/см<sup>3</sup>;
- ✓ сульфат амонію технічний ДСТУ ISO 2992:2008;
- ✓ кислоти сірчана технічна і молочна відповідно ДСТУ ГОСТ 2184:2018 і ДСТУ 4621: 2006;
- ✓ формалін технічний ГОСТ 1625-2016 з вмістом формальдегіду 37,5 %;
- ✓ жирувальний засіб похідних лецитину і ланоліну Fosfol L-1301 компанії «Cromogenia Units, S.A.» (Іспанія).

Для оцінювання ефективності процесу формування лимарно-сідельної шкіри різних варіантів використовується низка методів фізико-хімічних досліджень за методиками [11]. При цьому зразки попередньо кондиціюються ексикаторним методом за нормальних умов. Вологовміст шкіри визначається гравіметричним методом за температури  $100 \pm 105$  °C. Екстраговані речовини органічними розчинниками встановлюються у апараті Зайченка з використанням тетрахлорметану та наступним висушуванням за температури 128–130 °C. Загальні водовимовні речовини – у знежиреній наважці. Вміст дубильних сполук хрому в шкіряному напівфабрикаті визначається йодометричним титруванням і виражається як масова частка оксиду хрому (III). Температуру зварювання напівфабрикату – за початковим скороченням зразка при його нагріванні у воді зі швидкістю 2–3 °C/хв, рН хлоркалієвої витяжки, отриманої настоюванням наважки шкіри в 0,1 н. розчині хлориду калію, на приладі рН-340. Число продубу розраховується за відношенням маси зв'язаних танідів в зразку до вмісту в ньому голинної речовини. Дифузія танідів рослинних дубителів у структуру дерми досліджується мікроскопічним методом з використанням мікроскопу МБІ-3. Швидкість переміщення дубителів від зовнішніх поверхонь зразків напівфабрикату до середини визначається за допомогою окуляр-мікрометра після зрізування забарвленого краю. Фізико-

механічні властивості отриманої шкіри визначаються після їх деформування на розривній машині РМ-250М зі швидкістю 90 мм/хв.

### Результати дослідження та їх обговорення

Для проведення переддубильно-дубильних процесів виробництва лимарно-сідельних шкір зразки зеленого напівфабрикату (голини) товщиною 7,0–7,5 мм і розміром 1,8×2,5 дм згрупповуються у три партії по 7 шт. за методом асиметричної бахроми [12]. Переддубильно-дубильні процеси виконуються у барабані ємністю 10 дм<sup>3</sup> при його обертанні зі швидкістю 12–14 хв<sup>-1</sup> за трьома варіантами.

За *1 варіантом* технології зразки голини ретельно промиваються водою за звичайним методом, а знезолнювання виконується на залишковій рідині після зливання (~20 %) у барабані протягом 2 год за температури 19–20 °С в присутності 0,5 % сульфату амонію і 0,6 % суміші кислот молочної і сірчаної (таблиця 1) при співвідношенні 1:1 в розрахунку на 100 % концентрацію. Витрати реагентів встановлюються на основі попередніх досліджень. Для структурування голини у переддубильних обробленнях використовується гексаметафосфат натрію в присутності 100 % води маси напівфабрикату (РК 1) за тієї ж температури. Після 15 хв перемішування системи у барабан додається 0,6 % сірчаної кислоти, розбавленої водою 1:5. За 30 хв зовнішні шари голини попередньо фіксуються. Потім проводиться друге переддублення внаслідок додавання 1,5 % формаліну. Через 4 год неперервного обертання барабану, протягом наступних 12 год система приводиться в рух на 2–3 хв кожні 2 год. За цей час досягається значення рН зрізу напівфабрикату 4,6.

Відпрацьована рідина зливається і напівфабрикат з уже фіксованою структурою двічі промивається водою за температури 30–35 °С і РК 1,50. У подальшому для підвищення концентрації дубителя у робочому розчині напівфабрикат обробляється на залишковій воді синтетичним дубителем БНС з витратою 3,6 % у розрахунку на дубильні речовини. Слід зауважити, що синтин БНС використовується також для підвищення ступеня диспергування танідів рослинних дубителів. Через 1 год додаються екстракти акації і верби у розрахунку на таніди і процес дублення напівфабрикату продовжується 6,0–6,5 год. Після додавання 2 % жирувальних речовин процес продовжується ще 6,0–6,5 год. Для фіксації реагентів додається мурашина кислота в кількості 0,5 % розведена водою 1:5, а ще через 2 год дублений напівфабрикат вистилається для пролежування протягом 12 год під поліетиленовою плівкою. Наступні процеси проводяться за діючою технологією [11].

Таблиця 1

#### Витрати реагентів у переддубильно-дубильних процесах лимарно-сідельної шкіри

Хімічні реагенти	Витрати реагентів, % маси напівфабрикату, за варіантами		
	1	2	3
Переддубильне оброблення: вода	550	400	900
Сульфат амонію	0,5	2,5 + 3,0	3,0 + 7,0
Гексаметафосфат натрію	2,0	2,0	–
Кислота сірчана, 100 %	0,3 + 0,6	1,5 + 0,5	0,6
– молочна, 100 %	0,3	–	–
Формалін, 40 %	1,5	–	–
Хромовий дубитель	–	–	2,8
Дублення: синтан БНС	3,6 (у всіх технологіях)		
– екстракт акації	12,0 (також)		
– екстракт верби	8,0 (– “ –)		

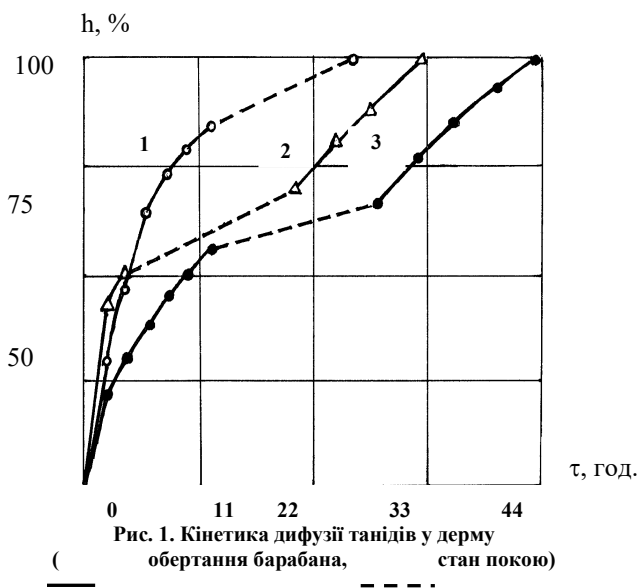


Рис. 1. Кінетика дифузії танідів у дерму обертання барабана, – – – – стан покою)

За *варіантом 2* для зменшення вмісту екологічно небезпечних реагентів з технологічного процесу виключається формалін. При цьому голина знезолнюється сульфатом амонію з витратою 2,5 % за температури 35–37 °С і РК 0,8. Для переддублення використовується гексаметафосфат натрію і сульфат амонію у співвідношенні 1,5:1 з додаванням через 0,5 год 1,5 % сірчаної кислоти у два прийоми. Через 12 год додається ще 0,5 % сірчаної кислоти і за 2 год обертання рН зрізу напівфабрикату набуває значення 3,0–3,5. Дублення здійснюється аналогічно варіанту 1.

*Варіант 3* є контрольним [11], яким для знезолнювання передбачається застосування сульфату амонію з витратою 3,0 % за температури 35–37 °С при РК 1,5. До дублення голина готується солюванням протягом 3 год з використанням 7 % сульфату

амонію і 0,6 % сірчаної кислоти та наступним попереднім структуруванням основним сульфатом хрому протягом 8 год при РК 1. Отримані зразки за всіма варіантами в подальшому обробляються за діючою технологією.

Результати дослідження дифузії танідів у структуру шкіряного напівфабрикату наведена на рисунку 1. Як видно з рисунка, швидкість дифузії танідів у структуру напівфабрикату максимальна на початку дублення для варіанту 2, а мінімальна в контрольному варіанті. В той час як тривалість процесу до повного профарбування напівфабрикату була мінімальна у варіанті 1, що дорівнювала 25 год. Причому після 2,5–3,0 год. дублення спостерігається сповільнення дифузії танідів у варіанті 2. Це зумовлено інтенсивнішою взаємодією частинок танідів з частково фіксованою структурою дерми на підготовчій стадії дублення, в результаті ущільнення її поверхневих шарів. У випадку застосування основного сульфату хрому цей ефект проявляється сильніше, тому технологічний процес завершається через 44 год.

Отже, комплексне використання хімічних реагентів, що попередньо фіксують структуру голини, в тому числі гексаметафосфату і формаліну, дають змогу суттєво скоротити тривалість процесу дублення напівфабрикату.

Результати оброблення голини за варіантами 1–3 з використанням хімічних реагентів згідно таблиці 1, наводяться в таблиці 2. Гідротермічна стійкість голини перед синтанно-танідним дубленням досягає максимального значення після хромування і мінімального – при використанні гексаметафосфату натрію. Це зумовлено структуруванням колагену при його хромуванні у відомій технології і руйнуванням значної кількості водневих зв'язків під дією кислот. Відповідно після дублення гідротермічна стійкість напівфабрикату максимально у варіанті 2, а максимального значення досягає у варіанті з попереднім хромуванням голини. Проміжне положення за гідротермічною стійкістю займає напівфабрикат 1 варіанту, що зумовлено структуруванням колагену формальдегідом.

Таблиця 2

**Фізико-хімічні властивості лимарно-сідельної шкіри дубленого напівфабрикату**

Показник	Варіант технології			ГОСТ 1904-81
	1	2	3	
Температура зварювання, °С, напівфабрикату перед дубленням	72	54	76	–
– дубленого напівфабрикату	78	73	86	–
Масова частка*, %, вологи	11,1	11,3	11,2	11–17
– речовин, що екстрагуються органічними розчинниками	9,3	9,6	10,2	6–11
– загальних водовимивних	6,7	6,3	6,0	не > 7,0
– оксиду хрому (III)	–	–	1,13	0,9–1,8
pH хлоркалієвої витяжки	5,3	5,0	5,0	4,0–5,5
Границя міцності при розтягуванні, МПа	22,0	22,0	23,0	не < 20
Подовження при напруженні 10 МПа, %	14,0	16,0	17,0	10–17
Число продубу, %	52,0	48,0	46,0	42–59

Примітка. \* – масові частки наводяться у перерахунку на нульову вологість.

Наявність формальдегіду у в варіанті 1 розробленої технології сприяє підвищенню взаємодії танідів з колагеном дерми з утворенням комплексних сполук, що супроводжується збільшенням зв'язаних танідів у структурі напівфабрикату і, відповідно, зменшенням деформаційної здатності зразків. За комплексом фізико-механічних властивостей напівфабрикат отриманий за розробленою технологією варіанта 2 з виключенням екологічно небезпечного формальдегіду відповідає технічним вимогам стандарту на лимарно-сідельні шкіри.

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

Розроблена технологія синтанно-танідного дублення голини, отриманої зі шкір великої рогатої худоби – яловиці важкої з кислотним знезолуванням, при формуванні лимарно-сідельної шкіри без використання сполук хрому. Використання гексаметафосфату натрію і формальдегіду замість сполук хрому перед синтанно-танідним дубленням дозволяє скоротити тривалість технології на 18 год, зменшити витрати води в 1,6–2,2 рази. При використанні тільки гексаметафосфату натрію на стадії переддубильно-дубильних процесів розробленої технології суттєво скорочується вміст токсичних речовин у стічних водах шкіряного виробництва. Лимарно-сідельна шкіра, що виробляється за розробленою технологією безхромового дублення за своєю якістю відповідає технічним вимогам діючого стандарту. Апробовані хімічні матеріали можуть бути ефективно використані й для розроблення альтернативних хромовим, екологічно безпечніших, ресурсозбережних технологій виробництва шкіряних матеріалів широкого призначення.

**Література**

1. Thanikaivelan P., Rao J. R., Nair B. U. & Ramasami T. Recent trends in leather making: processes, problems, and pathways. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2005. 35(1). P. 37–79.
2. He X., Wei Ding, Yue Yu, Yue Yu, Bi Shi Insight into the Correlations Between Fiber Dispersion and Physical Properties of Chrome Tanned Leather. *Journal of the American Leather Chemists Association*, 2020. Vol. 115. No 1. P. 23–29.

3. Cai S., Zeng Y., Zhang W., Wang Y. N., Shi B. Inverse chrome tanning technology based on wet white tanned by Al-Zr complex tanning agent. *Lefther Chem. Assoc.* 2015. Vol. 110. № 4. P. 114–120.
4. Song Y., Yunhang Zeng, Xiao Kunlu, Wu Hoopeng and Bi Shi Effect of molecular weight of acrylic resin retanning agent on properties of leather. *J Amer Leather Chem. Assoc.* 2017. 112. № 4. C 128–134.
5. Ma J. Z., Lu H. Elasticity studies on leather retanned with various types of acrylic polymers. *JALCA.* 2008. 103. Issue 11. P. 363–369.
6. Nashy E. H. A., Hussein A. L., Essa M. M. J. Novel retanning agents for chrome tanned leather based on emulsion-nano particles of styrene/butylacrylate copolymers. *J. Amer. Leather Chem. Assoc.* 2011. Vol. 106. Issue 9. P. 241–248.
7. Griyanitasari G., Rahmawati D., Sugihartono Y. Erwanto Cleaner sheep leather tanning process using uncaria gambir: the influence of rebating on leather properties. *Journal of Physics Conference Series* 1524:012011. 2020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1524/1/012011>
8. Плаван В. П. Застосування танідів сумаху для поліпшення експлуатаційних властивостей шкір. *Вісник КНУТД.* 2010. № 5. С. 79–85.
9. Плаван В. П., Ковтуненко О. В. Застосування сполук фосфонію для комбінованого дублення шкір. *Вісник КНУТД.* 2008. 6(44). С. 42–48.
10. Nasr A. Using some plants and their crude extracts in leather tanning: a thesis. – 2011. – 102 p.
11. Данилкович А. Г. Практикум з хімії і технології шкіри та хутра : навч. посібник. 2-е вид., перероб. і доп. Київ : Фенікс, 2006. 340 с.
12. Данилкович А. Г. Основні матеріали і технології виробництва шкіри : навч. посібник. Київ, 2016. 175 с.

#### References

1. Thanikaivelan P., Rao J. R., Nair B. U. & Ramasami T. Recent trends in leather making: processes, problems, and pathways. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology.* 2005. 35(1). R. 37–79.
2. He X., Wei Ding, Yue Yu, Yue Yu, Bi Shi Insight into the Correlations Between Fiber Dispersion and Physical Properties of Chrome Tanned Leather. *Journal of the American Leather Chemists Association*, 2020. Vol. 115. No 1. P. 23–29.
3. Cai S., Zeng Y., Zhang W., Wang Y. N., Shi B. Inverse chrome tanning technology based on wet white tanned by Al-Zr complex tanning agent. *Lefther Chem. Assoc.* 2015. Vol. 110. № 4. R. 114–120.
4. Song Y., Yunhang Zeng, Xiao Kunlu, Wu Hoopeng and Bi Shi Effect of molecular weight of acrylic resin retanning agent on properties of leather. *J Amer Leather Chem. Assoc.* 2017. 112. № 4. S 128–134.
5. Ma J. Z., Lu H. Elasticity studies on leather retanned with various types of acrylic polymers. *JALCA.* 2008. 103. Issue 11. R. 363–369.
6. Nashy E. H. A., Hussein A. L., Essa M. M. J. Novel retanning agents for chrome tanned leather based on emulsion-nano particles of styrene/butylacrylate copolymers. *J. Amer. Leather Chem. Assoc.* 2011. Vol. 106. Issue 9. P. 241–248.
7. Griyanitasari G., Rahmawati D., Sugihartono Y. Erwanto Cleaner sheep leather tanning process using uncaria gambir: the influence of rebating on leather properties. *Journal of Physics Conference Series* 1524:012011. 2020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1524/1/012011>
8. Plavan V. P. Zastosuvannia tanidiv sumakhu dlia polipshennia ekspluatatsiinykh vlastyvostei shkir. *Visnyk KNUVD.* 2010. № 5. S. 79–85.
9. Plavan V. P., Kovtunencko O. V. Zastosuvannia spoluk fosfoniiu dlia kombinovanoho dublennia shkir. *Visnyk KNUVD.* 2008. 6(44). S. 42–48.
10. Nasr A. Using some plants and their crude extracts in leather tanning: a thesis. – 2011. – 102 p.
11. Danylkovych A. H. Praktykum z khimii i tekhnolohii shkiry ta khutra : navch. posibnyk. 2-e vyd., pererob. i dop. Kyiv : Feniks, 2006. 340 s.
12. Danylkovych A. H. Osnovni materialy i tekhnolohii vyrobnytstva shkiry : navch. posibnyk. Kyiv, 2016. 175 s.

Надійшла/Paper received : 28.09.2022 p.    Надрукована/Printed : 01.11.2022 p.

**SOKOLAN Iuliia**

Khmelnytskyi National University

ORCID: [0000-0002-0273-5719](https://orcid.org/0000-0002-0273-5719)e-mail: [sokolanyul@khmnu.edu.ua](mailto:sokolanyul@khmnu.edu.ua)**MYLKO Volodymyr**

Khmelnytskyi National University

ORCID: [0000-0002-1118-3530](https://orcid.org/0000-0002-1118-3530)e-mail: [vlad.mylko@khmnu.edu.ua](mailto:vlad.mylko@khmnu.edu.ua)**TKACHUK Vitaliy**

Khmelnytskyi National University

ORCID: [0000-0003-0640-2740](https://orcid.org/0000-0003-0640-2740)e-mail: [tkachukvi@khmnu.edu.ua](mailto:tkachukvi@khmnu.edu.ua)**SOKOLAN Kateryna**

Khmelnytskyi National University

ORCID: [0000-0002-3513-8312](https://orcid.org/0000-0002-3513-8312)e-mail: [sokolank@khmnu.edu.ua](mailto:sokolank@khmnu.edu.ua)

## PROJECT CONCEPTION OF CAE-SYSTEM FOR WEAR ANALYSIS OF FRICTION BEARING UNDER CONDITIONS OF SHAFT AND LINER AXIS MISALIGNMENT

*Modelling of wear processes is an important stage in the design of mechanisms. Such virtual studies allow predicting the service life of components and the machine as a whole. Modern algorithms of CAE-systems allow performing such analysis with high accuracy and taking into account not only material and operating conditions of the mechanism, but also errors that occurred during the manufacturing and assembly of a particular part. These parts require high requirements to the accuracy of manufacturing and assembly, but within the tolerances of the fields errors of mutual positioning are still allowed, which in turn can significantly affect the service life of the mechanism. Therefore, the task of modeling the wear process of the shaft and sleeve in conditions of mutual misalignment of the axes is relevant. Such sliding pairs exist in almost all machines, including car engines, power generation turbines, etc.*

*In this article it is offered to use the module-integrated approach for modeling of wear processes in tribotechnics, providing use of CAE-systems for definition of functioning conditions of friction units as a system core, and construction of separate modules which in this or that degree are integrated into existing CAE systems. to define values of wear of elements of friction pairs that allows to consider mutual influence of wear and change of functioning conditions in the course of operation.*

*The practical implementation of the module-integrated approach is shown by the example of solving the problem of radial plain bearings wear during the misalignment of the shaft and bush axes in the ANSYS environment. The module of representation of multidimensional matrixes of static or dynamic data, providing essential increase in speed of data processing and quality level of the further analysis of the visualized information from any subject area, is developed.*

*Key words: modeling, friction, CAE-systems, wear of machine parts, mutual misalignment of axes, bearing, software.*

СОКОЛАН Юлія, МІЛЬКО Володимир, ТКАЧУК Віталій, СОКОЛАН Катерина  
Хмельницький національний університет

### РОЗРОБКА САЕ-СИСТЕМИ АНАЛІЗУ ЗНОШУВАННЯ ПІДШИПНИКІВ В УМОВАХ ПЕРЕКОСУ ОСЕЙ ВАЛА І ВТУЛКИ

*Моделювання процесів зношування є важливим етапом при проектуванні механізмів. Такі віртуальні дослідження дозволяють прогнозувати ресурс роботи вузлів та машини в цілому. Сучасні алгоритми САЕ-систем дозволяють виконувати такий аналіз з високою точністю та враховувати не лише матеріал та умови роботи механізму, а й похибки, які виникли під час виготовлення та складання конкретної деталі. Дані деталі вимагають високих вимог до точності виготовлення та складання, проте в межах полів допусків все ж таки допускаються похибки взаємного розташування, що в свою чергу може суттєво вплинути на ресурс роботи механізму. Тому задача моделювання процесу зносу вала і втулки в умовах взаємного перекосу осей є актуальною. Подібні пари ковзання існують майже у всіх машинах, зокрема двигунах автомобілів, електрогенеруючих турбінах, тощо.*

*У роботі запропоновано для моделювання процесів зношування в триботехніці використовувати модульно-інтегрований підхід, який передбачає використання САЕ-систем для визначення умов функціонування вузлів тертя в якості ядра системи, та побудови окремих модулів, які в тій чи іншій мірі інтегровані в існуючі САЕ-системи, для визначення величин зносу елементів пар тертя, що дозволяє враховувати взаємний вплив зносу та зміни умов функціонування в процесі експлуатації.*

*Практична реалізація модульно-інтегрованого підходу показана на прикладі розв'язання задачі про зношування радіальних підшипників ковзання при перекосі осей вала і втулки в середовищі САЕ-системи ANSYS. Розроблено модуль представлення багатовимірних матриць статичних або динамічних даних, який забезпечує суттєве підвищення швидкості обробки даних та рівня якості подальшого аналізу візуалізованої інформації з будь-якої предметної області.*

*Ключові слова: моделювання, тертя, САЕ-системи, знос деталей машин, взаємний перекося осей, підшипник, програмне забезпечення.*

### Introduction

Reliability of design is laid at the stage of designing of machines and mechanisms. Management of machine reliability indicators at the design stage is inseparably connected with the development and improvement of calculation methods of their determination. Strength calculations are widely used in design practice due to the



availability of a wide range of both analytical calculation methods and software that implements both numerous methods, such as finite element method [2] and limit element method.

At the same time, it should be taken into account that the most frequent cause of failure of machines is not their destruction due to insufficient strength, but the wear of friction units. As a result of wear of friction units there are functional failures, kinematic accuracy of mechanisms is violated, additional loads, vibrations, etc. appear unforeseen by calculation. Analysis of the methods used in the design practice for calculating the wear resistance and predicting the service life of friction units by the wear criterion showed a significant lag from the strength calculations.

Difficulties in the development of calculation methods for predicting the service life and wear of friction units are due to the presence of diverse in nature processes occurring on friction surfaces, and the influence on these processes of a large number of interrelated factors. Thus in the course of functioning of a tribo-node the factors change both in time, and on a contact surface of details of knots of a friction. Insufficient study of complex physical and chemical processes on the contact surfaces during friction, probabilistic nature of friction and wear processes, random nature of external influence parameters, material properties and initial geometry of the connected parts complicates the development of methods for calculating wear and predicting the resource. Proceeding from the aforesaid, the development of methods for calculating the resource and wear of friction units is the most important task, the solution of which is aimed at increasing the reliability and wear resistance of machines and equipment.

### Presentation of main material

When developing the methods for predicting the service life of friction units it is necessary to take into account the peculiarities of wear as a specific type of destruction, take into account that the fact of this process is not critical for the joint operation. When modeling mechanical wear it is necessary, first of all, to determine the stress state arising in the body at the given external conditions of interaction, properties of materials of contacting pair and macro- and microgeometry of surfaces.

In many cases, when building a model to analyze the serviceability of a friction unit, the most important characteristics of the process are macro changes in the shape of the elements of the tribonode. The task of stage-by-stage modeling (Fig. 1) of wear is to predict the transition from one macrostate to another under given external conditions.

The theoretical basis for the construction of phenomenological models of tribocouplings wear is made by the wear-contact problems, in which the contact pressures and the relative sliding velocity of friction pairs elements are considered as the main external characteristics.

To separate the solution of contact interaction problems and the forms of change of tribocoupling elements due to wear, an iterative approach is used, which implies consideration of a number of discrete states, through which the connection passes in the process of functioning.

The analysis of wear processes shows that the changes occurring in friction pairs are stochastic in essence, and the wear process, in the general case, is a random process. On the basis of theoretical processing of a huge experimental material it has been proved that processes of accumulation of tribo-damages belong to a class of cumulative damages and are most accurately described by Markovian random processes with discrete times and states [1, 2, 7]. The generalized scheme of construction of a three-boelement model of a friction pair is presented in Fig. 2. Thus, the algorithm for solving the wear-contact problems is based on the following steps:

1. Design of the geometrical model of the friction pair.

2. Representation of a worn surface in the form of some number of triboelements with preservation of their geometrical position in the form of an array of data.

3. Design of finite-element model of elastic elements of friction pair. The condition of geometrical coincidence of a part of knots of the end elements, located on a wear surface, with the location of triboelements is imposed.

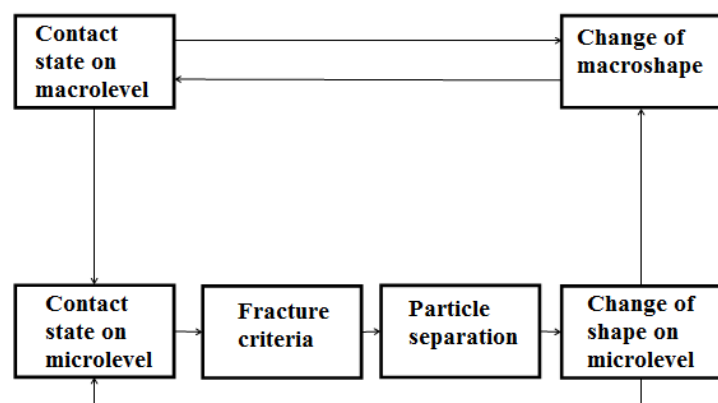
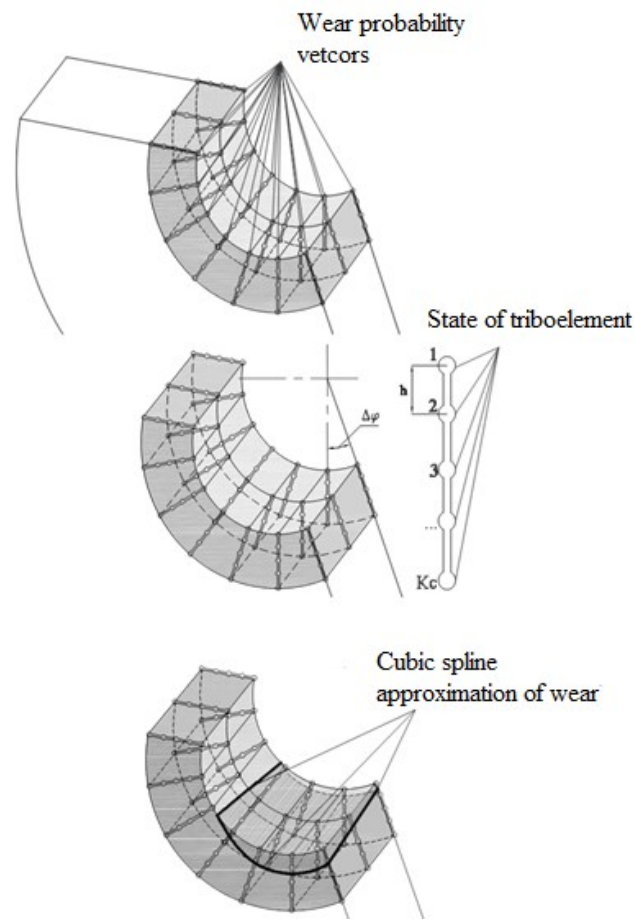


Figure 1. The main stages of wear modeling



**Figure 2. Generalized scheme of triboelement model**

4. Determination of contact pressures in the nodes located in the locations of the triboelements
5. Determination of the parameters of the triboelement wear model using the obtained solution results.
6. Determination of mathematical expectation of wear value for each triboelement with keeping the received vectors of unconditional probabilities of staying of triboelements in this or that state.
7. Determination of new coordinates of the end element nodes located on the wear surface in the locations of the triboelements, taking into account the wear value.
8. Design of cubic spline of geometric model of wear surface.
9. Cyclic execution of items 3 - 9 of this algorithm until reaching the wear limit or a given time of wear of elements of the friction pair.

Simulation of wear processes is an important stage in the design of mechanisms. Such virtual studies allow predicting the service life of components and the machine as a whole. Modern algorithms of CAE-systems allow performing such analysis with high accuracy and taking into account not only the material and operating conditions of the mechanism, but also the errors that occurred during the manufacturing and assembly of a particular part. For example, when considering predictive modeling of the cutting process for coated tools, it is necessary to know the basic parameters of the uncoated tool transition zone and the relative increase or decrease in the adhesion properties of this zone when the coating is applied there [4].

During the operation of machines, rotating and moving parts, in particular shafts, bushings, are subject to the greatest wear, so the analysis of predicting their service life is an important task. These parts require high requirements to the accuracy of manufacturing and assembly, but within the tolerances of the fields errors in mutual arrangement are still allowed, which in turn can significantly affect the service life of the mechanism [5]. Therefore, the task of modeling the wear process of the shaft and sleeve in conditions of mutual misalignment of the axes is relevant. Such sliding pairs exist in almost all machines, including car engines, power generation turbines, etc.

The analysis of the serviceability of plain bearings must take into account the design features of the machine design. One feature that can have a significant impact on the service life of a plain bearing is the relative alignment of the shaft and bearing sleeve axes. Deviations from parallelism can occur due to bending of the shaft, causing the axes of the shaft and the sleeve of the plain bearing to be positioned at a certain angle.

The contact of a rigid shaft of radius  $R_1$  (Fig. 3) and an elastic cylindrical antifriction layer of thickness  $\varepsilon$  coupled with a rigid sleeve is envisaged. The shaft is inclined at an angle  $\theta$  to the sleeve. The  $z$ -axis is directed along the bearing axis. The origin of the  $z$ -axis is located at the end of the bearing, and the angle  $\varphi$  is counted from a plane

passing through the bearing axis parallel to the main vector of forces acting on the shaft.

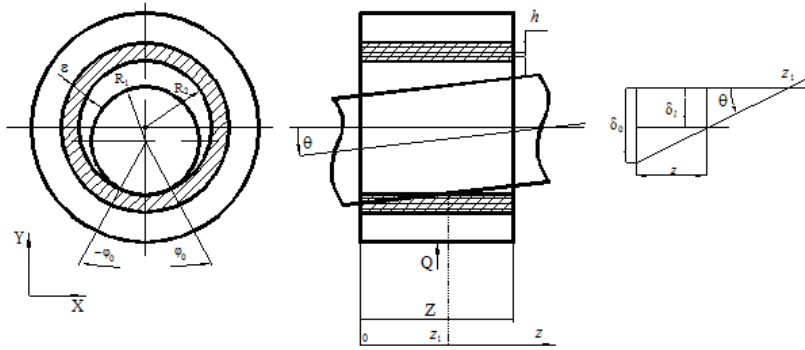


Figure 3. Schematic diagram

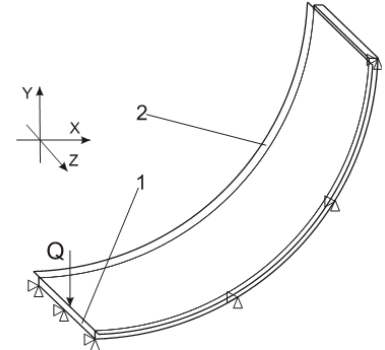


Figure 4. Schematic diagram:  
1 - antifriction element;  
2 - rigid shaft

To solve the wear-contact problems in the spatial formulation, it is necessary to take into account that in this case a cubic spline of the wear surface is constructed. The spline approximation is built on the points of antifriction layer [1], in the locations of triboelements, in two directions - along the  $z$  axis and in the radial direction. Thus, after each iteration of determining the wear value, a cubic spline of the wear surface is built, the geometry of which takes into account the wear at the previous step.

Based on the above calculation model, a parametrized calculation model was built, which is shown in Figure 3. When building the model, taking into account the conditions of the problem, the contact interaction of elements of the tribocoupling is modeled by a rigid-submissive contact. The shaft 2 (Fig. 4), as rigid, is taken as the target surface. The antifriction element 1 is taken as the contact surface. On the contact surface of the antifriction layer the geometric position of triboelements is determined. Twenty-node SolidWorks spatial elements were used to create a finite-element mesh model of the antifriction layer. To create the contact pair "bushing-antifriction element" contact elements "surface-surface" were used.

Wear was considered as a random Markov-type process with discrete time and states. At time  $t = 1$ , the probability locations of TO in one or another state were defined as the product of the vector of initial states  $[\pi_i]$  on the transition probability matrix  $[W_{ij}]$ :

$$[\pi_j(t=1)] = [\pi_j(t=0)][W_{ij}], \quad i, j = 1, 2, \dots, K_C, \quad (1)$$

where  $[\pi_j(t=0)]$  is initial states vector;  $[\pi_j(t=1)]$  – vector of unconditional probabilities of TO in  $j$ -th states ( $j = 1, \dots, K_C$ ) at a point in time  $t = 1$ ;  $[W_{ij}]$  – transition probability matrix.

The probabilities of TO states at time  $t > 1$  were determined as the product  $[\pi_j(t-1)]$  of the vector of unconditional probabilities at time  $t - 1$  on the transition probability matrix, which defines the behavior of TO at time  $t$ :

$$[\pi_j(t)] = [\pi_j(t-1)][W_{ij}], \quad i, j = 1, 2, \dots, K_C. \quad (2)$$

The components of the vector of initial states  $[\pi_j(t=0)]$  were determined from the assumption that at the initial moment of time TO was in the first state:

$$[\pi_j(t=0)] = [1, 0, 0, \dots, 0]. \quad (3)$$

A transition probability matrix [7] with unit jumps up and the presence of an absorbing state was used to describe the TO behavior:

$$[W_{ij}] = \begin{bmatrix} w_{11}(t) & w_{12}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & w_{22}(t) & w_{23}(t) & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

The absorbing state is understood as the state of complete wear of the antifriction layer.

The components  $w_{ij}(t)$ , were determined as follows:

$$w_{ij}(t) \cong_i(t) \Delta t, \quad \text{for } i \neq j, \quad (5)$$

where  $V_I(t) = V_I(t)/h$  - wear flow rate;  $\Delta t$  - time step of loading;  $h$  - value determined from the condition of ordinality of the wear flow;  $V_I(t)$  - the wear rate at the time  $t$ .

The value of wear  $h$  is chosen from the condition that in one load cycle the probability of a wear value greater than  $h$  is negligible. The value of the layer wear was determined because of the mathematical expectation  $\bar{m}_t$ :

$$z_t = (\bar{m}_t - 1)h, \quad (6)$$

where  $\bar{m}_t = \sum_{i=1}^{K_C} i\pi_i(t)$ ,  $i = 1, 2, \dots, K_C$ ;  $\pi_i(t)$  - unconditional probabilities of TO states;  $h = \varepsilon / (K_C - 1)$

- the amount of wear that determines the condition of the triboelements.

At the initial moment of time, it was assumed that all elements were in state 1. As the dependence of the wear rate on the contact pressures and sliding velocity, a stepwise dependence of the form was used:

$$V_I = K_w V^\gamma p(\varphi, \varphi_0(t))^\alpha, \quad (7)$$

where  $V_I$  - wear rate;  $K_w$  - depreciation rate;  $V$  - sliding velocity of the shaft on the sliding layer;  $p(\varphi, \varphi_0(t))$  - contact pressures;  $\alpha, \gamma$  - degree indicators [3].

Simulation of the wear process of parts in conditions of deviation from parallelism of shaft and bush axes allows to predict the possible places of defects in the operation of machines and mechanisms, as well as to calculate the durability of mechanisms. Such modeling contributes to reducing the number of repairs and increasing the life cycle of triboelements.

Visualization of repetitive cyclic loads in graphical format is characterized by reproducibility of large arrays of numerical data reduced to a unified form. If we consider the information presented in the form of multidimensional matrices with statistical data, the level of perception of such information is much lower than in the visual form.

The creation of multidimensional data matrices is an obligatory step of conducting process modeling for further analysis. Static matrices describe processes based on fundamental laws, while dynamic matrices include all iterative processes. When studying physical processes (especially iterative ones) there are cases when the corresponding data cannot be completely covered by a three-dimensional graph divided by a color spectrum, because it is impossible to demonstrate the dynamic process of parameters change from time by means of a static image. In such cases, it is advisable to use animation types of data representation, which allow to visually display the change of state of the processes depicted on the three-dimensional graph in time.

To solve the task, the module of calculation of friction unit wear was developed. The first step of the module is initialization and creation of a graphical model based on the received data. The created geometric model is broken down into finite elements, after that the contact pair is created and the constraints on freedom and value of friction knot loads are set. After the corresponding calculation, the constructed geometric model is destroyed and the process is repeated again for the number of iterations specified by the user.

Practical application of the developed system of modeling of wear processes confirmed the high efficiency of the visual display of the data characterizing the dynamics of wear processes for the general study of pressure and wear changes depending on time.

The multidimensional matrices, containing numerical data, are difficult in perception of the information, especially in the presence of its large number [6]. They do not allow to observe the general picture of researched processes, to give their generalized estimation, to carry out the concrete analysis.

In cases requiring the rapid formulation of generalized conclusions, the practical application of the developed system confirmed the high efficiency of applying the method of visualization of pressure and wear data in the study of shaft and bushing wear at mutual misalignment of the axes.

The basic interface of the developed software product is shown in Fig. 5. In order to increase the level of perception of the information depicted in the graph, the module implements the appropriate toolkit. The toolkit allows you to shift and rotate the graph around the abscissa and ordinate axes, to scale and build the graph step by step. Such step-by-step construction allows to distinguish moments of transition from normal conditions of node operation to critical wear conditions.

Within the framework of research of effectiveness of application of the system of modeling and visualization of wear processes its testing on the data characterizing different variants of dynamics of wear and pressure processes within the framework of the problem of radial plain bearings wear at misalignment of shaft and bush axes was carried out.

For example, in Fig. Fig. 6 shows graphs of pressure dependence on time under condition of rapid initial pressure value (Fig. 6, a), smoothed dependence of pressure on time when studying the wear process of shaft and bushing under condition of mutual misalignment of their axes (Fig. 6, b), and also cases of jump-like pressure growth in a critical situation in the form of peak dynamics of friction pair elements change (Fig. 6, c) and linear dependence of wear process of friction pair elements depending on time of mechanism operation (Fig. 6, d).

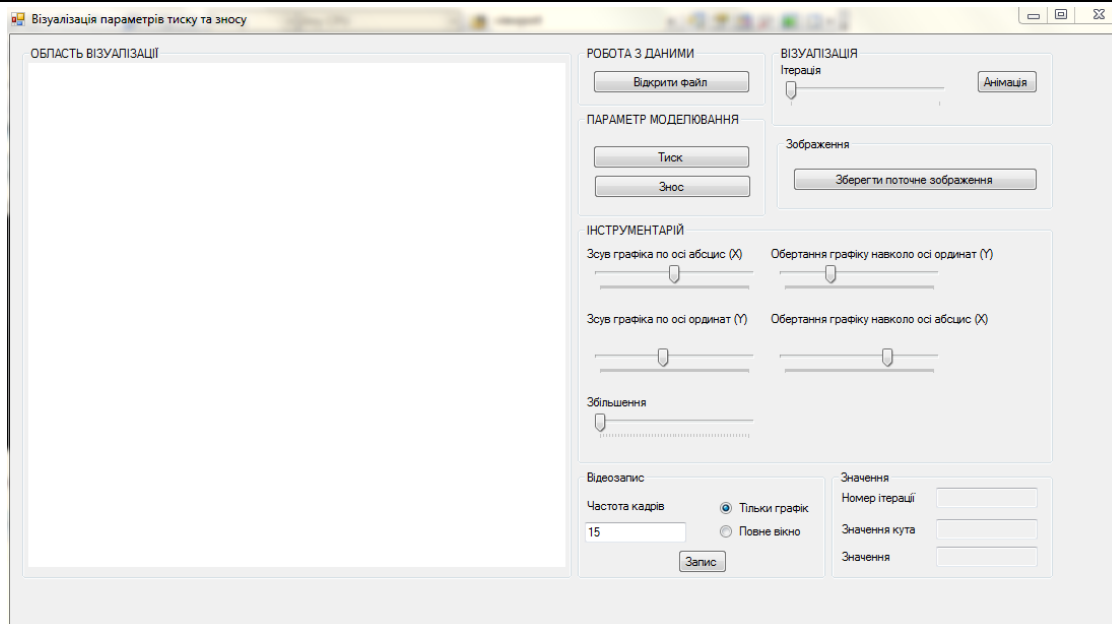


Figure 5. Basic interface of the module

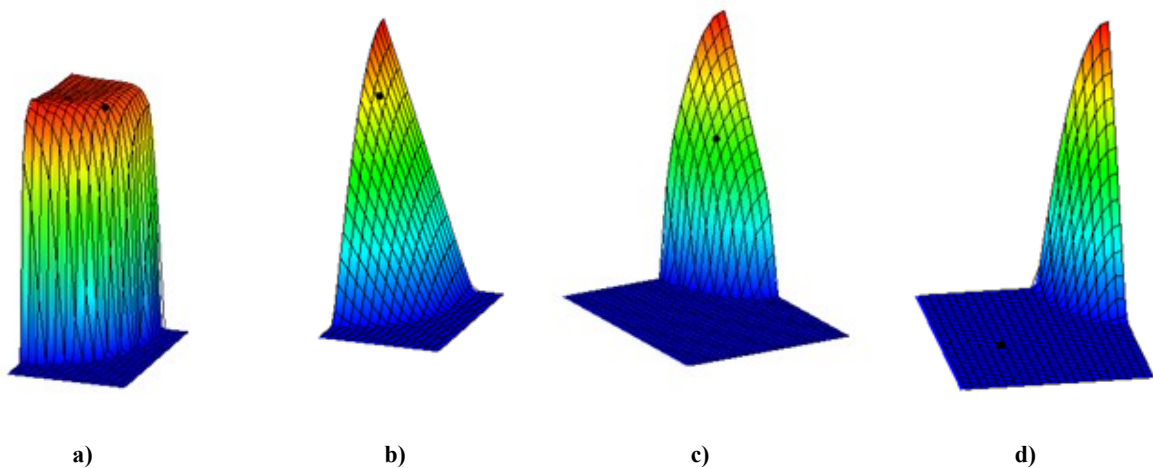


Figure 6. Examples of construction of shaft and liner wear models over time

For better perception of information and further analysis of critical areas of the node conditions, the module implements scaling of abscissa and ordinate axes, as well as rotation of the graph relative to its axis. In addition, the program implements the selection of a particular value from a multidimensional matrix of input data. To do this, the user needs to click the appropriate area of the graph and in the fields Iteration number, Angle value and Wear value the corresponding data will be displayed in numerical format.

If you need to present dynamic information in the absence of the module, it has the ability to record video files, providing several functions. The user can define the video quality himself, with the default setting of 15 frames per second. The program also allows you to save the current image that is in the visualization area.

### Conclusions

The developed system allows to visualize different cases of temporal changes of pressure and wear parameters, wear processes of friction elements, which allows to take into account mutual influence of wear and changes of functioning conditions in the process of operation. In addition, the use of such a system by an expert in the relevant subject area, in which there is a need to process multidimensional matrices, leads to the rapid determination of critical situations in the operation of the mechanism.

By means of visual representation of multidimensional numerical matrices there is a possibility to analyze general dynamics of wear and friction process, to obtain specific data in a certain period of mechanism operation time, to use obtained multimedia files for demonstration of modeling process in future depending on needs (scientific, training, analytical, etc.). The scope of application of the developed module is defined by its use in any field of knowledge in which there are multidimensional data matrices, especially in those areas where data change with time or by another parameter.

---

**References**

1. Hegadekatte V., Huber N., Kraft O. Finite element based simulation of dry sliding wear. *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* 2005. № 13. P. 57–75.
2. Kim N. H., Won D., Burris D., Holtkamp B. Finite element analysis and experiments of metal/metal wear in oscillatory contacts. *Wear*. 2005. № 258. P. 1787–1793.
3. Mazheiko O. I., Markovich S. I. Mathematical modeling of friction unit wear process of "shaft-hub" type. Collection of scientific papers of Kirovograd National Technical University. Machinery in agricultural production, industrial engineering, automation. Kirovograd: KNTU, 2008. Issue. 20. P. 267-274.
4. Mazur N.P., Gladkiy Ya.N., Milko V.V. Predictive modeling of cutting process for tools with coatings. Cutting and tools in technological systems. Kharkov: NTU "KHPI", 2002. Issue. 61. C. 123-131.
5. Sokolan K.S. Modeling of cutting processes using Boolean operations over 3-dimensional figures. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2011. № 6. P. 55-63.
6. Sokolan Yu. C. Graphic method of visualization of multidimensional data matrices in the calculation of wear and friction of shaft and bush in terms of mutual misalignment of axes. Actual problems of computer technology. Proceedings of the sixth all-Ukrainian scientific and technical conference "Actual problems of computer technology 2012". Khmelnytsky: KNU, 2012. P. 300-305.
7. Sorokatyi R.V. Method of triboelements. Monograph. Khmelnytsky: KNU, 2009. 242 p.

Надійшла/Paper received : 23.09.2022 р.    Надрукована/Printed : 01.11.2022 р.

КАТЕНІН Вадим

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ORCID: [0000-0002-6609-2652](https://orcid.org/0000-0002-6609-2652)e-mail: [vadym.katenin@mit.khpi.edu.ua](mailto:vadym.katenin@mit.khpi.edu.ua)

САМОЙЛЕНКО Наталія

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ORCID: [0000-0003-0306-8425](https://orcid.org/0000-0003-0306-8425)e-mail: [samoilenko@kpi.kharkov.ua](mailto:samoilenko@kpi.kharkov.ua)

## СУЧАСНИЙ СТАН ОПЕРАЦІЙ ПОВОДЖЕННЯ З ВІДХОДАМИ СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ В УКРАЇНІ

У роботі проаналізовано стійку тенденцію розвитку сонячної енергетики, що супроводжується утворенням і накопиченням відходів сонячних панелей. Цей процес вимагає застосування досконалого управління відходами та розробки технологій їх утилізації. Зазначено, що проблема відходів сонячних фотоелектричних панелей набуває більшої актуальності через військові дії, що відбуваються на території України. Неоднорідність матеріалів фотоелектричних панелей призводить до неоднозначної класифікації та передбачає поєднання безпечних і небезпечних складових. Визначено, що відходи фотоелектричних панелей можна поділити на два класи небезпеки: небезпечні відходи та відходи, що не є небезпечними. Охарактеризовано основні моменти утилізації непридатних для використання фотоелектричних панелей з відновленням ресурсоцінної сировини. Зазначено, що є значні відмінності у матеріальній складовій панелей із кристалічного кремнію та тонкоплівкових модулів. Визначено, що на сьогодні розрізняють два види переробки PV-модулів – грубу та тонку, а загалом операції утилізації відходів фотоелектричних панелей поєднують механічні та хімічні процеси вилучення матеріалів. Недосконалість законодавчо-нормативної та інформаційної бази, небезпека утворення та накопичення відходів, проблеми моніторингу, повільний розвиток процесів організації процесів збирання, накопичення та передачі відходів, а також недостатність пропозицій щодо способів переробки відходів фотоелектричних панелей як ресурсоцінної сировини визначні як основні проблеми у сфері управління відходами фотоелектричних панелей в Україні.

Ключові слова: сонячні фотоелектричні панелі, утилізація, відходи, управління відходами.

KATENIN Vadym, SAMOILENKO Nataliia

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

## CURRENT STATE OF SOLAR PHOTOVOLTAIC PANELS WASTE MANAGEMENT OPERATIONS IN UKRAINE

The paper analyzes the steady trend of solar energy development, which is accompanied by the formation and accumulation of solar panel waste. This process requires the application of accomplished waste management and the development of waste disposal technologies. It was determined that the problem of waste solar photovoltaic panels becomes more urgent due to the military actions taking place on the territory of Ukraine. The general characteristics of waste for different types of panels are given. The heterogeneity of the materials of photovoltaic panels leads to an ambiguous classification and involves a combination of safe and dangerous components. It has been determined that photovoltaic panel waste can be divided into two hazard classes: hazardous waste and non-hazardous waste. The key points of solar panel waste management operations are characterized in accordance with the Law of Ukraine "On Waste Management" and EU Legislation. The main points of disposal of unusable photovoltaic panels with recovery of valuable raw materials are described. It is noted that there are significant differences in the material composition of crystalline silicon panels and thin film modules. It is noted that two processing types of PV modules are currently distinguished - coarse and fine, and the most effective steps in the preparatory stage of disposal are also determined. In general, PV panel waste disposal operations combine mechanical and chemical material extraction processes. The imperfection of the legislative and regulatory framework in the field of waste management, the increase in the ecological danger of the generation and accumulation of waste, the imperfection of the information base and waste monitoring, the insufficient development of the processes of organizing the processes of collection, accumulation and transfer of waste for disposal, the insufficiency of proposals for methods of processing and disposal of solar panels waste as a valuable resource of secondary raw materials are notable as the main problems in the field of waste management of photovoltaic panels in Ukraine. One of the main tasks for development is to increase the share of waste materials that are currently not disposed of, but can be used as secondary raw materials.

Key word: solar photovoltaic panels, recycling, waste, waste management.

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

Тенденція до скорочення використання мінеральних енергетичних ресурсів та розвиток сонячної енергетики у багатьох країнах світу є послідовною та сталою. У цьому зв'язку виробництво і використання сонячних фотоелектричних панелей (СФЕП) з кожним роком збільшується. Так, у 2021 році у світі було встановлено щонайменше 175 гігават фотоелектричних систем, що майже на 18% більше ніж у 2020 році та у 10 разів більше ніж у 2010 [1]. Водночас цей процес супроводжується підвищенням екологічної небезпеки утворення і накопичення сонячних фотоелектричних панелей і вимагає застосування досконалого управління відходами та розробки технологій їх утилізації.

Відходи СФЕП використовуються у якості цінної сировини для виготовлення нових сонячних панелей або електронних пристроїв, що в цілому дозволяє знизити витрати енергії і матеріалів на виготовлення нової продукції, а також зменшити негативний вплив виробництва СФЕП на довкілля.



За оцінками, до 2050 року загальний обсяг відходів фотоелектричної енергії може досягти 78 мільйонів метричних тон. При цьому сировина, отримана з панелей, може складати вартість 450 млн дол. США до 2030 року і перевищувати 15 млрд дол. США до 2050 [2].

Донедавна відходи сонячних фотоелектричних панелей, в основному, являли собою відпрацьовані чи пошкоджені конструкції [3]. Військові дії, що відбуваються на території України і супроводжуються руйнуванням інфраструктури, породжують відходи війни, серед яких мають місце і відходи СФЕП. При розбиранні завалів такі панелі надходять у цикл будівельних відходів, з яких їх потрібно вилучати, демонтувати та направляти на утилізацію. Даний факт посилює актуальність питань, що стосуються екологічно безпечного управління будівельними відходами взагалі та відходами сонячних фотоелектричних панелей зокрема.

Важливим аспектом в управлінні відходами СФЕП є виважені, науково та практично обґрунтовані дії щодо кожної операції поводження з відходами, які повинні актуалізуватись та корегуватись відповідно вимог екологічної безпеки.

### **Аналіз досліджень та публікацій**

Стійка тенденція щодо збільшення кількості фотоелектричних сонячних панелей підвищує актуальність теми та відповідно кількість публікацій стосовно поводження з ними. При цьому основні дослідження присвячуються питанням операції утилізації панелей. Так, International Energy Agency [1] та International Renewable Energy Agency [2] публікують регулярні звіти по темі сучасних технологій рециклінгу сонячних панелей. Авторами [4, 5] аналізуються різні підходи до утилізації СФЕП та представляються висновки щодо екологічної та економічної доцільності відмінних методів. Акцентується увага на перевагах повного екологічно-свідомого циклу використання сонячних панелей перед традиційними підходами [6]. У публікаціях вітчизняних дослідників визначається актуальність питання утилізації фотоелектричних модулів, створення функціональної структури зі збору та переробки фотоелектричних модулів із застосуванням новітніх технологій і методологічних підходів поводження із подібними відходами [7].

Водночас у публікаціях мало уваги привертається актуальним питанням, що розглядають поводження з відходами сонячних фотоелектричних панелей не тільки в операціях утилізації, але й іншим операціям щодо поводження з відходами СФЕП.

### **Формулювання цілей статті**

Метою роботи є оцінка стану утворення відходів сонячних фотоелектричних панелей та аналіз досконалості операцій поводження з відходами в Україні.

### **Виклад основного матеріалу**

Структура фотоелектричних панелей характеризується використанням різного роду матеріалів: металу, скла, пластику та матеріалів фотоелектричного елементу. В залежності від типу останній може являти собою кристалічні монокристалічні чи багатокристалічні кремнієві пластини, а також тонкоплівкові елементи - аморфний кремній, телурид кадмію, мідний селенід індію галію. Проводяться дослідження за нанотехнологіями щодо застосування фосфіду індію галію, арсеніду галію та ін. [8]. Крім того, панелі можуть містити германій та селен [9].

Найбільш розповсюдженими є фотоелектричні панелі на основі кремнію, для виготовлення яких на практиці використовуються досить досконалі технології, що сприяє насиченню ринку цією продукцією та важливій позиції у відновлювальній енергетиці. У цьому зв'язку відходи фотоелектричних панелей, в основному, формуються кремнієвими СФЕП.

Метал у переважній більшості СФЕП представлений рамами з анодованого чи порошкового алюмінію, а також міддю в електричній частині. Кожна фотоелектрична панель у своїй конструкції має шар загартованого скла, плівку для ламінування з етиленвінілацетату (EVA – плівка), а також пластику як допоміжного матеріалу при кріпленні елементів СФЕП.

Зважаючи на неоднорідність матеріалів, з яких виготовлені СФЕП, їх відходи класифікуються неодноразово та передбачають поєднання у своїй конструкції безпечних і небезпечних для довкілля складових. Найбільшу небезпеку для довкілля являють собою тонкоплівкові СФЕП, що включають такі сполуки як телурид кадмію, мідний селенід індію галію. В умовах холодного клімату СФЕП виготовляють з використанням антифризових рідин, які є також небезпечними. У порівнянні з тонкоплівковими відходи кремнієвих СФЕП вважаються значно безпечнішими для довкілля.

У відповідності з прийнятим законом України «Про управління відходами» управління відходами – це комплекс заходів із збирання, перевезення, оброблення (відновлення, у тому числі сортування, та видалення) відходів, включаючи нагляд за такими операціями та подальший догляд за об'єктами видалення відходів [10].

Кожна операція даного комплексу виконується у відповідності з нормативними вимогами, що необхідні для здійснення відповідної їй діяльності. Так, інструкція по збору і транспортуванню відходів, якою керуються на підприємстві, передбачає комплекс заходів безпеки щодо зниження (повного виключення) негативного впливу на довкілля і людину діяльності при збиранні, тимчасовому зберіганні та видаленні відходів.

У загальному випадку збирання відходів передбачає операцію щодо вилучення, накопичення, зберігання, перевезення відходів на об'єкти оброблення відходів (або від одного об'єкта до іншого), яка здійснюється суб'єктами господарювання у сфері управління відходами. Зберігання відходів потребує їх утримання в умовах, безпечних для здоров'я людей та навколишнього природного середовища та з дотриманням відповідних екологічних вимог.

Основним фактором, що впливає на операції управління відходами, є їх ідентифікація, що включає віднесення до певного виду відходів. Для відходів СФЕП можуть бути визначені два класи небезпеки: небезпечні відходи та відходи, що не є небезпечними. Водночас, зважаючи на комплексність матеріалів, з яких виготовлено СФЕП, в одній панелі після розбирання на складові можуть бути елементи, що відносяться до різних класів відходів.

Законодавством ЄС передбачається віднесення відходів СФЕП до відходів електричного та електронного обладнання [11]. При цьому таке обладнання визначається як обладнання, належне функціонування якого залежить від електричного струму й електромагнітних полів, та обладнання для генерування, передачі та виміру такого струму й полів, призначене для використання з номінальною напругою не вище 1000 вольт для змінного струму та 1500 вольт для постійного струму.

В Україні електричні та електронні відходи входять в окрему групу, але безпосередньо відходи СФЕП в ній не зазначаються. У відповідності з Державним класифікатором відходів ДК 005-96 відходи СФЕП можливо ідентифікувати за різними групами: розділом Б.1. (група 40, код 4010.2.9.12) та розділом Б.6 (група 77, код 7740.3.1.03). У теперішній час розглядається проект національного класифікатора НК 005:2021 «Класифікатор відходів». Передбачається відповідність позицій відходів класифікатора європейському переліку відходів. Логічним є віднесення відходів СФЕП до групи електричних та електронних відходів.

У комплексі заходів управління відходами має місце видалення відходів, тобто здійснення операцій з відходами, яка не передбачає їх утилізацію через відсутність відповідної технології. Згідно нормативного порядку утилізація небезпечних відходів здійснюється спеціалізованими підприємствами, що мають відповідну ліцензію. Стосовно відходів СФЕП дана операція має обмежене застосування, так як переважна більшість панелей використовується повторно чи утилізується.

Переробка відходів СФЕП застосовується у випадку потенційної можливості продовжити термін експлуатації панелей, що вже закінчилися, або панель була пошкоджена. Проводиться очищення конструкції (ремонт) та тестування характеристик панелі, після чого СФЕП може бути повторно використати.

Утилізація непридатних для використання СФЕП проводиться для панелей різних типів, в першу чергу кремнієвих, які складають майже 90% відходів. Водночас, слід відзначити, що частина непридатної для використання панелі (до 15%) після розбирання не піддається утилізації [2, 12]. Таким чином, при проведенні процесу утилізації СФЕП утворюється вторинна сировина (скло, напівпровідникові матеріали і метали) та відходи.

До складу сонячних модулів входить ресурсоємна сировина, склад якої у панелях варіюється. Так, у відсотковому співвідношенні панель із кристалічного кремнію – це 76% скла, 10% полімерних матеріалів, 8% алюмінію, 5% кремнієвих напівпровідників, 1% міді, менше 0,1% срібла, олова та свинцю. У тонкоплівкових модулях частка скла набагато вище – 89% (CIGS) і 97% (CdTe) [5].

На сьогоднішній день розрізняють два види переробки PV-модулів – грубу та тонку. При першій здійснюється витяг основних матеріалів модуля: алюмінію, міді, скла; пластмаса ж термічно розкладається. При другій переробці можливе вилучення всіх хімічних елементів з фотоелементу панелі.

На підготовчій стадії до утилізації відходів використовують різні технологічні прийоми, що дозволяють відокремити основні частини конструкції. Звичайно послідовність операцій така:

1. Знімання захисної алюмінієвої рами з модуля.
2. Відокремлення розподільчої коробки.
3. Вилучення скла з кремнієвим сонячним елементом.
4. Відділення елементів панелі, що містять кремній та метали.

Вилучена алюмінієва рама направляється на переформування каркасів панелей. Великий відсоток скла можливо утилізувати, але при цьому виникають проблеми щодо якості матеріалу та можливого його забруднення домішками. Подальше механічне відділення елементів панелі потребує термічної обробки при температурі не нижче 500° С. У даному процесі проходить випарювання пластику, який використовувався для герметизації панелі. Операції щодо вилучення цінних матеріалів (кремнію, срібла, напівпровідникових елементів) виконуються із застосуванням хімічних процесів.

Таким чином, операції утилізації відходів СФЕП поєднують механічні та хімічні процеси вилучення матеріалів. При цьому підвищення рівня екологічної безпеки починається при термічному нагріванні та супроводжує етапи операцій щодо хімічних впливів на частину кремнієвих елементів панелі.

Основними проблемами у сфері управління відходами СФЕП в Україні є:

- недосконалість законодавчо-нормативної бази у сфері управління відходами;
- підвищення екологічної безпеки утворення та накопичення відходів, у тому числі тих, що входять у склад категорії відходів війни;
- недосконалість інформаційної бази та моніторингу відходів,
- недостатній розвиток процесів організації процесів збирання, накопичення та передачі відходів на утилізацію;

- недостатність пропозицій щодо способів екологічно безпечної переробки та утилізації відходів СФЕП як ресурсоцінної вторинної сировини.

Провідну роль у вирішенні даних проблем має нормативна складова. Законодавча база в Україні у сфері управління відходами у теперішній час удосконалюється шляхом прийняття закону та підзаконних нормативно-правових актів, які направлені на підвищення екологічної безпеки на всіх операціях поводження з ними, що в тому числі включають відходи СФЕП. Прийнятий закон України «Про управління відходами», який набирає чинності з 09.07.2023 р. [9], визначає основні напрямки діяльності щодо запобігання негативного впливу відходів на здоров'я людей та навколишнє природне середовище. Положення закону розглядаються у сфері права, організаційних та економічних засад щодо управління відходами, а також сприяння підготовці відходів до повторного використання, рециклінгу та відновленню.

Національною стратегією управління відходами до 2030 року та Національним планом управління відходами до 2030 року [13] визначаються напрямки розвитку управління відходами та узгоджуються національна політика і стратегія планування управління відходами з європейськими підходами. Розглядається впровадження економічних інструментів для удосконалення управління відходами, зокрема, запровадження економічного стимулювання впровадження екологічно чистих технологій виробництва та розширення можливостей перероблення (рециклінгу). В управлінському аспекті планується вдосконалення інституційної структури сфери управління відходами. Планується реформування системи інформаційного забезпечення сфери управління відходами з утворенням інформаційного центру для збирання, оброблення, аналізу та поширення інформації про управління відходами. Значна увага приділяється управлінню небезпечними відходами. Важливим є окремий підрозділ в документі, в якому розглядається формування державної політики у сфері управління відходами електричного та електронного обладнання. Планується розробка законопроекту про відходи електричного та електронного обладнання, встановлення вимог до збирання, зберігання та оброблення електричного та електронного обладнання, а також прийняття національних стандартів для відходів електричного і електронного обладнання. Передбачається створення інфраструктури для збирання та оброблення для відходів електричного та електронного обладнання та ін.

Що стосується недостатності пропозицій щодо способів переробки та утилізації відходів СФЕП, то слід зазначити, що процес утилізації даних відходів з точки зору запропонованих та запроваджених технологій навіть у розвинених країнах світу не є досконалим. Самою оптимістичною оцінкою щодо всіх панелей передбачається, що рівень збору складе 85%, а відновлення відновлення складових елементів – 95 % [8]. Безперечно, що дослідження у сфері використання відходів СФЕП як вторинної сировини потребують розширення та практичного використання. При цьому однією із головних задач є підвищення частки матеріалів відходів, для які у теперішній час не утилізуються, але можуть бути використані як вторинна сировина.

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

Масштабування та популяризація виробництва енергії шляхом сонячної генерації в світі призводить до підвищення актуальності питання переробки відпрацьованих панелей. Фотоелектричні панелі містять різні за класом небезпеки речовини і в Україні однозначно не ідентифікуються. Такий стан впливає на чіткість проведення процедур поводження з відходами та потребує нормативного регулювання.

Відходи СФЕП відносяться до ресурсоцінних, а отже операції з їх утилізації повинні розширюватись та удосконалюватись. Це передбачає утилізацію частини відходів, які у теперішній час не залучені у даний процес, та підвищення екологічної безпеки операцій вилучення цінних металів та кремнію.

Провідну роль у вирішенні проблем щодо операцій поводження з відходами сонячних фотоелектричних панелей має відігравати нормативна база. Особливо актуальним в Україні є розробка нормативних та методичних основ щодо операцій поводження з відходами СФЕП, що входять в категорію відходів війни

### **Література**

1. Masson, Gaetan & Bosch, Elina & Kaizuka, I. & Jäger-Waldau, Arnulf & Donoso, José. (2022). Snapshot of Global PV Markets 2022 Task 1 Strategic PV Analysis and Outreach PVPS.
2. IRENA, IEA-PVPS. End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, 2016. Available from: <http://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>.
3. Самойленко Н. М. Переробка та утилізація фотоелектричних сонячних панелей / Н. М. Самойленко, В. Д. Катенін, А. О. Баранова // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Нові рішення в сучасних технологіях : зб. наук. пр. = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : New solutions in modern technology : col. of sci. papers. – Харків : НТУ "ХПІ", 2021. – № 2 (8). – С. 121-126.
4. Weckend Stephanie, Wade Andreas, Heath Garvin A. End of Life Management: Solar Photovoltaic Panels. United States. 2016. doi: 10.2172/1561525.
5. Komoto K, Lee J-S, Zhang J, Ravikumar D, Sinha P, Wade A, Heath GA. End-of-life management of photovoltaic panels: trends in PV module recycling technologies. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO, 2018.

6. Tsang M., Sonnemann G., Bassani D. Life-cycle assessment of cradle-to-grave opportunities and environmental impacts of organic photovoltaic solar panels compared to conventional technologies. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2016. No 156. P. 37-48.
7. Пундєв В. О. Утилізація фотоелектричних модулів. Проблеми та міжнародний досвід / В. О. Пундєв, В. Ф. Рєзцов, Т. В. Суржик, В. І. Шевчук, І. О. Шейко // *Відновлювана енергетика*. – 2020. – № 3. – С. 27-34. – Режим доступу : [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vien\\_2020\\_3\\_6](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vien_2020_3_6).
8. Giurco D., Dominish E., Florin N., Watari T., McLellan B. Requirements for Minerals and Metals for 100% Renewable Scenarios. In: Teske S. (eds) *Achieving the Paris Climate Agreement Goals*. Springer, Cham. 2020, P. 437-457. doi: 10.1007/978-3-030-05843-2\_11.
9. Stamford L., Azapagic A. Environmental impacts of copper- indium-gallium-selenide (CIGS) photovoltaics and the elimination of cadmium through atomic layer deposition. *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 688. P. 1092-1101. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.343.
10. Про управління відходами : закон України від 20.06.2022 № 2320-IX. Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text>
11. European Union. Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). *Official Journal of the European Union*. 2012;197:38-71.
12. IRENA. Future of solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation: paper). Abu Dhabi. International Renewable Energy Agency. 2019. 73 pp.
13. Про внесення змін до деяких актів Кабінету Міністрів України з питань діяльності Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів. Постанова Кабінету Міністрів України від 09.09.2020 № 826. Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/826-2020-п#Text>

#### References

1. Masson, Gaetan & Bosch, Elina & Kaizuka, I. & Jäger-Waldau, Arnulf & Donoso, José. (2022). Snapshot of Global PV Markets 2022 Task 1 Strategic PV Analysis and Outreach PVPS.
2. IRENA, IEA-PVPS. End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, 2016. Available from: <http://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>.
3. Samoilenko N. M. Pererobka ta utylizatsiia fotoelektrychnykh soniachnykh panelei / N. M. Samoilenko, V. D. Katenin, A. O. Baranova // *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI"*. Ser. : Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh : zb. nauk. pr. = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : New solutions in modern technology : col. of sci. papers. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2021. – № 2 (8). – S. 121-126.
4. Weckend Stephanie, Wade Andreas, Heath Garvin A. End of Life Management: Solar Photovoltaic Panels. United States. 2016. doi: 10.2172/1561525.
5. Komoto K, Lee J-S, Zhang J, Ravikumar D, Sinha P, Wade A, Heath GA. End-of-life management of photovoltaic panels: trends in PV module recycling technologies. *National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO*, 2018.
6. Tsang M., Sonnemann G., Bassani D. Life-cycle assessment of cradle-to-grave opportunities and environmental impacts of organic photovoltaic solar panels compared to conventional technologies. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2016. No 156. P. 37-48.
7. Пундєв В. О. Утилізація фотоелектричних модулів. Проблеми та міжнародний досвід / В. О. Пундєв, В. Ф. Рєзцов, Т. В. Суржик, В. І. Шевчук, І. О. Шейко // *Відновлювана енергетика*. – 2020. – № 3. – С. 27-34. – Режим доступу : [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vien\\_2020\\_3\\_6](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vien_2020_3_6).
8. Giurco D., Dominish E., Florin N., Watari T., McLellan B. Requirements for Minerals and Metals for 100% Renewable Scenarios. In: Teske S. (eds) *Achieving the Paris Climate Agreement Goals*. Springer, Cham. 2020, P. 437-457. doi: 10.1007/978-3-030-05843-2\_11.
9. Stamford L., Azapagic A. Environmental impacts of copper- indium-gallium-selenide (CIGS) photovoltaics and the elimination of cadmium through atomic layer deposition. *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 688. P. 1092-1101. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.343.
10. Про управління відходами. Закон України; Перелік від 20.06.2022 № 2320-IX. Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text>
11. European Union. Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). *Official Journal of the European Union*. 2012;197:38-71.
12. IRENA. Future of solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio- economic aspects (A Global Energy Transformation: paper). Abu Dhabi. International Renewable Energy Agency. 2019. 73 pp.
13. Про внесення змін до деяких актів Кабінету Міністрів України з питань діяльності Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів. Постанова Кабінету Міністрів України від 09.09.2020 № 826. Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/826-2020-п#Text>

Надійшла/Paper received : 23.09.2022 р.    Надрукована/Printed : 01.11.2022 р.

ШІЛІНГ Анна

Національний університет «Львівська політехніка»

ORCID ID: 0000-0003-1063-3437

e-mail: [anna.y.shilinh@lpnu.ua](mailto:anna.y.shilinh@lpnu.ua)

ПАСЬКО Анастасія

Національний університет «Львівська політехніка»

e-mail: [anastasiia.pasko.dk.2020@lpnu.ua](mailto:anastasiia.pasko.dk.2020@lpnu.ua)

## РОЗРОБКА СТРУКТУРИ СЛОВНИКА ДЛЯ ЧАТ-БОТУ КАТАЛОГУ ОСВІТНІХ ПОСЛУГ ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

*В роботі запропоновано структуру словника лексичних запитів користувачів офіційних веб-ресурсів до чат-боту освітніх послуг закладу вищої освіти. Визначено, що ключові слова тематичних запитів, які визначають відповідні розділи каталогу освітніх послуг закладу вищої освіти, співпадають з мотиваційними намірами користувачів офіційних веб-ресурсів ЗВО. Розроблено показник важливості ключових слів у тематичних запитах до чат-боту, який оцінює ключові слова в запиті та зменшує важливість поширених слів. Результати дослідження використовуються і можуть бути використані для своєчасного та якісного інформування споживачів освітніх послуг та ефективного надання освітніх послуг закладами вищої освіти.*

*Ключові слова:* словник, чат-бот, каталог освітніх послуг, показник важливості, заклад вищої освіти.

SHILINH Anna, PASKO Anastasiia

Lviv Polytechnic National University

## DEVELOPMENT OF THE DICTIONARY STRUCTURE FOR THE CHAT-BOT OF EDUCATIONAL SERVICES CATALOG OF THE HIGHER EDUCATION INSTITUTION

*The aim of this article is to develop a dictionary structure for a chatbot of educational services catalog of the higher education institution. The quality of information support for consumers of educational services depends on the timeliness and reliability of the information provided. If the World Wide Web user does not receive information from official sources of the higher education institution (HEI), this may cause a negative impact on the information system of the higher education institution. The motivational intentions of the official web resources users of the higher education institution in thematic requests to the chatbot correspond to specific sections in the educational services catalog of the higher education institution. Therefore, the lexical selection of motivational intentions, which are characterized by keywords in the thematic query, makes it possible to clearly formulate/correct the completeness of the provision of relevant information. This will make it possible to rationally use the communication process between higher education institution and educational services consumers. As a result of the research, the structure of the lexical content of the dictionary for the chatbot of the educational services catalog is proposed, taking into account the peculiarities of the formation of users information needs from official web resources of the higher education institution. Each thematic request to the proposed chatbot is characterized by a set of keywords that correspond to certain sections of the educational services catalog of the higher education institution. The importance of these keywords are determined by the weighting factor, which shows the relevance of the thematic query to the section of the educational services catalog. For this, a statistical indicator was used, which evaluates the keywords in the query and reduces the importance of common words. The results of the research are applied and can be used for effective communication between the higher education institution and consumers of educational services using HEI's official resources for effective planning of educational services.*

*Keywords:* dictionary, chatbot, catalog of educational services, importance indicator, higher education institution.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

Ефективна діяльність закладу вищої освіти залежить від багатьох факторів. Однією з них є швидкість та якісна взаємодія зі споживачами освітніх послуг, зокрема і потенційними абітурієнтами. На сьогодні основний комунікаційний процес відбувається у віртуальному просторі. Але варто зауважити, що не вся інформація віртуального простору є якісною. У процесі прийняття рішення споживачами освітніх послуг важливу роль відіграє швидкість, якість та своєчасність наданої інформації. Оскільки, не отримавши вчасно відповідь на запитання користувач може звернутися до іншого ресурсу, який не завжди є офіційним для ЗВО. З іншого боку, живий комунікаційний процес, коли відповідь надає працівник ЗВО, не завжди є можливим і своєчасним. А інформація на інших веб-ресурсах, окрім офіційного веб-сайту ЗВО, є якісною за умови її модерації представником ЗВО. Офіційна інформація про підготовку спеціальностей ЗВО розміщена на офіційному сайті у каталозі освітніх послуг. Але пошук необхідної інформації ускладнюється тим, що потенційні споживачі освітніх послуг не мають досвіду у користуванні цим каталогом, тому або витрачають багато часу, щоб отримати необхідну інформацію, або здійснюють пошук на інших веб-ресурсах, які не завжди є офіційними (Рис.1).

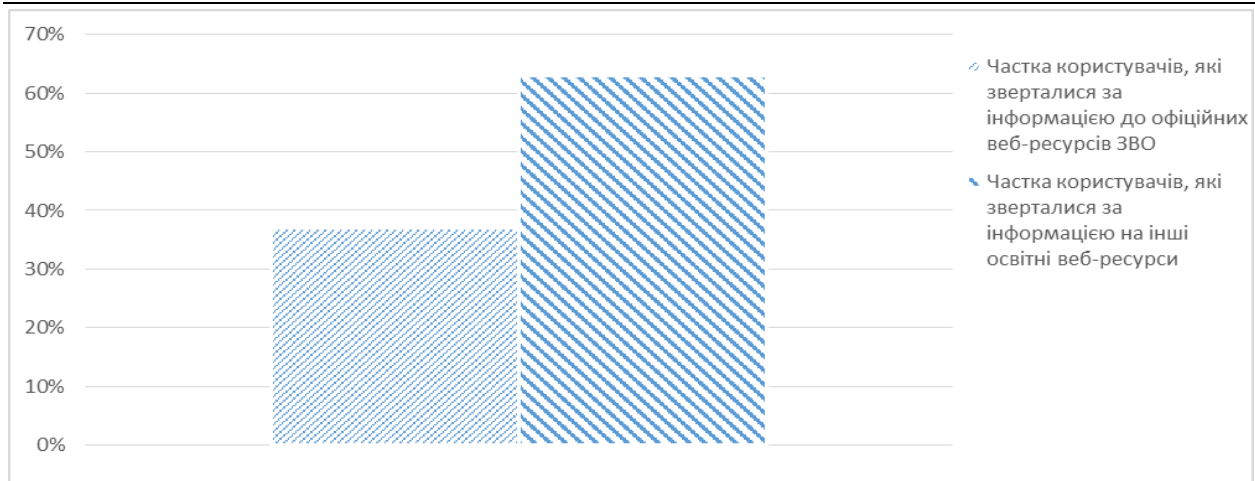


Рис. 1. Частка вибору веб-ресурсів користувачами для отримання освітньої інформації

Формуючи запити на отримання чи пояснення інформації, користувачі освітніх послуг виражають у свої інформаційні потреби. З іншого боку, каталог освітніх послуг закладу вищої освіти є чітко структурованим та містить інформацію у вигляді офіційних назв спеціальностей, освітніх програм та структурних одиниць ЗВО, що, у свою чергу, є його ключовими словами. Перетин цих множин ключових слів є визначальним у своєчасності та якості наданої інформації. Саме тому, є можливим використання ресурсу чат-боту для швидкого та якісного надання необхідної інформації для потенційних споживачів освітніх послуг. Важливим аспектом формування словника для чат-боту каталогу освітніх послуг є визначення значущості його змісту, оскільки він дає змогу точно і швидко реагувати на інформаційні потреби учасників комунікативної діяльності, не залучаючи до неї безпосередньо представників ЗВО.

#### Аналіз останніх джерел

Сьогодні віртуальний простір є першоджерелом комунікативної діяльності, а не середовищем пасивної інформатизації [1, 2]. Дослідження та аналіз комунікативної діяльності учасників веб-спільнот є предметом роботи [3]. Зокрема, дослідження [4] аналізує комунікативну діяльність у спеціалізованих веб-спільнотах з урахуванням особливостей планування надання освітніх послуг. Тенденції прийняття рішень вступниками під час відбору ЗВО та майбутніх спеціальностей проаналізовано у працях [5, 6]. Велика кількість інформаційного контенту освітніх веб-спільнот потребує його інтелектуальної обробки та аналізу [7]. Методи інтелектуального аналізу даних і аналізу тексту розглядаються в дослідженні [8]. Зокрема, у роботах [9, 10] проаналізовано методи вирішення проблеми вилучення інформації з текстів. Предметом дослідження є лінгвістичні основи виділення термінологічних одиниць із науково-технічних текстів [11]. Структура спеціалізованої лексики, лексичне представлення теми вилучення з наукової літератури для управління компетентністю є метою дослідження [12]. Методи визначення значення слів у веб-просторі та критерії якості веб-сторінок є визначено у дослідженнях [13, 14]. У роботі [15] обґрунтовано вибір статистичного показника TF-IDF для оцінки важливості слів у примітках та визначення актуальності цієї публікації.

Огляд сучасних тенденцій у розвитку систем чат-ботів є предметом дослідження [16]. Зокрема, технічний огляд п'яти сучасних систем чат-ботів є метою досліджень [17-19]. У роботах [20, 21] обґрунтовано причини, які стимулюють використання чат-ботів для різних сфер діяльності та їх корисність, зокрема освітньої, медичної та економічної галузей.

Але жодне з досліджень не розглядає можливість інтеграції отриманої інформації для ефективної комунікації ЗВО з користувачами офіційних веб-ресурсів для подальшого планування надання освітніх послуг.

Аналіз тематичних запитів споживачів освітніх послуг до чат-боту, та надання своєчасної якісної інформації вимагає виділення ключових слів, які характеризують певний розділ каталогу освітніх послуг закладу вищої освіти, та мотиваційних намірів користувача, тобто слів чи фраз, які їх ідентифікують, і визначають відношення до конкретного розділу каталогу. Саме тому, **метою** цієї статті є створення словника для чат-боту каталогу освітніх послуг закладу вищої освіти для якісної комунікації ЗВО зі споживачами освітніх послуг, та оцінка важливості виявлених ключових слів каталогу освітніх послуг для визначення актуальності запиту та своєчасного надання необхідної інформації. **Завданням роботи** є опис структури словникового чат-боту каталогу освітніх послуг закладу вищої освіти та визначення критеріїв оцінки важливості його інформації.

#### Виклад основного матеріалу

##### Формування словника лексичних запитів до чат-боту каталогу освітніх послуг закладу вищої освіти

В комунікаційній діяльності споживачів освітніх послуг, зокрема потенційних абітурієнтів, і закладу вищої освіти освітній спеціалізований чат-бот каталогу освітніх послуг відіграє важливу роль. Текстові запити, які формуються на основі повідомлень у системі чат-боту потребують видобування із них ключових слів, які характеризують їх мотиваційних наміри. Саме це є безпосереднім показником зацікавленості користувача офіційними ресурсами та виражає його вибір відносно майбутньої спеціальності та закладу вищої освіти.

Формування словника лексичних запитів до чат-боту каталогу освітніх послуг закладу вищої освіти дає змогу створити комфортний процес комунікації та визначити зони можливого впливу на споживачів освітніх послуг, аналізуючи їх інформаційні потреби, що зумовлені їх мотиваційними намірами.

Основою формування словника для чат-боту каталогу освітніх послуг є множина ключових слів кожного розділу електронного каталогу та словник мотиваційних намірів потенційних абітурієнтів, який ґрунтується на методі декомпозиції – метод, у процесі якого від допису відкидаю його частини до того часу, коли частина допису буде відповідати синтаксичній, або методу синтезу.

В основі процесу формування словника для чат-боту є співставлення елементів текстового запиту на офіційних веб-ресурсах закладу вищої освіти із елементами множини ключових слів відносно кожного розділу електронного каталогу освітніх послуг ЗВО.

Опис структури словника для чат-боту каталогу освітніх послуг закладу вищої освіти представлено на рис. 2.

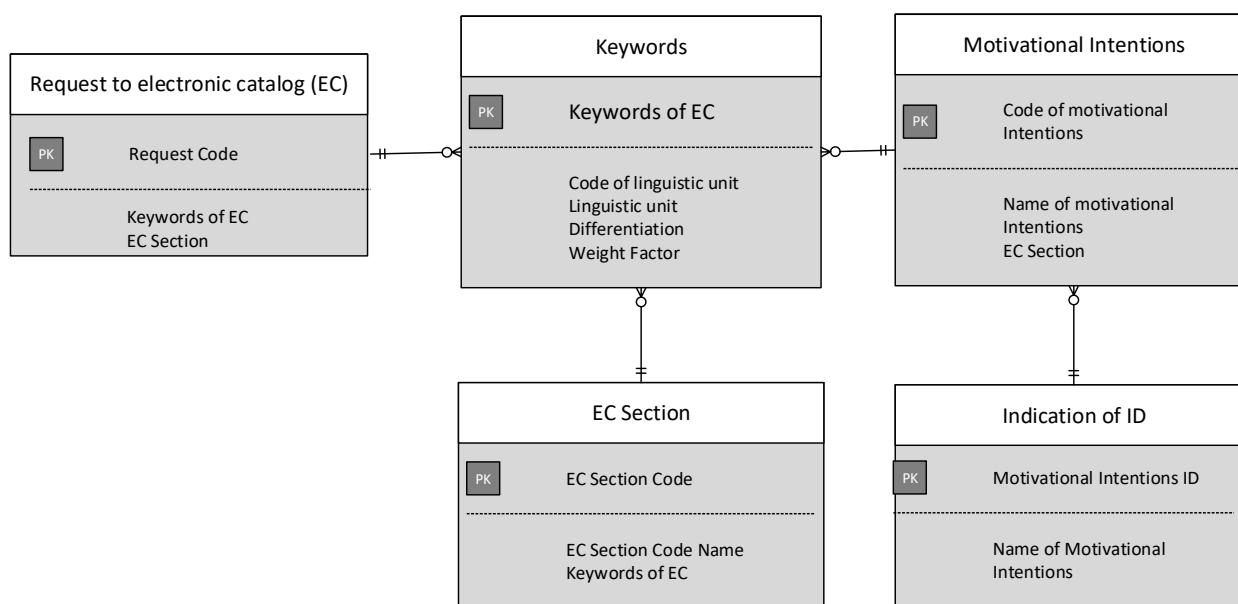


Рис. 2. Структура бази даних словника для чат-боту каталогу освітніх послуг закладу вищої освіти

Відношення «Request to EC» містить дані текстового запиту до чат-боту користувача офіційного веб-ресурсу ЗВО, який включає ключові слова (атрибут "Keyword of EC ") певного розділу електронного каталогу освітніх послуг ЗВО та посилання на розділ електронного каталогу освітніх послуг ЗВО (атрибут "EC Section").

Відношення «Keywords» містить дані про можливі форми лексико-семантичного одного або декількох позначень ключових слів, які характеризують потреби користувачів офіційних веб-ресурсів ЗВО відносно певного розділу каталогу освітніх послуг. Наприклад, запитом користувача до чат-боту є назва певного розділу електронного каталогу освітніх послуг (отримання інформації щодо освітньо-кваліфікаційних рівнів тощо). Атрибут «Differentiation» показує можливість застосування конкретного значення атрибуту «Linguistic Unit» для заміни запитів користувача до каталогу. В залежності від можливості диференціації, він приймає значення на проміжку [0, 1]. Атрибут «Weight factor» показує коефіцієнт важливості ключових слів електронного каталогу, які виявлені у відповідних запитах.

Відношення «Motivational Intentions» включає ознаки мотиваційних намірів користувачів, які створюють запит до чат-боту. Оскільки мотиваційні наміри провокуються потребами отримати інформацію, яка міститься в конкретному розділі електронного каталогу, то складові мотиваційних намірів включають атрибут «Name of motivational Intentions» - потреби користувача доступу до інформації розділу електронного каталогу освітніх послуг офіційних ресурсів ЗВО (атрибут «EC Section»). Зв'язок між мотиваційними намірами користувача, що зумовлені потребою отримати конкретну інформацію, здійснюється через ключові слова, які відносяться до розділу електронного каталогу освітніх послуг ЗВО.

Відношення «EC Section» містить дані про мовні конструкції, які опосередковано позначають назви розділів електронного каталогу освітніх послуг ЗВО. Тобто які не називають розділ, але вказують на нього.

Отже, запропонований словник чат-боту каталогу освітніх послуг закладу вищої освіти має на меті структурування основних аспектів для процесу прийняття рішення, вибраних із інформаційного наповнення тематичних запитів офіційних веб-ресурсів ЗВО. Оскільки наявність мотиваційних намірів свідчить про інформаційну потребу учасника комунікативної діяльності, то це ставить перед ЗВО завдання своєчасно та якісно відреагувати на них. Чіткі дії закладу вищої освіти є основою ефективного планування надання освітніх послуг. Формування такого словника дає змогу визначити актуальні запити та впливати на основні потреби споживачів освітніх послуг своєчасним наданням необхідної інформації. Кожне ключове слово тематичного запиту до чат-боту характеризується ваговим коефіцієнтом. Але розрахунок важливості



інформаційного наповнення словника чат-боту не виділяє ключові слова, якщо вони не містять конкретної назви структурної одиниці закладу вищої освіти. Саме тому, перелік ключових слів необхідно розширити із врахуванням назв спеціальностей, інститутів та кафедр цього ЗВО.

#### Оцінка важливості ключових слів запиту до чат-боту каталогу освітніх послуг закладу вищої освіти

Текстові запити до чат-боту каталогу освітніх послуг визначаються потребами користувачів офіційних веб-ресурсів ЗВО отримати конкретну інформацію щодо розділів цього каталогу [22]. Для ефективної інформатизації та своєчасної допомоги користувачу з боку чат-боту ЗВО, необхідно оцінити важливість ключових слів у запиті.

Ключові слова, що характеризують мотиваційні наміри користувачів щодо конкретного розділу електронного каталогу, визначають релевантність цих запитів, щодо повноти необхідної інформації.

Для оцінки важливості виявлених ключових слів у запитах користувачів до чат-боту використано статистичний показник, який використовується у задачах аналізу тексту та пошуку інформації.

Важливість ключових слів запиту щодо певного розділу електронного каталогу освітніх послуг пропорційна числу входжень слова в запит, і обернено пропорційна частоті вживання слова в інших тематичних запитах до чат-боту:

$$\omega_{pij} = \text{Frequency}_{pij} * \text{InFrequency}_{pij},$$

$$\omega_{pij} = \text{Frequency}_{pij} * \text{InFrequency}_{pij}, \quad (1)$$

де  $\text{Frequency}_{pij} = \frac{n_{pij}}{\sum_k n_{pijk}}$  – відношення числа входжень  $j$ -го ключового слова до загальної кількості слів у дописі  $i$ -го тематичного запиту відносно  $p$ -го розділу каталогу освітніх послуг,

$\text{InFrequency}_{pij} = \log \frac{|D|}{|d_{pij} \exists t_{pi}|}$  – інверсія частоти, з якою  $j$ -е ключове слово зустрічається у  $i$ -му тематичному запиті відносно  $p$ -го розділу каталогу освітніх послуг.

Показник  $\text{Frequency}_{pij}$  оцінює важливість ключового слова в межах обраного тематичного запиту. Використання  $\text{InFrequency}_{pij}$  зменшує вагу широкоживаних слів. Більшу вагу  $\omega_{pij}$  отримають ключові слова з високою частотою появи в межах запиту та низькою частотою вживання в інших тематичних запитах в межах розділу електронного каталогу освітніх послуг. Розрахунок показника важливості ключових слів у запитах до чат-боту каталогу освітніх послуг ЗВО подано у таблиці 1.

Таблиця 1

#### Розрахунок показника важливості ключових слів у запитах до чат-боту каталогу освітніх послуг ЗВО

Розділ електронного каталогу	Ключове слово	$\text{Frequency}_{pij}$	$\text{InFrequency}_{pij}$	$\omega_{pij}$
Освітньо-кваліфікаційний рівень	<i>Магістр</i>	0,63	0,672	0,42336
Інститут	<i>ІКНІ</i>	0,45	1	0,45
Форма навчання	<i>Денна</i>	0,3	0,9	0,27
Спеціальність	<i>Системний аналіз</i>	0,57	1	0,57

Отже, для визначення важливості ключових слів, які включені до інформаційного наповнення словника чат-боту визначено показник  $\omega_{pij}$ , який визначає важливість актуального ключового слова у межах запиту до електронного каталогу освітніх послуг та зменшує важливість широкоживаних слів. Оскільки ефективність інформатизації за допомогою чат-боту безпосередньо залежить від точності та якості наданої інформації, то оцінка важливості ключових слів виявлених у запитах користувачів є необхідним показником для вирішення цієї проблеми.

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

Отже, запропонований словник чат-боту каталогу освітніх послуг закладу вищої освіти є невід'ємною частиною ефективної комунікації ЗВО зі споживачами освітніх послуг. Він має на меті структурувати основні аспекти процесу прийняття рішень користувачів офіційних веб-ресурсів ЗВО, які вибрані з інформаційного наповнення тематичних запитів. Оскільки наявність тематичного запиту до чат-боту свідчить про інформаційну потребу користувача, то це ставить перед ЗВО завдання своєчасно та якісно реагувати на них. Чіткі дії закладу вищої освіти є основою ефективного планування надання освітніх послуг. Формування бази даних словника чат-боту з дозволяє виявляти актуальні розділи каталогу освітніх послуг ЗВО у певний період часу та впливати на основні потреби користувачів освітніх послуг. Кожне ключове слово чат-боту каталогу освітніх послуг характеризується ваговим коефіцієнтом. Для визначення важливості

ключових слів, що характеризують мотиваційний намір користувача та відносяться до конкретного розділу каталогу освітніх послуг, використано статистичний показник, який оцінює ключові слова в запиті та зменшує важливість поширених слів. Результати дослідження можуть бути використані для розширення можливостей ефективної комунікативної діяльності ЗВО з використанням інших освітніх ресурсів.

### Література

1. Vus V., Albota S., Dobrovolska V. The analysis of online communities as platforms for informational influences. *Journal of Scientific and Engineering Research*. 2019. № 6(2). P. 72-78.
2. Burnett G. Information exchange in virtual communities: a comparative study. *Journal of Computer-Mediated Communication*. Vol. 9 (2). URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1083-6101.2004.tb00286.x/full>.
3. Zhang J., Yu J.X., Hou J. Web communities: analysis and construction. Springer, Heidelberg. 2006. 187 p.
4. Shiling A., Zhezhnych P. Analysis of the user behavior specialized forums university entrants. *Proceedings of the VIIth International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT'2012)*. Lviv: Publisher Lviv Polytechnic. 2012. P. 202.
5. Connelly G., Halliday J. Reasons for choosing a further education: the views of 700 new entrants. *Journal of Vocational Education & Training*. Vol. 53(2). 2001. P. 181-192.
6. Mikhno N., Sorokina L. Trend analysis of the educational choice of university entrants as tool to improve the quality of educational service. *International Journal of Information and Communication Technologies in Education*. Vol. 6(3). 2017. P. 36-39.
7. Yi L., Liu B. Eliminating noisy information in web pages for Data Mining. *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining (KDD-2003)*, Washington DC, USA. 2003. P. 296. 305.
8. Santos A., Guillen P.G., Villa E., Serradilla F. Semantic construction of univocal language. *Information Theories and Applications*. Vol. 19, Number 3. 2012. P. 211–215.
9. Corcho O., Lopez M., Gomez-Perez A. Methodologies, tools, and languages for building ontologies. Where is their meeting point? *Data & Knowledge Engineering*. Vol. 46. 2003. P. 41-64.
10. Buitelaar P., Cimiano P., Magnini B. Ontology learning from texts: an overview. in *ontology learning from text: methods, evaluation and applications*. Computational Linguistics. Vol. 23 (4). 2005. P. 234-265.
11. Simperl E., Mocho M. Achieving maturity: the state of practice in ontology engineering. In *International Journal of Computer Science and Applications, Technomathematics Research Foundation*. Vol. 7(1). 2010. P. 45-65.
12. Buileaar P., Eigner T. Topic extraction from scientific literature for competency management. In *The 7th International Semantic Web Conference PICKME*, Germany. 2008. P. 55-67.
13. Page L., Brin S., Terry W. The page rank citation ranking: bringing order to the Web. URL: <http://ilpubs.stanford.edu:8090/422/1/1999-66.pdf>.
14. Song R., Liu H., Wen J.-R., Ma W.-Y. Learning block importance models for Web pages. *Proceedings of the 13th international conference on World Wide Web*, New York. 2004. P. 203–211.
15. Jones K. S. A statistical interpretation of term specificity and its application in retrieval. *Journal of Documentation*. Vol. 60 (5). 2004. P. 493-502.
16. Nagarhalli T. P., Vaze V., Rana N. K. A review of current trends in the development of chatbot systems. *6th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*. 2020. P. 706-710. DOI: 10.1109/ICACCS48705.2020.9074420.
17. Lokman A.S., Amedeen M.A. Modern Chatbot Systems: a technical review. *Proceedings of the Future Technologies Conference (FTC) 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 881. 2019. P. 1012–1023.
18. Yin Z., Chang K.H., Zhang R. DeepProbe: information directed sequence understanding and chatbot design via recurrent neural networks. In: *Proceedings of the 23rd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. 2017. P. 2131–2139.
19. Cui L., Huang S., Wei F., Tan C., Duan C., Zhou M. SuperAgent: a customer service chatbot for e-commerce websites. In: *Proceedings of ACL 2017, System Demonstrations*. 2017. P. 97–102.
20. Adamopoulou E., Moussiades L. An Overview of Chatbot Technology. In: Maglogiannis, I., Iliadis, L., Pimenidis, E. (eds) *Artificial Intelligence Applications and Innovations. AIAI 2020. IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Vol. 584. 2020. 373–383.
21. Hien H.T., Cuong P.-N., Nam L.N.H., Nhung H.L.T.K., Thang L.D. Intelligent assistants in higher-education environments: the FIT-EBot, a chatbot for administrative and learning support. In: *Proceedings of the Ninth International Symposium on Information and Communication Technology*. 2018. P. 69–76.
22. Zhezhnych P., Shilinh A. Linguistic analysis of user motivations of information content for university entrant's Web-forum. *International Journal of Computing*. Vol 18(1). 2019. P. 67-74.

Надійшла/Paper received : 13.10.2022 p. Надрукована/Printed : 01.11.2022 p.

DOI 10.31891/2307-5732-2022-313-5-99-107  
УДК 681.863.61

**БАБІЙ Сергій**

Вінницький національний технічний університет  
e-mail: [babiy82sm@gmail.com](mailto:babiy82sm@gmail.com)

**МОШНОРИЗ Микола**

Вінницький національний технічний університет  
ORCID ID: [0000-0001-7626-8327](https://orcid.org/0000-0001-7626-8327)  
e-mail: [moshnoriz@vntu.edu.ua](mailto:moshnoriz@vntu.edu.ua)

**ПРОЦЕНКО Дмитро**

Вінницький національний технічний університет  
ORCID ID: [0000-0002-5611-7262](https://orcid.org/0000-0002-5611-7262)  
e-mail: [procenko.d.p@vntu.edu.ua](mailto:procenko.d.p@vntu.edu.ua)

**ПАЯНОК Олександр**

Вінницький національний технічний університет  
ORCID ID: [0000-0001-8139-4600](https://orcid.org/0000-0001-8139-4600)  
e-mail: [opayanok@gmail.com](mailto:opayanok@gmail.com)

**ЖУКОВ Олексій**

Вінницький національний технічний університет  
ORCID ID: [0000-0001-7451-7633](https://orcid.org/0000-0001-7451-7633)  
e-mail: [alex4444\\_2004@ukr.net](mailto:alex4444_2004@ukr.net)

## МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПІДЙОМНОЇ ЛЕБІДКИ КРАНА В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

*В роботі проведено аналіз статичних навантажень підйомних лебідок підйомно-транспортних механізмів та сформовано узагальнену математичну модель підйомної лебідки крана. На основі запропонованої моделі розроблено структурну схему підйомної лебідки та реалізовано її як комп'ютерну модель у вигляді блока бібліотеки програмного середовища Simulink Matlab. Використання даної моделі дозволяє суттєво спростити процес проектування електроприводів підйомних лебідок кранів.*

*Ключові слова:* підйомна лебідка, математична модель, статичний момент, електропривод.

BABIY Sergiy, MOSHNORIZ Mykola, PROCENKO Dmytro,  
PAYANOK Oleksandr, ZHUKOV Oleksiy  
Vinnitsia National Technical University

## SIMULATION OF WORKING MODES OF THE ELECTRICAL DRIVE OF A LIFTING CRANE WINCHES IN MATLAB

*Among the most common mechanisms in the industry are lifting machines of various types and designs. They are widely used in construction and assembly, repair, warehouse and other works related to lifting and moving large and heavy loads. The main and most energy-intensive mechanism of lifting machines is the lifting winch. The electric drive of the lifting winch must meet the increased operational requirements and ensure the performance of the given speed diagram, the necessary dynamics of work and high reliability in the operating modes. The energy indicators of the electric drive of the lifting winch mainly determine the energy indicators of the machine as a whole, therefore, due attention should be paid to the issue of designing the electric drives of the lifting winches. It is worth noting that the kinematic connections of the lifting winch are not absolutely rigid, which determines the occurrence of oscillations in the system as a result of dynamic forces. It is the presence in the electromechanical system of the lifting winch of elements with high inertia that causes the appearance of elastic oscillations during any transient process in this system. The presence of elastic oscillations in the mechanical system of the electric drive distorts the speed graphs of the system and leads to force pulsations. Elastic oscillatory processes in mechanisms lead to unpredictable behavior of the system and can cause emergency situations. Thus, taking into account the elastic properties of the mechanical system during its design will improve the efficiency and reliability of its operation. The results of the research carried out in the work contain the analysis of static loads of lifting winches of lifting and transport mechanisms and a generalized mathematical model of the crane lifting winch. On the basis of the proposed mathematical model, a structural diagram of a lifting winch was developed and implemented as a computer model in the form of a Matlab Smulink PPP library block. The mathematical and computer models presented in the work allow obtaining correct results in the entire range of loads, taking into account the change in the efficiency of the mechanical transmission when the loads and the direction of transportation change, and also take into account the influence of the elastic connection between the drive motor and the actuator. The use of the proposed models will significantly simplify the process of designing the power electric drive of lifting winches of cranes.*

*Keywords:* lifting winch, mathematical model, static moment, electric drive.

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

Одним із важливих напрямків розвитку сучасного електричного привода (ЕП) є продовження наукових-досліджень зі створення комп'ютерних засобів для моделювання режимів їх роботи [1]. Це дозволяє суттєво спростувати процес проектування ЕП виробничих механізмів і дає можливість проводити дослідження їх роботи без шкоди та зношення технологічного обладнання.

В промисловості одними із найбільш поширених є вантажопідйомні машини різних типів та конструкцій. Вони широко використовуються при виконанні будівельно-монтажних, ремонтних, складських та інших робіт, пов'язаних з підйомом та переміщенням великогабаритних та вагових вантажів. Основним та найбільш енергоємним механізмом вантажопідйомних машин, наприклад кранів, є підйомна лебідка.

Енергетичні показники ЕП підйомної лебідки визначають головним чином енергетичні показники машини в цілому. Наявність в електромеханічній системі підйомної лебідки елементів з високою інерційністю під час будь-якого перехідного процесу викликає появу пружних коливань в цій системі, які призводять до непередбачуваної поведінки системи і можуть стати причиною аварійних ситуацій. Врахування пружних властивостей механічної системи підйомної лебідки під час її проектування дозволить покращити ефективність та надійність її роботи. Саме тому питання проектування ЕП підйомних лебідок має беззаперечну актуальність та потребує проведення відповідних досліджень.

### Аналіз досліджень та публікацій

Значна частина досліджень в галузі підйомно-транспортних машин орієнтована на формування оптимальних законів керування механізмами цих машин, як це показано, наприклад, в роботах [2, 3] тощо. Інші роботи присвячені питанню проектування силового привода механізмів підйомно-транспортних машин. Так в роботі [4] запропоновано комп'ютерну модель підйомної лебідки вантажного крана в середовищі ППП Matlab. Дана модель дозволяє отримати коректні результати лише за умови, якщо значення коефіцієнта корисної дії механічної передачі електропривода складає не менше 0,5. Крім того, запропонована модель не враховує вплив пружного зв'язку між приводним двигуном та виконавчим механізмом.

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є розробка математичної та відповідної їй комп'ютерної моделей підйомної лебідки крана, які враховують вплив пружних зв'язків між приводним двигуном електропривода та його виконавчим механізмом, і дозволяють отримати реальні динамічні характеристики досліджуваного механізму в усьому діапазоні навантажень із врахуванням зміни коефіцієнта корисної дії (ККД) механічної передачі та напрямку транспортування (підйом, спуск).

### Виклад основного матеріалу

Спрощено кінематична схема підйомної лебідки зображена на рис. 1.

Результуючий момент статичного опору підйомної лебідки обумовлений як активним моментом  $M_A$  від сили тяжіння, що діє на вантаж та вантажозахватний пристрій, так і реактивним моментом  $M_P$  від сили тертя в рухомих елементах кінематичної схеми [5]:

$$M_c = M_A \pm M_P, \quad (1)$$

$$M_A = \frac{F \cdot D}{2 \cdot i_{mn} \cdot u}, \quad (2)$$

$$M_P = M_A \left( \frac{1}{\eta_{mn}} - 1 \right), \quad (3)$$

де  $F$  – результуюче зусилля на барабані лебідки, Н;  $D$  – діаметр барабана лебідки, м;  $i_{mn}$  – передаточне число механічної передачі;  $u$  – кратність поліспасти;  $\eta_{mn}$  – ККД механічної передачі при підйомі вантажу [5].

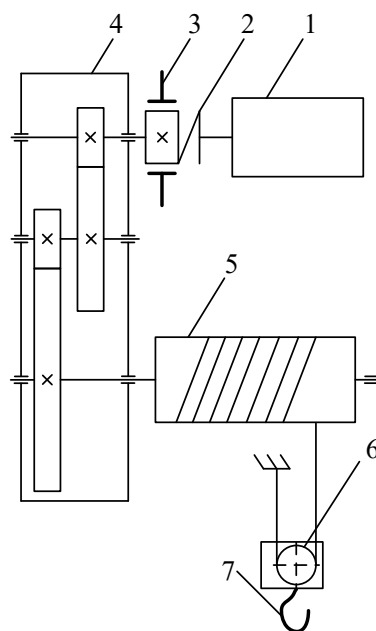


Рис. 1. Кінематична схема підйомної лебідки: 1 – двигун; 2 – муфта; 3 – гальмо; 4 – механічна передача (редуктор); 5 – барабан; 6 – блок поліспастів; 7 – вантажозахватний пристрій

Результуюче зусилля на барабані лебідки:

$$F = (m_b + m_0) \cdot g = G_b + G_0, \quad (4)$$

де  $m_b$  – маса вантажу, т;  $m_0$  – маса вантажозахватного пристрою;  $G_b$  – вага вантажу, Н;  $G_0$  – вага вантажозахватного пристрою, Н;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup> [5].

На основі аналізу наведеної кінематичної схеми та з врахуванням виразів (1)-(4) сформуємо узагальнену систему рівнянь, які описують механічну частину лебідки:

$$\begin{cases} V = \frac{\omega_{dv} \cdot D_6}{2 \cdot i_{мп} \cdot u}, \\ G_0 = m_0 \cdot g, \\ G_b = m_b \cdot g, \\ M_c = M_A + M_P \cdot \text{sign}(V), \\ M_A = \frac{(G_b + G_0) \cdot D_6}{2 \cdot i_{мп} \cdot u}, \\ M_P = M_A \cdot \left( \frac{1}{\eta_{мп}} - 1 \right), \end{cases} \quad (5)$$

де  $V$  – швидкість транспортування вантажу, м/с;  $\omega_{dv}$  – кутова швидкість вала двигуна при транспортуванні вантажу, рад/с.

Відповідна структурна схема механічної частини лебідки зображена на рис. 2.

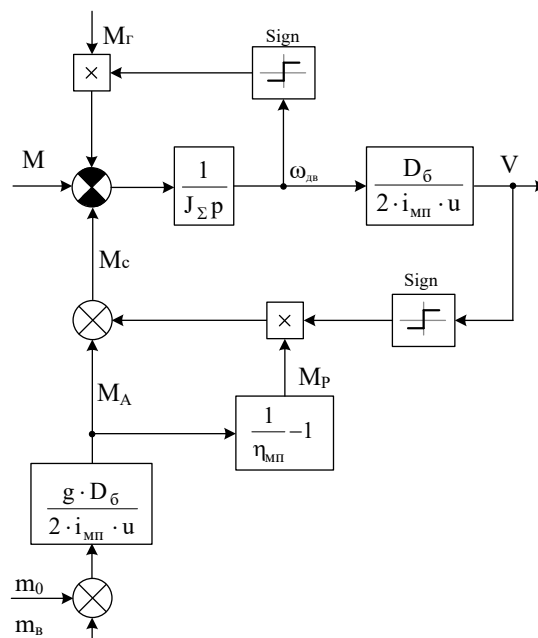


Рис. 2. Структурна схема механічної частини лебідки

На рис. 2:  $M$  – момент приводного двигуна, Н·м;  $M_c$  – гальмівний момент, створюваний електромагнітним гальмом, Н·м;  $J_\Sigma$  – приведений до вала двигуна момент інерції привода, кг·м<sup>2</sup>.

ККД механічної передачі залежить від навантаження, а тому його наближене значення при будь-якому навантаженні пропонується розраховувати аналітичним шляхом так [6, 7]:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{a}{\gamma} + b}, \quad (6)$$

де  $a$  – коефіцієнт постійних втрат;  $b$  – коефіцієнт змінних втрат;  $\gamma$  – коефіцієнт навантаження, значення якого для підйомної лебідки може бути розраховано таким чином [6, 7]:

$$\gamma = \frac{m_g + m_0}{m_{en} + m_0}, \quad (7)$$

де  $m_{en}$  – номінальна маса вантажу, т.

При номінальному навантаженні ( $\gamma = 1$ ) співвідношення коефіцієнтів втрат відомі із статистичних даних [6, 7]:

$$k = \frac{a}{b} = 1,2 \dots 1,5. \quad (8)$$

Таким чином значення коефіцієнтів постійних та змінних втрат можна розрахувати шляхом сумісного розв'язку рівнянь (6) та (8) при  $\gamma = 1$  [6, 7]:

$$b = \frac{1 - \eta_{ном}}{\eta_{ном}(1 + k)}, \quad (9)$$

$$a = kb = k \frac{1 - \eta_{ном}}{\eta_{ном}(1 + k)}. \quad (10)$$

Відповідно до розробленої структурної схеми (див. рис. 2) та наведених аналітичних виразів реалізуємо відповідну структуру в ППП Matlab та оформимо її у вигляді елемента бібліотеки Simulink (див. рис. 3).

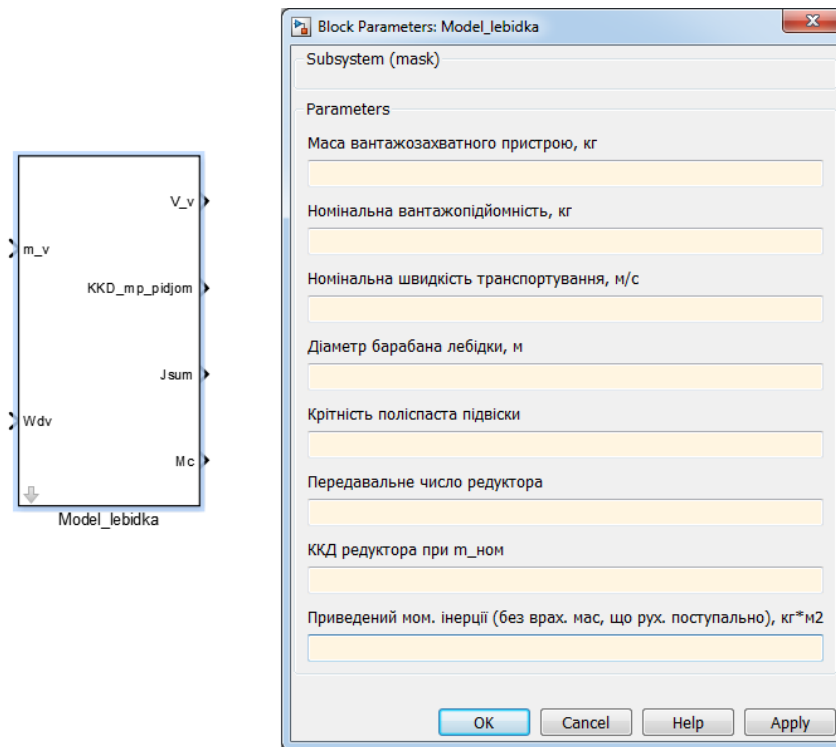


Рис. 3. Налаштування моделі підйомної лебідки

Розгорнута структура механічної частини лебідки зображена на рис. 4.

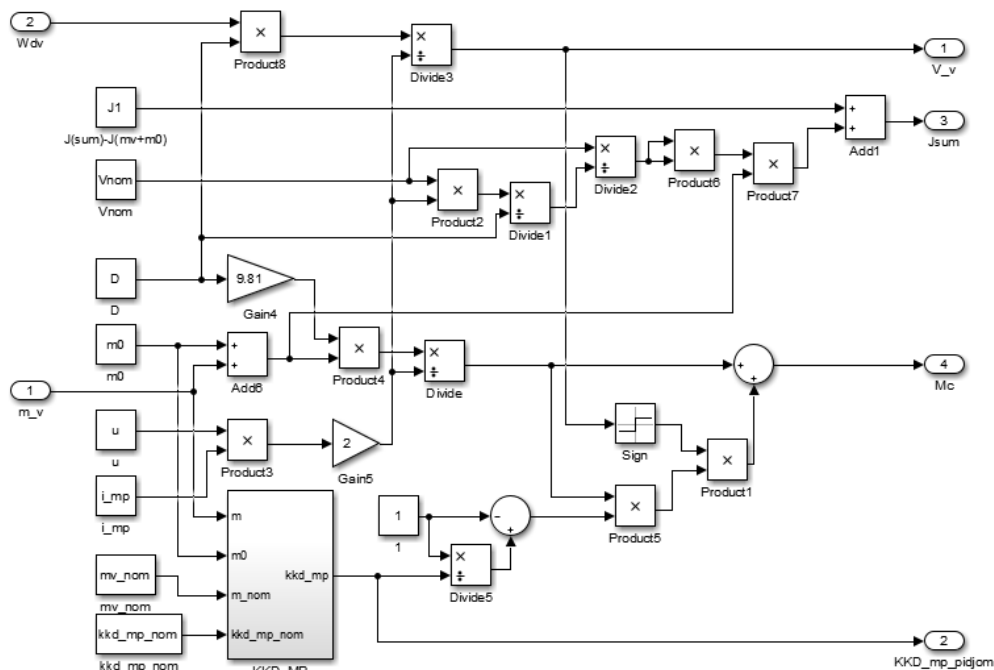


Рис. 4. Розгорнута структура механічної частини підйомної лебідки

Структура блоку розрахунку ККД механічної передачі відповідно до виразів (6) – (10) приведена на рис. 5.

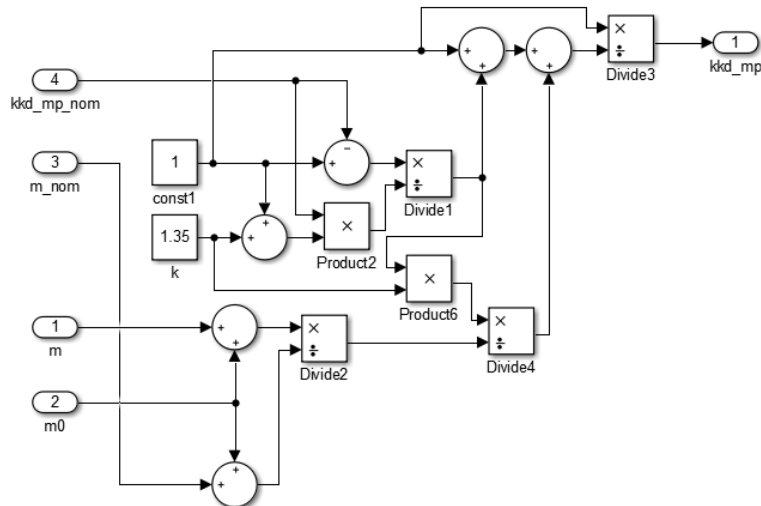


Рис. 5. Структура блоку розрахунку ККД механічної передачі лебідки

Проведемо моделювання роботи електропривода підйомної лебідки електроталі вантажопідйомністю 2т. при підйомі номінального вантажу. Лебідка приводиться в дію електродвигуном потужністю 3 кВт. Модель в ППП Matlab Simulink та налаштування її параметрів приведені на рис. 6. Результати моделювання повністю збігаються з результатами проведених аналітичних розрахунків та зображені на рис. 7.

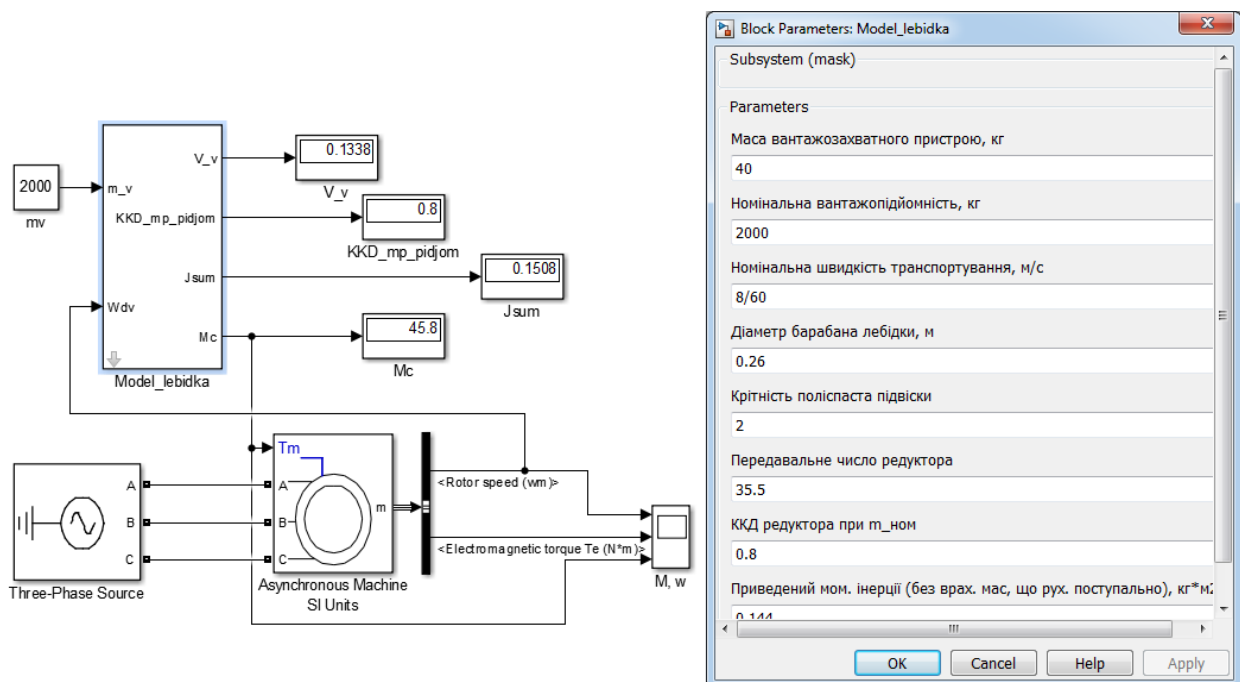


Рис. 6. Моделювання електропривода лебідки електроталі при підйомі номінального вантажу

Використовуючи запропоновану модель визначимо границі зміни статичних навантажень розглянутої підйомної лебідки при підйомі та спуску номінального вантажу та незавантаженого вантажозахватного пристрою (рис. 8). Результати моделювання представимо у вигляді графіків механічних характеристик (рис. 9).



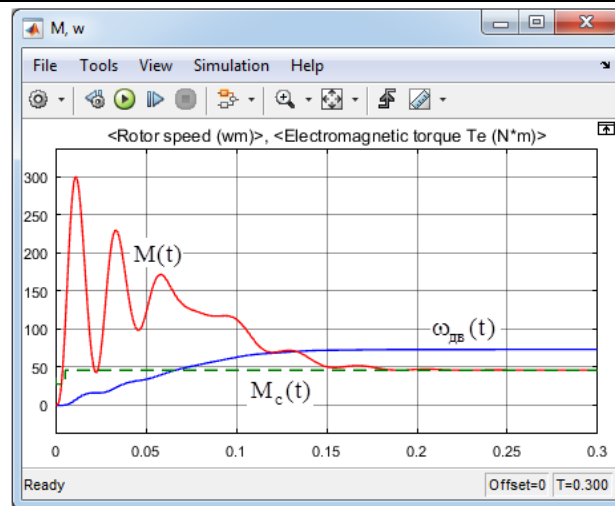


Рис. 7. Результати моделювання електропривода лебідки електроталі при підйомі номінального вантажу

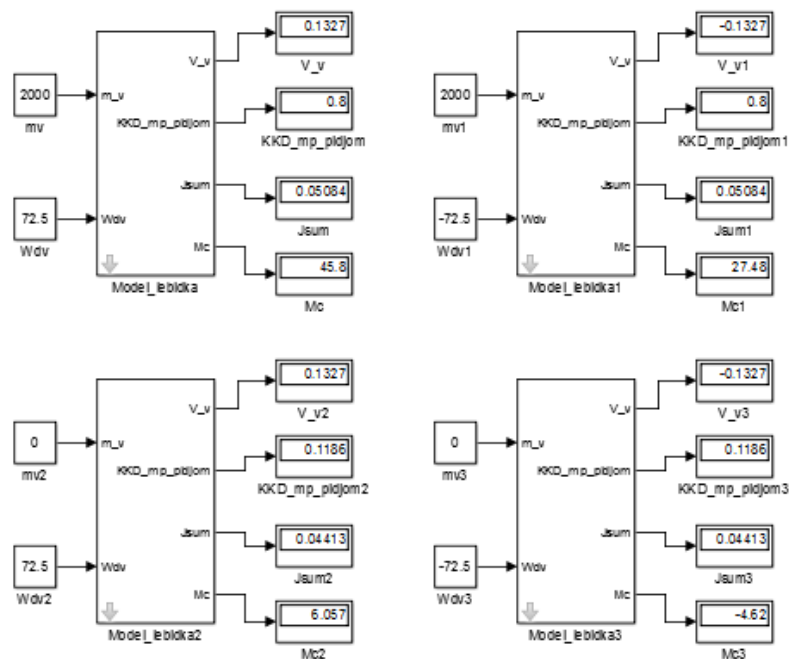


Рис. 8. Моделювання статичних навантажень підйомної лебідки при підйомі та спуску номінального вантажу та незавантаженого вантажозахватного пристрою

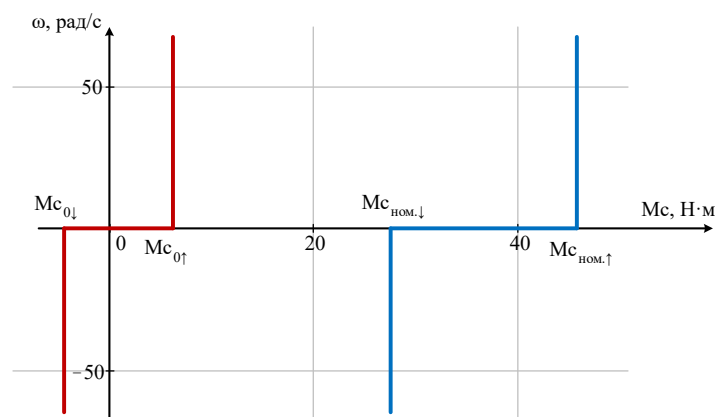


Рис. 9. Межі зміни статичних моментів лебідки при підйомі та спуску вантажів

Кінематичні зв'язки підйомної лебідки не є абсолютно жорсткими, вони характеризуються певною жорсткістю, що обумовлює виникнення коливань в системі в результаті дії динамічних зусиль.

Наявність пружних коливань в механічній системі спотворює графіки швидкості руху системи та призводить до пульсацій зусилля. Якщо під час проектування або моделювання не враховувати пружні

властивості механічного зв'язку, то можна помилитися у виборі матеріалу в механічній системі, завданні режиму роботи системи. Все це може призвести до аварії, зупинки технологічного процесу, нанесення шкоди обслуговуючому персоналу тощо.

Представимо підйомну лебідку двомасовою механічною системою з пружним зв'язком (рис. 10).

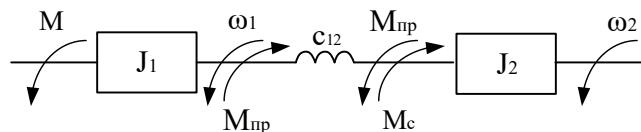


Рис. 10. Еквівалентна двомасова система з пружним зв'язком

Система диференціальних рівнянь такої двомасової системи буде мати вигляд:

$$\begin{cases} M_{np} = c_{12} \cdot \Delta\varphi, \\ \Delta\varphi = \int (\omega_1 - \omega_2) dt, \\ M - M_{np} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt}, \\ M_{np} - M_c = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}, \end{cases} \quad (11)$$

де  $M_{np}$  – момент пружного зв'язку, Н·м;  $c_{12}$  – коефіцієнт пружності у зв'язку між масами;  $\Delta\varphi$  – кутова деформація пружного елемента, рад;  $\omega_1, \omega_2$  – частота обертання першої та другої мас, рад/с;  $M$  – рушійний момент, Н·м;  $J_1, J_2$  – момент інерції першої та другої маси, кг·м<sup>2</sup>.

Для сталевих валів та канатів коефіцієнт пружності розраховується за формулами [8]:

$$c_{np} = \frac{\pi}{32} \cdot G \cdot \frac{d^4}{L}, \quad (12)$$

$$c_{np} = \frac{1,11 \cdot 10^8 \cdot m_k}{160 \cdot H_k - 10^{-4} \cdot m_k \cdot H_k^2}, \quad (13)$$

де  $G$  – коефіцієнт, що характеризує пружні якості матеріалу, з якого виготовлено вал ( $G = 8,7 \cdot 10^5$  кг/см<sup>2</sup> =  $8,53 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>);  $d$  – діаметр вала, см;  $H_k$  – довжина канату, м;  $m_k$  – запас пружності канату.

Структурна схема двомасової системи, складеної у відповідності до системи рівнянь (11) наведена на рис. 11 [9, 10].

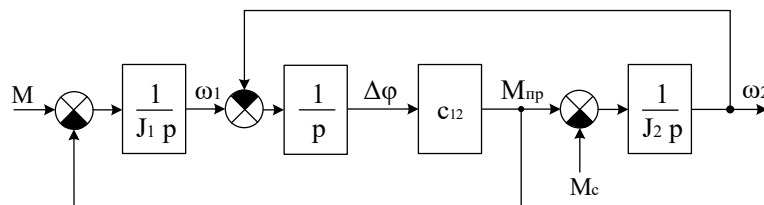


Рис. 11. Структурна схема двомасової системи

Доповнивши модель підйомної лебідки структурою двомасової системи, отримаємо узагальнену модель лебідки із врахуванням пружності механічної передачі. На рис. 12 наведено відповідну комп'ютерну модель (з використанням лінеаризованої моделі приводного двигуна) та графіки перехідних процесів  $\omega_1(t)$  та  $\omega_2(t)$  при підйомі номінального вантажу.

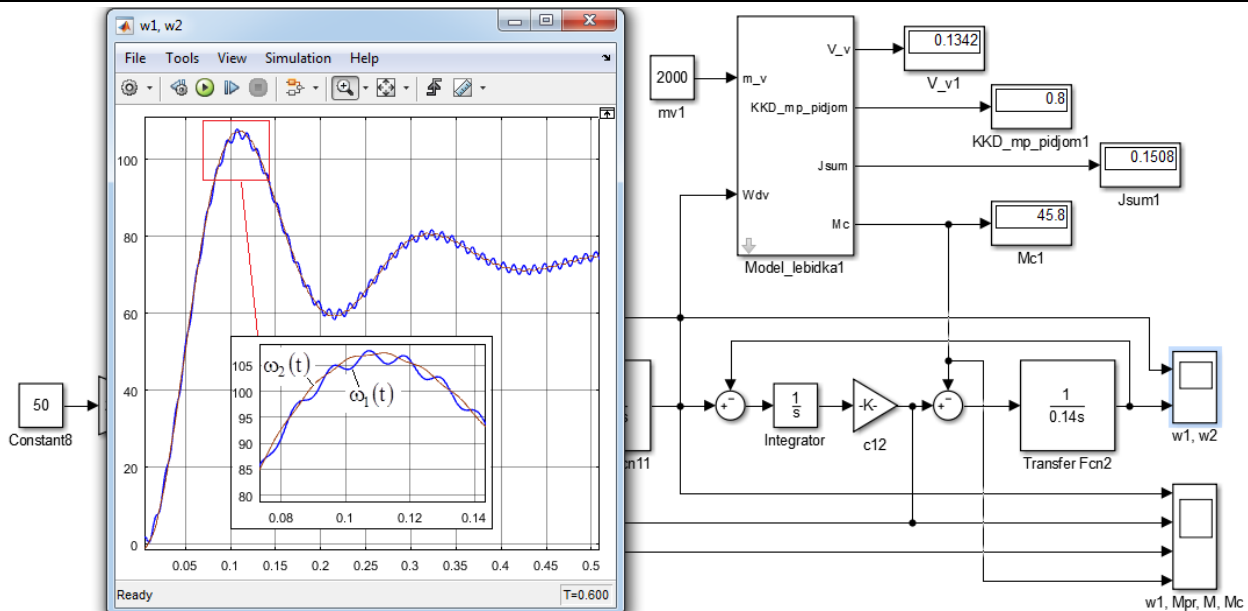


Рис. 12. Результати моделювання двомасової системи із врахуванням пружності у зв'язку між масами

На рис. 13 наведено графіки перехідних процесів кутової швидкості двигуна  $\omega_1(t)$ , моменту двигуна  $M(t)$ , пружного моменту  $M_{np}(t)$  та моменту статичного опору  $M_c(t)$  при підйомі номінального вантажу.

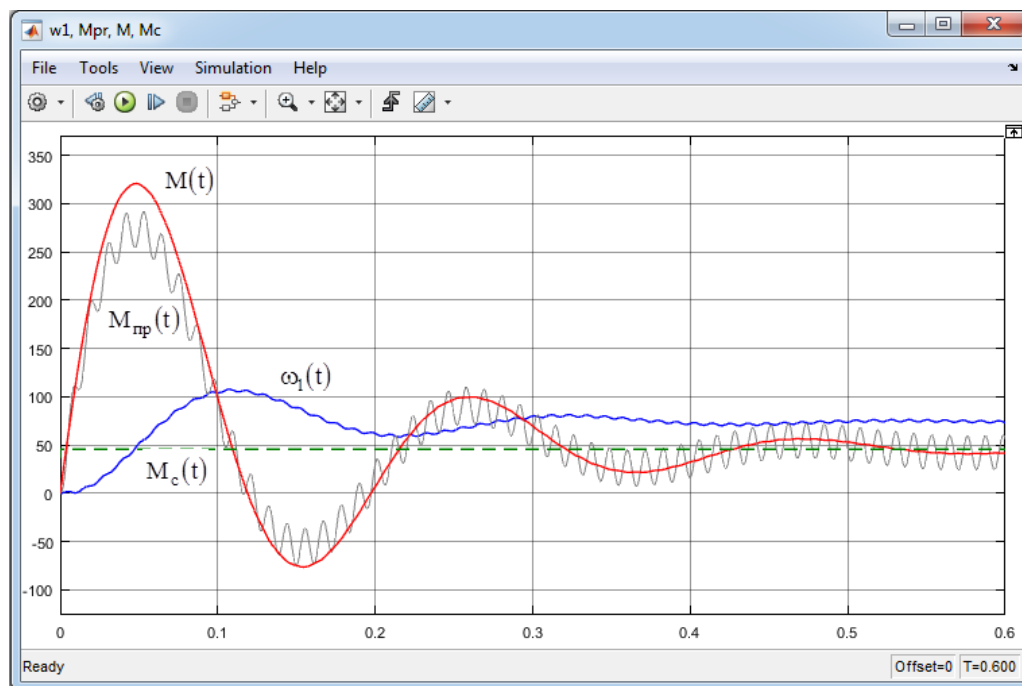


Рис. 13. Результати моделювання двомасової системи із врахуванням пружності у зв'язку між масами

З графіків видно, що в результаті прямого запуску установки її швидкість та момент мають більш виражений коливальний характер. Таких коливань немає на графіках (див. рис. 7), які отримані без врахування пружності. Пружні коливальні процеси в механізмах призводять до непередбачуваної поведінки системи і можуть стати причиною аварійної ситуації. Таким чином, врахування пружних властивостей механічної системи під час її проектування дозволить покращити ефективність та надійність її роботи.

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

Розроблені математичні та комп'ютерні моделі дозволяють отримати коректні результати в усьому діапазоні навантажень із врахуванням зміни ККД механічної передачі при зміні навантажень та напрямку транспортування, а також враховують вплив пружного зв'язку між приводним двигуном та виконавчим механізмом. Використання запропонованих моделей дозволить суттєво спростити процес проектування силового електропривода підйомних лебідок кранів.

## Література

1. Москаленко В. В. Электрический привод / В. В. Москаленко – М. : Издательский центр «Академия», 2007. – 368 с.
2. Ловейкін В. С. Динамічна оптимізація механізму підйому вантажу мостових кранів : монографія / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич. – Київ : КОМПРИНТ, 2015. – 197 с.
3. Мокін Б. І. Синтез закону оптимального керування одним класом об'єктів з параметрами, змінними у часі та просторі / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, О. М. Кривоніс // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2020. – № 6. – С. 38-46.
4. Бабій С. М. Комп'ютерна модель підйомної лебідки вантажного крана в середовищі Matlab / С. М. Бабій, А. М. Ратушна // Zbiór artykułów naukowych. «Inżynieria i technologia. East European Conference» (29.06.2017 – 30.06.2017) – Warszawa : Wydawca : Sp. z o.o. «Diamond trading tour», 2017. – 40 str. – S. 11–13.
5. Ключев В. И. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов / В. И. Ключев, В. М. Терехов. – М. : Энергия, 1980. – 360 с.
6. Есаков В. П. Электрооборудование и электропривод промышленных установок / В. П. Есаков. – Киев : Высшая школа. Главное изд-во, 1981. – 248 с.
7. Автоматизований електропривод типових виробничих механізмів. Курсове та дипломне проектування. Самостійна та індивідуальна робота студентів / В. В. Грабко, С. М. Бабій, М. М. Мошноріз – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 119 с.
8. Моделювання електромеханічних систем : підручник / О. П. Чорний, А. В. Луговой, Д. Й. Родькін, Г. Ю. Сисюк, О. В. Садовой – Кременчук, 2001. – 410 с.
9. Толочко О. І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу : навчальний посібник / О. І. Толочко. – Київ, НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с.
10. Довгань С. М. Дослідження систем електропривода методами математичного моделювання : навчальний посібник / С. М. Довгань. – Дніпропетровськ : НГА України, 2001. – 137 с.

## References

1. Moskalenko V. V. Elektricheskij privod / V. V. Moskalenko – M. : Izdatelskij centr «Akademiya», 2007. – 368 s.
2. Loveikin V. S. Dynamichna optymizatsiia mekhanizmu pidiomu vantazhu mostovykh kraniv : monohrafiia / V. S. Loveikin, Yu. O. Romasevych. – Kyiv : KOMPRYNT, 2015. – 197 s.
3. Mokin B. I. Syntez zakonu optymalnoho keruvannya odnym klasom obiektiv z parametry, zminnymy u chasi ta prostori / B. I. Mokin, O. B. Mokin, O. M. Kryvonis // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2020. – № 6. – S. 38-46.
4. Babii S. M. Kompiuterna model pidiomnoi lebidky vantazhnogo kрана v seredovyshchi Matlab / S. M. Babii, A. M. Ratushna // Zbiór artykułów naukowych. «Inżynieria i technologia. East European Conference» (29.06.2017 – 30.06.2017) – Warszawa : Wydawca : Sp. z o.o. «Diamond trading tour», 2017. – 40 str. – S. 11–13.
5. Klyuchev V. I. Elektroprivod i avtomatizaciya obshepromyshlennykh mehanizmov / V. I. Klyuchev, V. M. Terehov. – M. : Energiya, 1980. – 360 s.
6. Esakov V. P. Elektrooborudovanie i elektroprivod promyshlennykh ustanovok / V. P. Esakov. – Kiev : Vysshaya shkola. Golovnoe izd-vo, 1981. – 248 s.
7. Avtomatyzovanyi elektroprivod typovykh vyrobnychikh mekhanizmiv. Kursove ta dyplomne proektuvannya. Samostiina ta individualna robota studentiv / V. V. Hrabko, S. M. Babii, M. M. Moshnoriz – Vinnytsia : VNTU, 2017. – 119 s.
8. Modeliuvannya elektromekhanichnykh system : pidruchnyk / O. P. Chornyi, A. V. Luhovoi, D. Y. Rodkin, H. Yu. Sysiuk, O. V. Sadovoi – Kremenichuk, 2001. – 410 s.
9. Tolochko O. I. Modeliuvannya elektromekhanichnykh system. Matematychnе modeliuvannya system asynkhronnoho elektroprivodu : navchalnyi posibnyk / O. I. Tolochko. – Kyiv, NTUU «KPI», 2016. – 150 s.
10. Dovhan S. M. Doslidzhennia system elektroprivoda metodamy matematychnoho modeliuvannya : navchalnyi posibnyk / S. M. Dovhan. – Dnipropetrovsk : NHA Ukrainy, 2001. – 137 s.

Надійшла/Paper received : 11.08.2022 p.    Надрукована/Printed : 01.11.2022 p.

БАГРІЙ Олена

Хмельницький національний університет

ORCID ID: 0000-0003-2267-7162

e-mail: bahrii@khmnu.edu.ua

## ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ІТЕРАЦІЙНИХ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ПЛОСКОЇ ФІЗИЧНО НЕЛІНІЙНОЇ ЗАДАЧІ

*Розглядається нелінійний програмний блок до спеціалізованого програмного комплексу GEO, що дозволяє враховувати особливості деформування дискретного середовища та моделювати процес деформування плоскої області, заповненої дискретним матеріалом.*

*Ключові слова: ітераційний алгоритм, нелінійний програмний блок, дискретне середовище, внутрішнє тертя.*

BAHRII Olena

Khmelnyskyi National University

### SOFTWARE IMPLEMENTATION OF ITERATIVE ALGORITHMS FOR SOLVING A PLANAR PHYSICALLY NONLINEAR PROBLEM

*To solve physically nonlinear problems, specialized software solutions based on the procedures of MSE, FDM, BEM, etc. are used. The article provides an overview of software complexes that allow solving problems in various fields of science and technology. To solve a planar physically nonlinear problem, it is irrational to use the considered systems in most cases since they are closed software complexes, making it impossible to modify the algorithm partially. The difference between software systems is only in the "nonlinear" part, where a specific algorithm for solving a specific problem is implemented. The proposed software implementation of iterative algorithms for solving a plane physically nonlinear problem consists of several independent modules, each of which performs a separate calculation stage. The principle of the iterative algorithm is that a complex physically nonlinear problem is solved step by step. At each stage, a linear problem is solved, in which the values of the deformation parameters are assigned depending on the level of stresses and strains in each element reached at the previous stage. The iterative algorithm is implemented based on the specialized GEO software package developed at the Department of Strength of Materials of KhNU. The complex implies the possibility of replacing a "nonlinear" program block, depending on the type of nonlinear relations adopted in the model. The nonlinear block considered the features of the deformation of a discrete medium, namely, the accepted nonlinear dependencies of a particular material. In the calculation process, the divergence with the linear solution is checked at each iteration until the required accuracy is achieved. This allows simulating the deformation process of a flat area filled with a discrete material.*

*Keywords: iterative algorithm, non-linear program block, discrete environment, internal friction.*

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

Існує велика кількість спеціалізованих програм для розв'язання фізично нелінійних задач на основі процедур МСЕ, МСР, МГЕ та ін. Серед них є універсальні програмні комплекси, які дозволяють розв'язувати задачі в різних галузях науки і техніки, наприклад, комп'ютерні програмні комплекси SolidWorks [1], „Plaxis” [2], автоматизовані системи наукових досліджень АСНД „VESNA” (КНУБА) [3], „ЛІРА” (О.С. Городецький) [4], „SKAD” (А.В. Перельмутер) [5], „CONCORD” (С.Ф. Клованич) [6] та ін.

Для розв'язання сформульованої у [7] нелінійної задачі використовувати ці системи в більшості випадків нераціонально, оскільки це закриті програмні комплекси, що робить неможливою часткову модифікацію алгоритму рішення задачі у випадку виникнення такої потреби.

Більш придатними для дослідницьких цілей є спеціалізовані програмні комплекси, розраховані на розв'язання одного класу задач. Комплекси для розв'язання задач, пов'язаних з дослідженням напружено-деформативного стану ґрунтового середовища, розроблені під керівництвом А.К. Бугрова (ЛПІ) [8], А.Л. Гольдіна (ВНДІГ) [9], Ю.К. Зарецького (Гідропроєкт) [10], В.В. Ковтуна (ХНУ) [11], І.П. Бойка (КНУБА) [12], В.О. Грішина (ОНМУ) [13] та ін.

Ці програмні комплекси використовують процедурні мови програмування, що дозволяє легко видозмінювати окремі підпрограми, пристосовуючи їх для нових умов задач.

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є розробка нелінійного програмного блока до спеціалізованого програмного комплексу GEO, що дозволить враховувати особливості деформування дискретного середовища та моделювати процес деформування плоскої області, заповненої дискретним матеріалом.

### Виклад основного матеріалу

Для розв'язання будь-яких задач методом скінчених елементів використовуються схожі процедури підготовки дискретної моделі розрахункової області, розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь, формування кінцевих результатів у зручній для користувача формі. Відмінність програмних комплексів полягає тільки в „нелінійній” частині, де реалізується специфічний алгоритм розв'язку конкретної задачі. Розглянемо декілька найпоширеніших програмних продуктів в даній області.

## COSMOS

Для розв'язку крайових задач широко використовують метод скінчених елементів (МКЕ), на базі якого розроблена система COSMOS/M.

Пакет COSMOS/M розроблено корпорацією структурних досліджень та аналізу (Structural Research and Analysis Corporation) (США). Він відноситься до найбільш поширених у світі.

Структура пакета побудована на основі окремих модулів. Пакет є відкритою системою і має можливість подальшого вдосконалення та підключення нових модулів. Бібліотеки матеріалів можуть бути додатково доповнені користувачем. Програма дозволяє будувати епюри, графіки, кольорові заливки, ізоповерхні, „розрізи” тіл, анімацію для виведення результатів всіх видів розрахунку.

Набір розрахункових модулів охоплює більшість випадків, що зустрічаються в інженерній практиці, включаючи комплексний аналіз.

Скінчені елементи згруповано в бібліотеці системи COSMOS/M, в семи різних групах. При розв'язанні задач, більшість груп елементів можна замінити на іншу з мінімальною модифікацією вхідних даних.

## Nastran

Програмний продукт компанії MSC.Software – MSC.Nastran – це одна з кращих скінчено-елементних програм. MSC.Nastran забезпечує розрахунок напружено-деформованого стану, власних частот і форм коливань, аналіз стійкості, рішення завдань теплопередачі, дослідження сталих і несталих процесів, акустичних явищ, нелінійних статичних процесів, нелінійних динамічних перехідних процесів, розрахунок критичних частот і вібрацій роторних машин, аналіз частотних характеристик при впливі випадкових навантажень, спектральний аналіз. Передбачено можливість моделювання великого списку матеріалів, включаючи композитні й гіперпружні. Розширені функції включають технологію суперелементів (підконструкцій), модальний синтез і макромову DMAP для створення користувацьких додатків.

MSC.Nastran може також використовуватись для оптимізації проектів. Оптимізацію можна проводити для задач статички, стійкості, динамічних перехідних процесів, власних частот і форм коливань, акустики. Завдяки своїй ефективності алгоритми оптимізації обробляють необмежене число проектних параметрів й обмежень.

MSC.Nastran застосовується також для планування експериментів і оцінки повноти отриманих експериментальних даних.

Основу MSC.Nastran складають відпрацьована технологія елементів і надійні чисельні методи. Програма дозволяє одночасно застосовувати в одній і тій же моделі h- і p-елементи для досягнення точності розрахунку при мінімальних комп'ютерних ресурсах. Елементи високого порядку апроксимації – p-елементи – добре відбивають криволінійну геометрію конструкції і забезпечують високу точність при детальному розрахунку напружень. Ці елементи автоматично адаптуються до бажаного рівня точності.

Тісний зв'язок MSC.Nastran з MSC.Patran забезпечує повністю інтегроване середовище для моделювання й аналізу результатів. MSC.Nastran гнучко інтегрується в багато середовищ проектування.

## Ansys

Програма ANSYS – це гнучкий, надійний засіб проектування й аналізу. Особливістю програми є файлова сумісність всіх членів сімейства ANSYS для всіх використовуваних платформ. Багатоцільова спрямованість програми (тобто реалізація в ній засобів для опису відклику системи на впливи різної фізичної природи) дозволяє використати ту саму модель для рішення таких зв'язаних завдань, як міцність при тепловому навантаженні, вплив магнітних полів на міцність конструкції, тепломасоперенос в електромагнітному полі.

Програма пропонує перелік розрахункових засобів, які можуть врахувати різноманітні конструктивні нелінійності; дають можливість вирішити загальний випадок контактної задачі; допускають наявність більших (кінцевих) деформацій і кутів повороту; дозволяють виконати інтерактивну оптимізацію і аналіз впливу електромагнітних полів, одержати рішення задач гідроаеродинаміки разом з параметричним моделюванням, адаптивним перебудуванням сітки, використанням p-елементів і великих можливостей створення макрокоманд із допомогою мови параметричного проектування програми ANSYS (APDL).

Модуль програми ANSYS Design Data Access (DDA) забезпечує передачу в програму моделей, створених засобами комп'ютерного проектування (CAD), що виключає повторення виконаної раніше роботи. Програмні засоби серії DDA Connection можуть працювати разом з розробками багатьох провідних постачальників CAD-програм, включаючи компанії Parametric Technology Corporation, EDS/Unigraphics і Computervision Corporation. Можливості аналізу і оптимізації програми ANSYS легко переносяться на CAD-моделі за рахунок використання форматів IGES й STEP для пересилання геометрії або відповідного інтерфейсу CAD-програм.

Графічні можливості забезпечуються повністю інтерактивною графікою, що є складовою програми ANSYS. Графіка важлива для перевірки вихідних даних і перегляду результатів рішення на етапі постпроцесорної обробки.

Модуль PowerGraphics має значну швидкість побудови геометричних об'єктів і графіків результатів. Засоби візуалізації цього модуля придатні для зображення елементів сітки й областей рівних значень напружень як при використанні p-елементів, так і h-елементів. Можливості модуля PowerGraphics дозволяють швидко видавати зображення: ізоповерхонь; графічних об'єктів, розділених на складові частини у вигляді однієї збірки або сукупності так званих Q-розрізів.

Проаналізувавши програмні середовища, можна зробити висновок, що існуючі системи не розглядають плоску нелінійну задачу механіки дискретних матеріалів в потрібній постановці і тим самим не враховують багато важливих факторів, що безумовно впливає на якість кінцевого результату. Також для вирішення поставленої задачі іноді виникає необхідність деякого корегування роботи програми, а отже використання готових програмних комплексів є не завжди раціональним. Більш ефективними для такого використання є пакети прикладних програм. В цьому напрямку виконані роботи В.О. Грішина, В.В. Ковтуна, О.А. Дорофєєва, С.С. Ковальчука.

До такого типу програм відноситься і запропонований програмний продукт. Програма складається з декількох незалежних модулів, кожен з яких виконує окремий етап розрахунку. Ця структура має наступні переваги:

- програміст може легко модифікувати систему, додавати нові компоненти вносячи нову функціональність;
- дозволяє швидко розробляти систему розподіляючи роботу між кількома програмістами;
- легко виявляти і видаляти помилки.



Рис. 1. Функціональна блок-схема програмного комплексу



Описаний в [14] ітераційний алгоритм розв'язання фізично нелінійної плоскої крайової задачі реалізований на основі розробленого на кафедрі опору матеріалів ХНУ [11] спеціалізованого програмного комплексу GEO. Комплекс передбачає можливість заміни "нелінійного" програмного блоку в залежності від виду прийнятих в моделі нелінійних співвідношень. Для використання в розрахунках співвідношень [7] розроблено спеціальний нелінійний блок Non-Linear. На рис. 1 представлена функціональна блок-схема програмного комплексу.

Програмний комплекс виконує наступні етапи розрахунку:

1. Введення вихідних даних: характеристики матеріалу (модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона – визначають експериментально), умови закріплення, відомі переміщення та навантаження у граничних точках.
2. Побудова дискретної моделі розрахункової області: автоматична розбивка на елементи, формування векторів вузлових сил та відомих вузлових переміщень.
3. Формування матриць жорсткості елементів.
4. Формування матриці жорсткості системи.
5. Формування та розв'язання системи лінійних рівнянь методу переміщень і визначення вузлових переміщень.
6. Обчислення деформацій та напружень.
7. Розв'язання нелінійної задачі з урахуванням прийнятих нелінійних залежностей конкретного матеріалу.
8. Перевірка розходження.
9. Формування результатів розрахунку.

Етапи 1–6 належать до стандартного розв'язання лінійної задачі МСЕ. Вони реалізовані на основі алгоритму, використаного в програмному комплексі GEO. Етапи 7, 8 реалізують оригінальний алгоритм, описаний у [14]. Результати розрахунку виводяться у вигляді таблиці в текстовому редакторі Word.

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

На основі описаного у [14] алгоритму створено нелінійний блок Non-Linear програмного комплексу GEO. Блок враховує особливості деформування дискретного середовища, а програмний комплекс з новим нелінійним блоком дозволяє моделювати процес деформування плоскої області, заповненої дискретним матеріалом.

#### **Література**

1. Програмний комплекс SolidWorks. URL: <https://www.solidworks.com/>
2. PLAXIS Geotechnical Analysis Software. URL: <https://www.bentley.com/en/products/brands/plaxis>
3. Автоматизована система наукових досліджень (АЧНД) «VESNA». URL: [https://www.knuba.edu.ua/ukr/?page\\_id=934](https://www.knuba.edu.ua/ukr/?page_id=934)
4. Багатофункціональний програмний комплекс ЛІРА-САПР. URL: <https://www.liraland.ua/lira/>
5. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. А. Маляренко, М. А. Микитавренко, А. В. Перельмутер, М. А. Перельмутер. – СКАД СОФТ, 2012. – 657 с.
6. Клованич, С. Ф. Метод конечных элементов в расчетах пространственных железобетонных конструкций / С. Ф. Клованич, Д. И. Безушко. – Одесса : Изд-во ОНМУ, 2009. – 89 с.
7. Bagrii O. V. Plane problem of discrete environment mechanics. Problems of Tribology. 2022. № 2. P. 104–111.
8. Бугров А. К. Численное решение физически нелинейных задач для грунтовых оснований / А. К. Бугров, К. К. Гребнев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1977. – № 3. – С. 39–42.
9. Гольдин А. Л. Плоская задача физически нелинейной упругой грунтовой среды / А. Л. Гольдин // Известия ВНИИГ. – 1968. – Т. 87. – С. 169–174.
10. Зарецкий Ю. К. Статика и динамика грунтовых плотин / Ю. К. Зарецкий, В. Н. Ломбардо. – М. : Энергия, 1983. – 256 с.
11. Ковтун В. В. Программный комплекс для решения задач нелинейной механики грунтов с помощью ЭВМ / В. В. Ковтун // Современные проблемы нелинейной механики грунтов. – Челябинск, 1985. – С. 136–137.
12. Сахаров В. О. Модель нелінійного деформування ґрунтової основи для розв'язання геотехнічних задач прибудови / В. О. Сахаров // Основи і фундаменти : міжвід. наук.-техн. зб. КНУБА. – 2005. – Вип. 29. – С. 8–19.
13. Гришин В. А. Нелинейные модели конструкций, взаимодействующих с грунтовой средой / В. А. Гришин, В. С. Дорофеев – Одесса : Внешрекламсервис, 2006. – 242 с.
14. Багрій О. В. Ітераційні алгоритми рішення плоскої задачі для середовища з суттєвим проявом внутрішнього тертя / О. В. Багрій // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2022. – № 4. – С. 44–48.

## References

1. Prohramnyi kompleks SolidWorks. URL: <https://www.solidworks.com/>
2. PLAXIS Geotechnical Analysis Software. URL: <https://www.bentley.com/en/products/brands/plaxis>
3. Avtomatyzovana systema naukovykh doslidzhen (ASND) «VESNA». URL: [https://www.knuba.edu.ua/ukr/?page\\_id=934](https://www.knuba.edu.ua/ukr/?page_id=934)
4. Bahatofunktsionalnyi prohramnyi kompleks LIRA-SAPR. URL: <https://www.liraland.ua/lira/>
5. SCAD Office. Vychislitel'nyj kompleks SCAD / V. S. Karpilovskij, Je. Z. Kriksunov, A. A. Maljarenko, M. A. Mikitavrenko, A. V. Perel'muter, M. A. Perel'muter. – SKAD SOFT, 2012. – 657 s.
6. Klovanih, S. F. Metod konechnykh jelementov v raschetah prostranstvennykh zhelezobetonnykh konstrukcij / S. F. Klovanih, D. I. Bezushko. – Odessa : Izd-vo ONMU, 2009. – 89 s.
7. Bagrii O. V. Plane problem of discrete environment mechanics. Problems of Tribology. 2022. № 2. R. 104–111.
8. Bugrov A. K. Chislennoe reshenie fizicheski nelinejnykh zadach dlja gruntovykh osnovanij / A. K. Bugrov, K. K. Grebnev // Osnovaniya, fundamente i mehanika gruntov. – 1977. – № 3. – S. 39–42.
9. Gol'din A. L. Ploskaja zadacha fizicheski nelinejnoj uprugoj gruntovoj sredy / A. L. Gol'din // Izvestija VNIIG. – 1968. – T. 87. – S. 169–174.
10. Zareckij Ju. K. Statika i dinamika gruntovykh plotin / Ju. K. Zareckij, V. N. Lombardo. – M. : Jenergija, 1983. – 256 s.
11. Kovtun V. V. Programmnyj kompleks dlja reshenija zadach nelinejnoj mehaniki gruntov s pomoshh'ju JeVM / V. V. Kovtun // Sovremennye problemy nelinejnoj mehaniki gruntov. – Cheljabinsk, 1985. – S. 136–137.
12. Sakharov V. O. Model neliniinogo deformuvannia gruntovoi osnovy dlja rozv'iazannia heotekhnichnykh zadach prybudovy / V. O. Sakharov // Osnovy i fundamente : mizhvid. nauk.-tekhn. zb. KNUBA. – 2005. – Vyp. 29. – S. 8–19.
13. Grishin V. A. Nelinejnye modeli konstrukcij, vzaimodejstvujushchih s gruntovoj sredoj / V. A. Grishin, V. S. Dorofeev – Odessa : Vneshreklamsservis, 2006. – 242 s.
14. Bahrii O. V. Iteratsiini alhorytmy rishennia ploskoi zadachi dlja seredovyshcha z suddiivym proiavom vnutrishnoho tertia / O. V. Bahrii // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2022. – № 4. – S. 44–48.

Надійшла/Paper received : 29.09.2022 р.    Надрукована/Printed : 01.11.2022 р.

БОЙКО Юлій

Хмельницький національний університет

ORCID: [0000-0003-0603-7827](https://orcid.org/0000-0003-0603-7827)e-mail: [boiko\\_julius@ukr.net](mailto:boiko_julius@ukr.net)

ПЯТИН Ілля

Хмельницький політехнічний фаховий коледж національного університету «Львівська політехніка»

ORCID: [0000-0003-1898-6755](https://orcid.org/0000-0003-1898-6755)e-mail: [ilkhmel@ukr.net](mailto:ilkhmel@ukr.net)

МОКРИЦЬКИЙ Андрій

Хмельницький національний університет

e-mail: [AndriyAssassin@i.ua](mailto:AndriyAssassin@i.ua)

## ДОСЛІДЖЕННЯ КІЛ СИНХРОНІЗАЦІЇ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ

В роботі наведено результати досліджень різних характеристик цифрової системи ФАПЧ (час досягнення блокування; встановлена помилка; перехідна поведінка) для різних видів вхідної дії. Досліджено коефіцієнт бітових помилок когерентної цифрової системи зв'язку. Визначено перехідний процес системи ФАПЧ під час адаптації. Наявність нульової фазової помилки визначається контурним фільтром ФАПЧ. Ширина смуги контуру та початкове відхилення між вхідною та опорною частотами впливають на час адаптації ФАПЧ. Коефіцієнт загасання ФАПЧ впливає на поведінку адаптації: швидкість і величину викидів.

Ключові слова: фазове автопідлаштування частоти, фазовий детектор, генератор з числовим керуванням, контурний фільтр, коефіцієнт загасання.

BOIKO Juliy, MOKRYTSKY Andriy

Khmelnytskyi National University

PYATIN Ilya

Khmelnytskyi Polytechnic, Professional College by Lviv Polytechnic National University

## RESEARCH OF SYNCHRONIZATION CIRCUITS FOR DIGITAL COMMUNICATION SYSTEMS

In a digital communication system, the transmitter and receiver have several generators for modulation and demodulation; increasing and decreasing the sampling frequency; synchronization of symbols and bit streams. The causes of phase and carrier frequency errors are the instability of the frequency of the local generators of the transmitter and receiver; presence of Doppler frequency shift; signal propagation delay from the transmitter to the receiver. Synchronization circuits of modern digital communication systems are built on the basis of phase-locked loop (PLL). The purpose of the work is: research of various characteristics of the digital PLL (locking time; established error; transient behavior) for various types of input action; study of the bit error rate of a coherent digital communication system. The PLL consists of the following components: a phase detector that generates a signal that varies in proportion to the phase difference between the input signal and a locally generated sinusoid; controlled generator that generates an output signal whose phase and frequency depends on the input signal; loop filter, which removes unwanted high-frequency components in the output signal of the phase detector and forms a signal that controls the NCO. During adaptation, the PLL has some transient process that depends, in particular, on three factors: the presence of a zero-phase error is determined by the PLL contour filter; the determined bandwidth of the circuit and the initial deviation between the input and reference frequencies affect the PLL adaptation time; the attenuation coefficient of the PLL affects the adaptation behavior: the speed and magnitude of emissions. The study of the output signal of the linear PLL model for damping factor  $\xi = 0,3$ ,  $\xi = 1$  and  $\xi = 3$ , and we will use an input signal of the step function type, linear voltage changes and hyperbola. type 1, type 2, and type 3 PLLs can adapt to a zero-error step input. If the input signal is a linearly varying voltage, PLL types 2 and 3 can adapt with zero phase error, while type 1 adapts with a residual phase error. For hyperbola input, only type 3 PLL can fully adapt: type 2 adapts with residual error, while type 1 cannot adapt. The damping factor should be in the range of  $0,3 \leq \xi \leq 1$ . When changing the input signal frequency from 3.55 MHz to 3.72 MHz, the capture time of the type 2 PLL changes from about 150  $\mu$ s to about 600  $\mu$ s, that is, when the frequency increases by 170 kHz, the capture time increases almost four times. The error that has occurred is affected by the choice of the contour filter and the features of the synchronization.

Keywords: phase-locked loop, phase detector, numerically controlled oscillator, loop filter, damping ratio.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

У цифровій системі зв'язку передавач і приймач мають у своєму складі декілька генераторів:

- для модуляції і демодуляції;
- для підвищення і пониження частоти дискретизації;
- для синхронізації символів і бітових потоків;
- для отримання дискретних відліків сигналу.

Приймач виділяє інформацію про синхронізацію з отриманого сигналу. Синхронізація повинна бути зроблена на наступних рівнях:

1. Відновлення несучої частоти.
2. Відновлення часу надходження символу.
3. Синхронізація фреймів.

Причини помилок фази та частоти несучої полягають у наступному:

- нестабільність частоти локальних генераторів передавача і приймача;

- наявність Доплерівського зсуву частоти;
- затримка розповсюдження сигналу від передавача до приймача.

У традиційному підході локальний генератор приймача адаптивно узгоджується з частотою і фазою отриманого сигналу. Точне відновлення фази необхідно для когерентного виявлення.

Відновлення несучої часто виконується в двох частинах:

1. Грубе регулювання частоти.
2. Остаточне налаштування частоти і відновлення фази.

### Аналіз досліджень та публікацій

В роботах [1-5] наведено дані про принципи побудови цифрових систем зв'язку. Кола синхронізації сучасних цифрових систем зв'язку будують на основі фазового автопідлаштування частоти (ФАПЧ) [6-9]. Це дозволяє відтворювати вхідну синусоїду, відстежувати відхилення її частоти та пригнічувати шум. Кола ФАПЧ можуть бути побудовані як в аналоговому, так і в цифровому вигляді [2]. Наявність помилки синхронізації несучої частоти приводить до наступних ефектів:

- виникає фазова помилка несучої  $\phi$ , що призводить до повороту сузір'я

$$\bar{A}_k = e^{j\phi} A_k.$$

- виникає помилка несучої  $\Delta\omega$ , що призводить до обертання сузір'я модульованого сигналу у часі

$$\bar{A}_k = e^{jkT\Delta\omega} A_k.$$

Якщо ці параметри можуть бути оцінені з достатньою точністю, розглянуті ефекти можуть бути компенсовані комплексним множителем при обробці сигналу в основній смузі частот до операцій виявлення.

### Постановка завдання

Підвищення швидкості і якості передачі інформації цифрових систем зв'язку неможливо досягти без забезпечення синхронізації передавача і приймача [10, 11], що передбачає використання кіл фазового автопідлаштування частоти (ФАПЧ). Від встановленого режиму роботи кола ФАПЧ залежить ефективність і працездатність системи зв'язку.

Метою роботи є дослідження різних характеристик цифрової ФАПЧ (час досягнення блокування; встановлена помилка; перехідна поведінка) для різних видів вхідної дії; дослідження коефіцієнту бітових помилок когерентної цифрової системи зв'язку.

### Виклад основного матеріалу

Структурна схема ФАПЧ показано на рис. 1. Вона складається з наступних компонентів [10]:

- фазовий детектор, який генерує сигнал, що змінюється пропорційно різниці фаз між вхідним сигналом і синусоїдою, що генерується локально.
- керований генератор, який генерує вихідний сигнал, фаза і частота якого залежить від вхідного сигналу. Виділяють генератор керований напругою (ГКН) аналогових ФАПЧ, або генератор керований кодом (ГКК) цифрових ФАПЧ.
- контурний фільтр, який видаляє небажані високочастотні складові у вихідному сигналі фазового детектора і формує сигнал, який керує ГКН або ГКК.

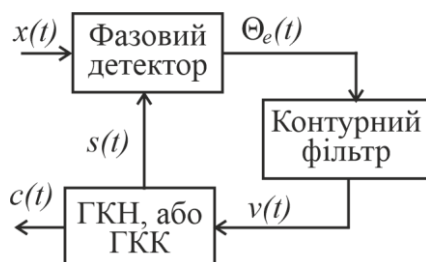


Рис. 1. Структурна схема ФАПЧ

Вхідний опорний сигнал ФАПЧ:  $x(t) = \cos(2\pi f_i t + \Theta_i(t))$

Вихідний сигнал ФАПЧ:  $c(t) = \cos(2\pi f_0 t + \Theta_0(t))$

Сигнал локального генератора:  $s(t) = -\sin(2\pi f_0 t + \Theta_0(t))$

Сигнал помилки:  $\Theta_e(t) = K_p (\Theta_i(t) + \Theta_0(t))$

Роль фазового детектора полягає в генерації сигналу, пропорційного різниці фаз між опорним вхідним сигналом і локальним генератором. Фазовий детектор часто реалізується як помножувач сигналів.

Вихід помножувача для фазового детектора можна представити виразом:

$$y(t) = x(t) \cdot s(t) = \cos(2\pi f_i t + \Theta_i(t)) \cdot (-\sin(2\pi f_0 t + \Theta_0(t)))$$

Коли частоти  $f_i$  і  $f_0$  рівні, вихідний сигнал можна представити у вигляді:

$$y(t) = \frac{1}{2} \sin(\Theta_i(t) - \Theta_0(t)) - \frac{1}{2} \sin(4\pi f_i(t) + \Theta_i(t) + \Theta_0(t)).$$

На виході помножувача маємо низькочастотну складову, пропорційну різниці фаз і більш високочастотні складові (другий доданок), які видаляються фільтрацією. На виході контурного фільтра маємо сигнал, що пропорційний фазовій помилці згідно виразу:

$$\Theta_e(t) = K_p (\Theta_i(t) - \Theta_0(t))$$

де  $\Theta_i(t)$  і  $\Theta_0(t)$  - фази вхідного опорного і сигналу гетеродину в момент часу  $t$  відповідно;  $K_p$  - коефіцієнт підсилення фазового детектора.

Контурний фільтр призначений для фільтрації сигналу помилки, що створюється фазовим детектором. Це фільтр нижніх частот, що складається з пропорційної ланки і одної або декількох ланок інтегрування [12]. Конструкція петлевого фільтра є дуже важливою для визначення загальних характеристик та поведінки ФАПЧ.

ГКН або ГКК є генератором з частотою спокою  $f_0$  і керуючим входом [13]. ГКК створює вихідний сигнал із заданою частотою спокою, яка регулюється вхідним сигналом. Вихід для вибірки  $m$  визначається виразом:

$$c[m] = \cos(2\pi f_0 mT + \hat{\Theta}[m]),$$

де  $T$  - період вибірки, а  $\hat{\Theta}[m]$  - розрахункова фаза у вибірці  $m$ , отримана шляхом підсумовування керуючого входу ГКК, по всіх вибірках, тобто:

$$\hat{\Theta}[m] = K_0 \sum_{n=0}^m v[n].$$

Коефіцієнт пропорційності  $K_0$  для моделі ГКН безперервного часу вимірюється в радіанах на вольт.

Поведінка ГКК часто описується з погляду розміру кроку  $\mu$ . Якщо припустити, що розмір кроку фіксований, фаза ГКК збільшується на заданий розмір кроку для кожної вибірки, тобто:

$$\hat{\Theta}[m] = \hat{\Theta}[m-1] + \mu[m]$$

ГКК проходить повний період (2 радіани) протягом деякого фіксованого числа вибірок. Розмір кроку управляє швидкістю збільшення фази, тобто частотою хвилі, що генерується, при цьому більший розмір кроку дає більш високу частоту. Розмір кроку для генерації сигналу на певній частоті, визначається виразом:

$$\mu = \frac{2\pi f_d}{f_s}.$$

Наприклад, якщо  $f_s = 100$  Гц та  $f_d = 10$  Гц, то  $\mu = \pi / 5$ .

Розмір кроку формується шляхом підсумовування двох складових: постійного значення, що відповідає частоті спокою; змінного значення, що потрібний для коригування. Це визначається виразом:

$$\mu[m] = \mu_q + \mu_a[m]$$

Регульовальний член визначається сигналом зворотного зв'язку, тобто  $\mu[m]$  масштабується коефіцієнтом підсилення генератора  $K_0$ .

### Модель ФАПЧ з дискретним часом

На рис. 2 показано загальну модель конструкції цифрових контурних фільтрів ФАПЧ типу 1, типу 2 та типу 3. Тип можна визначити, встановивши відповідні коефіцієнти помножувача у моделі.

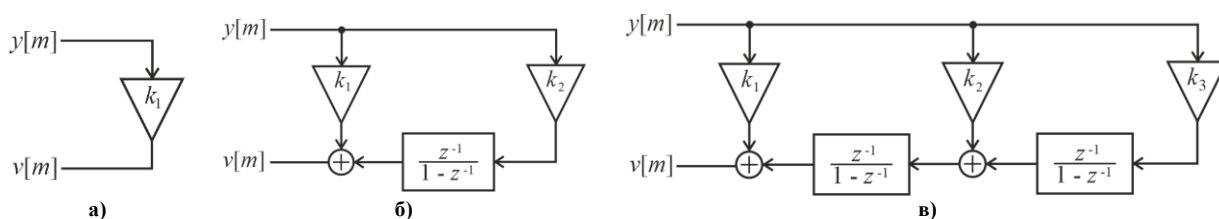


Рис. 2. Структури цифрових контурних фільтрів ФАПЧ (а – тип 1, б – тип 2, в – тип 3)

При використанні контурного фільтра 2-го типу система ФАПЧ (рис. 3) повинна мати можливість відстежувати ступінчасту або лінійну зміну фази з нульовою фазовою помилкою після адаптації.

ФАПЧ має встановлений режим, коли сигнал, що генерується ФАПЧ, досягає тієї ж частоти, що і вхідний опорний сигнал. Можна визначити ключові характеристики ФАПЧ:

- час досягнення блокування;
- встановлена помилка;
- перехідна поведінка та можливість відстеження;
- пропускна спроможність.

Ці варіанти залежать від сфери застосування та очікуваних умов експлуатації. Смуга пропускання повинна бути достатньою для компенсації відхилень між частотою генератора і опорним вхідним сигналом.

Час, необхідний ФАПЧ для синхронізації з опорним сигналом, є важливим чинником, особливо у

системах зв'язку [11, 14, 15]. Чим більше часу потрібно для досягнення блокування, тим більша довжина преамбули [12].

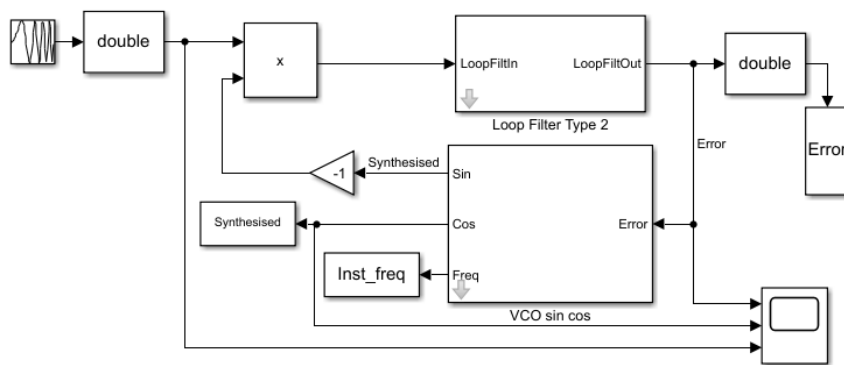


Рис. 3. Simulink модель кола ФАПЧ з контурним фільтром типу 2

На час досягнення синхронізації впливає конструкція ФАПЧ, а також різниця у частоті між вхідним опорним сигналом та частотою спокою ГКК. На рис. 4 показано два приклади поведінки ФАПЧ типу 2 (рис.3) у міру адаптації. На рис. 5 приведена залежність сигналу помилки на виході фазового детектора від часу для ФАПЧ типу 2. Частота спокою  $f=3,5$  МГц. Чутливість ФАПЧ 1 МГц/В.

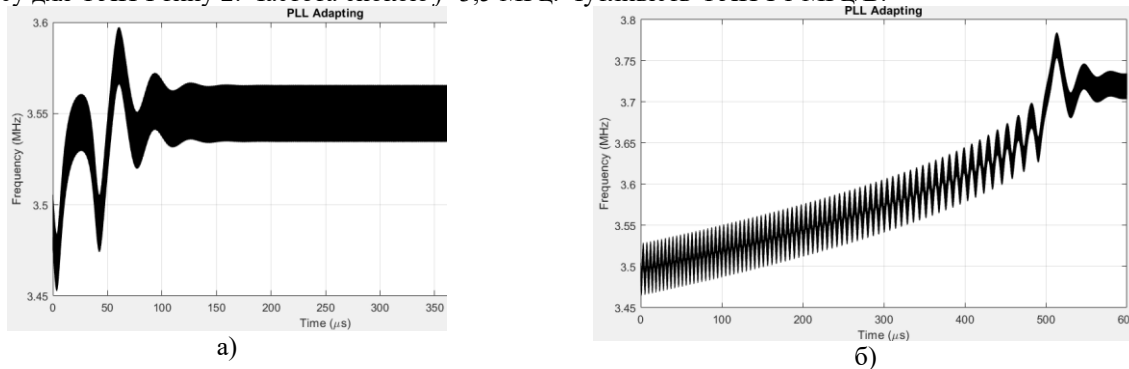


Рис. 4. Залежність зміни частоти на виході ГКН від часу для ФАПЧ типу 2  
(а – вхідна частота  $f=3,55$  МГц; б – вхідна частота  $f=3,72$  МГц )

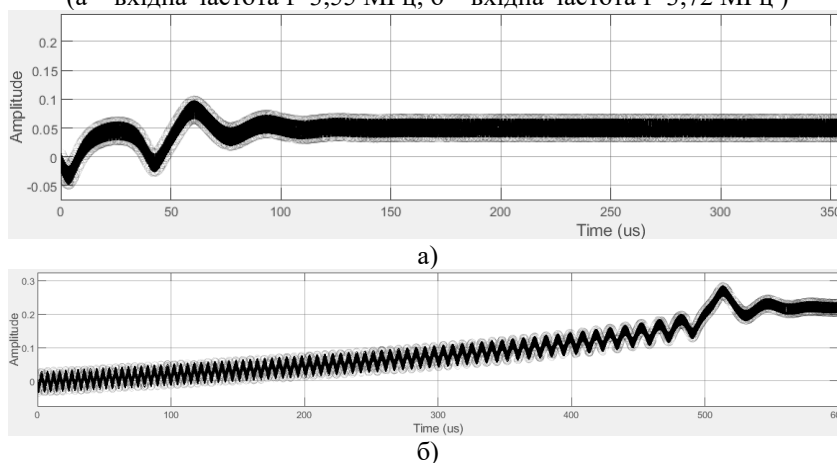


Рис. 5. Залежність сигналу помилки на виході фазового детектора від часу для ФАПЧ типу 2  
(а – вхідна частота  $f=3,55$  МГц; б – вхідна частота  $f=3,72$  МГц )

При зміні частоти вхідного сигналу від 3,55 МГц до 3,72 МГц, час досягнення захоплення ФАПЧ типу 2 змінюється від близько 150 мкс до близько 600 мкс, тобто при збільшенні частоти на 170 кГц, час досягнення захоплення збільшується майже у чотири рази. Встановлена помилка синхронізації. ФАПЧ типу 3 звичайно використовуються у складніших сценаріях, наприклад, у приймачах GPS, де поширені великі Допплерівські зміщення частоти.

ФАПЧ під час адаптації має деякий перехідний процес, що залежить, зокрема, від трьох факторів [15]:

- наявність нульової фазової помилки визначається контурним фільтром ФАПЧ;
- визначена ширина смуги контуру та початкове відхилення між вхідною та опорною частотами впливають на час адаптації ФАПЧ;
- коефіцієнт загасання ФАПЧ впливає на поведінку адаптації: швидкість і величину викидів.

Коефіцієнт загасання  $\xi$  визначає перехідну поведінку ФАПЧ при досягненні фазової синхронізації. Значення  $\xi < 1$  відповідають системі з недостатнім загасанням (перехідний процес показує викиди і коливання навколо значення встановленого стану перед стабілізацією). Значення  $\xi > 1$  відповідають занадто загасаючій системі, що поступово сходиться до стійкого стану. Якщо  $\xi = 1$ , то говорять, що система має критичне загасання, тобто має мінімально можливий час відновлення без викидів [1]. Менші коефіцієнти загасання краще відстежують зміни фази і частоти. Коефіцієнт загасання має перебувати у діапазоні  $0,3 \leq \xi \leq 1$ .

Смуга пропускання задається відповідно діапазону частот, в якому працює ФАПЧ з мінімізацією шуму.

ФАПЧ з ширшою смугою пропускання може справлятися з більшими відхиленнями між частотою спокою ГКК та вхідним опорним сигналом. Тобто, ФАПЧ може успішно адаптуватися у ширшому діапазоні частот. З іншого боку, широка смуга пропускання дозволяє більшій кількості шуму проникати в систему ФАПЧ, ніж вузькосмугова ФАПЧ - це погіршує чистоту синтезованої синусоїди.

#### Дослідження лінійної моделі ФАПЧ

Проведемо дослідження лінійної моделі ФАПЧ, Simulink модель якої наведена на рис. 6. Розглянемо ФАПЧ типу 2. Для цього коефіцієнт  $k_3$  необхідно прийняти рівним нулю.

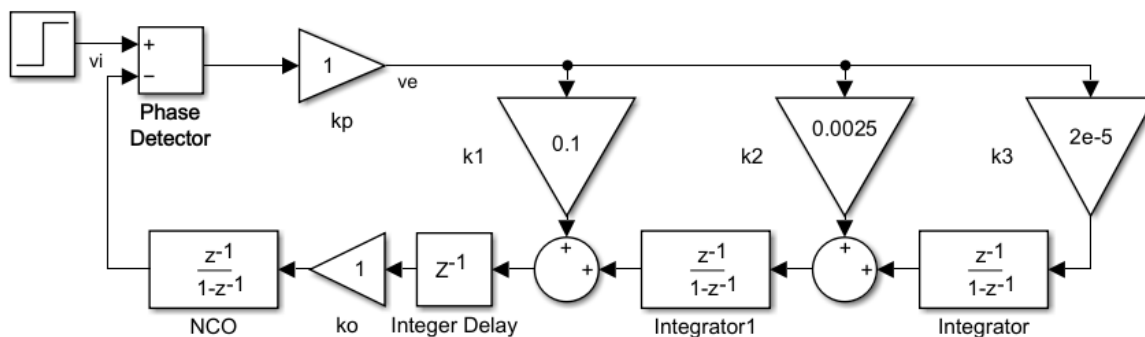


Рис. 6. Simulink модель лінійної моделі ФАПЧ

Проведемо дослідження вихідного сигналу ФАПЧ типу 2 (рис. 7 – рис.9) для коефіцієнтів загасання  $\xi = 0,3$ ,  $\xi = 1$  і  $\xi = 3$ . Використаємо вхідний сигнал типу сходящова функція, лінійно змінна напруги та гіпербола.

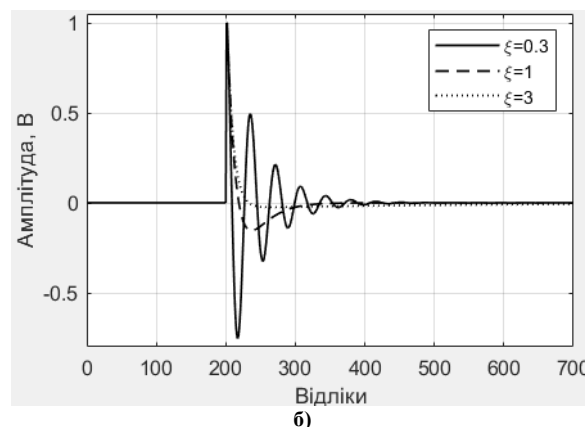
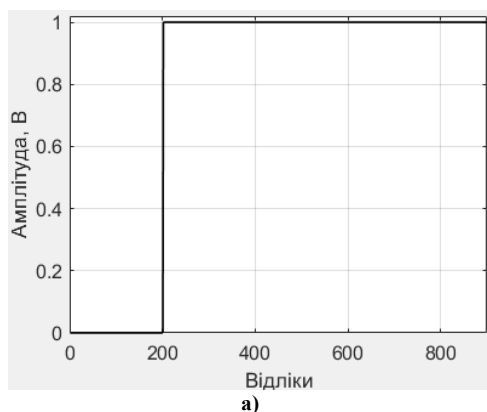


Рис. 7. Реакція ФАПЧ типу 2 (б) на вхідну дію у вигляді сходящової функції (а) для різних значень коефіцієнта загасання



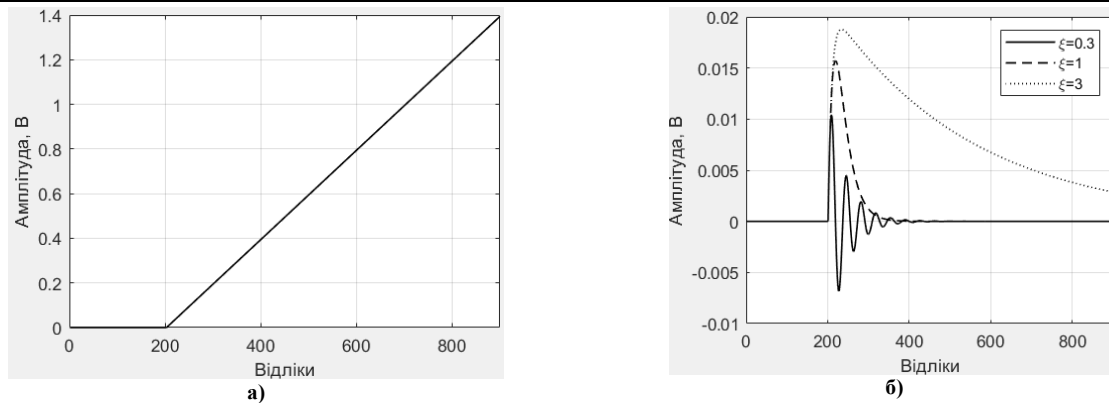


Рис. 8. Реакція ФАПЧ типу 2 (б) на вхідну дію у вигляді лінійно змінної напруги (а) для різних значень коефіцієнта загасання

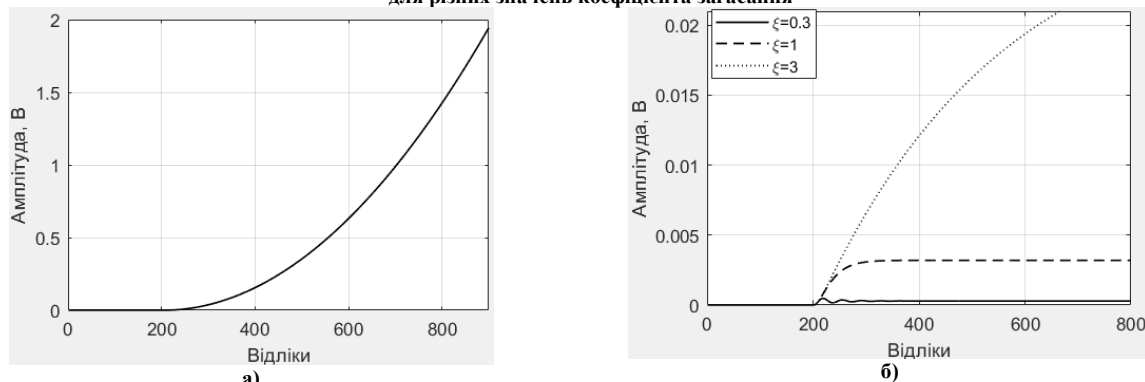


Рис. 9. Реакція ФАПЧ типу 2 (б) на вхідну дію у вигляді гіперболи (а) для різних значень коефіцієнта загасання

Проведемо дослідження вихідного сигналу ФАПЧ типу 3 (рис. 10 – рис. 12) для коефіцієнтів загасання  $\xi = 0,3$ ,  $\xi = 1$  і  $\xi = 3$ . Встановимо значення коефіцієнта підсилення  $k_3 = 2 \cdot 10^{-5}$ ,  $\xi = 1$ .

ФАПЧ типу 1, типу 2 і типу 3 можуть адаптуватися до ступінчастого входу з нульовою помилкою. Якщо вхідний сигнал є лінійно змінною напругою, ФАПЧ типу 2 і 3 можуть адаптуватися з нульовою фазовою помилкою, а тип 1 адаптується, з залишковою фазовою помилкою. Для входу гіперболи тільки ФАПЧ типу 3 може повністю адаптуватися: тип 2 адаптується з залишковою помилкою, тоді як тип 1 не може адаптуватися.

ФАПЧ типу 1: може адаптуватися при наявності початкової різниці фаз; неможливо адаптувати динамічний зсув частоти.

ФАПЧ типу 2: може адаптуватися як до цільової частоти, так і до цільової фази за наявності початкової різниці частот та початкової різниці фаз; може адаптуватися до цільової частоти за наявності динамічного зміщення частоти з залишковою фазовою помилкою.

ФАПЧ типу 3: може адаптуватися за наявності початкової різниці фаз, початкової різниці частот та динамічного зміщення частоти, у кожному випадку з нульовою залишковою фазовою помилкою.

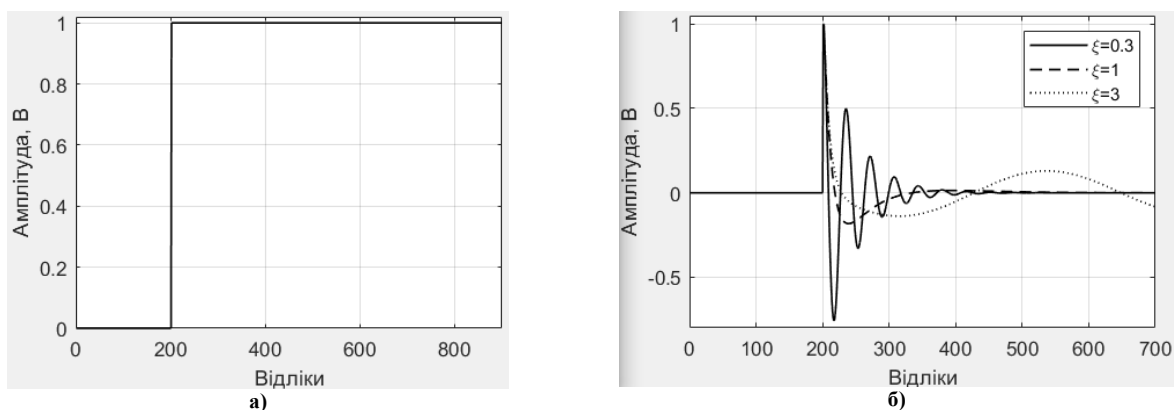


Рис. 10. Реакція ФАПЧ типу 3 (б) на вхідну дію у вигляді сходинок функції (а) для різних значень коефіцієнта загасання

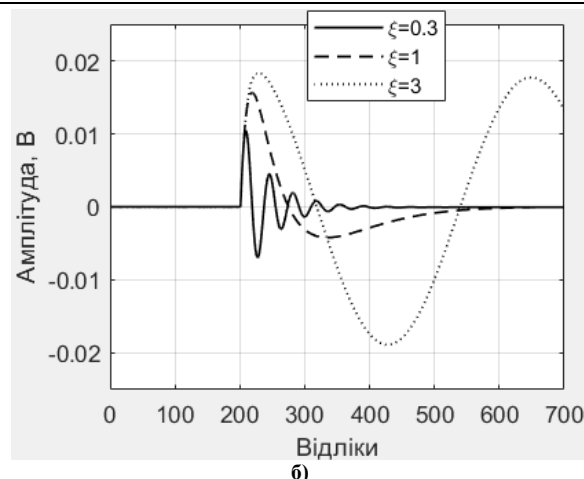
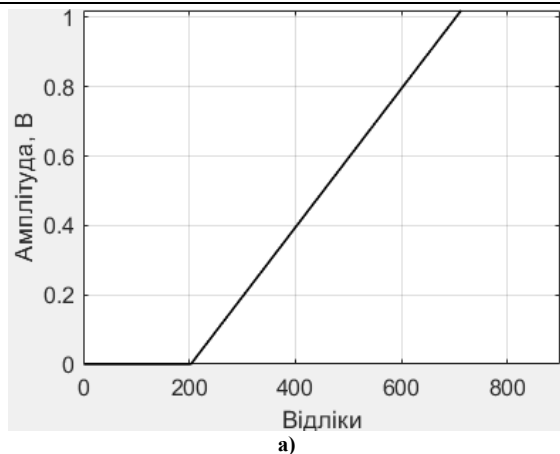


Рис. 11. Реакція ФАПЧ типу 3 (б) на вхідну дію у вигляді лінійно змінної напруги (а) для різних значень коефіцієнта загасання

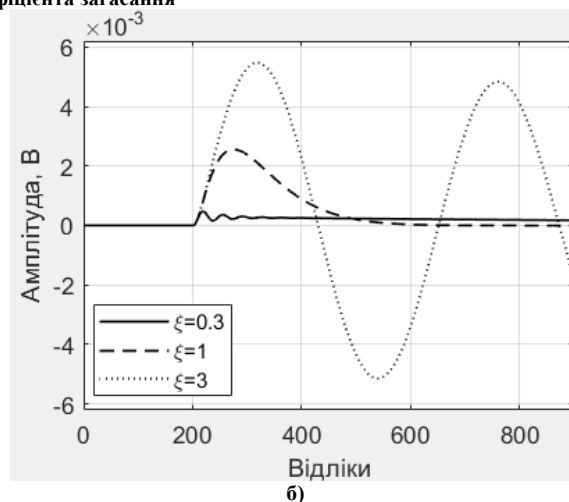
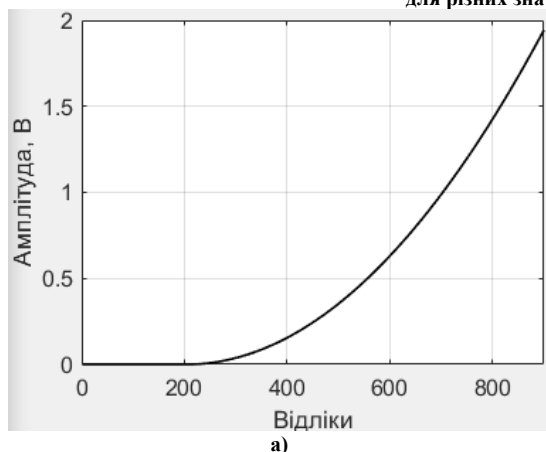


Рис. 12. Реакція ФАПЧ типу 3 (б) на вхідну дію у вигляді гіперболи (а) для різних значень коефіцієнта загасання

Звичайно використовуються кола ФАПЧ типу 2, оскільки вони забезпечують достатню продуктивність. Не бажано використовувати коефіцієнт загасання  $\xi < 1$  через збільшення тривалості перехідних процесів.

Частота дискретизації повинна мати значення, яке щонайменше в 5 разів перевищує очікувану частоту вхідного сигналу. Це дозволяє використовувати фазовий детектор на основі помножувача.

В конструкції фазового детектора на основі помножувача, коефіцієнт підсилення залежить від амплітуди вхідного сигналу. Для уникнення цього, на вході ФАПЧ вмикають пристрій автоматичного регулювання підсилення (АРП), який підтримує амплітуду сигналу на вході ФАПЧ постійною.

#### Дослідження коефіцієнту бітових помилок у когерентній цифровій системі зв'язку

Розглянемо методику проведення синхронізації у системі зв'язку шляхом моделювання у Matlab. Компенсація значних фазових та частотних зсувів для сигналу з квадратурною амплітудною модуляцією у каналі AWGN виконується у два етапи. Спочатку коригується грубий зсув частоти, використовуючи оцінку, надану грубим частотним компенсатором, а потім відбувається точна корекція, використовуючи синхронізацію несучої. Через грубе частотне коригування синхронізатор несучої швидко сходиться, навіть якщо нормалізована смуга пропускання встановлена на низьке значення. Нижчі значення нормалізованої смуги пропускання забезпечують краще коригування невеликих залишкових зсувів несучої. Після застосування коригування зміщення фази та частоти до отриманого сигналу необхідно розв'язати неоднозначність фази за допомогою преамбули.

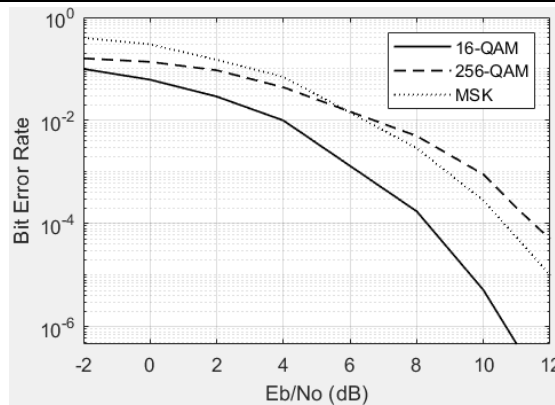


Рис. 13. Залежність коефіцієнту бітових помилок від відношення сигнал-шум для системи зв'язку

З отриманих залежностей можна зробити висновок, що не зважаючи на введені частотні і фазові зсуви, кола синхронізації цифрової системи зв'язку на основі ФАПЧ забезпечують придатний рівень бітових помилок.

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

При зміні частоти вхідного сигналу від 3,55 МГц до 3,72 МГц, час досягнення захоплення ФАПЧ типу 2 змінюється від близько 150 мкс до близько 600 мкс, тобто при збільшенні частоти на 170 кГц, час досягнення захоплення збільшується майже у чотири рази. ФАПЧ типу 3: може адаптуватися за наявності початкової різниці фаз, початкової різниці частот та динамічного зміщення частоти, у кожному випадку з нульовою залишковою фазовою помилкою для значень коефіцієнта загасання  $\xi < 1$ . Незважаючи на введені частотні і фазові зсуви, кола синхронізації цифрової системи зв'язку на основі ФАПЧ забезпечують придатний рівень бітових помилок.

#### Література

1. Karimi-Ghartema M. PLL Structures for Single-Phase Applications. Enhanced Phase-Locked Loop Structures for Power and Energy Applications. Wiley-IEEE Press, 2014, P.1-1.
2. Talbot D. B. A Review of PLL Fundamentals. Frequency Acquisition Techniques for Phase Locked Loops, Wiley-IEEE Press, 2012, P.3-15.
3. Пятін І.С. Система зв'язку з QPSK модуляцією і синхронізацією несучої / І.С. Пятін, В.В. Мішан, О.О. Кухарець // Вісник Хмельницького національного університету. - 2019. - №5. - С.211-217.
4. Berkman L. Designing a system to synchronize the input signal in a telecommunication network under the condition for reducing a transitional component of the phase error / L. Berkman, O. Tkachenko, O. Turovsky, V. Fokin, V. Strelnikov // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2021. - Т. 1. - № 9-109. - С. 66-76.
5. Бойко Ю.М. Порівняльний аналіз детекторів помилки символної синхронізації когерентної системи цифрового зв'язку з модуляцією QPSK / Ю.М. Бойко І.С. Пятін // Зв'язок. - 2019. - №6. - С. 12-18.
6. Козловський В. В. Синтез складного розімкнутого зв'язку в системі синхронізації при умові мінімізації дисперсії фазової помилки в ході стеження за несучою частотою / В. В. Козловський, О. Л. Туровський // Вісник Хмельницького національного університету. - 2020. - С. 162 -168.
7. Туровський О. Л. Оцінка можливостей підвищення ефективності роботи системи синхронізації радіотехнічного пристрою в ході стеженні за несучою частотою / О. Л. Туровський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. - 2020. - № 1. - С. 116-122.
8. Бойко Ю. М. Проблеми синтезу пристроїв тактової синхронізації приймачів супутникових телекомунікаційних систем передачі інформації / Ю. М. Бойко, О. І. Єрьоменко // Вісник Національного технічного університету України Київський політехнічний інститут. Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування. - 2014. - №. 58. - С. 55-66.
9. Huang S. Low-Noise Fractional-N PLL With a High-Precision Phase Control in the Phase Synchronization of Multichips / S. Huang, S. Liu, M. Liu, J. Hu and Z. Zhu // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. - 2018. - T. 28, N. 8. - P. 702-704.
10. Boiko J. Study of the Influence of Changing Signal Propagation Conditions in the Communication Channel on Bit Error Rate / J. Boiko, I.Pyatin, L. Karpova, O. Eromenko // Data-Centric Business and Applications. - Springer, Cham, 2021. - С. 79-103.
11. Шкурूपій С. С. Аналіз методів синхронізації еталонних частотно-часових сигналів військовим користувачам / С.С. Шкурूपій, В.М. Пилипенк, О.О. Клімішен, М.І. Кожушко, І.О. Атаманенко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. - 2021. - № 4 (45). - С. 116-123.
12. Бойко Ю.М. Методика обробки та синхронізації сигналів у програмно-обумовлених радіосистемах з OFDM / Ю.М. Бойко, І.С. Пятін, І.Р. Пархомей // Вісник Хмельницького національного університету. - 2022. - №2. - С. 123-132.

13. Туровський О. Л. Особенности и задачи по оценке несущей частоты современных спутниковых систем передачи данных / О. Л. Туровський, С. В. Панадій, Н. О. Ліщиновська // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2020. – № 1. – С. 174–187.
14. Berkman L. Analyzing the code structures of multidimensional signals for a continuous information transmission channel / L. Berkman, O. Turovsky, L. Kyryach, O. Varfolomeeva, V. Dmytrenko, O. Pokotylo // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021 – T. 5. – № 9. – С. 70–81.
15. Pyatin I., Boiko J., Eromenko O. Design and Simulation of Synchronization Systems in Telecommunications with QPSK //2020 IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT). – IEEE, 2020. – С. 98-103.

#### References

1. Karimi-Ghartema M. PLL Structures for Single-Phase Applications. Enhanced Phase-Locked Loop Structures for Power and Energy Applications. Wiley-IEEE Press, 2014, P.1-1.
2. Talbot D. B. A Review of PLL Fundamentals. Frequency Acquisition Techniques for Phase Locked Loops, Wiley-IEEE Press, 2012, P.3-15.
3. Pyatin I.S. Communication system with QPSK modulation and carrier synchronization / I.S. Pyatin, V.V. Mishan, O.O. Kuharets// Herald of Khmelnytskyi national university. – 2019. - №5. - P. 211-217.
4. Berkman L. Designing a system to synchronize the input signal in a telecommunication network under the condition for reducing a transitional component of the phase error / L. Berkman, O. Tkachenko, O. Turovsky, V. Fokin, V. Strelnikov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – V. 1. – no. 9-109. – P. 66–76.
5. Boiko J. Comparative analysis of timing error detectors for symbol synchronization of the coherent system of digital communication with QPSK modulation / J. Boiko, I. Pyatin // Connectivity. – 2019. – no. 6. – P. 12-18.
6. Kozlovskiy V. V. Synthesis of a complex interconnected relationship in the synchronization system under the minimization of phase error dispersion during discontinuation / V. V. Kozlovskiy, O. L. Turovskiy // Herald of Khmelnytskyi national university. – 2020. – S. 162–168.
7. Turovsky O. Evaluation of possibilities to improve work efficiency systems of synchronization of a radio technical device during carrier frequency tracking / O. Turovsky // Measuring and computing devices in technological processes. – 2020. - № 1 – S. 116–122.
8. Boiko J. M., Eromenko A. I. Synthesis problems of clock synchronization devices for receivers of satellite telecommunication data transmission systems //Bulletin of National Technical University of Ukraine" Kyiv Polytechnic Institute" Series—Radiotechnique. Radioapparatus building. — 2014. – T. 58. – S. 55-66.
9. Huang S. Low-Noise Fractional-N PLL With a High-Precision Phase Control in the Phase Synchronization of Multichips / S. Huang, S. Liu, M. Liu, J. Hu and Z. Zhu // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2018. - T. 28, N. 8. – P. 702-704.
10. Boiko J. Study of the Influence of Changing Signal Propagation Conditions in the Communication Channel on Bit Error Rate / J. Boiko, I. Pyatin, L. Karpova, O. Eromenko //Data-Centric Business and Applications. – Springer, Cham, 2021. – С. 79-103.
11. Shkurupii S. An analysis of methods synchronization of reference frequency and time signals to military consumers / S. Shkurupii, V. Pylypenk, O. Klimishen, M. Kozhushko, I. Atamanenko //Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy. – 2021. – № 4 (45). – S. 116-123.
12. Boiko J. Signal processing and synchronization technique in software-defined radio systems with OFDM / J. Boiko, I. Pyatin, I. Parkhomey // Herald of Khmelnytskyi national university. - 2022. - №2. – S. 123-132.
13. Turovsky O. L. Osobennosti i zadachi po ocenke nesushej chastoty sovremennyh sputnikovyh sistem peredachi dannyh / O. L. Turovsky, S. V. Panadii, N. O. Lishchynovska //Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnolohii. – 2020. – № 1. – С. 174-187.
14. Berkman L. Analyzing the code structures of multidimensional signals for a continuous information transmission channel / L. Berkman, O. Turovsky, L. Kyryach, O. Varfolomeeva, V. Dmytrenko, O. Pokotylo // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021 – V. 5. – no. 9. – P. 70–81.
15. Pyatin, J. Boiko and O. Eromenko, "Design and Simulation of Synchronization Systems in Telecommunications with QPSK," 2020 IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT), 2020, pp. 98-103.

Надійшла/Paper received : 12.08.2022 р.    Надрукована/Printed :01.11.2022 р.

КРИЛИК Людмила

Вінницький національний технічний університет

ORCID ID: 0000-0001-6642-754X

e-mail: lyudmila.krylik@gmail.com

## ЗАСТОСУВАННЯ БАГАТОФАКТОРНОГО ДИСПЕРСІЙНОГО АНАЛІЗУ З МЕТОЮ ЯКІСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ФАКТОРІВ НА ЧУТЛИВІСТЬ ЄМНІСНОГО СЕНСОРА ВОЛОГОСТІ

З метою якісного оцінювання впливу на чутливість ємнісного сенсора вологості таких факторів як товщина вологочутливого шару, концентрація розчину солі NaCl, як адсорбуючого матеріалу та їх сумісного впливу, застосовано багатofакторний дисперсійний аналіз. Розроблено багатofакторний план у випадку двох якісних факторів. Результати досліджень отримано на основі порівняння факторної дисперсії, яка обумовлена впливом фактора та залишкової дисперсії, що обумовлена впливом випадкових причин. Порівняння факторної та залишкової дисперсії проводилось за величиною критерію Фішера. Використовуючи багатofакторний дисперсійний аналіз встановлено, що на відгук моделі, а саме чутливість ємнісного сенсора вологості вагомий вплив має фактор – концентрація розчину солі NaCl. В цьому випадку значення критерію Фішера, яке спостерігається в експерименті значно перевищує критичне значення критерію Фішера, а саме  $22,77 > 4,75$  ( $F > F_{кр}$ ). Вплив таких факторів як товщина вологочутливого шару та сумісний вплив товщини вологочутливого шару та концентрації розчину солі є несуттєвим, тобто різниця в значеннях відгуку моделі пов'язана з випадковим її характером і не пов'язана зі зміною значення фактора. Використовуючи дисперсійний аналіз впливу фактора доведено, що незалежно від конструктивного виконання ємнісних сенсорів вологості, концентрація розчину солі, яку використано для створення вологочутливого шару суттєво впливає на чутливість ємнісного сенсора вологості.

Ключові слова: багатofакторний дисперсійний аналіз, фактор, відгук моделі, критерій Фішера, чутливість, ємнісний сенсор вологості.

KRYLIK Lyudmila

Vinnytsia National Technical University

## APPLICATION OF MULTIFACTOR DISPERSION ANALYSIS WITH THE PURPOSE OF QUALITATIVE ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF FACTORS ON THE SENSITIVITY OF THE CAPACITIVE HUMIDITY SENSOR

In order to qualitatively assess the influence of such factors as the thickness of the moisture-sensitive layer, the concentration of the NaCl salt solution as an adsorbing material and their combined effect on the sensitivity of the capacitive humidity sensor, a multivariate dispersion analysis was used. Capacitive humidity sensors served as experimental samples. Capacitive humidity sensors are made on a  $0.7 \times 0.9$  mm sital substrate. A copper film is applied to the surface of the sital substrate, which forms the covers of the capacitive humidity sensors in the form of a meander with the appropriate geometry of  $7.85 \cdot 10^{-2} \times 150 \cdot 10^{-6} \times 1.2 \cdot 10^{-6}$  m. In such a design, the moisture-sensitive layer is hygroscopic salt, which serves as a dielectric. To create a moisture-sensitive film, solutions of hygroscopic salt NaCl with concentrations of 0.89 mol/l and 5.33 mol/l were used. They were applied to the surface of capacitive humidity sensors with a spray gun at a distance of 40-50 cm with thicknesses of 5.0  $\mu$ m and 10.0  $\mu$ m. A multifactor plan was developed in the case of two qualitative factors. The research results were obtained on the basis of the comparison of the factor variance, which is due to the influence of the factor, and the residual variance, which is due to the influence of random causes. Factorial and residual variance were compared using the value of Fisher's test. Using multivariate dispersion analysis, it was found that the concentration of the NaCl salt solution has a significant influence on the response of the model, namely the sensitivity of the capacitive humidity sensor. In this case, the value of Fisher's criterion observed in the experiment significantly exceeds the critical value of Fisher's criterion, namely  $22.77 > 4.75$  ( $F > F_{ck}$ ). The influence of such factors as the thickness of the moisture-sensitive layer and the combined effect of the thickness of the moisture-sensitive layer and the concentration of the salt solution is insignificant, i.e. the difference in the response values of the model is related to its random nature rather than to the change in the value of the factor. Using the dispersion analysis of the influence of the factor, it was proved that regardless of the design of the capacitive humidity sensors, the concentration of the salt solution used to create the moisture-sensitive layer significantly affects the sensitivity of the capacitive humidity sensor.

Keywords: multivariate variance analysis, factor, model response, Fisher criterion, sensitivity, capacitive humidity sensor.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

Як відомо, сучасне виробництво потребує точного та якісного виконання технології виробництва та широкого застосування автоматизації виробничих процесів. Ефективність засобів технічної діагностики, приладів контролю, систем перевірки якості продукції, контролю параметрів докілья тощо, передусім, залежить від якості первинних перетворювачів, які є основними чутливими органами вимірювальної апаратури. Важливою різновидністю яких є сенсори вологості [1–6]. Крім того, якість управління такою складною системою, значно зростає при застосуванні математичної статистики як інструменту дослідницької роботи.

Застосування методів математичної статистики сприяє систематизації, обробці та аналізу результатів явищ, які спостерігаються. Статистичні моделі широко використовують для діагностики стану об'єктів дослідження, при вивченні причинно-наслідкового механізму та динаміки досліджуваних явищ і

процесів, моніторингу кон'юнктури ринку, при прогнозуванні та прийнятті різного кола рішень. До найважливіших розділів математичної статистики відносять: статистичні ряди розподілу, оцінення параметрів розподілу, закони розподілу вибірових характеристик, дисперсійний, регресійний, кореляційно-регресійний аналіз тощо [7–14].

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

В теорії планування експерименту виділяють тактичне та стратегічне планування. Тактичне планування допомагає визначити умови проведення одного експерименту, а стратегічне планування – серії експериментів. Стратегічне планування факторних експериментів передбачає застосування як регресійного аналізу, так і дисперсійного аналізу. Регресійний аналіз та дисперсійний аналіз є сукупністю статистичних методів. Однак, регресійний аналіз забезпечує кількісне оцінювання впливу фактора. Такий тип аналізу допомагає визначити, який з факторів спричиняє найбільший вплив, а який найменший вплив. І взагалі як потрібно змінювати значення факторів, щоб досягти збільшення або зменшення значення відгуку моделі на задану величину. Тобто, застосовуючи регресійний аналіз можна оптимізувати параметри виготовлення як пристроїв, так і технологічних процесів в різних сферах промислової індустрії [7–10, 14].

Дисперсійний аналіз спочатку був розроблений для статистичної обробки агрономічних дослідів [11]. Нині він широко застосовується в різних сферах діяльності людини [12–14]. У спеціальній літературі дисперсійний аналіз часто називають ANOVA (від англійської назви *analysis of variance*). Вперше цей метод було розроблено Р. Фішером в 1925 р. Дисперсійний аналіз застосовується для якісного оцінювання впливу факторів.

Метою дисперсійного аналізу є визначення впливу фактора на рівні «впливає» або «не впливає». Основне запитання, на яке дає відповідь дисперсійний аналіз впливу фактора, формулюється так: різниця у значеннях відгуку моделі, отриманих при різних значеннях фактора обумовлена випадковістю чи пояснюється виключно дією фактора? Розрізняють однофакторний та багатофакторний дисперсійний аналіз. Однофакторний дисперсійний аналіз виконується для з'ясування впливу одного фактора на відгук моделі (результат) у випадках, коли неможливо провести порівняльні спостереження вихідної величини при наявності фактора і без нього (контрольна група) та набрати відповідні статистичні дані.

Крім того, на практиці виникає потреба дослідити вплив декількох факторів. Результат можна отримати, дослідивши вплив кожного фактора окремо. Але кількість експериментів при такому підході швидко зростає зі збільшенням кількості факторів, щоб уникнути цього проводять експерименти за багатофакторними планами з урахуванням сумісного впливу факторів [12, 14].

Отже, розробка багатофакторного плану експерименту у випадку якісних факторів є актуальною задачею.

### Постановка завдання

Метою роботи є застосування дисперсійного аналізу для оцінювання якісного впливу на чутливість ємнісного сенсора вологості таких факторів:

- товщини вологочутливого шару;
- концентрації розчину солі, як адсорбуючого матеріалу;
- сумісного впливу товщини вологочутливого шару та концентрації розчину солі.

Для досягнення поставленої мети у роботі потрібно вирішити такі задачі:

- 1) провести аналіз наукових джерел та обґрунтувати доцільність застосування багатофакторного експерименту у випадку якісних факторів;
- 2) розробити багатофакторний план експерименту у випадку якісних факторів;
- 3) використовуючи дисперсійний аналіз впливу фактора провести оцінювання впливу таких факторів: товщини вологочутливого шару; концентрації розчину солі, як адсорбуючого матеріалу; сумісного впливу товщини вологочутливого шару та концентрації розчину солі на чутливість ємнісного сенсора вологості;
- 4) зробити висновки з проведених досліджень.

### Виклад основного матеріалу

Експериментальними зразками слугували ємнісні сенсори вологості (м. Вінниця, Україна, ВНТУ). Досліджувалась залежність чутливості ємнісних сенсорів вологості від впливу таких факторів: товщини вологочутливого шару, концентрації розчину солі (гігроскопічна сіль NaCl) та сумісного впливу товщини вологочутливого шару та концентрації розчину солі.

Ємнісні сенсори вологості виготовлені на ситаловій підкладці розміром 0,7×0,9 мм. На поверхні ситалової підкладки нанесена плівка міді, яка утворює обкладки ємнісних сенсорів вологості у вигляді меандру з відповідною геометрією  $7,85 \cdot 10^{-2} \times 150 \cdot 10^{-6} \times 1,2 \cdot 10^{-6}$  м [4]. В такій конструкції вологочутливим шаром є гігроскопічна сіль, яка слугує діелектриком. Для створення вологочутливої плівки використовувались розчини гігроскопічної солі NaCl з концентраціями 0,89 моль/л та 5,33 моль/л, які наносились на поверхню ємнісних сенсорів вологості пульверизатором на відстані 40 – 50 см товщинами 5,0 мкм та 10,0 мкм.

Для розрахунків використаємо такі позначення: фактор  $A$  – товщина вологочутливого шару  $d$ , мкм;  $A_1$  – нижній рівень фактора  $A$ ;  $A_2$  – верхній рівень фактора  $A$ ; фактор  $B$  – концентрація розчину солі NaCl, яка виконує функцію адсорбуючого матеріалу  $C$ , моль/л;  $B_1$  – нижній рівень фактора  $B$ ;  $B_2$  – верхній рівень фактора  $B$ ;  $AB$  – сумісний вплив фактора  $A$  та фактора  $B$ ; відгук моделі  $y$  – чутливість ємнісного сенсора вологості  $S_C$ , пФ/%.

Для двох факторів кількість експериментів буде  $2^2$ , тобто  $N = 4$ .

Потрібно провести оцінювання впливу факторів  $A$ ,  $B$  та  $AB$  на чутливість ємнісного сенсора вологості за такими даними факторного експерименту (табл. 1):

Таблиця 1

Результати факторного експерименту

	$d = 5,0$ мкм	$d = 10,0$ мкм
$C = 0,89$ моль/л	5,2; 4,8; 6,7; 7,8	6,1; 5,0; 7,5; 8,4
$C = 5,33$ моль/л	10,1; 16,2; 25,3; 30,7	32,5; 28,1; 38,5; 49,0

Для кожного фактора маємо два рівня, отже  $q = 2$  та вісім прогонів, тобто  $p = 8$ . Результати експериментів, які подано в таблиці, відповідають багатофакторному плану у випадку двох якісних факторів (табл. 2).

Таблиця 2

Результати багатофакторного плану у випадку двох якісних факторів

$2^2$	$A_1$	$A_2$	Дисперсійний аналіз	
			дисперсія	кількість ступенів вільності
$B_1$	5,2; 4,8; 6,7; 7,8	6,1; 5,0; 7,5; 8,4	фактор $A$ фактор $B$ фактор $AB$	1 1 1
$B_2$	10,1; 16,2; 25,3; 30,7	32,5; 28,1; 38,5; 49,0	залишкова	15-3=12
	$p = 8$	$N_{np} = 16$	загальна	16-1=15

Для оцінювання впливу факторів проведемо багатофакторний дисперсійний аналіз. Основна ідея дисперсійного аналізу полягає в порівнянні факторної дисперсії, яка обумовлена впливом фактора та залишкової дисперсії, що обумовлена впливом випадкових причин. Якщо різниця між цими дисперсіями значна, то фактор здійснює вплив на відгук моделі  $y$ .

Для цього розраховують значення факторної дисперсії  $S_{\text{факт}}$ , залишкової дисперсії  $S_{\text{залиш}}$  за такими формулами [14]:

$$S_{\text{факт}} = p \cdot \sum_{j=1}^2 (\bar{y}_j - \bar{y})^2, \quad (1)$$

$$S_{\text{залиш}} = \sum_{i=1}^p (y_{i1} - \bar{y}_1)^2 + \sum_{i=1}^p (y_{i2} - \bar{y}_2)^2, \quad (2)$$

де  $y_j$  – спостереження відгуку моделі в  $j$ -ому експерименті;

$y_{i1}$ ,  $y_{i2}$  –  $i$ -е спостереження відгуку моделі нижнього та верхнього рівня факторів.

Середні значення спостережень обчислюються за такими формулами [14]:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p y_{ij}, \quad \bar{y} = \sum_{j=1}^2 \bar{y}_j. \quad (3)$$

Факторна  $d_{\text{факт}}$  та залишкова дисперсії  $d_{\text{залиш}}$  з врахуванням кількості ступенів вільності обчислюються за формулами [14]:

$$d_{\text{факт}} = S_{\text{факт}}, \quad d_{\text{залиш}} = \frac{S_{\text{залиш}}}{2 \cdot (p-1)}. \quad (4)$$

У формулах (4) в знаменнику виразу стоїть кількість ступенів вільності. Порівняння факторної та залишкової дисперсії, які спостерігаються в експерименті проводять за величиною критерію Фішера [14]:

$$F = \frac{d_{\text{факт}}}{d_{\text{залиш}}}. \quad (5)$$

Оцінювання впливу факторів  $A$ ,  $B$  та  $AB$  за дисперсійним аналізом будемо проводити за виразами



(1) – (5).

Для фактора  $A$  маємо такі розрахунки:

$$\overline{y_{A_1}} = 13,35; \quad \overline{y_{A_2}} = 21,888; \quad \overline{y_A} = 17,619;$$

$$S_{\text{факт}} = 291,58978; \quad S_{\text{залиш}} = 2762,68875;$$

$$d_{\text{факт}} = S_{\text{факт}} = 291,58978; \quad d_{\text{залиш}} = \frac{S_{\text{залиш}}}{12} = 230,22406.$$

Потрібно зауважити, що в знаменнику залишкової дисперсії стоїть кількість ступенів вільності 12, а не 14, як в однофакторному дисперсійному аналізі.

Значення критерію Фішера, яке спостерігається в експерименті:

$$F = 1,27.$$

Критичне значення критерію Фішера (при кількості ступенів вільності знаменника 12):

$$F_{\text{кр}} = 4,75.$$

Оскільки  $F < F_{\text{кр}}$  ( $1,27 < 4,75$ ), то вплив фактора  $A$  є незначущим, тобто різниця в значеннях відгуку моделі пов'язана з випадковим її характером і не пов'язана зі зміною значення фактора.

Для фактора  $B$  маємо такі результати:

$$\overline{y_{B_1}} = 6,438; \quad \overline{y_{B_2}} = 28,8; \quad \overline{y_B} = 17,619;$$

$$S_{\text{факт}} = 2000,23618; \quad S_{\text{залиш}} = 1053,91875;$$

$$d_{\text{факт}} = S_{\text{факт}} = 2000,23618; \quad d_{\text{залиш}} = 87,82656.$$

Для багатофакторного плану у випадку двох якісних факторів кількість ступенів вільності 12.

Значення критерію Фішера, яке спостерігається в експерименті:

$$F = 22,77.$$

Критичне значення критерію Фішера (при кількості ступенів вільності знаменника 12):

$$F_{\text{кр}} = 4,75.$$

Оскільки  $F > F_{\text{кр}}$  ( $22,77 > 4,75$ ), то вплив фактора  $B$  є значущим. Різниця в значеннях відгуку моделі пов'язана зі зміною значення фактора і не може бути спричинена тільки її випадковим характером.

Для фактора  $AB$  отримано такі значення:

$$\overline{y_{AB_1}} = 21,575; \quad \overline{y_{AB_2}} = 13,663; \quad \overline{y_{AB}} = 17,619;$$

$$S_{\text{факт}} = 250,39898; \quad S_{\text{залиш}} = 2803,81375;$$

$$d_{\text{факт}} = S_{\text{факт}} = 250,39898; \quad d_{\text{залиш}} = 233,65115.$$

Для багатофакторного плану у випадку двох якісних факторів кількість ступенів вільності 12.

Значення критерію Фішера, яке спостерігається в експерименті:

$$F = 1,07.$$

Критичне значення критерію Фішера (при кількості ступенів вільності знаменника 12):

$$F_{\text{кр}} = 4,75.$$

Оскільки  $F < F_{\text{кр}}$  ( $1,07 < 4,75$ ), то вплив фактора  $AB$  є незначущим.

Результати досліджень отримано на основі порівняння факторної дисперсії, яка обумовлена впливом фактора та залишкової дисперсії, що обумовлена впливом випадкових причин. Порівняння факторної та залишкової дисперсії проводилось за величиною критерію Фішера. Використовуючи багатофакторний дисперсійний аналіз встановлено, що на відгук моделі, а саме чутливість ємнісного сенсора вологості вагомий вплив має фактор  $B$  – концентрація розчину солі  $\text{NaCl}$ . В цьому випадку значення критерію Фішера, яке спостерігається в експерименті значно перевищує критичне значення критерію Фішера, а саме  $22,77 > 4,75$  ( $F > F_{\text{кр}}$ ). Вплив факторів  $A$ ,  $AB$ , а саме товщини вологочутливого шару та сумісного впливу товщини вологочутливого шару і концентрації розчину солі є несуттєвим, тобто різниця в значеннях відгуку моделі пов'язана з випадковим її характером і не пов'язана зі зміною значення фактора ( $F < F_{\text{кр}}$ ).

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

1. Встановлено, що методи математичної статистики сприяють систематизації, обробці та аналізу результатів досліджуваних явищ. До найважливіших розділів математичної статистики відносять:

статистичні ряди розподілу, оцінка параметрів розподілу, закони розподілу вибірових характеристик, дисперсійний, регресійний, кореляційно-регресійний аналіз тощо. Дисперсійний аналіз застосовується для якісного оцінювання впливу факторів. Використовуючи його в багатофакторному аналізі явищ, які виникають при проведенні різного роду технологічних процесів, а також у дослідницькій роботі можна отримати реальну картину, що демонструє вплив кожного фактора в різних умовах, які створюються змінами різних за своєю природою факторів. Крім того, дисперсійний аналіз дає змогу об'єктивно пояснити складну взаємодію таких факторів.

2. Використовуючи дисперсійний аналіз впливу фактора доведено, що незалежно від конструктивного виконання ємнісних сенсорів вологості, концентрація розчину солі, яку використано для створення вологочутливого шару суттєво впливає на чутливість ємнісного сенсора вологості. Результати досліджень отримано на основі порівняння факторної дисперсії, яка обумовлена впливом фактора та залишкової дисперсії, що обумовлена впливом випадкових причин. Порівняння факторної та залишкової дисперсії проводилось за величиною критерію Фішера. Використовуючи багатофакторний дисперсійний аналіз встановлено, що на відгук моделі, а саме чутливість ємнісного сенсора вологості вагомий вплив має фактор  $B$  – концентрація розчину солі  $\text{NaCl}$ . В цьому випадку значення критерію Фішера, яке спостерігається в експерименті значно перевищує критичне значення критерію Фішера, а саме  $22,77 > 4,75$  ( $F > F_{кр}$ ). Вплив факторів  $A$ ,  $AB$ , а саме товщини вологочутливого шару та сумісного впливу товщини вологочутливого шару і концентрації розчину солі є несуттєвим, тобто різниця в значеннях відгуку моделі пов'язана з випадковим її характером і не пов'язана зі зміною значення фактора ( $F < F_{кр}$ ).

3. В подальших дослідженнях планується застосувати багатофакторний експеримент у випадку трьох якісних факторів. Експериментальним зразком слугуватиме ємнісний сенсор вологості з двошаровою структурою, нижнім шаром є гігроскопічна сіль, а верхнім – полімер.

### Література

1. Готра З. Ю. Мікроелектронні сенсори фізичних величин. Том 2 / З. Ю. Готра. – Львів : Ліга-Прес, 2003. – 595 с.
2. Осадчук В. С. Сенсори вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 208 с.
3. Осадчук В. С. Дослідження резистивних вологочутливих елементів / В. С. Осадчук, Л. В. Крилик // Вісник ВПІ. – 2001. – №6. – С. 148–152.
4. Осадчук В. С. Дослідження ємнісних вологочутливих елементів / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, М. В. Євсєєва // Вісник ВПІ. – 2002. – №5. – С. 65–71.
5. Осадчук В. С. Ємнісний сенсор вологості гребінцевої структури на основі полімерних матеріалів / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, М. В. Євсєєва // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. Міжнародний науково-технічний журнал. – 2006. – № 2(12). – С. 222–227.
6. Осадчук О. В. Ємнісні сенсори вологості на основі стибій або бісмутвмісних діоксидів ніколу (II) / О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, М. В. Євсєєва // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2015. – № 1(221). – С. 131–135.
7. Ляшок А. В. Планування багатофакторного експерименту при дослідженні процесу ультразвукового розпилення в тонкому шарі / А. В. Ляшок // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. – 2013. – № 3. – С. 13–17.
8. Павлюк К. В. Методичні підходи до розроблення нормативів і оцінки науково-дослідної праці на основі багатофакторного кореляційно-регресійного аналізу / К. В. Павлюк // Наукові праці НДФІ. – 2020. – № 3(92). – С. 5–19.
9. Аксьончиков С. О. Регресійний аналіз тенденцій розвитку кібератак / С. О. Аксьончиков, І. В. Ємельянова, К. Д. Маркова, І. І. Сватовський // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія: Мат. моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. – 2017. – Вип. 36. – С. 5–13.
10. Кучернюк П. В. Модель загроз безпеки в інформаційно-комунікаційних системах на основі регресійного аналізу / П. В. Кучернюк, А. О. Довгаль // Інформаційні та телекомунікаційні системи та технології, захист інформації. – 2017. – Вип. 22, №2. – С. 79–84.
11. Самарець Н. М. Використання інформаційних технологій у статистичному аналізі даних для аграрних підприємств / Н. М. Самарець, Є. М. Харченко, Н. О. Чорна // АГРОСВІТ. – 2013. – № 20. – С. 14–20.
12. Шуть О. Теоретико-методологічні аспекти статистичних досліджень / О. Шуть // Збірник наукових праць ДЕТУТ. Серія «Економіка і управління». – 2012. – Вип. 22–21, Ч. 2. – 305–311.
13. Єріна А. М. Поєднання моделей регресійного і дисперсійного аналізу в соціально-економічних дослідженнях / А. М. Єріна // Наукові записки НаУКМА. Серія: Економічні науки. – 2000. – Том 18. – С.12–17.
14. Стеценко І. В. Моделювання систем / І. В. Стеценко. – Черкаси : ЧДТУ, 2010. – 399 с.

## References

1. Hotra Z. Yu. Mikroelektronni sensory fizychnykh velychyn. Tom 2 / Z. Yu. Hotra. – Lviv : Liha-Pres, 2003. – 595 s.
2. Osadchuk V. S. Sensory volohosti / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, L. V. Krylyk. – Vinnytsia : UNIVERSUM – Vinnytsia, 2003. – 208 s.
3. Osadchuk V. S. Doslidzhennia rezystyvnykh volohochutlyvykh elementiv / V. S. Osadchuk, L. V. Krylyk // Visnyk VPI. – 2001. – №6. – S.148–152.
4. Osadchuk V. S. Doslidzhennia yemnisnykh volohochutlyvykh elementiv / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, L. V. Krylyk, M. V. Yevsieieva // Visnyk VPI. – 2002. – №5. – S. 65–71.
5. Osadchuk V. S. Yemnisnyi sensor volohosti hrebintsevoi struktury na osnovi polimernykh materialiv / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, L. V. Krylyk, M. V. Yevsieieva // Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii. Mizhnarodnyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal. – 2006. – № 2(12). – S. 222–227.
6. Osadchuk O. V. Yemnisni sensory volohosti na osnovi stybii abo bismutvmsnykh dioksymativ nikolu (II) / O. V. Osadchuk, L. V. Krylyk, M. V. Yevsieieva // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky. – 2015. – № 1(221). – S. 131 – 135.
7. Liashok A. V. Planuvannia bahatofaktornoho eksperymentu pry doslidzhenni protsesu ultrazvukovoho rozpylennia v tonkomu shari / A. V. Liashok // Visnyk NTUU «KPI». Serii: mashynobuduvannia. – 2013. – №3. – S. 13–17.
8. Pavliuk K. V. Metodychni pidkhody do rozroblennia normatyviv i otsinky naukovo-doslidnoi pratsi na osnovi bahatofaktornoho koreliatsiino-rehresiinoho analizu / K. V. Pavliuk // Naukovi pratsi NDFI. – 2020. – № 3(92). – S. 5–19.
9. Aksonchikov S. O. Rehresiinyi analiz tendentsii rozvytku kiberata / S. O. Aksonchikov, I. V. Yemelianova, K. D. Markova, I. I. Svatovskyi // Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V. N. Karazina. Serii: Mat. modeliuvannia. Informatsiini tekhnolohii. Avtomatyzovani systemy upravlinnia. – 2017. – Vyp. 36. – S. 5–13.
10. Kucherniuk P. V. Model zahroz bezpeky v informatsiino-komunikatsiinykh systemakh na osnovi rehresiinoho analizu / P. V. Kucherniuk, A. O. Dovhal // Informatsiini ta telekomunikatsiini systemy ta tekhnolohii, zakhyst informatsii. – 2017. – Vyp. 22, №2. – S. 79–84.
11. Samarets N. M. Vykorystannia informatsiinykh tekhnolohii u statystychnomu analizi danykh dlia ahrarnykh pidpriemstv / N. M. Samarets, Ye. M. Kharchenko, N. O. Chorna // AHROSVIT. – 2013. – № 20. – S. 14–20.
12. Shut O. Teoretyko-metodolohichni aspekty statystychnykh doslidzhen / O. Shut // Zbirnyk naukovykh prats DETUT. Serii: «Ekonomika i upravlinnia». – 2012. – Vyp. 22–21, Ch. 2. – S. 305–311.
13. Yerina A. M. Poiednannia modelei rehresiinoho i dyspersiinoho analizu v sotsialno-ekonomichnykh doslidzhenniakh / A. M. Yerina // Naukovi zapysky NaUKMA. Serii: Ekonomichni nauky. – 2000. – Tom 18. – S.12–17.
14. Stetsenko I. V. Modeliuvannia system / I. V. Stetsenko. – Cherkasy : ChDTU, 2010. – 399 s.

Надійшла/Paper received : 13.09.2022 р.    Надрукована/Printed : 01.11.2022 р.

ГАЛИШ Віта

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

ORCID ID: [0000-0001-7063-885X](https://orcid.org/0000-0001-7063-885X)e-mail: [v.galysh@gmail.com](mailto:v.galysh@gmail.com)

РАДОВЕНЧИК Ярослав

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

ORCID ID: [0000-0002-0101-0273](https://orcid.org/0000-0002-0101-0273)e-mail: [r.yar@ukr.net](mailto:r.yar@ukr.net)

ГОМЕЛЯ Микола

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

ORCID ID: [0000-0003-1165-7545](https://orcid.org/0000-0003-1165-7545)e-mail: [m.gomelya@kpi.ua](mailto:m.gomelya@kpi.ua)

РАДОВЕНЧИК Вячеслав

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

ORCID ID: [0000-0001-5361-5808](https://orcid.org/0000-0001-5361-5808)e-mail: [dokeco@ukr.net](mailto:dokeco@ukr.net)

## ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ОЧИЩЕННЯ ПІДСІТКОВИХ ВОД ДЛЯ ПОВТОРНОГО ВИКОРИСТАННЯ В ЦЕЛЮЛОЗНО-ПАПЕРОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

В роботі наведено результати досліджень процесів освітлення підсіткових вод технологічного процесу виробництва картону тарного з макулатури. Встановлено закономірності впливу компонентів макулатурної маси на ефективність їх видалення з оборотних вод за використання неорганічних коагулянтів різних типів. Показано, що залишкова каламутність оборотних вод пов'язана з вмістом в них мінеральних наповнювачів.

Ключові слова: первинне волокно, вторинне волокно, картон, показники міцності, підсіткові води, коагулянти.

HALYSH Vita, RADOVENCHYK Iaroslav, GOMELYA Mykola, RADOVENCHYK Vyacheslav  
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

### STUDY OF THE PROCESSES OF WASTEWATER TREATMENT FOR REUSE IN THE PULP AND PAPER INDUSTRY

Nowadays, more than 80% of cardboard and paper products of Ukrainian mills are made from waste paper - secondary fibers that differ in their chemical and physical properties from primary cellulosic fibers. Characteristic feature of secondary fibers is the presence of a large number of small fibers, which negatively affects the quality of finished products, mass retention on the grid during the formation of paper or cardboard, which leads to pollution of wastewaters. Despite its environmental friendliness and economy, waste paper is also characterized by the presence of various pollutants, the formation of which is associated with the process of paper formation, storage of finished products, and their use. As a result of the preparation of the mass from secondary fibers, there is a transition of pollutants from the waste paper to the wastewater in the form of colloiddally dispersed and soluble substances, which lead to the pollution of circulating water. Purification of water and its reuse in technological processes is an important task of paper industry mills. The results show that more than 90% of the secondary fibers have a length that does not exceed 1 mm, while in the primary cellulose fiber from coniferous wood about 53% of the fibers have a length of more than 1 mm. The high content of short fibers in the paper mass affects the processes of paper formation, worsening them, and a decrease in the retention of the fiber on the grid of the paper or cardboard machine is observed, causing the pollution of wastewater. The results of the study of coagulation of industrial wastewater with the content of suspended solids 1520 and 3200 mg/dm<sup>3</sup> from the production of cardboard from recycling paper show that the best coagulants are  $Al(OH)Cl_2$  and  $Al_2(OH)_5Cl$ . The maximum efficiency of water purification of only 92.5% was achieved at the suspended solids content of 1520 mg/dm<sup>3</sup>, while for wastewater with a suspended solids concentration of 3200 mg/dm<sup>3</sup> 98.0% was obtained. To develop a scheme for deep purification of wastewaters, it is important to understand which components are removed from water more easily and which are more difficult during coagulation. For this purpose, studies on coagulation of model suspensions of starches, bentonite and kaolin using inorganic coagulants were conducted. It was established that coagulation of native corn starch suspension with inorganic coagulants is effective. However, in the case of using modified starches, the removal of cationic starches is reduced. The efficiency of water purification in the removal of bentonite by sedimentation-filtration with the use of coagulants is quite high. The degree of purification reaches 80.8-98.1%. The filtering stage allows the degree of purification to be further increased. Research on the processes of purification of model kaolin suspensions shows that mechanical and physico-chemical methods are ineffective in removing this mineral filler.

Keywords: primary fiber, secondary fiber, cardboard, strength indicators, wastewater, coagulants.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

На сьогоднішній день підприємства целюлозно-паперової промисловості використовують різні волокнисті напівфабрикати, такі як хіміко-термомеханічна маса, механічна маса, напівцелюлоза, целюлоза [1]. Ці напівфабрикати представляють собою первинні целюлозні волокна з різним вмістом лігніну [2]. Проте картонно-паперова продукція вітчизняних підприємств більш як на 80% виробляється з макулатури – вторинних волокон, які відрізняються за своїми хімічними та фізичними властивостями від первинних целюлозних волокон [3]. Характерним для вторинних волокон є наявність великої кількості дрібних волокон що негативно впливає на якість готової продукції, значно знижує ефективність утримання маси на сітці при формуванні паперу чи картону, що призводить до забруднення підсіткових вод [4].

Незважаючи на екологічність та економічність використання макулатури як вихідної сировини,

вона характеризується присутністю різних забруднюючих речовин, утворення яких пов'язане з процесом формування паперу, зберіганням готової продукції та її використанням. В результаті підготовки маси з вторинних волокон відбувається перехід забруднюючих речовин з макулатури до підсіткових вод у вигляді колоїдно-дисперсних та розчинних речовин, які призводять до забруднення оборотних вод [5]. Очищення води та її повторне використання в технологічних процесах є важливим завданням підприємств паперової галузі.

#### Аналіз досліджень та публікацій

Важливими факторами, що стимулюють розробку та впровадження водоочисних та водозберігаючих технологій є висока вартість свіжої води, суворі екологічні норми та значні витрати на скид стічних вод. Впровадження ефективних схем водоочистки дозволяє зменшити споживання свіжої води в технологічних процесах шляхом використання очищених оборотних, значно зменшити негативне навантаження на навколишнє середовище, а також повторно використовувати дороговартісну волокнисту сировину у вигляді скопу в композиції паперу та картону. Це значно сприяє екологізації виробництва та реалізації концепцій ресурсозбереження [6-8].

Підсіткові води, що утворюються при зневодненні паперового чи картонного полотна на сітці паперо- або картоноробної машини, використовуються в гідророзбивачах для розпуску сухої волокнистої сировини та сухого браку. Термін «освітлена вода» застосовується до підсіткових вод після локальної очистки. Освітлена вода використовується для розбавлення паперової маси перед очищенням та сортуванням. Для локальної очистки використовують процеси відстоювання, фільтрації, флотації, в результаті чого відбувається видалення целюлозних волокон та наповнювачів з води, що призводить до полегшення її очищення на етапах загальнозаводського очищення [9]. Термін «оборотна вода» застосовується до підсіткових та прояснених вод.

Переваги та недоліки технологій, які на сьогоднішній день використовуються для очищення підсіткових вод, наведено в таблиці 1 [10]. Зазвичай очистку виконують шляхом використання одного з методів або поєднанням кількох для видалення з води розчинених неорганічних та органічних речовин та забруднюючих речовин у колоїдно-дисперсному стані.

Таблиця 1

Переваги та недоліки локальних методів очистки

Технологія	Переваги	Недоліки
Хімічна коагуляція	Ефективна у видаленні з води твердих речовин і деяких барвників/органічних сполук	Використання додаткових хімічних речовин, утворення шламу
Флотація	Ефективна у видаленні гідрофобних речовин (фарб) і колоїдних речовин	Використання додаткових хімічних речовин, утворення шламу
Біологічна обробка	Ефективна у видаленні речовин, що викликають біологічне споживання кисню, деяких органічних сполук	Мало ефективна для видалення мінеральних компонентів
Окислення	Сприяє видаленню органічних речовин і барвників	Утворення побічних продуктів окислення, висока вартість хімічних реагентів
Баромембранні технології	Проста організації та використання, ефективна у видаленні мікроорганізмів і твердих речовин	Необхідна попередня обробка води, низька питома пропускна здатність, висока вартість процесу очищення та обладнання

Коагуляція вважається одним з найбільш оптимальних та ефективних методів очистки стічних вод різних виробництв за умови правильної витрати реагентів, оскільки дозволяє видаляти змулені речовини, зменшувати кольоровість, хімічне та біологічне споживання кисню [11, 12]. Найпоширенішими коагулянтами є солі алюмінію, заліза та поліелектроліти [13]. Коагулянти на основі алюмінію також сприяють видаленню амінокислот, білків та довголанцюгових жирних кислот [14, 15].

#### Формулювання цілей статті

**Метою роботи** є дослідження впливу коагулянтів на вилучення з підсіткових вод компонентів макулатурної маси.

#### Виклад основного матеріалу

За фракційним складом вторинна паперова сировина є досить неоднорідною через високий вміст коротких волокон та різних домішок, наприклад, проклеюючих речовин та наповнювачів. Для вивчення фракційного складу макулатурної маси використовували апарат FS-100 фірми "Каяні". В досліджах використовували волокнисту масу, до складу якої входила макулатура марок МС-3А, МС-4А, МС-6Б, МС-7Б, МС-8Б, МС-9Б (в однаковому співвідношенні) [16]. Результати, наведені в таблиці 2, свідчать про те, що

більше 90% волокон мають довжину, яка не перевищує 1 мм, в той час як близько 53% волокон з первинного целюлозного волокна хвойних порід деревини мають довжину більше 1 мм [17]. Високий вміст коротких волокон в паперовій масі значно погіршує процеси формування полотна, оскільки відбувається зниження ефективності утримання волокна на сітці паперо- чи картоноробної машини, що, в свою чергу, збільшує забруднення стічних вод.

Таблиця 2

Фракційний склад макулатурної маси

Фракція, мм	0,20 – 0,60	0,61 – 1,20	1,20 – 2,00	2,00 – 3,00	3,00 – 7,00
Вміст, %	65,3	25,4	7,7	1,5	0,1

Ефективність використання коагулянтів при очищенні води в значній мірі залежить від типу хімічних допоміжних речовин, їх дози, конкретної партії стічної води [18, 19]. Для досліджень використовували партію оборотних вод ПрАТ “Київський картонно-паперовий комбінат” від виробництва макулатурного картону. Як Вивчення впливу витрат коагулянтів на ефективність освітлення оборотної води з вмістом змулених речовин 1520 та 3200 мг/дм<sup>3</sup> представлено на рисунку 1.

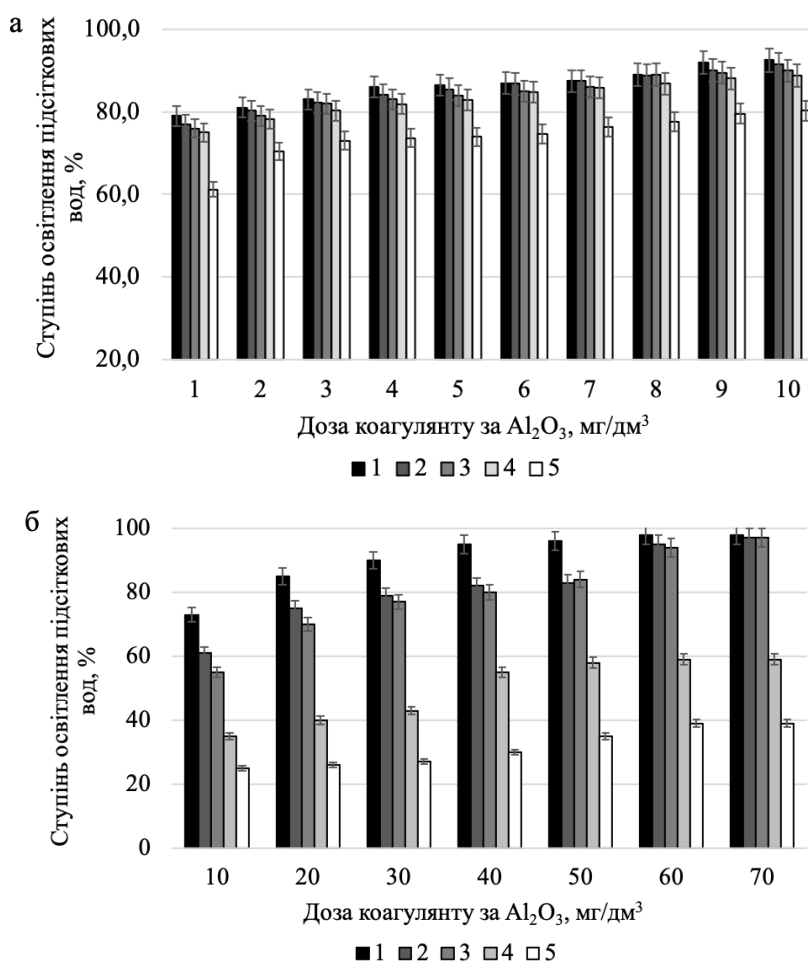


Рис. 1. Вплив дози коагулянта на ступінь освітлення вод з початковим вмістом змулених речовин: а – 1520 мг/дм<sup>3</sup>; б – 3200 мг/дм<sup>3</sup>; 1 – Al(OH)Cl<sub>2</sub>; 2 – Al<sub>2</sub>(OH)<sub>5</sub>Cl; 3 – Al(OH)<sub>2</sub>Cl; 4 – Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>; 5 – NaAl(OH)<sub>4</sub>

Результати дослідження показують, що найкращими коагулянтами в даному випадку є Al(OH)Cl<sub>2</sub> та Al<sub>2</sub>(OH)<sub>5</sub>Cl. Очевидним є те, що чим більше концентрація змулених речовин в оборотній воді, тим більшу ефективність проявляє коагулянт. При освітленні води з вмістом змулених речовин 1520 мг/дм<sup>3</sup> максимальна ефективність очищення води складала лише 92,5%, в той час як для оборотних вод з концентрацією змулених речовин 3200 мг/дм<sup>3</sup> вона складала 98,0%. Однак, навіть при цьому, концентрації змулених речовин в освітлених оборотних водах складають 114 та 64 мг/дм<sup>3</sup>, відповідно, що є досить високим показником. Такий залишковий вміст змулених речовин суттєво обмежує повторне використання освітленої води в технологічних процесах для заміни свіжої.

Для розробки схеми глибокого освітлення підсіткових вод важливо розуміти, які компоненти коагулюванням видаляються з води легше, а які важче. Для цього нами були проведені дослідження процесів коагулювання модельних суспензій крохмалів, бентоніту та каоліну з використанням неорганічних коагулянтів. Вибір модельних компонентів є не випадковим. Вони входять до складу макулатурної маси для надання необхідних показників міцності готовій продукції. Результати вивчення впливу дози неорганічного

коагулянту на ефективність освітлення модельних суспензій крохмалів, а саме нативного кукурудзяного та Церезану (рН=6,7) представлені в таблиці 3. Встановлено, що освітлення суспензії нативного кукурудзяного крохмалю неорганічними коагулянтами відбувається досить ефективно. Проте, у випадку використання модифікованих крохмалів відбувається зниження ефективності видалення катіонних крохмалів.

Таблиця 3

**Вплив витрат неорганічних коагулянтів на ступінь освітлення модельних суспензій крохмалів, %**

Реагент	Доза, мг/дм <sup>3</sup>	Суспензія крохмалю			
		Крохмаль нативний кукурудзяний		Церезан	
		С <sub>зв'яз. поч.</sub> 111 мг/дм <sup>3</sup>	С <sub>зв'яз. поч.</sub> 270 мг/дм <sup>3</sup>	С <sub>зв'яз. поч.</sub> 120 мг/дм <sup>3</sup>	С <sub>зв'яз. поч.</sub> 308 мг/дм <sup>3</sup>
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	2	85,6	90,0	80,0	84,7
	5	92,3	93,9	89,2	91,8
	10	95,8	94,9	95,0	96,5
NaAl(OH) <sub>4</sub>	2	42,8	59,0	40,6	56,6
	5	53,1	66,0	50,0	63,3
	10	57,7	68,5	53,8	68,5
Al(OH)Cl <sub>2</sub>	2	95,1	97,0	80,1	89,3
	5	98,6	98,0	90,8	93,6
	10	99,5	99,0	95,0	97,4
Al(OH) <sub>2</sub> Cl	2	88,8	92,9	78,8	85,5
	5	92,8	96,3	88,3	92,4
	10	98,9	98,4	92,1	96,4
Al <sub>2</sub> (OH) <sub>5</sub> Cl	2	86,0	91,8	79,2	84,4
	5	91,2	94,1	88,7	91,7
	10	95,5	97,0	92,9	96,6

Результати вивчення впливу дози неорганічного коагулянту на ефективність освітлення модельних суспензій мінеральних наповнювачів, а саме бентоніту та каоліну представлені в таблиці 4. Початкові концентрації мінеральних речовин в модельних суспензіях складали 100 мг/дм<sup>3</sup>. Спочатку суспензії обробляли коагулянтами, інтенсивно перемішували, а потім залишали для відстоювання. Освітлену воду додатково фільтрували. Одержані результати показують, що після відстоювання залишкова каламутність складала 39 мг/дм<sup>3</sup>, а після подальшого фільтрування зменшується до 8 мг/дм<sup>3</sup>. За цих умов, ступінь освітлення для кожної зазначеної стадії складає відповідно 61,0% та 79,5%. Загальний ступінь освітлення склав 92,0%.

Ефективність очищення води при видаленні бентоніту шляхом відстоювання-фільтрування з використанням коагулянтів є досить високою. Загальний ступінь освітлення сягає 80,8-98,1%. Стадія фільтрування дозволяє значно підвищити ступінь очищення. Максимальна ефективність очистки води від бентоніту досягнута при застосуванні Al(OH)Cl<sub>2</sub>, в результаті використання якого вміст наповнювача у воді було зменшено з 100 мг/дм<sup>3</sup> до 0,1 мг/дм<sup>3</sup>. Таким чином загальний ступінь освітлення склав 99,3%.

Таблиця 4

**Вплив витрат неорганічних коагулянтів на ступінь освітлення модельних суспензій мінеральних наповнювачів, %**

Реагент	Суспензія бентоніту				Суспензія каоліну			
	Доза, мг/дм <sup>3</sup>	Z <sub>відст.</sub> , %	Z <sub>фільтр.</sub> , %	Z <sub>загал.</sub> , %	Доза, мг/дм <sup>3</sup>	Z <sub>відст.</sub> , %	Z <sub>фільтр.</sub> , %	Z <sub>загал.</sub> , %
-	-	61,0	79,5	92,0	-	36,0	44,5	64,5
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	2	65,0	84,5	94,0	10	32,0	93,0	95,5
	5	55,0	84,6	94,1	30	22,0	84,4	90,0
	10	49,0	88,5	95,5	70	20,0	72,7	82,5
NaAl(OH) <sub>4</sub>	2	70,5	88,5	95,5	10	30,0	75,8	84,5
	5	74,0	89,5	96,0	30	25,2	55,9	71,8
	10	76,7	97,4	99,0	70	22,9	53,1	70,1
Al(OH)Cl <sub>2</sub>	2	74,0	87,7	95,0	10	32,0	95,2	96,9
	5	80,0	87,4	95,1	30	35,6	94,5	96,5
	10	83,0	98,1	99,3	70	37,7	85,6	89,5
Al(OH) <sub>2</sub> Cl	2	69,0	76,9	91,0	10	28,9	90,9	94,2
	5	63,0	83,3	93,5	30	33,8	78,9	86,5
	10	67,7	96,2	98,5	70	36,9	75,8	84,5
Al <sub>2</sub> (OH) <sub>5</sub> Cl	2	66,0	80,8	92,5	10	45,2	95,0	96,8
	5	75,0	94,4	97,8	30	45,7	87,0	91,7
	10	78,0	97,4	99,0	70	43,7	82,7	88,9

При дослідженні процесів освітлення модельних суспензій каоліну показано, що механічні та фізико-хімічні методи є малоефективними у видаленні цього мінерального наповнювача. За початкової концентрації каоліну 100 мг/дм<sup>3</sup> залишкова концентрація змулених речовин після відстоювання змінюється не суттєво і досягає лише 64 мг/дм<sup>3</sup>. Подальшим фільтруванням її вдалося знизити до 39,5 мг/дм<sup>3</sup>, що також не можна вважати задовільним результатом. Ефективність освітлення за стадіями складає 36,0% та 44,5% відповідно. Загальна ефективність видалення каоліну складає лише 64,5%. Невисокою є також ефективність освітлення суспензій каоліну при використанні коагулянтів.



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

Встановлено, що складові компонент макулатурної маси мають різний вплив на ефективність перебігу процесу коагуляції. За використання коагулянтів крохмали досить ефективно видаляються з стічної води навіть при невеликих дозах реагентів ( $2\text{--}10\text{ мг/дм}^3$ ) і не збільшують каламутність освітленої води незважаючи на їх залишкову концентрацію в підсіткових водах. Ефективність коагулянтів зростає при переході від сульфату алюмінію до гідроксохлоридів алюмінію в усіх випадках. Мінеральні наповнювачі, що використовуються у композиції макулатурної маси при виробництві картонно-паперової продукції, утворюють у воді досить стійкі суспензії, які погано видаляються при використанні коагулянтів, незалежно від типу і дози хімічного реагенту. Ефективне зниження їх концентрації в освітленій воді відбувається при обробці реагентами з подальшим фільтруванням.

**Література**

1. Sixta H., Potthast A., Krottschek A.W. Chemical Pulping Processes: Handbook of Pulp / Ed. by Herbert Sixta. – Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2006. – 1291 p.
2. Deykun I. Rapeseed straw as an alternative for pulping and papermaking / I. Deykun, V. Halysh, V. Barbash // Cellulose Chemistry and Technology. – 2018. – Volume 52, No. 9-10. – P. 833–839.
3. Nanofibrillated cellulose as an additive for recycled paper // L.C. Viana, D.C. Potulski, G.I.B.D. Muniz, A.S.D. Andrade, E.L.D Silva // Cerne. – 2018. – No. 24. – P. 140–148.
4. Fatta-Kassinos D. Wastewater reuse and current challenges / D. Fatta-Kassinos, D. Dionysiou // The Handbook of Environmental Chemistry. – 2016. – No. 44. – P. 1–257.
5. Treatment of pulp and paper mill wastewater with various molecular weight of polyDADMAC induced flocculation / M.A.A. Razali, Z. Ahmad, M.S.B. Ahmad, A. Ariffin // Chemical Engineering Journal. – 2011. – Volume 166, No. 2. – P. 529–535.
6. Woods to goods: water consumption analysis for papermaking industry in China / Y. Man, Y. Han, Y. Wang, J. Li, L. Chen, Y. Qian, M. Hong // Journal of Cleaner Production. – 2018. – No. 195. – P. 1377–1388.
7. Žarković D.B. Simple and cost-effective measures for the improvement of paper mill effluent treatment – A case study / D.B. Žarković, Ž.N. Todorović, L.V. Rajaković, // Journal of Cleaner Production. – 2011. – No. 19 (6-7). – P. 764–774.
8. Jung H. Water in the paper industry / H. Jung, J. Kappen // Professional Papermaking. – 2014. – No. 2. – P. 11–13.
9. Olanrewaju S. Pulp and paper mill effluent management / S. Olanrewaju, M. Gustavo // Water Environment Research. – 2014. – No. 86. – P. 1535–1544.
10. Hubbe M. Measures to clean up process water / M. Hubbe // Paper Technology. – 2007. – No. 48. – P. 23–30.
11. Tetteh E.K. Application of organic coagulants in water and wastewater treatment / E.K. Tetteh, S. Rathilal // Organic Polymers. – 2019. – No. 1. – P. 1–18.
12. Косогіна І.В. Коагуляційний реагент з відходів глиноземних виробництв / І.В. Косогіна, І.М. Астрелін, Н.В. Стасюк // Праці Одеського політехнічного університету. – 2013. – No. 3. – С. 281–285.
13. Шаблій Т.О. Розробка коагулянтів для інтенсифікації освітлення стічних вод картонно-паперових виробництв / Т.О. Шаблій // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Volume 1, No. 6. – P. 41–44.
14. Birjandi N. Treatment of wastewater effluents from paper-recycling plants by coagulation process and optimization of treatment conditions with response surface methodology / N. Birjandi, H. Younesi, N. Bahramifar // Applied Water Science. – 2016. – No. 6. – P. 339–348.
15. Razali M.A.A. Treatment of pulp and paper mill wastewater with various molecular weight of polydadmac induced flocculation with polyacrylamide in the hybrid system / M.A.A. Razali, Z.A. Ahmad, A. Ariffin // Chemical Engineering Journal. – 2011. – No. 166. – P. 529–535.
16. Макулатура паперова й картонна. Технічні умови : ДСТУ 3500:2019. – [Чинний від 2020–07–01]. – Київ : Держспоживстандарт України, 2019. – IV, 11 с. – (Національний стандарт України).
17. Галиш В.В. Ресурсозберігаюча технологія одержання картонно-паперової продукції / В.В. Галиш, І.М. Дейкун // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: «Технічні науки». – 2021. – №3. (297). – С.112–115.
18. Techno-economic feasibility for water purification from copper ions / I. Trus, V. Halysh, M. Gomelya, D. et al. // Ecological Engineering & Environmental Technology, – 2021. – Volume 22. No. 3. – P. 27–34.
19. Evaluation of Optimal Conditions for the Application of Capillary Materials for the Purpose of Water Deironing / I. Radovenchyk, I. Trus, V. Halysh et al. // Ecological Engineering & Environmental Technology. – 2021. – Volume 22. No. 2. – P. 1–7.

**References**

1. Sixta H., Potthast A., Krottschek A.W. Chemical Pulping Processes: Handbook of Pulp / Ed. by Herbert Sixta. – Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2006. – 1291 p.
2. Deykun I. Rapeseed straw as an alternative for pulping and papermaking / I. Deykun, V. Halysh, V. Barbash // Cellulose Chemistry and Technology. – 2018. – Volume 52, No. 9-10. – P. 833–839.

3. Nanofibrillated cellulose as an additive for recycled paper // L.C. Viana, D.C. Potulski, G.I.B.D. Muniz, A.S.D. Andrade, E.L.D. Silva // *Cerme*. – 2018. – No. 24. – P. 140–148.
4. Fatta-Kassinos D. Wastewater reuse and current challenges / D. Fatta-Kassinos, D. Dionysiou // *The Handbook of Environmental Chemistry*. – 2016. – No. 44. – P. 1–257.
5. Treatment of pulp and paper mill wastewater with various molecular weight of polyDADMAC induced flocculation / M.A.A. Razali, Z. Ahmad, M.S.B. Ahmad, A. Ariffin // *Chemical Engineering Journal*. – 2011. – Volume 166, No. 2. – P. 529–535.
6. Woods to goods: water consumption analysis for papermaking industry in China / Y. Man, Y. Han, Y. Wang, J. Li, L. Chen, Y. Qian, M. Hong // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – No. 195. – P. 1377–1388.
7. Žarković D.B. Simple and cost-effective measures for the improvement of paper mill effluent treatment—A case study / D.B. Žarković, Ž.N. Todorović, L.V. Rajaković, // *Journal of Cleaner Production*. – 2011. – No. 19(6-7). – P. 764–774.
8. Jung H. Water in the paper industry / H. Jung, J. Kappen // *Professional Papermaking*. – 2014. – No. 2. – P. 11–13.
9. Olanrewaju S., Gustavo M. Pulp and paper mill effluent management / S. Olanrewaju, M. Gustavo // *Water Environment Research*. – 2014. – No. 86. – P. 1535–1544.
10. Hubbe M. Measures to clean up process water / M. Hubbe // *Paper Technology*. – 2007. – No. 48. – P. 23–30.
11. Tetteh E.K., Rathilal S. Application of organic coagulants in water and wastewater treatment / E.K. Tetteh, S. Rathilal // *Organic Polymers*. – 2019. – No. 1. – P. 1–18.
12. Kosohina I.V. Koahuliatsiinyi reagent z vidkhodiv hlynozemykh vyrobnytstv / I.V. Kosohina, I.M. Astrelin, N.V. Stasiuk // *Pratsi Odeskoho politekhnichnoho universytetu*. – 2013. – No. 3. – S. 281–285.
13. Shablilii T.O. Rozrobka koahuliantiv dlia intensyfikatsii osvittleniia stichnykh vod kartonno-paperyvnykh vyrobnytstv / T.O. Shablilii // *Vostochno-Evropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohyi*. – 2013. – Volume 1, No. 6. – R. 41–44.
14. Birjandi N. Treatment of wastewater effluents from paper-recycling plants by coagulation process and optimization of treatment conditions with response surface methodology / N. Birjandi, H. Younesi, N. Bahramifar // *Applied Water Science*. – 2016. – No. 6. – P. 339–348.
15. Razali M.A.A. Treatment of pulp and paper mill wastewater with various molecular weight of polydadmac induced flocculation with polyacrylamide in the hybrid system / M.A.A. Razali, Z.A. Ahmad, A. Ariffin // *Chemical Engineering Journal*. – 2011. – No. 166. – P. 529–535.
16. Makulatura paperova y kartonna. Tekhnichni umovy : DSTU 3500:2019. – [Chynnyi vid 2020–07–01]. – Kyiv : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2019. – 11 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy).
17. Halysh V.V. Resursozberihaiucha tekhnolohiia oderzhannia kartonno-paperyvoi produktsii / V.V. Halysh, I.M. Deikun // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriya: «Tekhnichni nauky»*. – 2021. – №3. (297). – S.112–115.
18. Techno-economic feasibility for water purification from copper ions / I. Trus, V. Halysh, M. Gomelya et al. // *Ecological Engineering & Environmental Technology*. – 2021. – Volume 22, No. 3. – P. 27–34.
19. Evaluation of Optimal Conditions for the Application of Capillary Materials for the Purpose of Water Deironing / I. Radovenchyk, I. Trus, V. Halysh et al. // *Ecological Engineering & Environmental Technology*. – 2021. – Volume 22, No. 2. – P. 1–7.

Надійшла/Paper received : 12.08.2022 р.    Надрукована/Printed : 01.11.2022 р.

**ГОРДІЄНКО Катерина**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID ID: [0000-0002-7722-7567](https://orcid.org/0000-0002-7722-7567)  
e-mail: [dey85@ukr.net](mailto:dey85@ukr.net)

**РАДОВЕНЧИК Ярослав**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID ID: [0000-0002-0101-0273](https://orcid.org/0000-0002-0101-0273)  
e-mail: [r.yar@ukr.net](mailto:r.yar@ukr.net)

**КРИСЕНКО Тамара**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID ID: [0000-0002-9903-6884](https://orcid.org/0000-0002-9903-6884)  
e-mail: [tavok@ukr.net](mailto:tavok@ukr.net)

**РАДОВЕНЧИК Вячеслав**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID ID: [0000-0001-5361-5808](https://orcid.org/0000-0001-5361-5808)  
e-mail: [dokeco@ukr.net](mailto:dokeco@ukr.net)

## **ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИСАДЖЕННЯ ІОНІВ КАЛЬЦІЮ З РОЗВЕДЕНИХ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ У ВИГЛЯДІ ФОСФАТІВ**

*В роботі досліджено особливості формування фосфатів кальцію при обробці розведених водних розчинів фосфатом натрію з метою їх пом'якшення в побутових чи офісних умовах. Досліджено вплив рН, температури, співвідношення реагентів та інших факторів на ефективність пом'якшення води та особливості формування твердої фази.*

*Ключові слова: пом'якшення, кальцій, фосфат-іони, формування фосфату кальцію, освітлення розчинів.*

GORDIENKO Katerina, RADOVENCHYK Yaroslav,  
KRYSENKO Tamara, RADOVENCHYK Vyacheslav  
National Technical University of Ukraine  
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

## **EFFICIENCY OF PLANTING CALCIUM IONS FROM DILUTE AQUEOUS SOLUTIONS IN THE FORM OF PHOSPHATES**

*The specifics of calcium phosphate formation process during diluted aqueous solutions softening for home or office were researched. Studies have shown that, unlike calcium carbonate, effective precipitation of calcium ions with phosphate is possible even at doses less than stoichiometric. The ratio between concentrations of phosphate ions and calcium ions  $K = [PO_4^{3-}, \text{mg-eq}] / [Ca^{2+}, \text{mg-eq}]$  is a determining factor. Already at  $K = 0.5$  there is a decrease in the content of calcium ions by more than half. In stoichiometry ( $K = 1$ ), the residual concentrations of calcium ions in the treated water fall below  $1 \text{ mg-eq/dm}^3$ . At  $K > 1.5$ , the content of calcium ions in the treated water stabilizes at the level of  $0.2 - 0.1 \text{ mg-eq/dm}^3$ . Water temperature does not significantly affect the deposition of calcium ions with phosphates. A noticeable decrease in efficiency is recorded only at a temperature of  $5^\circ \text{C}$ . But even in this case, this decrease is  $0.1 - 1.5 \text{ mg-eq/dm}^3$ , which is quite acceptable for living conditions, since it provides soft and very soft water. The reaction between calcium ions and phosphates is quite complete in the first minutes of contact. The settling of mixed solutions for an hour showed that the reaction of the formation of a solid phase takes place at the time of draining the solutions and over time the residual hardness of the water practically does not change. From the point of view of softening efficiency, phosphate is quite suitable as a reagent for removing calcium ions from hard natural waters. An important aspect of the softening technology is the separation of the precipitate formed from the treated water. To do this, it is necessary to determine the conditions for the formation of a crystalline, most compact and formed precipitate. The clarification of the hard water sample treated with sodium phosphate showed that there was no significant difference in deposition at different initial pH values.*

*Key words: softening, calcium, phosphate ions, generation of calcium phosphate, solutions clarification.*

### **Постановка проблеми у загальному вигляді**

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

Якість води більшості природних водойм не відповідає нормативним вимогам і потребує додаткової обробки. Підвищена мінералізація та значний вміст іонів кальцію та магнію роблять такі води непридатними як для споживання людиною, так і для промислового використання. Особливо така ситуація характерна для східних та південних регіонів України, де в результаті скидів в поверхневі водойми значних об'ємів шахтних вод мінералізація та жорсткість вод за останні кілька десятиліть суттєво зросла. Досить часто на значних територіях України підвищена мінералізація та жорсткість характерна і для підземних вод. Споживання води з підвищеним вмістом іонів кальцію та магнію супроводжується проблемами опорно-рухового апарату, негараздами із серцево-судинною системою, відкладанням каменів в нирках і жовчному міхурі. Оскільки запаси якісних природних вод з кожним роком скорочуються, то проблема пом'якшення води набуває все більшої актуальності та гостроти, а дослідження в цій галузі завжди своєчасні та актуальні.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Важливим показником якості води є її жорсткість, котра визначається вмістом іонів кальцію та магнію. Чинними нормативними документами України жорсткість води для споживання людиною обмежується величиною в 7 мг-екв/дм<sup>3</sup> [1]. Споживання води з більшими значеннями жорсткості негативно впливає на людський організм, тому така вода підлягає пом'якшенню. Ще жорсткіші умови до вод, що застосовуються в промисловості. Жорсткість води в харчовій промисловості регламентується на рівні 0,1 – 0,2 мг-екв/дм<sup>3</sup>, а в енергетиці взагалі на рівні 0,03 – 0,05 мг-екв/дм<sup>3</sup> [2]. Класичною технологією зниження жорсткості води є содово – вапняне пом'якшення. Суть його полягає в обробці жорсткої води спочатку карбонатом натрію для осадження іонів кальцію, а потім вапном для осадження іонів магнію [3]. Після відстоювання та відділення твердої фази оброблена вода потребує коригування рН, оскільки процес проводиться при значенні водневого показника 10,0 – 11,0. Однак, навіть за таких умов залишкова жорсткість води складає 0,5 – 1,0 мг-екв/дм<sup>3</sup>, а найбільш повно реакція проходить при температурі води 35–40 °С. Ця технологія пом'якшення вважається базовою для промислового використання. Незважаючи на величезну кількість публікацій в цій галузі, багато особливостей процесу лишилося поза увагою дослідників.

Останнім часом підвищення жорсткості природних вод змушує впроваджувати системи пом'якшення в офісах та приватних будинках і квартирах. Найбільшого поширення в цій галузі отримали іонообмінні установки пом'якшення [4]. Характерною їх особливістю є періодичне утворення регенераційних розчинів, основним компонентом котрих є хлорид натрію і домішки іонів кальцію та магнію. Крім цього, значна кількість води використовується для спущування та відмивання іонітів. В цілому 20–30 % обробленої води використовується на власні потреби [5]. Регенерація іонітів проводиться, найчастіше, 6–8 % розчином хлориду натрію. Тому після регенерації в гідросферу ми повертаємо не лише вилучені в процесі іонування води іони кальцію та магнію, а й значно більші кількості хлориду натрію [6]. Таким чином формується замкнений круг, результатом котрого в найближчому майбутньому обов'язковим стане не лише пом'якшення природної води, а й зниження її мінералізації. Тому важливим завданням є необхідність розірвати цей круг.

### Формулювання цілей статті

Найбільш простим шляхом вирішення проблеми є застосування в побуті та офісах традиційної содово-вапняної технології. Однак, в промисловості ця технологія реалізується при підвищених температурах води, за умови тривалого відстоювання для формування твердої фази та відрізняється досить низькою ефективністю. В науковій літературі практично відсутні дані щодо ефективності технології в умовах реальних температур в гідросфері та без відстоювання. Проведені нами дослідження [7] показали, що ефективне содово-вапняне пом'якшення при низьких температурах та без відстоювання можливе лише при 5–10-кратному перевищенні дози осаджувача в порівнянні із стехіометричним. При цьому процес освітлення обробленої води проходить нестабільно, інтенсивність осадження твердих часток низька, а залишковий уявний об'єм осаду потребує використання додаткових реагентів у вигляді коагулянтів чи флокулянтів. Регулюючи водневий показник в поєднанні із регулюванням температури можливо знизити залишкову жорсткість води до 0,6 мг-екв/дм<sup>3</sup>. Встановлено, що використання методу має досить низьку ефективність і навряд чи може бути застосовано в побутових умовах та для пом'якшення води в офісах. Тому нами продовжено пошук прийнятних реагентів для пом'якшення води в побутових та офісних системах. Дана робота присвячена вивченню ефективності видалення іонів кальцію шляхом обробки води фосфатом натрію.

### Опис методики досліджень

Суть дослідження полягала в приготуванні модельних розчинів із різним вмістом іонів Ca<sup>2+</sup> та обробці їх різними дозами фосфату натрію (Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) при різних співвідношеннях компонентів та різних значеннях рН і температури. Причому, осадження проводили без відстоювання. Осад відфільтровували відразу після осадження на «синій стрічці» та визначали залишкову жорсткість розчину шляхом титрування з використанням еріхрому чорного Т та трилону Б. Проведені також дослідження по вивченню інтенсивності освітлення оброблених розчинів з метою визначення найбільш оптимальних умов утворення компактного осаду. Для цього оброблену реагентом воду заливали в градуйований циліндр та знімали криві відстоювання суспензії в часі.

### Викладення основного матеріалу

Проведені дослідження показали, що, на відміну від карбонату кальцію [7], ефективне осадження іонів кальцію фосфатом можливе навіть при дозах, менше стехіометричних. Так, при співвідношенні компонентів  $K = [\text{PO}_4^{3-}, \text{мг-екв}] / [\text{Ca}^{2+}, \text{мг-екв}] = 1$  за звичайних температур ефективність методу досить висока (рис. 1).

Вже при  $K = 0,5$  спостерігається зменшення вмісту іонів кальцію більше ніж у два рази. При стехіометрії ( $K = 1$ ) залишкові концентрації іонів кальцію в обробленій воді падають нижче 1 мг-екв/дм<sup>3</sup>. Для вод, що споживаються людиною, такий рівень іонів кальцію є навіть необхідним для забезпечення фізіологічної повноцінності води по мінеральному складу [1]. Перевагою також є те, що висока ефективність методу

забезпечується в широкому діапазоні рН - 5÷11. При  $K > 1.5$  вміст іонів кальцію в обробленій воді стабілізується на рівні 0,2 – 0,1 мг-екв/дм<sup>3</sup>. Таким чином, на відміну від содово-вапняного методу, котрий вимагає значної перевитрати реагентів, використання фосфатів в процесі пом'якшення дозволяє цілком обходитись стехіометричними співвідношеннями реагентів. Найважливішою перевагою осадження іонів кальцію фосфатами є, виходячи з мети даної роботи, моментальне утворення твердої фази після змішування компонентів. При додаванні реагенту до модельних розчинів спостерігається моментальне помутніння розчину, інтенсивно формуються тверді частки, котрі через 3 – 5 с починають з'єднуватися в агрегати та осідати на дно посудини.

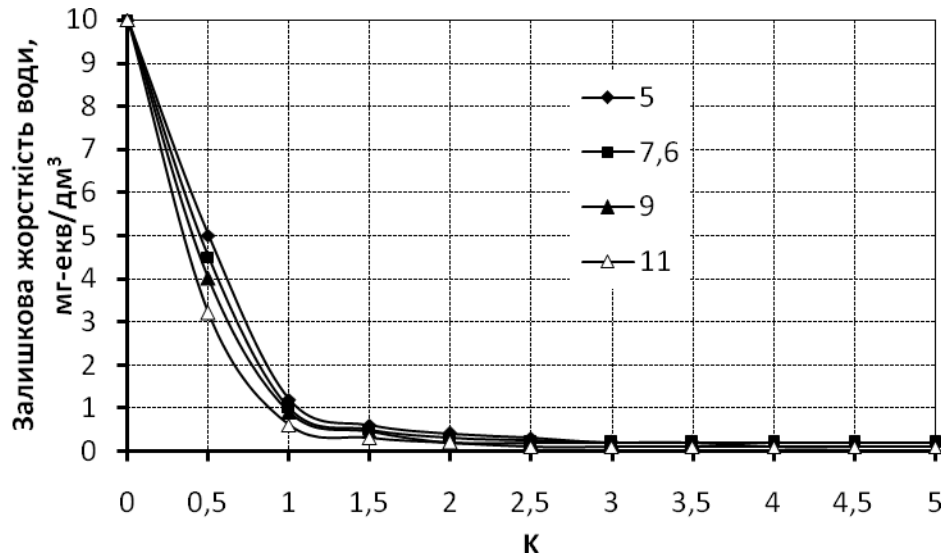


Рис. 1. Залежність залишкової жорсткості води від співвідношення компонентів  $K = [\text{PO}_4^{3-}, \text{мг-екв}] / [\text{Ca}^{2+}, \text{мг-екв}]$  при температурі 20 °С, початковій жорсткості  $J_{\text{поч}} = 10 \text{ мг-екв/дм}^3$  та різних початкових значеннях водневого показника

Ще одним параметром, котрий досить важливий в процесі пом'якшення і може впливати на його ефективність, є початкова жорсткість води, що підлягає обробці. Проведені нами дослідження при температурі 20 °С, нейтральному середовищі та стехіометричному співвідношенні реагентів показали, що залишкова жорсткість обробленої води дуже мало залежить від початкової (рис. 2). Деяке підвищення залишкової жорсткості із збільшенням початкової викликано, на нашу думку, неповною взаємодією реагентів при змішуванні, оскільки проби оброблених модельних розчинів відразу піддавали фільтруванню. В цілому, проведені дослідження показують, що використання фосфатів в процесах пом'якшення води дозволяє в широкому діапазоні вмісту іонів кальцію отримувати дуже м'яку воду (жорсткість менше 1,5 мг-екв/дм<sup>3</sup>).

Надзвичайно важливим параметром процесу пом'якшення є температура води, що обробляється. При використанні в якості осаджувача карбонату натрію ефективність процесу при температурах нижче 35–40 °С надзвичайно низька [7], що вимагає обов'язкового її підігрівання. З іншого боку, вода в централізованих мережах та підземних горизонтах в окремі періоди може мати температуру 10 °С і нижче. Тому питання ефективності процесу пом'якшення за низьких температур є досить важливими, оскільки дозволяє визначити необхідність попереднього підігрівання води. Проведені нами дослідження з фосфатом натрію в якості осаджувача показали, що достатня ефективність забезпечується в широкому діапазоні температур (рис. 3).

Як видно з результатів досліджень (рис. 3), температура води суттєво не впливає на процес осадження іонів кальцію фосфатами. Помітне зниження ефективності фіксується лише при температурі в 5 °С. Але і в цьому випадку це зниження складає 0,1 – 1,5 мг-екв/дм<sup>3</sup>, що для побутових та офісних умов цілком прийнятно, оскільки забезпечує отримання м'якої та дуже м'якої води. Очевидно, що стабільність процесу пом'якшення в такому широкому діапазоні температур свідчить на користь застосування фосфатів в процесах пом'якшення. При цьому важливо знати, наскільки повно за описаних вище умов реагують між собою катіони кальцію та аніони фосфору в процесі зливання розчинів.

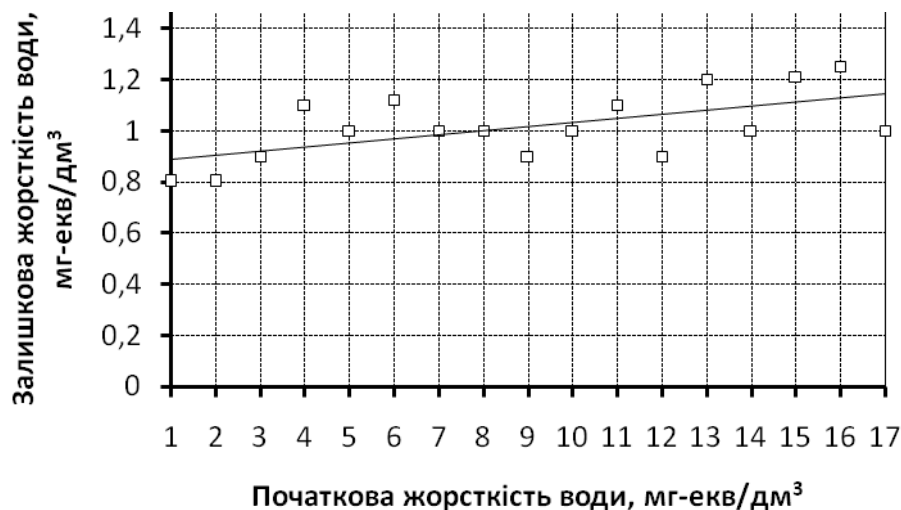


Рис. 2. Залежність залишкової жорсткості води від початкової жорсткості при співвідношенні компонентів  $K = [\text{PO}_4^{3-}, \text{мг-екв}] / [\text{Ca}^{2+}, \text{мг-екв}] = 1$ , температурі  $20^\circ\text{C}$ ,  $\text{pH} = 6,58$

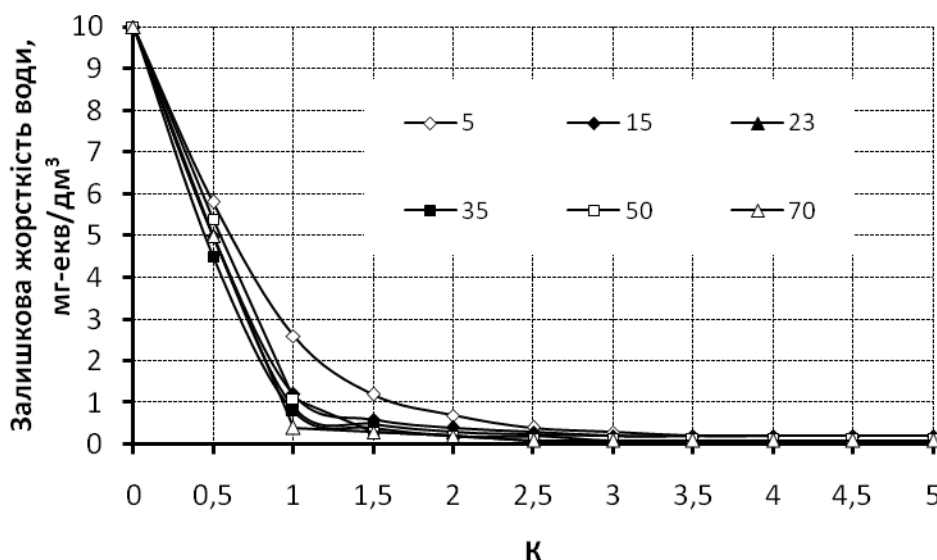


Рис. 3. Залежність залишкової жорсткості води від температури і співвідношення компонентів  $K = [\text{PO}_4^{3-}, \text{мг-екв}] / [\text{Ca}^{2+}, \text{мг-екв}]$  при початковій жорсткості  $10 \text{ мг-екв/дм}^3$  та  $\text{pH} = 7,45$

Як було встановлено в процесі подальших досліджень (рис. 4), реакція між іонами кальцію та фосфатами проходить досить повно вже в перші хвилини контакту. Відстоювання змішаних розчинів протягом години показало, що реакція утворення твердої фази проходить в момент зливання розчинів і з часом залишкова жорсткість води практично не змінюється. Цей факт є надзвичайно важливий для технологій, в яких етап відстоювання не передбачено.

Таким чином, з точки зору ефективності пом'якшення фосфат цілком підходить в якості реагенту для видалення іонів кальцію з жорстких природних вод. В той же час, важливим аспектом технології пом'якшення є можливість ефективного відділення утвореного осаду від обробленої води, оскільки лише в цьому випадку забезпечується загальна висока ефективність технології. Другий етап досліджень було присвячено вивченню умов формування кристалічного, найбільш компактного та сформованого осаду. Освітлення оброблених фосфатом натрію проб жорсткої води показало (рис. 5–7), що суттєвої різниці в осадженні при різних початкових значеннях  $\text{pH}$  не зафіксовано.

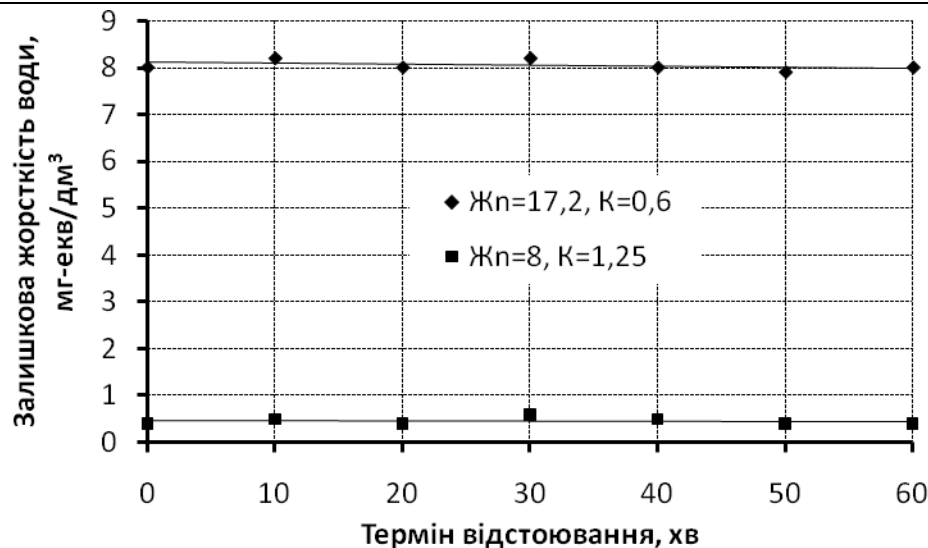


Рис. 4. Залежність залишкової жорсткості води від терміну відстоювання суміші при різних значеннях початкової жорсткості ( $J_n$ ) та коефіцієнті  $K = [PO_4^{3-}, \text{мг-екв}] / [Ca^{2+}, \text{мг-екв}]$

В слабо кислому середовищі (рис. 5) інтенсивне освітлення фіксується лише при  $K = 0,5$ , тобто, при незначній концентрації твердих часток. В цьому випадку осадження відбувається при значному надлишку іонів кальцію, але при дефіциті аніонів фосфору. Через кілька секунд після зливання розчинів спостерігається утворення твердої фази та коагуляція утворених часток. Утворені агрегати починають швидко осідати у водному середовищі. Через годину відстоювання уявний об'єм твердої фази зменшується до  $30 \text{ см}^3$  і подальше освітлення розчину практично не спостерігається.

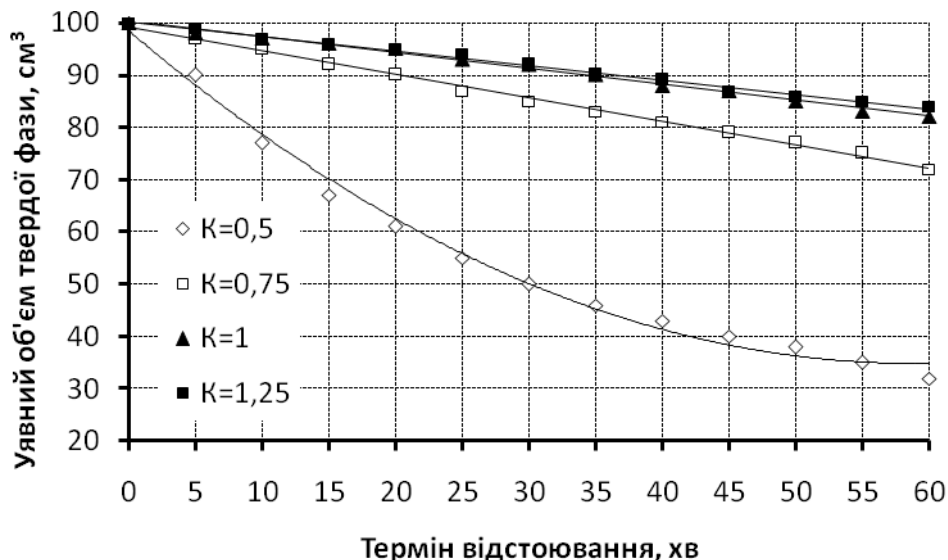


Рис. 5. Залежність уявного об'єму утвореної твердої фази від терміну відстоювання при різних значеннях співвідношення реагентів  $K = [PO_4^{3-}, \text{мг-екв}] / [Ca^{2+}, \text{мг-екв}]$  ( $J_n = 23 \text{ мг-екв/дм}^3$ ,  $pH = 5,2$ ,  $t = 20,7^\circ C$ )

Збільшення дози фосфатів призводить до утворення більшої кількості твердих часток та їх гірше освітлення. Наприклад, при стехіометрії ( $K = 1$ ) після години відстоювання уявний об'єм твердої фази знижується лише на 20 %. Очевидно, що така початкова жорсткість води є досить високою, а тверді частки надзвичайно дисперсні, з відповідним зарядом поверхні, що перешкоджає їх коагуляції.

Варто зауважити, що формування сполук кальцію та фосфору є досить складним процесом. Як зазначено у [8], при зливанні розчинів хлориду кальцію та фосфornoї кислоти в діапазоні  $pH = 3 - 8$  утворюється кристалогідрат гідрофосфату кальцію  $CaHPO_4 \cdot 2H_2O$ . В умовах  $pH > 8$  можливе утворення гідроксиапатиту. Зважаючи на складність реагентів, що використовуються в нашому експерименті, водневий показник також може суттєво впливати на формування осаду, утворюючи однозаміщені, двоаміщені і т.п. структури. Разом з тим, це питання є досить складним та об'ємним для даного дослідження, тому ми не приділяємо йому належної уваги. Тим більше, що на даному етапі досліджень нас більше цікавлять фізико-хімічні властивості осаду з точки зору ефективності відділення твердої фази від розчину.

При осадженні іонів кальцію в нейтральному середовищі ситуація кардинально не змінюється (рис. 6). Об'єми твердої фази після відстоювання протягом години дещо знижуються, особливо при низьких значеннях коефіцієнту  $K$  (біля 30 %). При співвідношенні реагентів, близькому до стехіометричного, різниця в уявному об'ємі твердої фази за тих же умов зменшується на 2 – 4 %.



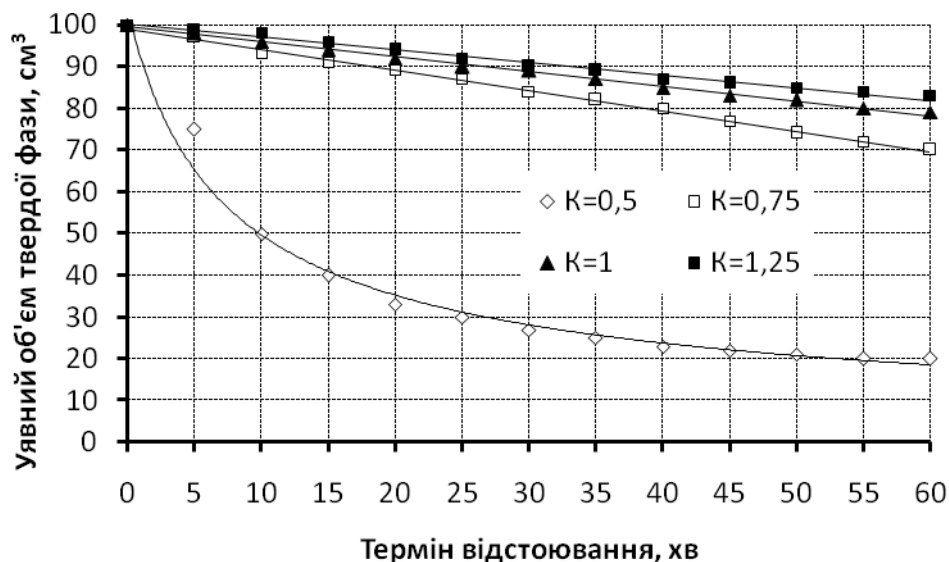


Рис. 6. Залежність уявного об'єму утвореної твердої фази від терміну відстоювання при різних значеннях співвідношення реагентів  $K = [\text{PO}_4^{3-}, \text{мг-екв}]/[\text{Ca}^{2+}, \text{мг-екв}]$  ( $J_n = 23 \text{ мг-екв/дм}^3$ ,  $\text{pH} = 6,78$ ,  $t = 20,7^\circ\text{C}$ )

Цікаво, що навіть осадження в сильнолужному середовищі суттєво в бік покращення на інтенсивність освітлення суспензії не впливає (рис. 7), хоча різниця більш відчутна, ніж при осадженні в кислому середовищі. Навіть при  $K = 0,5$  уявний об'єм осаду після відстоювання протягом години не знижується менше 50 % від початкового об'єму суспензії. Очевидно, що працювати з таким дисперсним та високооб'ємним осадом досить важко, тому в реальних умовах необхідно передбачати додаткові процеси коагулювання чи флокуляції, що потребує комплексу додаткових досліджень.

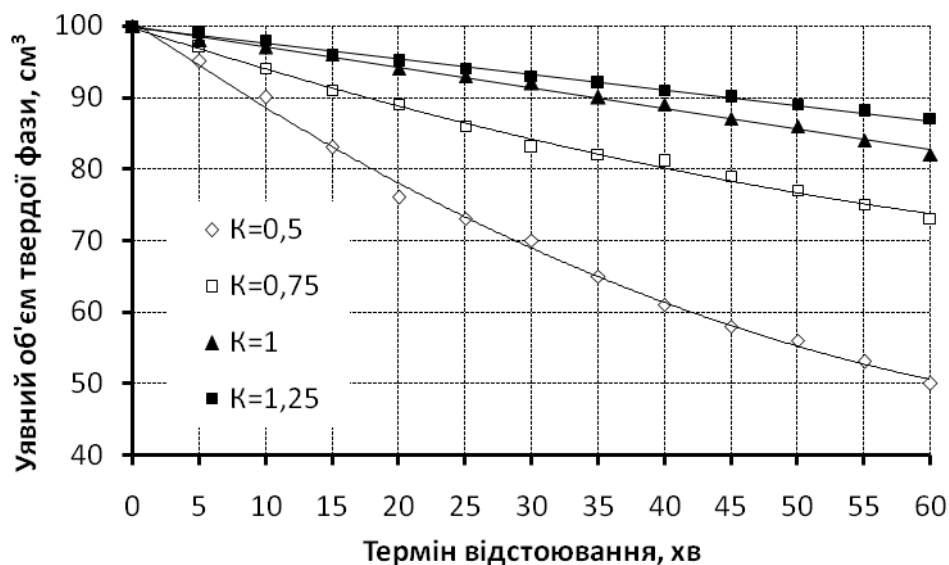


Рис. 7. Залежність уявного об'єму утвореної твердої фази від терміну відстоювання при різних значеннях співвідношення реагентів  $K = [\text{PO}_4^{3-}, \text{мг-екв}]/[\text{Ca}^{2+}, \text{мг-екв}]$  ( $J_n = 23 \text{ мг-екв/дм}^3$ ,  $\text{pH} = 10,5$ ,  $t = 20,7^\circ\text{C}$ )

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

Проведені дослідження показали, що ефективне пом'якшення води шляхом обробки фосфатом натрію можливе навіть при низьких температурах та без відстоювання. При цьому співвідношення між реагентами на рівні стехіометричного забезпечує достатню ефективність для отримання м'якої та дуже м'якої води. В діапазоні температур  $5\text{--}70^\circ\text{C}$  та діапазоні  $\text{pH} = 5\text{--}11$  ефективність фосфату натрію залишається стабільно високою і змінюється на 5–25 %. Залишкова жорсткість води в результаті підбору умов осадження може бути доведена до  $0,1\text{--}0,2 \text{ мг-екв/дм}^3$ . В цілому, з точки зору ефективності пом'якшення, фосфат-іон цілком підходить в якості реагенту для видалення іонів кальцію з жорстких природних вод в побутових та офісних системах. В той же час, можливість ефективного відділення утвореного осаду від обробленої води не забезпечується через високу дисперсність твердих часток. Процес освітлення обробленої води проходить нестабільно, інтенсивність осадження твердих часток низька, а залишковий уявний об'єм осаду потребує використання додаткових реагентів у вигляді коагулянтів чи флокулянтів.

### Література

1. ДСанПіН 2.2.4-171-10. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною : Наказ Міністерства охорони здоров'я України 12.05.2010 р. № 400.
2. Рябчиков Б. Е. Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования / Б. Е. Рябчиков. – М. : ДеЛи принт, 2004. – 301 с.
3. Карелин В.А. Водоподготовка. Физико-химические основы процессов обработки воды : учебное пособие / В. А. Карелин. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 97 с.
4. Лифшиц О. В. Справочник по водоподготовке котельных установок : справочник / О. В. Лифшиц. – Москва : Энергия, 1980. – 288 с.
5. Дикаревский В. С. Обработка воды для теплоэнергетических установок ж/д транспорта / В. С. Дикаревский, И. И. Караваев. – Москва : Транспорт, 1986. – 460 с.
6. Шаблій Т. О. Застосування нових реагентів і технологій в промисловому водоспоживанні / Т. О. Шаблій, В. М. Радовенчик, М. Д. Гомеля. – К. : Інфодрук, 2014. – 302 с.
7. Радовенчик Я. В. Особливості хімічного висадження іонів кальцію з розведених водних розчинів / Я. В. Радовенчик, К. Ю. Гордієнко, Т. В. Крисенко, В. М. Радовенчик // Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2022. – № 2. – С. 72–78. – <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2022.260353>.
8. Василенко К. В. Одержання високочистих орто- і пірофосфатів натрію, калію, амонію та кальцію для використання в якості харчових добавок : дис. на здобуття наук. ступеня доктора філософії : 161 / К. В. Василенко. – Дніпро, 2021. – 199 с.

### References

1. DSanPiN 2.2.4-171-10. Hygienic requirements for drinking water, intended for human consumption : Order of the Ministry of Health of Ukraine 12.05.2010 r. № 400.
2. Ryabchikov B. E. Sovremennyye metody podgotovki vody dlya promyshlennogo i bytovogo ispolzovaniya / B. E. Ryabchikov. – M. : DeLi print, 2004. – 301 s.
3. Karelin V.A. Vodopodgotovka. Fiziko-himicheskie osnovy processov obrabotki vody : uchebnoe posobie / V. A. Karelin. – Tomsk : Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2012. – 97 s.
4. Lifshic O. V. Spravochnik po vodopodgotovke kotelnykh ustanovok : spravochnik / O. V. Lifshic. – Moskva : Energiya, 1980. – 288 s.
5. Dikarevskiy V. S. Obrabotka vody dlya teploenergeticheskikh ustanovok zh/d transporta / V. S. Dikarevskiy, I. I. Karavaev. – Moskva : Transport, 1986. – 460 s.
6. Shablii T. O. Zastosuvannya novykh reagentiv i tekhnolohii v promyslovomu vodospozhyvanni / T. O. Shablii, V. M. Radovenchyk, M. D. Homelia. – K. : Infodruk, 2014. – 302 s.
7. Radovenchyk Ya. V. Osoblyvosti khimichnoho vysadzhennia ioniv kaltsiiu z rozvedenykh vodnykh rozchyniv / Ya. V. Radovenchyk, K. Yu. Hordiienko, T. V. Krysenko, V. M. Radovenchyk // Visnyk NTUU “KPI imeni Ihoria Sikorskoho”. Seriya: Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia. – 2022. – № 2. – S. 72–78. – <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2022.260353>.
8. Vasylenko K. V. Oderzhannia vysokochystykh orto- i pirofosfativ natriiu, kaliuu, amoniiu ta kaltsiiu dlia vykorystannia v yakosti kharchovykh dobavok : dys. na zdobuttia nauk. stupenia doktora filosofii : 161 / K. V. Vasylenko. – Dnipro, 2021. – 199 s.

Надійшла/Paper received : 06.08.2022 р.    Надрукована/Printed : 01.11.2022 р.

ГОРОХОВ Ігор

Херсонський національний технічний університет

ORCID ID: [0000-0002-9483-4123](https://orcid.org/0000-0002-9483-4123)e-mail: [gorohov2410@gmail.com](mailto:gorohov2410@gmail.com)

КУЛИШ Ірина

Херсонський національний технічний університет

ORCID ID: [0000-0002-0961-5904](https://orcid.org/0000-0002-0961-5904)e-mail: [kulish.in.411@gmail.com](mailto:kulish.in.411@gmail.com)

АСАУЛЮК Тетяна

Херсонський національний технічний університет

ORCID ID: [0000-0001-5961-6895](https://orcid.org/0000-0001-5961-6895)e-mail: [tatisevna@gmail.com](mailto:tatisevna@gmail.com)

САРІБСКОВА Юлія

Херсонський національний технічний університет

ORCID ID: [0000-0001-6430-6509](https://orcid.org/0000-0001-6430-6509)e-mail: [ysaribykova@gmail.com](mailto:ysaribykova@gmail.com)

## ДОСЛІДЖЕННЯ АНТИМІКРОБНОЇ ОБРОБКИ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРИГНІЧУВАННЯ БАКТЕРІАЛЬНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ІЗ ДОВКІЛЛЯ

Мета роботи полягає у розробці антимікробного складу та дослідженні якості антимікробної обробки бавовняних текстильних матеріалів.

В якості об'єкту дослідження як ефективний, безпечний антимікробний препарат використано водний розчин полігексаметиленгуанідін хлориду. Для підвищення стійкості обробки до прання досліджено добавки гліцидилових ефірів, здатних до реакції зшивання, різних за функціональністю та масовою часткою епоксидних груп. Обробку бавовняної тканини здійснено методом просочення водним розчином полігексаметиленгуанідін хлориду та гліцидиловими ефірами у опоряджувальній ванні з наступним сушінням і термофіксацією. Перевірку антимікробного ефекту бавовняної тканини проводили за аналізом дифузії диску тканини на засіяному з повітря агарі після обробки антимікробним складом та після прання.

У роботі наведено результати дослідження якості обробки бавовняної тканини від застосування у антимікробному складі полігексаметиленгуанідін хлориду та різноманітних гліцидилових ефірів для підвищення стійкості ефекту до прання. Встановлено ефективність пригнічування бактеріального забруднення із довкілля оброблених антимікробним складом зразків тканин. Результати експерименту показали, що практично всі зразки тканини, модифіковані полігексаметиленгуанідін хлоридом та гліцидиловими ефірами, характеризуються вираженою зоною інгібування мікрофлори, засіяної з повітря, але більшу стійкість до прання має склад зі вмістом моногліцидилового ефіру бутилцелозольву з масовою часткою епоксидних груп 16,0 – 20,0%.

Доведено, що введення моногліцидилового ефіру бутилцелозольву з масовою часткою епоксидних груп 16,0 – 20,0% до опоряджувального складу на основі полігексаметиленгуанідін хлориду дозволяє забезпечити антимікробну дію текстильного матеріалу та підвищити стійкість антимікробного ефекту до прання.

Отримані результати експерименту мають практичне значення для розробки нових опоряджувальних складів для надання текстильним матеріалам антимікробних властивостей.

Ключові слова: антимікробна обробка, полігексаметиленгуанідін хлорид, гліцидилові ефіри, бавовняна тканина, бактеріальне забруднення, метод засівання з повітря.

HOROKHOV Ihor, KULISH Irina, ASAULYUK Tatyana, SARIBYEKOVA Yulia  
Kherson National Technical University

## INVESTIGATION OF ANTIMICROBIAL TREATMENT OF TEXTILE MATERIALS ON THE EFFECTIVENESS OF INHIBITION OF BACTERIAL CONTAMINATION FROM THE ENVIRONMENT

The purpose of the work is to develop an antimicrobial composition and study the quality of antimicrobial treatment of cotton textile materials.

An aqueous solution of polyhexamethylene guanidine chloride was used as an object of study as an effective, safe antimicrobial agent. To increase the stability of the treatment to washing, additives of glycidyl ethers capable of crosslinking reaction, with epoxy groups of different functionality and mass fraction were studied. The treatment of cotton fabric was carried out by impregnation with an aqueous solution of polyhexamethylene guanidine chloride and glycidyl ethers in a finishing bath, followed by drying and curing. Checking the antimicrobial effect of cotton fabric was carried out by the settle plate method by analyzing the diffusion of the fabric disc on agar after treatment with an antimicrobial composition and after washing.

The paper presents the results of a study of the quality of cotton fabric treatment from the use of polyhexamethylene guanidine chloride and various glycidyl ethers in the antimicrobial composition to increase the resistance to washing. The efficiency of inhibition of bacterial contamination from the environment of fabric samples treated with the antimicrobial composition was established. The results of the experiment showed that almost all fabric samples modified with polyhexamethylene guanidine chloride and glycidyl ethers are characterized by a pronounced zone of inhibition of microflora seeded from the air, but a composition containing butyl cellosolve monoglycidyl ether with a mass fraction of epoxy groups of 16.0 – 20.0% has a greater resistance to washing.

It has been proven that the introduction of butyl cellosolve monoglycidyl ether with a mass fraction of epoxy groups of 16.0 – 20.0% into a finishing composition based on polyhexamethylene guanidine chloride makes it possible to provide an antimicrobial effect of a textile material and increase the resistance of the antimicrobial effect to washing.

*The obtained results of the experiment are of practical importance for the development of new finishing compositions in order to impart antimicrobial properties to textile materials.*

*Keywords: antimicrobial treatment, polyhexamethylene guanidine chloride, glycidyl ethers, cotton fabric, bacterial contamination, settle plate method.*

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

Текстиль виконує захисну функцію у житті людини і в той же час може вміщувати різні типи мікробів, спроможних взаємодіяти з мікрофлорою шкіри [1].

В галузях охорони здоров'я, гігієни, упаковки харчових продуктів, автомобільного текстилю, опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, повітряних фільтрів та систем очищення води використовуються антимікробний текстиль. Він також використовуються для захисту медичного персоналу як функціональний одяг, для побутових тканин, наразі – масок для обличчя. Антимікробний текстиль також популярний серед сучасного спортивного одягу та одягу для активного способу життя [2].

Більшість протимікробних агентів, що використовуються в текстильній промисловості, характеризуються механізмом контрольованого вивільнення або вилучення у присутності вологи. Вилужувальна дія призводить до поступового зниження активної речовини. Додатки можуть бути введені всередину волокнистої матриці під час формування та екструзії, або вони можуть бути нанесені на текстильні поверхні за допомогою звичайного процесу покриття або просочення, такого як набивання або витяжка [3].

### Аналіз останніх джерел

Ефективною антимікробною обробкою бавовняних тканин, що призначені для використання у побуті та громадських приміщеннях з покриттями на основі різних типів полімерів, є обробка гуанідинами або полімерними нанокомпозитними матеріалами з постійними антимікробними властивостями без погіршення їх фізико-хімічних та механічних характеристик [4]. Крім того, відоме використання [5] біорозкладних полікарбонатів, функціоналізованих гуанідіном, для забезпечення антимікробної активності *in vivo* проти *A. baumannii*, *E. coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *S. aureus* і *P. Aeruginosa*.

В іншому дослідженні [6] повідомлено про полімерні плівкові покриття на основі ПВС/хітозан з додаванням полігексаметиленгуанідину, які характеризуються антибактеріальними властивостями.

Полігуанідини широко застосовуються як універсальний дезінфікуючий засіб у багатьох галузях промисловості, відносяться до мало небезпечних речовин (3 клас безпеки по токсикологічній класифікації), характеризуються низькою токсичністю для людини, практично відсутністю корозійної активності до більшості матеріалів. Полігуанідини спроможні до плівкоутворення на оброблених поверхнях, що вказує на пролонговану активність препаратів. Відносяться до полікатионних амінів, спроможні до руйнування бактеріальної клітини за рахунок електростатичного притягування [7, 8].

Полібігуаніди, як полімерні полікатионні аміни, в основному складаються з ланок катіонного бігуаніду, що повторюються, з вуглеводневими лінкерами однакової або різної довжини. Цей клас біоцидних полімерів добре відомий як життєво важливий, завдяки їх високій гідрофільності, чудовій біоцидній ефективності проти широкого спектру мікробів та нетоксичності. Катіонні групи, що взаємодіють із бігуанідом, можуть зв'язуватися з негативно зарядженими групами (COOH) целюлози. Одним з найбільш застосованих полімерів на основі бігуаніду є полігексаметиленгуанідин хлорид через його низьку токсичність та розчинність у воді.

Бактерицидні властивості гуанідинових речовин обумовлені руйнівним електрохімічним впливом на оболонку клітини (клітинну мембрану), яка відіграє роль молекулярного фільтра, що захищає цитоплазматичну мембрану від руйнівних токсинів. Внаслідок електрохімічних властивостей, контактуючи з поверхнею клітинної оболонки, молекули полігексаметиленгуанідину викликають відтік компонентів, що забезпечують цілісність клітинної мембрани. Молекули полігексаметиленгуанідину зв'язуються з молекулами, що знаходяться ззовні клітини, утворюючи в ній проломи, через які залишкові кількості полігексаметиленгуанідину проникають до цитоплазматичної мембрани, порушуючи її цілісність. На першому етапі спостерігається витік молекул із низькою молекулярною масою, насамперед іонів калію. Вже при бактериостатичних кількостях полігексаметиленгуанідину клітина втрачає близько 40% калію, що міститься в ній.

Враховуючи, що текстильні матеріали експлуатуються в побуті, транспорті, суспільних місцях і піддаються дії різноманітної мікрофлори, яка переноситься у повітрі, **метою роботи** є проведення дослідження якості антимікробної обробки текстильних матеріалів на ефективність пригнічування бактеріального забруднення із довкілля. У роботі використовували метод седиментаційного аналізу, який відноситься до найбільш простих, але, в той же час, швидких і показових методів вивчення мікрофлори повітря і використовується для порівняльного аналізу бактеріального забруднення повітря.

### Виклад основного матеріалу

Для визначення антимікробної дії текстильні матеріали різноманітного сировинного складу обробляли водним розчином полігексаметиленгуанідин хлориду (ПГМГ), структурна формула якого наведена на рис. 1, у концентраціях 1–6%.



Враховуючи, що саме натуральні волокна найбільш піддаються мікробній атаці та забрудненню, що викликано спроможністю натуральних волокон до вологоутримання, в подальшому дослідженні для розробки антимікробного складу використовували зразки тканини з бавовняного волокна. В роботі досліджували вплив добавок гліцидилових ефірів як потенційних зшиваючих агентів для підвищення стійкості антимікробної обробки до прання, враховуючи, що полігексаметиленгуанідін хлорид відноситься до плівкоутворюючих речовин, але має високу розчинність у воді. В таблиці 1 наведені характеристики досліджуваних гліцидилових ефірів з різною функціональністю та масовою долею епоксидних груп.

## Характеристики досліджуваних гліцидилових ефірів

Хімічний склад	Функціональність	Масова частка епоксидних груп, %	В'язкість при 25°C, мПа·с
Моногліцидиловий ефір бутилцелозольву	1	16,0 – 20,0	3 – 8
Моногліцидиловий ефір алкілфенолу	1	11,0 – 14,0	100 – 150
Дигліцидиловий ефір поліоксіпропіленгліколю	2	7,5 – 10,5	70 – 120

---

143



В роботі опоряджувальний розчин готували розбавленням водою полігексаметиленгуанідін хлориду до концентрації 6%, далі до складу розчину вводили гліцидилові ефіри у концентрації 1% (таблиця 1). Технологічний процес обробки включав: просочування бавовняної тканини на двовальній плюсовці з подвійним зануренням і віджимом до залишкової вологості 90%; висушування при температурі 80°C та термофіксацію при температурі 120°C протягом 4 хв. В таблиці 2 показані результати обробки тканини до та після прання, в залежності від використовуваних гліцидилових ефірів, які характеризуються різною часткою епоксидних груп та функціональністю.

Таблиця 2

**Вплив гліцидилових ефірів на антимікробний ефект бавовняної тканини**

Епоксидна складова антимікробного складу (концентрація 1%)	Антимікробна дія опоряджувального складу	Стійкість антимікробного ефекту до 1 прання	Стійкість антимікробного ефекту після 5 циклів прання	Масова частка епоксидних груп, %
Моногліцидиловий ефір бутилцелозольву	+++	++	+	16,0 – 20,0
Моногліцидиловий ефір алкілфенолу	+	+	-	11,0 – 14,0
Дигліцидиловий ефір поліоксіпропіленгліколю	+	+ -	-	7,5 – 10,5

+ – вираженість антимікробного ефекту.

Перевірку антимікробного ефекту бавовняної тканини проводили методом засівання мікроорганізмів з повітря. Антимікробні властивості тканини визначали за аналізом дифузії диску тканини на засіяному з повітря агарі. На фото (рис. 3) представлені результати дослідження бавовняної тканини без опорядження та з включенням до складу розчину полігексаметиленгуанідін хлориду гліцидилових ефірів з різною функціональністю та масовою часткою епоксидних груп.

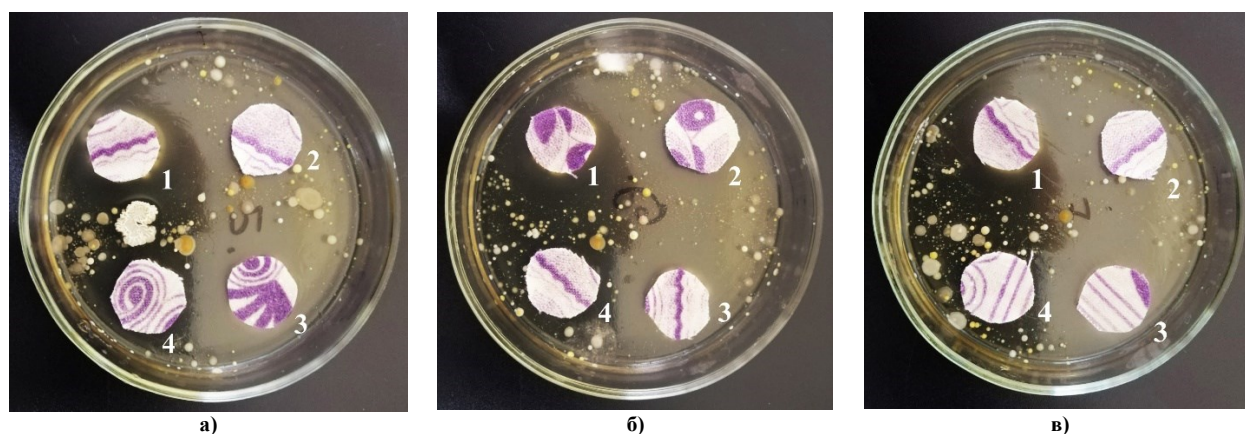


Рис. 3. Аналіз дифузії диску з бавовняної тканини:

а) моногліцидиловий ефір бутилцелозольву; б) моногліцидиловий ефір алкілфенолу;

в) дигліцидиловий ефір поліоксіпропіленгліколю;

1, 3 – зразки бавовняної тканини, обробленої антимікробним складом; 2 – зразок після першого прання;

4 – зразок після п'ятого прання

Як бачимо на фото, представлених на рис. 3, значна кількість різноманітної мікрофлори, що переноситься повітрям, сконцентрована саме у зоні, де немає зразків тканини. Виражена зона інгібування, близько 8–10 мм, наявна навколо дисків тканини під номерами 1 та 3, які модифіковані полігексаметиленгуанідін хлоридом та усіма досліджуваними гліцидиловими ефірами. Найкращий показник проявляє диск тканини, у якого до опоряджувального складу входить моногліцидиловий ефір бутилцелозольву з масовою часткою епоксидних груп 16,0 – 20,0 % (рис.3 а). Стійкість антимікробного ефекту після першого прання при використанні моногліцидилового ефіру бутилцелозольву (зразок 2, рис. 3 а) дещо знижується, зона інгібування складає 2–4 мм, однак, після п'ятого прання (зразок 4, рис. 3 а) тканина все ще проявляє незначні антимікробні властивості (зона інгібування близько 1 мм, але не для всіх патогенів). Зона інгібування навколо оброблених антимікробним складом дисків тканини після інкубації підтверджує їх антимікробні властивості.

Обробка складом з вмістом моногліцидилового ефіру алкілфенолу з масовою часткою епоксидних груп 11,0 – 14,0% (рис. 3 б) та дигліцидилового ефіру поліоксіпропіленгліколю з масовою часткою епоксидних груп 7,5 – 10,0% (рис. 3 в) ефективна лише при використанні тканини, яка не підлягає мокрої обробки. Тканина, оброблена переліченими препаратами, втрачає антимікробну стійкість під час мокрої обробки при першому пранні, а після п'ятого прання антимікробного ефекту не спостерігається.

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

Таким чином, антимікробні властивості бавовняної тканини, визначені за допомогою аналізу дифузії тканинного диску, та зона інгібування, що утворилася навколо тканини після інкубаційного періоду, підтверджують, що модифікований полігексаметилenguанідін хлоридом та моногліцидиловим ефіром бутілцелозольову бавовняний текстиль є ефективним проти значної кількості бактерій, що переносяться у повітрі.

**References**

1. Sanders D. A review of clothing microbiology: the history of clothing and the role of microbes in textiles / D. Sanders, A. Grunden, R.R. Dunn // *Biol Lett.* – 2021. – 17(1). – P. 20200700. – DOI: 10.1098/rsbl.2020.0700.
2. Gulati R. Antimicrobial textile: recent developments and functional perspective / R. Gulati, S. Sharma, R.K. Sharma // *Polymer Bulletin.* – 2022. – 79. – P. 5747–5771. – DOI: 10.1007/s00289-021-03826-3.
3. Abo El-Ola S.M. Recent Developments in Finishing of Synthetic Fibers for Medical Applications / S.M. Abo El-Ola // *Designed Monomers and Polymers.* – 2008. – 11(6). – P. 483–533. – DOI: 10.1163/156855508X363816.
4. Chin W. A macromolecular approach to eradicate multidrug resistant bacterial infections while mitigating drug resistance onset / W. Chin, G. Zhong, Q. Pu, et al. // *Nat. Commun.* – 2018. – 9(1). – P. 917. – DOI: 10.1038/s41467-018-03325-6.
5. Cao Y. Guanidine-functionalized cotton fabrics for achieving permanent antibacterial activity without compromising their physicochemical properties and cytocompatibility / Y. Cao, J. Gu, S. Wang, et al. // *Cellulose.* – 2020. – 27(10). – P. 6027–6036. – DOI: 10.1007/s10570-020-03137-2
6. Olewnik-Kruszkowska E. Antibacterial Films Based on PVA and PVA-Chitosan Modified with Poly-(Hexamethylene Guanidine) / E. Olewnik-Kruszkowska, M. Gierszewska, E. Jakubowska, et al. // *Polymers.* – 2019. – 11 (12). – P. 2093. – DOI: 10.3390/polym11122093.
7. Zhao T. Halogenated phenols and polybiguanides as antimicrobial textile finishes / T. Zhao, Q. Chen // *Antimicrobial Textiles.* 2016. – P. 141–153. – DOI: 10.1016/B978-0-08-100576-7.00009-2.
8. Li Z. Permanent antimicrobial cotton fabrics obtained by surface treatment with modified guanidine / Z. Li, J. Chen, W. Cao, et al. // *Carbohydr Polym.* – 2018. – 180. – P. 192–199. – DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.09.080.

Надійшла/Paper received : 05.08.2022 p.    Надрукована/Printed : 01.11.2022 p.

ГОРОХОВ Ігор

Херсонський національний технічний університет

ORCID ID: [0000-0002-9483-4123](https://orcid.org/0000-0002-9483-4123)e-mail: [gorohov2410@gmail.com](mailto:gorohov2410@gmail.com)

КУЛІШ Ірина

Херсонський національний технічний університет

ORCID ID: [0000-0002-0961-5904](https://orcid.org/0000-0002-0961-5904)e-mail: [kulish.in.411@gmail.com](mailto:kulish.in.411@gmail.com)

АСАУЛЮК Тетяна

Херсонський національний технічний університет

ORCID ID: [0000-0001-5961-6895](https://orcid.org/0000-0001-5961-6895)e-mail: [tatisevna@gmail.com](mailto:tatisevna@gmail.com)

САРІБЕКОВА Юлія

Херсонський національний технічний університет

ORCID ID: [0000-0001-6430-6509](https://orcid.org/0000-0001-6430-6509)e-mail: [ysaribekova@gmail.com](mailto:ysaribekova@gmail.com)

## ЕФЕКТИВНІСТЬ ОБРОБКИ АНТИМІКРОБНИМИ СКЛАДАМИ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ, ПРИЗНАЧЕНИХ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ У ПОБУТІ ТА ГРОМАДСЬКИХ ПРИМІЩЕННЯХ

Мета роботи полягає у розробці антимікробного складу та дослідженні ефективності антимікробної обробки текстильних матеріалів. В якості об'єкту дослідження як ефективні безпечні антимікробні препарати використовували полігексаметиленгуанідін хлорид з антимікробними препаратами на біологічній основі. Обробку бавовняної тканини здійснено методом просочення водним розчином полімеру та полігексаметиленгуанідін хлориду і антимікробними препаратами на біологічній основі у опоряджувальній ванні з наступним сушінням і термофіксацією. Зміну структурних параметрів акрилового полімеру та кількість зшивок в об'ємі полімерного утворення визначали за властивістю зшитих полімерних систем до обмеженого набухання у розчинниках. Перевірку антимікробного ефекту текстильних матеріалів проводили за аналізом дифузії диску тканини на засіяному з повітря агарі після обробки антимікробним складом та після прання. Для визначення ефективності антимікробної дії препаратів на біологічній основі як тест-культуру використовували одного з представників раньової мікрофлори – грампозитивну бактерію *Staphylococcus ruodenes* з Української колекції мікроорганізмів. У роботі наведено результати дослідження текстильних матеріалів після опорядження антимікробними препаратами на біологічній основі та полігексаметиленгуанідін хлориду. Підвищення стійкості антимікробного ефекту до прання досягали введенням до опоряджувального складу акрилового полімеру, структуроутворення якого оцінювалося за кількістю ацетононерозчинної фракції сформованих на скляній підложці полімерних плівок під час екстрагування у розчинниках. Результати дослідження показали, що введення антимікробних препаратів до складу полімеру підвищує ступінь зшивки полімерної плівки за рахунок використання полігексаметиленгуанідін хлориду. Доведена ефективність антимікробної дії препаратів на біологічній основі за результатом проведення дослідження на тест-культурі грам позитивної бактерії *Staphylococcus ruodenes*, що підтверджується появою зони інгібування мікроорганізму навколо досліджуваного зразка тканини. Дослідження за методикою засівання мікрофлори з оточуючого повітря показали, що усі зразки тканини, оброблені антибактеріальним складом, характеризуються вираженою зоною затримки росту мікрофлори.

Наукова новизна. Доведено, що опоряджувальний склад на основі акрилового полімеру, що містить полігексаметиленгуанідінхлорид та препарати на біологічній основі, дозволяє забезпечити антимікробну дію текстильного матеріалу та покращити стійкість антимікробного ефекту до прання за рахунок підвищення ступеня зшивки акрилового полімеру.

Практична значимість. Отримані результати експерименту мають практичне значення для розробки нових опоряджувальних складів для надання текстильним матеріалам антимікробних властивостей.

Ключові слова: антимікробна обробка, полігексаметиленгуанідін хлорид, препарати на біологічній основі, текстильні матеріали, бактеріальне забруднення, метод засівання з повітря, зона затримки росту мікроорганізмів.

HOROKHOV Ihor, KULISH Irina, ASAULYUK Tatyana, SARIBYEKOVA Yulia  
Kherson National Technical University

## EFFECTIVENESS OF THE ANTIMICROBIAL TREATMENT OF TEXTILE MATERIALS FOR USE AT HOME AND IN PUBLIC SPACES

*Purpose.* The purpose of the work is to develop an antimicrobial composition and study the effectiveness of antimicrobial treatment of textile materials.

*Methodology.* Polyhexamethylene guanidine chloride with bio-based antimicrobial preparations were used as the objects of the study as effective safe antimicrobial agents. The treatment of cotton fabric was carried out by impregnation with an aqueous solution of polymer and polyhexamethylene guanidine chloride and bio-based antimicrobial preparations in a finishing bath, followed by drying and thermal fixation. Changes in the structural parameters of the acrylic polymer and the number of crosslinks in the bulk of the polymer formation were determined from the property of crosslinked polymer systems to swell in solvents to a limited extent. Examination of the antimicrobial effect of textile materials was carried out by analyzing the diffusion of the fabric disk on agar after treatment with the



antimicrobial composition and after washing. To determine the effectiveness of the antimicrobial action of bio-based preparations, one of the representatives of the wound microflora, the gram-positive bacterium *Staphylococcus pyogenes* from the Ukrainian collection of microorganisms, was used as a test culture. Findings. The results of the study of textile materials after treatment with bio-based antimicrobial preparations and polyhexamethylene guanidine chloride are presented. An increase in the resistance of the antimicrobial effect to washing was achieved by introducing an acrylic polymer into the finishing composition, the structure formation of which was evaluated by the amount of the acetone-insoluble fraction of polymer films during extraction in solvents. The results of the study showed that the introduction of antimicrobial agents into the polymer composition increases the degree of crosslinking of the polymer film due to the use of polyhexamethylene guanidine chloride. The effectiveness of the antimicrobial action of bio-based preparations has been proven by the results of a study on a test culture of a gram-positive bacterium *Staphylococcus pyogenes*, which is confirmed by the appearance of a zone of inhibition of the microorganism around the studied fabric sample. Studies using the settle plate method showed that all fabric samples treated with the antibacterial composition are characterized by a pronounced zone of microflora growth inhibition.

*Originality.* It has been proven that an acrylic polymer-based finishing composition containing polyhexamethylene guanidine chloride and bio-based preparations provides an antimicrobial effect to a textile material and will improve the wash resistance of the antimicrobial effect by increasing the degree of crosslinking of the acrylic polymer.

*Practical value.* The obtained results of the experiment are of practical importance for the development of new finishing compositions for imparting antimicrobial properties to textile materials.

*Keywords:* antimicrobial treatment, polyhexamethylene guanidine chloride, bio-based preparations, textile materials, bacterial contamination, settle plate method, microbial growth inhibition zone.

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

Застосування текстильних матеріалів із антибактеріальними властивостями направлено, насамперед, на захист людини від дії патогенної мікрофлори, і в той же час, на збереження текстильних виробів від мікробіологічного псування. Крім цього, виробництво текстильних матеріалів, що володіють бар'єрними властивостями до патогенних мікроорганізмів, грибів та вірусів забезпечує виконання вимог, регламентованих Урядом України щодо потреби у захисному одязі від інфекційних хвороб для багаторазового необмеженого використання, визначених переліком товарів, робіт і послуг, необхідних для здійснення заходів, спрямованих на запобігання виникненню та поширенню епідемій та пандемій гострої респіраторної хвороби COVID-19, спричиненої коронавірусом SARS-CoV-2 на території України, затвердженим постановою Кабінету міністрів України від 20.03.20 р. за № 225. Такий текстиль, у першу чергу, використовується для медичного персоналу, у публічних закладах, для військового спорядження, у транспорті, для спортивного одягу, панчішно-шкарпеткових виробів та ін.

Текстильні волокна, особливо природного походження, є легкою здобиччю для різноманітних мікроорганізмів, так як вони легко утримують воду і мікробні ферменти та можуть гідролізувати їх полімерні зв'язки. Натуральні волокна характеризуються також різноманітним періодом зберігання мікрофлори. Тому надання текстильним матеріалам антимікробних властивостей переслідує дві основні цілі: захист від дії мікроорганізмів і захист від дії патогенної мікрофлори об'єктів, що контактують з текстильними матеріалами.

### **Аналіз досліджень та публікацій**

Наразі увагу дослідників привертають антимікробні препарати на біологічній основі, що є результатом прагнення суспільства до використання екологічно чистої продукції та продуктів, що не генерують з нафти. [1-3].

Вченими розробляються та вдосконалюються препарати для антимікробної обробки тканин з урахуванням засад «зелених технологій», а саме дослідження біологічно активних добавок, спроможних впливати на патогенну мікрофлору, яка загрожує здоров'ю людини. Серед натуральних рослинних продуктів антибактеріальні властивості мають екстракти німу, гранату, алое вера, куркуми, гвоздики тощо [4]. Біологічно активні речовини можуть додаватися до синтетичних волокон у процесі формування [5], таким чином, поліакрилонітрильні, ацетатні та поліпропіленові волокна з антимікробною обробкою вже представлені на ринку. Однак, цей спосіб модифікації є принципово неможливим для обробки природних волокон.

Більш універсальним способом модифікації волокон є формування на текстильному матеріалі полімерного покриття, що дає змогу іммобілізувати різноманітні функціональні речовини в залежності від призначення текстилю та вимог споживачів [6]. Наприклад, рекомендується склад із хітозаном – речовиною, що отримується із панцирів ракоподібних, для надання антимікробних властивостей найлону [7], бавовни [8] та вовни [9]. Недоліками хітозану є необхідність його застосування у високих концентраціях, що погіршує гігієнічні властивості текстильних матеріалів і підвищує їх жорсткість, та недостатня стійкість обробки до прання.

В останній час зацікавленість винахідників викликають біоорганічні склади фітинової кислоти, відомої як інозит-гексакисфосфатна кислота або фітат у формі солі, яка розглядається як «зелена» молекула, що в достатній кількості утримується в тканинах рослин, таких як боби, злаки, насіння [10]. Як біосумісна, екологічно чиста, нетоксична і легко одержувана органічна кислота, вона широко застосовується в антиоксидантній, біосенсорній, катіонообмінній, наноматеріальній та інших галузях завдяки своїй особливій структурі гексафосфату інозита [11].

Використання фітинової кислоти дозволяє отримувати комплексне опорядження текстильного матеріалу. Бавовняні тканини покривали фітиновою кислотою з кремнієм і нітрогеновміщуючою сполукою, полі-[3-(5,5-ціануровокислотапропіл)-силоксан-три-метиламоніпропіл-силоксан-хлорид] шляхом пошарового збирання (Cotton-PEI / (PCQS / PA) 30-Cl). Оброблені бавовняні тканини зменшили дію *E. coli* і *S. aureus* на 100% лише протягом 1 хвилини контакту [12].

Підтвердженою є ефективність антимікробної обробки бавовняних тканин, що призначені для використання у побуті та громадських приміщеннях, з покриттями на основі різних типів полімерів, таких як гуанідини, або полімерних нанокомпозитних матеріалів з постійними антимікробними властивостями без погіршення їх фізико-хімічних та механічних характеристик [13]. Крім того, відоме використання [14] біорозкладних полікарбонатів, функціоналізованих гуанідином, для забезпечення антимікробної активності *in vivo* проти *A. baumannii*, *E. coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *S. aureus* і *P. Aeruginosa*.

В іншому дослідженні [15] було отримано полімерні плівкові покриття на основі ПВС/хітозан з додаванням полігексаметиленгуанідину, які характеризуються антибактеріальними властивостями.

Полігуанідини мають широке застосування як універсальний дезинфікуючий засіб в багатьох галузях промисловості, відносяться до мало небезпечних речовин (3 клас безпеки по токсикологічній класифікації), характеризуються низькою токсичністю для людини, практично відсутня корозійна активність до більшості матеріалів. Полігуанідини спроможні до плівкоутворення на оброблених поверхнях, що вказує на пролонговану активність препаратів.

Активні полімери на основі бігуанідів (полікатіонних амінів) спроможні до руйнування бактеріальної клітини за рахунок електростатичного притягування [16, 17].

Аналіз публікацій свідчить про актуальність досліджуваного напрямку з розробки текстильних матеріалів з антибактеріальними властивостями. Не дивлячись на те, що у світі в останні роки проблема надання текстильним матеріалам антибактеріальних властивостей набуває все більшої актуальності, в Україні на даний час відсутнє виробництво текстилю вказаного асортименту. Слід також відмітити, що до недоліків антимікробної обробки відносять низьку стійкість до прання. Одним із способів підвищення даного показника є введення до оброблювального складу полімерів, спроможних за рахунок сил адгезії фіксувати різноманітні речовини на поверхні текстильних матеріалів різного волокнистого складу, в тому числі і антимікробні агенти. Таким чином, **мета роботи** полягає в розробці ефективних антимікробних складів для текстильних матеріалів різного сировинного складу і призначення.

### Виклад основного матеріалу

В роботі досліджували акрилову дисперсію Neoprint NPO, яка в процесі плівкоутворення виступатиме в ролі матриці для утримання антимікробних компонентів та спроможна забезпечувати комплекс необхідних властивостей тканині. У якості антимікробних препаратів біологічного походження використовували фітинову та лимонну кислоти. Для підвищення антибактеріального ефекту до опоряджувального складу вводили полігексаметиленгуанідин хлорид, спроможний до плівкоутворення.

Враховуючи, що структура полімеру визначає остаточні його властивості, досліджували структурні характеристики полімерних плівок, сформованих із акрилового полімеру Neoprint NPO, а також плівок з Neoprint NPO з добавкою фітинової (ФК) та лимонної (ЛК) кислот у співвідношенні 1/1; 3/2. Для підвищення антимікробної властивості до складу також вводили антимікробний препарат полігексаметиленгуанідин хлорид (ГХ). Усі компоненти добре розчинні у воді. Обробка тканини проводилася методом просочення антимікробним складом з наступним сушінням при температурі 80°C, а також термофіксацією при температурі 120°C протягом 3 хв.

Для отримання інформації про структуроутворення полімерної матриці використовують властивості зшитих полімерних систем обмежено набухати у розчинниках. Основне завдання зводилося до визначення кількості зшивок в об'ємі полімерної матриці, а також зв'язку між ступенем зшивки та властивостями композиційної полімерної плівки.

Ефективність зшивки оцінювали за кількістю ацетононерозчинної фракції досліджуваних полімерних плівок протягом екстрагування зразків у розчиннику. Для проведення експерименту попередньо на скляній підложці формували полімерні плівки з індивідуального досліджуваного полімеру та з полімеру, наповненого антибактеріальними компонентами. Золь-гель аналіз проводили за стандартною методикою за допомогою апарата Сокслета шляхом екстрагування полімерних плівок ацетоном протягом 18 год. і бензолом протягом 16 год. Визначали масу набряклого зразка, а також сухий залишок від нього. Кількість бензольного екстракту, який пішов на екстракцію полімеру, відповідає вмісту золь-фракції S (%), що визначається за співвідношенням (1) [22]:

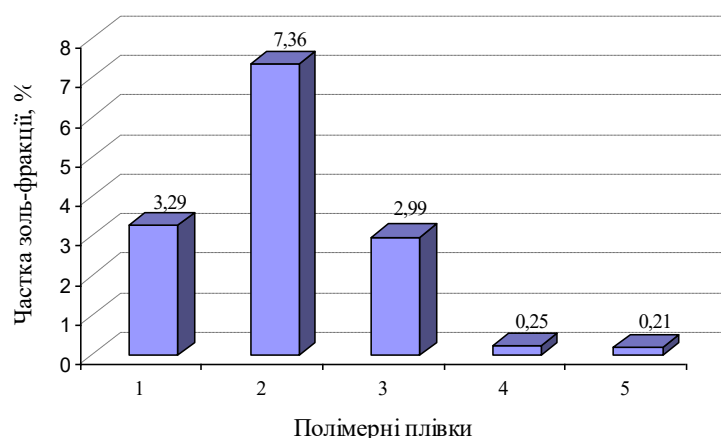


Рис. 1. Золь-фракція полімерних плівок:

1 – без добавок; 2 – з добавкою ФК і ЛК у співвідношенні 1/1;  
3 – з добавкою ФК і ЛК у співвідношенні 3/2; 4 – з добавкою ФК і ЛК у співвідношенні 3/2 і ГХ; 5 – з добавкою ФК і ЛК у співвідношенні 3/2 і ГХ після термофіксації.

$$S = \frac{m_a - m_b}{m_a} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де  $m_a$  – маса зразка після екстрагування ацетоном, г;  $m_b$  – маса зразка після екстрагування бензолом, г.

Наявність золь-фракції після екстрагування в апараті Сокслета показує вміст макромолекул, що залишилися поза сіткою у зшитому зразку композиційної полімерної плівки. Золь-фракція вимивається з полімерної плівки розчинником, оскільки не пов'язана в тривимірну сітку полімерного утворення. На діаграмі, що представлена на рис. 1, показана частка золь-фракції у досліджуваних композиційних плівках.

Аналіз кількості золь-фракції композиційних полімерних плівок показує, що індивідуальні полімерні плівки, сформовані з Neoprint NPO, малорозчинні в ацетоні та здатні забезпечити якісні показники полімерного покриття. У той же час, на рис. 1 представлені дані про вплив різних співвідношень фітинової та лимонної кислот, а також полігексаметиленгуанідін хлориду на стійкість полімерних плівок до дії органічного розчинника, що характеризує ступінь їх твердіння. В результаті дослідження встановлено, що зі збільшенням вмісту наповнювачів кількість золь-фракції знижується. Найбільш високим ступенем твердіння характеризується композиційна плівка, наповнена фітиновою та лимонною кислотами у співвідношенні 3/2 з добавками полігексаметиленгуанідін хлориду, а при проведенні термофіксації композиційної полімерної плівки вміст золь-фракції знижується ще на 12,5 %. Таким чином, наявність функціональних антимікробних добавок не погіршує властивості полімеру, та у процесі експлуатації текстильних виробів не відбуватиметься вимивання полімеру.

Ступінь зшивання полімеру (коефіцієнт зшивання), який показує число мономірних ланцюгів, за якими утворилася зшивка, у перерахунку на середньо чисельну макромолекулу, визначали за співвідношенням (2):

$$j = \frac{1}{S + \sqrt{S}}, \quad (2)$$

Долю активних ланцюгів полімеру знаходили за формулою (3):

$$V_c = (1 - S)^2 (1 - 2jS)(1 + jS), \quad (3)$$

Коефіцієнт зшивання в перерахунку на середньо масову макромолекулу визначали із співвідношення (4):

$$@ = \frac{2}{S + \sqrt{S}}, \quad (4)$$

Результати розрахунків представлені у табл. 1.

Таблиця 1

#### Структурні характеристики сформованих полімерних плівок

Склад полімерної плівки	Ступінь зшивання полімеру, j, %	Коефіцієнт зшивання	Доля активних ланцюгів полімеру, $V_c$ , моль/см <sup>3</sup>
Без добавок	4,66	9,33	0,74
ФК/ЛК = 1/1	2,90	5,80	0,59
ФК/ЛК = 3/2	5,02	9,86	0,76
ФК/ЛК = 3/2 + 6% ГХ	19,16	38,31	0,94
ФК/ЛК = 3/2 + 6% ГХ (термофіксація)	20,72	41,45	0,95

Як бачимо з отриманих даних, структурні характеристики полімерних плівок змінюються у різних мірі в залежності від їх наповнення. При додаванні фітинової та лимонної кислот у рівних кількостях щільність сітки поперечних зв'язків полімеру, порівняно з ненаповненою плівкою, зменшується на 37%, при цьому частка активних ланцюгів становить 0,59, порівняно з плівкою без добавок, частка активних ланцюгів якої становить 0,74. При збільшенні концентрації кислот у полімерній плівці ступінь зшивання підвищується до 5,02% і частка активних ланцюгів становить 0,76. Додавання до полімерної композиції полігексаметиленгуанідін хлориду дозволяє підвищити ступінь зшивання плівки до 19,16%, що пов'язане зі здатністю полігексаметиленгуанідін хлориду формувати полімерні плівки, в результаті чого збільшилася кількість взаємних зчеплень макромолекул полімерів. Процес термофіксації композиційної полімерної плівки суттєво не впливає на підвищення ступеня зшивання полімерів.

Виявлення ефективності антибактеріальної чутливості текстильних матеріалів здійснювали на зразках текстильних матеріалів різного сировинного складу. Технологічний процес антимікробної обробки складається із просочення зразків опоряджувальними розчинами при температурі 20 – 25° з наступним віджиманням і сушінням при 90°.

Існує ряд методів, що використовуються для встановлення антимікробних властивостей тканин. Визначення антимікробної дії оброблених зразків досліджуваних текстильних матеріалів проводили на агаризованому середовищі LB, що складається з (г/л): пептон – 10,0; дріжджовий екстракт – 5,0; NaCl – 5,0; агар-агар – 14,0; при рН – 7,0±0,2. Як тест-культуру досліджували одного з представників раньової

мікрофлори – грампозитивну бактерію *Staphylococcus pyogenes* з Української колекції мікроорганізмів, яку культивували при 37° протягом 24 год. Після культивування частину культури вносили до фізіологічного розчину. Із отриманої суспензії аліквоти переносили на свіже агаризоване середовище LB, та вносили диски з тканин, оброблених антимікробними складами. Після витримування в ексикаторі протягом доби визначали стійкість оброблених зразків тканин до дії мікроорганізмів. На рис.2 показана зона затримки росту бактеріальної мікрофлори навколо зразка сумішевої тканини складу поліефір 47% та бавовна 53%, обробленого фітиновою і лимонною кислотами.



Рис. 2. Зона затримки росту культури *Staphylococcus pyogenes* навколо зразка тканини, обробленого фітиновою і лимонною кислотами

Антимікробну дію оцінювали за ступенем пригнічення росту бактерій культури *Staphylococcus pyogenes* під час інкубації, в порівнянні з контрольними зразками, що не були оброблені антимікробним складом. Результати досліджень показали, що в необроблених зразках спостерігається високий ріст мікроорганізмів. В оброблених зразках відмічається зона затримки росту мікроорганізмів *Staphylococcus pyogenes* в межах 1–4 мм (рис. 2).

Так як текстильні матеріали експлуатуються в побуті, транспорті та інших суспільних місцях, представляло інтерес проведення дослідження мікрофлори оточуючого повітря і ефективність антимікробної обробки до пригнічення бактеріального забруднення навколо оброблених текстильних матеріалів. Цей метод відноситься до найбільш простих і швидких методів вивчення мікрофлори повітря та використовується для порівняльного аналізу бактеріального забруднення довкілля. Для засівання мікрофлорою з оточуючого середовища чашки Петрі з застиглим агаром виставляли на відкритому просторі у приміщенні на 15 хв. Зразок тканини у вигляді круглого диска розміщували у чашці Петрі на поверхні засіяного з повітря агару, закривали, вносили до термостату та витримували 72 год. при температурі 38° для інкубації посівів. Антимікробні властивості текстильних матеріалів визначали за допомогою аналізу дифузії диску тканини. Результати дослідження представлені на рис. 3–5.

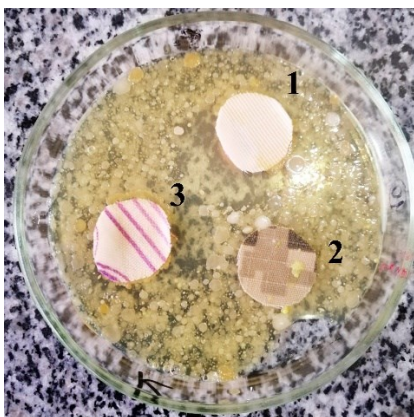


Рис. 3. Зразки тканин без обробки.

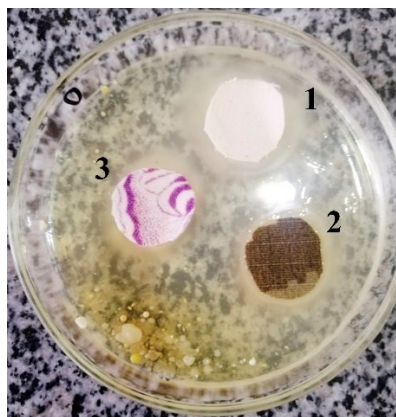


Рис. 4. Зразки тканин з антибактеріальною обробкою.

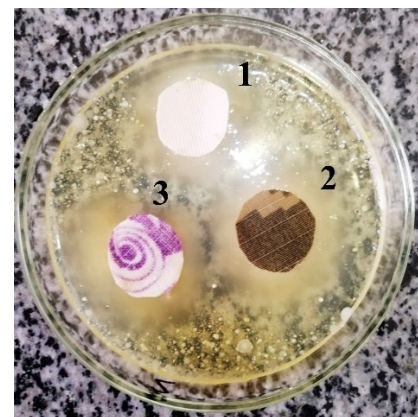


Рис. 5. Зразки тканин з антибактеріальною обробкою після прання.

1 – поліефір 47% та бавовна 53%; 2 – бавовна 50% та нейлон 50%; 3 – бавовна 100%

Як видно із фото на рис. 3, диски зі зразків тканин без антимікробної обробки характеризуються високим бактеріальним забрудненням та відсутністю навколо них зони інгібування. Зразки тканин, представлені на рис. 4, характеризуються значною зоною затримки росту бактеріальної мікрофлори навколо дисків тканин в межах 4–8 мм. Таким чином, виражена зона інгібування після проведення процесу інкубації підтверджує антимікробні властивості досліджуваних текстильних матеріалів. Зразки текстильних матеріалів після прання, які показані на рис. 5, також демонструють достатньо значну зону затримки росту бактеріальної мікрофлори навколо дисків тканин.

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

Аналіз дифузії диску тканини та зона інгібування, що утворилася навколо зразків текстильних матеріалів, оброблених полігексаметиленгуанідін хлоридом та біологічною фітиновою кислотою, підтверджують ефективність антимікробної обробки проти значної кількості бактерій, що переносяться у повітрі.



## References

1. Kolb V.M. Green Organic Chemistry and Its Interdisciplinary Applications (1st ed.) / V.M. Kolb. – CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2016. – 193 p. – DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315371856>.
2. Kim H.J. Phytic Acid Doped Polyaniline Nanofibers for Enhanced Aqueous Copper(II) Adsorption Capability / H.J. Kim, S. Im, J.C. Kim, W.G. Hong, K. Shin, H.Y. Jeong, Y.J. Hong // ACS Sustainable Chem. Eng. – 2017. – 5(8). – P. 6654 – 6664. – DOI: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b00898>.
3. Malucelli G. Textile finishing with biomacromolecules: A low environmental impact approach in flame retardancy // The impact and prospects of green chemistry for textile technology. – Woodhead Publishing, 2019. – P. 251 – 279. – DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102491-1.00009-5>.
4. Reshma A. Sustainable antimicrobial finishing of fabrics using natural bioactive agents – a review / A. Reshma, V. Brindha Priyadarisini, K. Amutha // Int. J. Life Sci. Pharma Res. – 2018. – 8(4). – P. 10 – 20. – DOI: <http://dx.doi.org/10.22376/ijpbs/lpr.2018.8.4.L10-20>.
5. Perepelkin K.E. Principles and Methods of Modification of Fibres and Fibre Materials. A Review / K.E. Perepelkin // Fibre Chemistry. – 2005. – 37. – P. 123 – 140. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10692-005-0069-6>.
6. Billah S.M.R. Textile Coatings / S.M.R. Billah // Functional Polymers: [monograph]. Edited by Jafar Mazumder M., Sheardown H., Al-Ahmed A. – Cham: Springer International Publishing, 2019. – 10. – P. 825 – 882. – DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-95987-0\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95987-0_30).
7. Sadeghi-Kiakhani M. Improvement of dyeing and antimicrobial properties of nylon fabrics modified using chitosan-poly(propylene imine) dendreimer hybrid / M. Sadeghi-Kiakhani, S. Safapour // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2016. – 33. – P. 170 – 177. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.09.034>.
8. Arif D. Preparation of Antibacterial Cotton Fabric Using Chitosan-silver Nanoparticles / D. Arif, M. Niazi, N. Ul-Haq, M. Anwar, E. Hashmi // Fibers and Polymers. – 2015. – 16. – P. 1519 – 1526. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s12221-015-5245-6>.
9. Xue Z. Microwave-assisted antimicrobial finishing of wool fabric with chitosan derivative / Z. Xue // Indian Journal of Fibre and Textile Research. – 2015. – 40(1). – P. 51 – 56.
10. Moccellini S.K. Bean sprout peroxidase biosensor based on l-cysteine self-assembled monolayer for the determination of dopamine / S.K. Moccellini, S.C. Fernandes, I.C. Vieira // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2008. – 133(2). – P. 364 – 369. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2008.02.039>.
11. Laufer G. Intumescent Multilayer Nanocoating, Made with Renewable Polyelectrolytes, for Flame-Retardant Cotton / G. Laufer, C. Kirkland, A.B. Morgan, J.C. Grunlan // Biomacromolecules. – 2012. – 13(9). – P. 2843 – 2848. – DOI: <https://doi.org/10.1021/bm300873b>.
12. Li S. Phosphorus-nitrogen-silicon-based assembly multilayer coating for the preparation of flame retardant and antimicrobial cotton fabric / S. Li, X. Lin, Y. Liu, R. Li, X. Ren, T.-S. Huang // Cellulose. – 2019. – 26. – P. 4213 – 4223. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02373-5>.
13. Chin W. A macromolecular approach to eradicate multidrug resistant bacterial infections while mitigating drug resistance onset / W. Chin, G. Zhong, Q. Pu et al. // Nature Communications. – 2018. – 9(1). – P. 917. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03325-6>.
14. Cao Y. Guanidine-Functionalized Cotton Fabrics for Achieving Permanent Antibacterial Activity Without Compromising their Physicochemical Properties and Cytocompatibility / Y. Cao, J. Gu, S. Wang, Z. Zhang, H. Yu, J. Li, S. Chen // Cellulose. – 2020. – 27(10). – P. 6027 – 6036. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03137-2>.
15. Olewnik-Kruszkowska E. Antibacterial Films Based on PVA and PVA-Chitosan Modified with Poly-(Hexamethylene Guanidine) / E. Olewnik-Kruszkowska, M. Gierszewska, E. Jakubowska, et al. // Polymers. – 2019. – 11(12). – P. 2093. – DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11122093>.
16. Zhao T. Halogenated phenols and polybiguanides as antimicrobial textile finishes / T. Zhao, Q. Chen // Antimicrobial Textiles. – 2016. – P. 141 – 153. – DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100576-7.00009-2>.
17. Li Z. Permanent antimicrobial cotton fabrics obtained by surface treatment with modified guanidine / Z. Li, J. Chen, W. Cao, et al. // Carbohydr Polym. – 2018. – 180. – P. 192 – 199. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.09.080>.

Надійшла/Paper received : 05.09.2022 p.    Надрукована/Printed : 15.11.2022 p.

**ЗАЛЮБОВСЬКИЙ Марк**Київський національний університет технологій та дизайну,  
Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»

ORCID ID: 0000-0001-6258-0088

e-mail: [markzalubovskiy@gmail.com](mailto:markzalubovskiy@gmail.com)**ПАНАСЮК Ігор**

Київський національний університет технологій та дизайну

ORCID ID: 0000-0001-6671-4266

e-mail: [panasjuk1961@gmail.com](mailto:panasjuk1961@gmail.com)

## РОЗРОБКА ВИСОКОПРОДУКТИВНОЇ ГАЛТУВАЛЬНОЇ МАШИНИ ЗІ СКЛАДНИМ ПРОСТОРОВИМ РУХОМ ДВОХ РОБОЧИХ ЄМКОСТЕЙ

Запропоновано нову конструкцію галтувальної машини, яка оснащена двома робочими ємкостями, які виконують складний просторовий рух. Достеменно описано будову та принцип роботи розробленої конструкції машини. Розроблена конструкція машини з двома ємкостями, які виконують складний просторовий рух, дозволяє значно підвищити продуктивність обробки деталей за рахунок того, що виникає можливість на одній машині одночасно виконувати дві різні галтувальні технологічні операції або одночасно обробляти дві партії різних деталей. Конструкція машини, під час експлуатації, дозволяє задіяти у робочий процес, як обидві робочі ємкості, так і одну. Оснащення машини спеціальною конструкцією приводу із чотирма шарнірами Гука дозволяє на кожному ведучому валу машини відтворити необхідний закон зміни кутової швидкості, реалізація якого створить умови, які забезпечуватимуть однакову інтенсивність руху робочого масиву між протилежними торцями ємкості у зустрічних напрямках та постійний режим руху сипкого середовища упродовж усього технологічного процесу, а також рівномірне динамічне навантаження усіх рухомих ланок. Виконані аналітичні дослідження, в межах яких визначено деякі геометричні параметри конструкції машини, зокрема, встановлено значення кута  $\alpha$  між осями валів кожного шарніру Гука, яке буде забезпечувати реалізацію необхідного закону кутової швидкості на ведучому валу машини. Встановлено взаємозв'язок між екстремальними значеннями закону зміни кутової швидкості ведучих валів машини та величиною кутів у кожному шарнірі Гука. Отримані результати аналітичних досліджень можуть бути використані у відповідних конструкторських бюро машинобудівних підприємств на стадії проектування галтувального обладнання зі складним просторовим рухом робочих ємкостей.

Ключові слова: шарнір Гука, галтування, робоча ємкість, закон зміни кутової швидкості.

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

## DEVELOPMENT OF A HIGH-PERFORMANCE HOLDING MACHINE WITH COMPLEX SPATIAL MOVEMENT OF TWO WORKING CAPACITIES

A new design of the galvanizing machine is proposed, which is equipped with two working tanks that perform complex spatial movement. The structure and principle of operation of the developed design of the machine are accurately described. The developed design of the machine with two capacities that perform complex spatial movement allows to increase considerably productivity of processing of details due to the fact that there is a possibility to carry out two different thawing technological operations on one machine or to process two parties of different details at the same time. The design of the machine, during operation, allows to involve in working process, both two working capacities, and one. Equipping the machine with a special drive design with four Hook hinges allows to reproduce the required law of change of angular velocity on each driving shaft of the machine, the implementation of which will create conditions that will ensure the same intensity of the working array between opposite ends of the tank in opposite directions. process, as well as uniform dynamic loading of all moving parts. Analytical studies were performed, within which some geometrical parameters of the machine design were determined, in particular, the value of the angle  $\alpha$  between the axes of the shafts of each Hook hinge was established, which will ensure the implementation of the required angular velocity law on the machine drive shaft. The relationship between the extreme values of the law of change of the angular velocity of the driving shafts of the machine and the magnitude of the angles in each Hook hinge is established. The obtained results of analytical research can be used in the relevant design offices of machine-building enterprises at the stage of designing galvanizing equipment with complex spatial movement of working tanks.

**Key words:** Hook hinge, galting, working capacity, law of change of angular velocity.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

На сьогоднішній день, у різних галузях промисловості (машинобудування, легка промисловість тощо), поширена реалізація галтувальних технологічних операцій [1] (відділення деталей від ливників [2, 3], покращення якості поверхні виробів [4], подрібнення, очищення металевих деталей від утворення продуктів корозії тощо) із застосуванням спеціального обладнання, яке оснащено ємкостями з їх різним характером руху.

Деякі типи такого обладнання, такі як машини з обертальним рухом робочих ємкостей [5], а також вібраційні машини [6], є застарілими типами обладнання та характеризуються досить низькою продуктивністю.

Низькою попередніх досліджень [7] було встановлено, що значного збільшення продуктивності

виконання галтувальних технологічних операцій та одночасного зменшення енерговитрат можна досягнути при використанні машин, у яких робочі ємкості виконують складний просторовий рух. При такому способі обробки, робочий масив рухається значно інтенсивніше, під час переміщення отримує усі ступені свободи.

Однак, у більшість відомих конструкцій галтувальних машин зі складним просторовим рухом робочих ємкостей оснащені однією робочою ємкістю. У зв'язку з тим, що такі конструкції машин оснащені лише однією робочою ємкістю, виключається можливість одночасної обробки декількох різних партій деталей, які не дозволяється змішувати між собою, унеможливорюється одночасне виконання двох різних галтувальних технологічних операцій, наприклад – відділення деталей від ливників та паралельне шліфування поверхні виробів. В цілому, машина не здатна забезпечити високу продуктивність під час виконання галтувальних технологічних операцій.

### Аналіз досліджень та публікацій

Відомий ряд досліджень щодо інтенсифікації галтувальних технологічних процесів із використанням обладнання зі складним просторовим рухом робочих ємкостей. Зокрема, досліджувалися процеси відділення металевих деталей замка «блискавка» від ливників [2, 7, 8]. Результати досліджень показали, що при використанні обладнання зі складним рухом робочих ємкостей можна досягнути збільшення продуктивності у більш ніж 10 разів. Також досліджували процеси покращення якості поверхні (шліфування та полірування) [4, 9], що також показали позитивні результати.

Відоме [10, 11] успішне застосування даного обладнання для реалізації технологічних процесів змішування сипких дрібнодисперсних речовин.

Попередньо, авторами були розроблені різні конструкції галтувальних машин з відмінними експлуатаційними властивостями. Таким чином, було синтезовано просторові механізми машин без наявності пасивних зв'язків у їх кінематичних ланцюгах – це машини з додатковими рухомими ланками повзуном [12] шатуном [13] та коромислом [14]. При експлуатації таких машин значно зменшується вірогідність виникнення деформацій ланок та раптового заклинювання просторового механізму, значно збільшується безвідмовний термін експлуатації обладнання.

Відомі конструкції машин з двома рухомо з'єднаними між собою робочими ємкостями із використанням поступальної [15] та обертальної кінематичних пар. Однак, у процесі експлуатації, відсутня можливість вимкнути із роботи одну із ємкостей, під час роботи машини завжди задіяні дві робочі ємкості.

### Виділення невирішених частин

Приймаючи до уваги попередні дослідження, можна зробити висновок, що до теперішнього часу залишається певна кількість невирішених питань. Зокрема, відсутня високопродуктивна конструкція машини з двома робочими ємкостями, які, під час експлуатації, можна вмикати, як разом, так і окремо.

### Формулювання цілей

Суть даної роботи полягає у синтезі просторового механізму та подальшої розробки високопродуктивної галтувальної машини зі складним просторовим рухом двох робочих ємкостей з можливістю їх спільного та окремого застосування під час реалізації галтувальних технологічних процесів.

### Виклад основного матеріалу

Розглянемо «базову» конструкцію машини [16] зі складним просторовим рухом робочої ємкості у кінематичному ланцюзі якої наявним є пасивний зв'язок. Кінематична схема просторового механізму машини представлена на рис. 1. а, модель машини – на рис. 1. б,

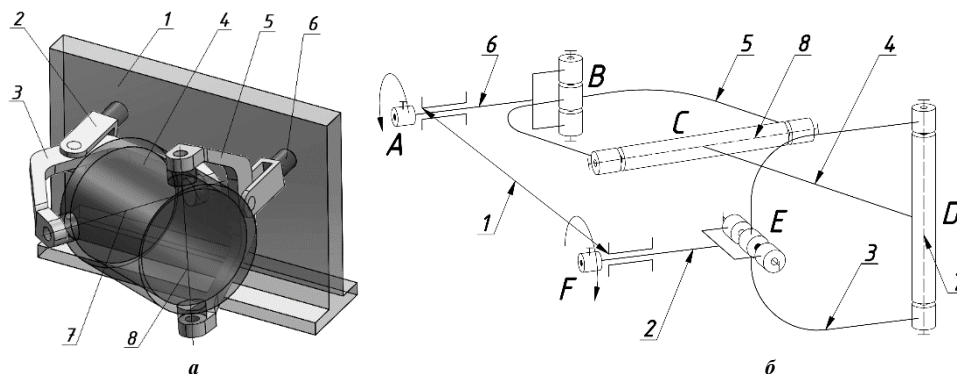


Рис. 1. «Базова» конструкція машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості у кінематичному ланцюзі якої наявним є пасивний зв'язок: а – кінематична схема, б – модель машини

Машина містить станину 1, вали – ведучий 2 та ведений 6, котрі встановлені в станині паралельно в одній площині та з'єднані між собою подвійним просторовим шарніром, що виконаний у вигляді ведучої вилки 3, веденої вилки 5 та проміжної ланки 4 (робочої ємкості), закріпленої між вилками на діаметрально взаємно перпендикулярних геометричних осях 7 та 8 відповідно. Рухомі ланки машини утворюють собою



просторовий шестиланковий механізм з обертальними кінематичними парами, ланка 4 виконує складний просторовий рух.

Однак, експериментальні дослідження руху сипкого масиву в середині такої ємкості, які були проведені в межах роботи [17], показали, що технологічне середовище, за рахунок різкого прискорення частини робочої ємкості, яка з'єднана з веденою вилкою, буде переміщатися з різною інтенсивністю між її торцями в протилежних напрямках фактично при будь-якій постійній кутовій швидкості ведучого валу з представленого вище діапазону. Таким чином, одночасно проявляються два режими руху технологічного середовища – каскадний та водоспадний. Такий режим обробки придатний не для всіх гальтувальних технологічних операцій. Більшість гальтувальних технологічних операцій рекомендовано виконувати при одному режимі руху технологічного середовища. Наприклад, шліфування та полірування – при каскадному режимі, відділення деталей від ливників – лише при водоспадному режимі. Необхідним є розробка такої конструкції приводу, яка б змогла забезпечити просторове переміщення протилежних торців ємкості з однаковою інтенсивністю.

У той само час, у роботі [17] було отримано необхідний закон зміни кутової швидкості ведучого валу (1) такої машини, відтворення якого створить умови, які забезпечуватимуть однакову інтенсивність руху робочого масиву між протилежними торцями ємкості у зустрічних напрямках та постійний режим руху сипкого середовища упродовж усього технологічного процесу. Відбуватиметься такий ефект за рахунок досягнення реалізації циклічної зміни кутових швидкостей ведучого та веденого валів машини таким чином, щоб їх екстремуми знаходилися у протифазі з однаковим амплітудним значенням.

$$\omega_{\text{ведуч}} = \omega_{\text{серед}} - \omega_{\text{ампл}} \sin\left(2\varphi + \frac{\pi}{2}\right), \quad (1)$$

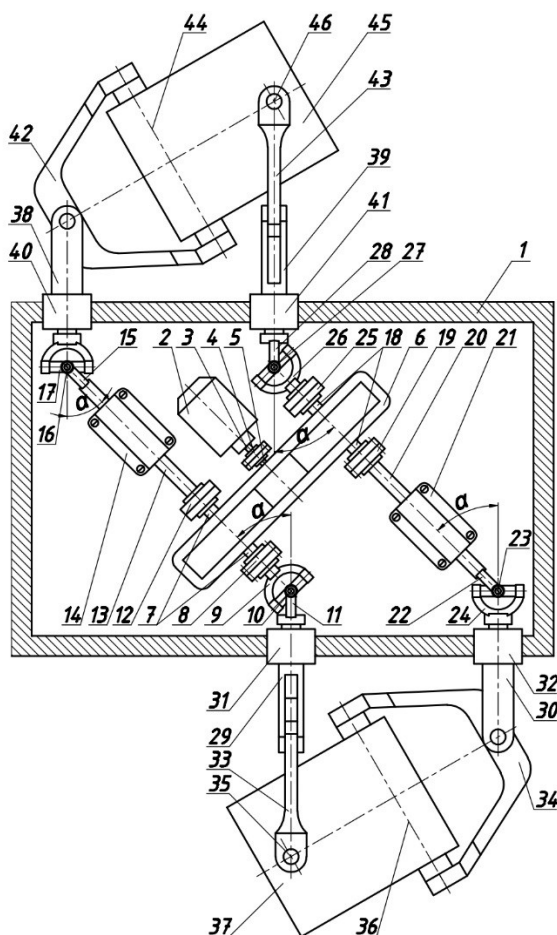


Рис. 2. Розроблена конструкція гальтувальної машини – вид зверху

На основі вищесказаного, було розроблено конструкцію гальтувальної машини з двома робочими ємкостями та спеціальною конструкцією приводу, яка дозволяє реалізувати попередньо отриманий [17] закон зміни кутової швидкості на ведучому валу машини. Розроблена конструкція машини представлена на рис. 2.

Розроблена машина містить станину 1, в якій розміщений електродвигун 2, вал 3 якого за допомогою глухої муфти 4 жорстко з'єднаний з швидкохідним валом 5 двопоточного редуктора 6. Перший тихохідний вал 7 двопоточного редуктора 6 одним кінцем, за допомогою глухої муфти 8, жорстко з'єднаний з першим шарніром Гука, що включає ведучу вилку 9, хрестовину 10, яка кінематично з'єднана з ведучою 9 та веденою 11 вилками першого шарніру Гука. Іншим кінцем перший тихохідний вал 7 двопоточного редуктора 6, за допомогою першої зчпної муфти 12, з'єднаний з другим проміжним валом 13, який встановлений у підшипниковій опорі 14 та виконаний заодно з третім шарніром Гука, що включає ведучу вилку 15, хрестовину 16, яка кінематично з'єднана з ведучою 15 та веденою 17 вилками третього шарніру Гука. Другий тихохідний вал 18 двопоточного редуктора 6 одним кінцем, за допомогою глухої муфти 19, жорстко з'єднаний з першим проміжним валом 20, що встановлений у підшипниковій опорі 21 та виконаний заодно з другим шарніром Гука, що включає ведучу вилку 22, хрестовину 23, яка кінематично з'єднана з ведучою 22 та веденою 24 вилками другого шарніру Гука. Іншим кінцем другий тихохідний вал 18 двопоточного редуктора 6, за допомогою другої зчпної муфти 25, з'єднаний з четвертим шарніром Гука, що включає ведучу вилку

26, хрестовину 27, яка кінематично з'єднана з ведучою 26 та веденою 28 вилками четвертого шарніру Гука. Ведена вилка 11 закріплена на першому ведучому валу 29, а ведена вилка 24 закріплена на другому ведучому валу 30. Ведучі вали 29 та 30 встановлені в підшипникових опорах 31 та 32 відповідно, а також з'єднані з подвійним просторовим шарніром, виконаним у вигляді двох вилок 33 та 34, діаметрально взаємно перпендикулярні вісі яких 35 та 36 є осями кріплення першої робочої ємкості 37. У свою чергу, ведена вилка 17 закріплена на третьому ведучому валу 38, а ведена вилка 28 закріплена на четвертому ведучому валу 39. Ведучі вали 38 та 39 встановлені в підшипникових опорах 40 та 41 відповідно, а також з'єднані з подвійним просторовим шарніром, виконаним у вигляді двох вилок 42 та 43, діаметрально взаємно перпендикулярні вісі яких 44 та 45 є осями кріплення першої робочої ємкості 46.

Використання двопоточного редуктора дає можливість передавати крутний момент одночасно на чотири ведучі вали та забезпечує однаковий розподіл потужності електродвигуна та крутного моменту між двома його тихохідними валами. Застосування двох зчіпних муфт дає можливість, за необхідності, як вмикати в роботу, так і вимикати другу робочу ємкість, роз'єднуючи зв'язок між тихохідними валами двопоточного редуктора та другим проміжним валом й четвертим шарніром Гука. Оснащення приводу машини чотирма шарнірами Гука дозволяє усі рухомі ланки машини практично однаково динамічно навантажити, зменшити ймовірність виникнення їх деформацій та знизити концентрації нерівномірних навантажень в окремих місцях, що забезпечить підвищення довговічності роботи машини.

Машина для обробки деталей може працювати в двох режимах: А та Б.

У режимі А зчіпні муфти 12 та 25 зчеплені, експлуатуються обидві робочі ємкості – перша 37 та друга 46. При увімкненні електродвигуна 2, розташованого в станині 1, постійний обертальний рух від його валу 3 через глуху муфту 4 передається на швидкохідний вал 5 двопоточного редуктора 6. За допомогою двопоточного редуктора 6, постійний обертальний рух від швидкохідного валу 5 розподіляється між його двома тихохідними валами 7 та 18. Постійний обертальний рух від першого тихохідного валу 7 двопоточного редуктора 6 через глуху муфту 8 передається на ведучу вилку 9 першого шарніра Гука, а через зчіпну муфту 12 та другий проміжний вал 13 – на ведучу вилку 15 третього шарніру Гука. Постійний обертальний рух від другого тихохідного валу 18 двопоточного редуктора 6 через глуху муфту 19 передається на перший проміжний вал 20 та ведучу вилку 22 другого шарніра Гука, а через зчіпну муфту 25 – на ведучу вилку 26 четвертого шарніра Гука. Далі, постійний обертальний рух ведучих вилок 9, 15, 22 та 26 за допомогою чотирьох шарнірів Гука перетворюється в рівнозмінний зміщений на півперіоду між собою обертальний рух ведених вилок 11, 17, 24 та 28. Таким чином, рівнозмінний зміщений на півперіоду між собою обертальний рух ведених вилок 11, 17, 24 та 28, які жорстко з'єднані з ведучими валами 29, 30, 38 та 38, відповідно, що також встановлені у підшипникових опорах 31, 32, 40 та 41, відповідно, передається на вилки 33, 34, 42 та 43 двох подвійних просторових шарнірів, відповідно. В свою чергу, вилки 33 та 35 через осі 35 та 36 обертають першу робочу ємкість 37, а вилки 42 та 43 через осі 44 та 45 обертають другу робочу ємкість 46, надаючи їм складного просторового переміщення у трьох взаємно перпендикулярних площинах з одночасним обертанням навколо власних повздовжніх осей.

У режимі Б зчіпні муфти 12 та 25 роз'єднані, крутний момент від приводу машини не передається до другої робочої ємкості 46, третій та четвертий шарніри Гука, другий проміжний вал 13, ведучі вали 38 та 39, а також вилки 42 та 43 залишаються нерухомими. Таким чином, функціонує лише частина машини, зокрема, перша робоча ємкість 37. Крутний момент від приводу машини до першої робочої ємкості 37 передається аналогічно, як і при роботі машини у режимі А.

Для того, щоб відтворити необхідний закон зміни кутової швидкості на ведучому валу машини необхідно встановити значення кута  $\alpha$ , що буде утворюватися між осями усіх шарнірів Гука (між осями тихохідних валів двопоточного редуктора та осями ведучих валів привода). Опиралися на рівняння (2) та (3), які описують в цілому роботу шарніру Гука та отримані у роботі [18]:

$$\frac{\omega_2^{\max}}{\omega_1} = \frac{1}{\cos \alpha}; \quad (2)$$

$$\frac{\omega_2^{\min}}{\omega_1} = \cos \alpha, \quad (3)$$

де  $\omega_1$  – постійна кутова швидкість ведучої вилки кожного шарніра Гука;  $\omega_2^{\max}$ ,  $\omega_2^{\min}$  – максимальне та мінімальне значення закону зміни кутової швидкості веденої вилки кожного шарніра Гука, відповідно. Оскільки кожна ведена вилка шарніра Гука виконана заодно з кожним ведучим валом машини, то:

$$\omega_2^{\max} = \omega_{\text{ведуч}}^{\max}; \quad (4)$$

$$\omega_2^{\min} = \omega_{\text{ведуч}}^{\min}. \quad (5)$$

З рівнянь (2) та (3) виразимо значення  $\omega_1$  та об'єднаємо їх в одне рівняння, при цьому, враховували рівності (4) та (5):

$$\omega_{\text{ведуч}}^{\max} \cos \alpha = \omega_1 = \frac{\omega_{\text{ведуч}}^{\min}}{\cos \alpha}. \quad (6)$$

Приведемо рівняння (6) до наступного вигляду:

$$\cos^2 \alpha = \frac{\omega_{\text{ведуч}}^{\min}}{\omega_{\text{ведуч}}^{\max}}. \quad (7)$$

Із рівняння (7) виражали максимальне та мінімальне значення закону зміни кутової швидкості ведучих валів через їх середнє значення:

$$\cos^2 \alpha = \frac{2\omega_{\text{сеп}}}{3} \cdot \frac{3}{4\omega_{\text{сеп}}} = \frac{2\omega_{\text{сеп}}}{4\omega_{\text{сеп}}} = \frac{1}{2}. \quad (8)$$

Після відповідних арифметичних скорочень вираз (8) отримав вигляд:

$$\cos^2 \alpha = 0,5. \quad (9)$$

Для лівої частини рівняння (9) використаємо формулу для пониження ступеня тригонометричної функції:

$$\cos^2 \alpha = \frac{1 + \cos 2\alpha}{2}. \quad (10)$$

Рівняння (9) з урахуванням виразу (10) матиме вигляд:

$$\frac{1 + \cos 2\alpha}{2} = 0,5. \quad (11)$$

Після відповідних перетворень, вираз (11) отримав вигляд:

$$\cos 2\alpha = 0. \quad (12)$$

З рівняння (12) виражали значення кута  $\alpha$ :

$$\alpha = 0,5 \cdot \arccos 0 = 45^\circ. \quad (13)$$

Таким чином, встановлено, що значення кута  $\alpha$  між осями валів шарнірів Гука, яке буде забезпечувати реалізацію закону кутової швидкості (1) на ведучому валу машини повинно становити  $45^\circ$ .

Таким чином, у зв'язку з тим, що ведучі вали 29, 30, 38 та 38 виконують рівнозмінний зміщений на півперіоду між собою обертальний рух, інтенсивність переміщення сипкого робочого середовища між протилежними торцями робочих ємкостей 37 та 46 в обох напрямках буде однаковою.

У свою чергу, максимальні екстремальні значення законів зміни кутових швидкостей на ведених вилках 11, 17, 24 та 28 шарнірів Гука, мають відповідати таким положенням вилок 33, 34, 42 та 43, при яких їх осі 35, 36, 44 та 45, відповідно, будуть розташовані паралельно до вертикальної площини, а мінімальні екстремальні значення законів зміни кутових швидкостей на ведених вилках 11, 17, 24 та 28 шарнірів Гука, мають відповідати таким положенням вилок 33, 34, 42 та 43, при яких їх осі 35, 36, 44 та 45, відповідно, будуть розташовані паралельно до горизонтальної площини.

Використання запропонованої конструкції машини для обробки деталей дозволяє: розширити сферу використання машини для обробки деталей; значно підвищити продуктивність обробки деталей за рахунок того, що виникає можливість на одній машині одночасно виконувати дві різні технологічні операції або одночасно обробляти дві партії різних деталей; збільшити довговічність машини за рахунок зниження концентрації нерівномірних навантажень в опорах валів, кінематичних парах та рухомих ланках машини, зменшити ймовірність виникнення деформацій ланок; забезпечити всі необхідні умови для реалізації якісних гальтувальних технологічних операцій чи змішування сипких дрібнодисперсних речовин, досягнути однакової інтенсивності переміщення сипкого робочого середовища в середині обох робочих ємкостей між її протилежними торцями.

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

2. Розроблено конструкцію високопродуктивної гальтувальної машини зі складним просторовим рухом двох робочих ємкостей з можливістю їх спільного та окремого застосування для реалізації гальтувальних технологічних процесів.

3. Розроблена конструкція машини з двома ємкостями дозволяє значно підвищити продуктивність обробки деталей за рахунок того, що виникає можливість на одній машині одночасно виконувати дві різні технологічні операції або одночасно обробляти дві партії різних деталей. Конструкція машини, під час експлуатації, дозволяє задіяти у робочий процес, як дві робочі ємкості, так і одну.

4. Аналітичним шляхом виконані дослідження деяких геометричних параметрів конструкції машини, зокрема, встановлено значення кута  $\alpha$  між осями валів кожного шарніру Гука, яке буде забезпечувати реалізацію необхідного закону кутової швидкості на ведучому валу машини.

### Література

1. Залюбовський М.Г. Перспективні гальтувальні та змішувальні технологічні процеси у машині типу «Turbula» / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк, В.В. Малишев // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки – 2021. – № 3, том 32 (71). – С. 6–11.

2. Залюбовський М.Г. Експериментальне дослідження впливу геометрії металевих відливок деталей замка «блискавка» на особливості їх обробки в гальтувальній машині / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну – 2020. – №2 (144). – С. 24–32.

3. Залюбовський М.Г. Експериментальне визначення енергії необхідної для відділення металевих деталей від ливників / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк, В.В. Малишев // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну – 2019. – №5 (138). – С. 17–26.

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

5. Шварц А.И. Механизация и автоматизация производства формовых РТИ : учебное пособие для рабочего образования. М. : Химия, 1987. 176 с.

6. Шумакова Т. А. Инструмент для виброабразивной обработки деталей : монография / Т. А. Шумакова, В. И. Шаповалов, Ю. И. Гутько ; Восточноукр. нац. ун-т им. В. Даля. – Луганск : Ноулидж, 2011. – 59 с.
7. Бурмістенков О.П. Виробництво литих деталей та виробів з полімерних матеріалів у взуттєвій та шкіргалантереїній промисловості : монографія / О.П. Бурмістенков, Б.М. Злотенко, В.П. Коновал, І.В. Панасюк, М.Є. Скиба, О.М. Синюк. – Хмельницький, 2007. – 255 с.
8. Залюбовський М.Г. Експериментальне дослідження впливу 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.
9. Zalyubovskiy M.G. Analytical determination of the time of handling process of polymeric details in a machine with a complex movement of working container / Zalyubovskiy M.G., Panasyuk I.V., Smirnov Y.I., Kuznetsova O.O., Malyshev V.V. // Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design. – 2019. – Vol. 3 (134). – P. 9–17.
10. Marigo M. Developing Mechanistic Understanding of Granular Behaviour in Complex Moving Geometry using the Discrete Element Method / M. Marigo, D. L. Cairns, M. Davies, A. Ingram, E. H. Stitt // Powder Technology 212 (2011), p. 17–24.
11. Marigo M. Discrete Element Method Modelling of Complex Granular Motion in Mixing Vessels: Evaluation and Validation: dissertation – The University of Birmingham, UK, 2012. 316 p.
12. Zalyubovskii M. G. On the study of the basic design parameters of a seven-link Spatial mechanism of a part processing machine / M. G. Zalyubovskii, I. V. Panasyuk // International Applied Mechanics, 56, issue 1, April 2020, 54–64.
13. Zaliubovskiy M. G. Synthesis and research of the tumbling machine spatial mechanism / M. G. Zaliubovskiy, I. V. Panasiuk, Yu. I. Smirnov, V. V. Malyshev // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2020. – 178, issue 4, 69–75.
14. Zalyubovskiy M. G. Synthesis and analysis of redundant-free seven-link spatial mechanisms of part processing machine / M.G. Zalyubovskiy, I.V. Panasyuk, S.O. Koshel', G.V. Koshel' // International Applied Mechanics, 57, No. 4, July 2021, 466–476.
15. Zalyubovskii M. G. Studying the main design parameters of linkage mechanisms of part-processing machines with two working barrels / M. G. Zalyubovskii, I. V. Panasyuk // International Applied Mechanics, 56, issue 6, November 2020, 762–772.
16. Willy A. Bachofen (WAB). Willy A. Bachofen AG, Maschinenfabrik. 2022. URL: <https://www.wab-group.com/en/> (22.02.2022).
17. 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.
18. Артоболевский И.И. Теория машин и механизмов / Артоболевский И.И. – М. : Наука, 1988. – 640 с.

#### References

1. Zaliubovskiy M.H. Perspektivni haltuvalni ta zmishuvalni tekhnologichni protsesy u mashyni typu «Turbula» / M.H. Zaliubovskiy, I.V. Panasiuk, V.V. Malyshev // Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: tekhnichni nauky – 2021. – № 3, tom 32 (71). – S. 6–11.
2. Zaliubovskiy M.H. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu heometrii metalevykh vidlyvok detalei zamka «blyskavka» na osoblyvosti yikh obrobky v haltuvalni mashyni / M.H. Zaliubovskiy, I.V. Panasiuk // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu – 2020. – №2 (144). – S. 24–32.
3. Zaliubovskiy M.H. Eksperymentalne vyznachennia enerhii neobkhdnoi dlia viddilennia metalevykh detalei vid lyvnykiv / M.H. Zaliubovskiy, I.V. Panasiuk, V.V. Malyshev // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu – 2019. – №5 (138). – S. 17–26.
4. Zalyubovskiy M.G. Experimental investigation of the handling process of polymeric units in a machine with a compacted space movement of working capacity / Zalyubovskiy M.G., Panasyuk I.V., Smirnov Y.I., Klaptsov Y.V., Malyshev V.V. // Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design. – 2019. – Vol. 2 (132). – P. 24–32.
5. Shvarc A.I. Mehanizatsiya i avtomatizatsiya proizvodstva formovykh RTI : uchebnoe posobie dlya rabocheho obrazovaniya. M. : Himiya, 1987. 176 s.
6. Shumakova T. A. Instrument dlya vibroabrazivnoy obrabotki detalei : monografiya / T. A. Shumakova, V. I. Shapovalov, Yu. I. Gutko ; Vostochnoukr. nac. un-t im. V. Dalia. – Lugansk : Noulidzh, 2011. – 59 s.
7. Burmistenkov O.P. Vyrobnystvo lytykh detalei ta vyrobiv z polimernykh materialiv u vzuttievi ta shkirhalantereinii promyslovosti : monohrafiya / O.P. Burmistenkov, B.M. Zlotenko, V.P. Konoval, I.V. Panasiuk, M.Ie. Skyba, O.M. Syniuk. – Khmelnytskyi, 2007. – 255 s.
8. Zaliubovskiy M.H. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu rezhymiv rukhu robochoho masivu ta ob'emu zapovnennia yemkosti na intensyvni viddilennia metalevykh detalei vid lyvnykiv / M.H. Zaliubovskiy, I.V. Panasiuk // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu – 2020. – № 1 (142). – S. 27–38.
9. Zalyubovskiy M.G. Analytical determination of the time of handling process of polymeric details in a machine with a complex movement of working container / Zalyubovskiy M.G., Panasyuk I.V., Smirnov Y.I., Kuznetsova O.O., Malyshev V.V. // Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design. – 2019. – Vol. 3 (134). – P. 9–17.
10. Marigo M. Developing Mechanistic Understanding of Granular Behaviour in Complex Moving Geometry using the Discrete Element Method / M. Marigo, D. L. Cairns, M. Davies, A. Ingram, E. H. Stitt // Powder Technology 212 (2011), p. 17–24.
11. Marigo M. Discrete Element Method Modelling of Complex Granular Motion in Mixing Vessels: Evaluation and Validation: dissertation – The University of Birmingham, UK, 2012. 316 p.
12. Zalyubovskii M. G. On the study of the basic design parameters of a seven-link Spatial mechanism of a part processing machine / M. G. Zalyubovskii, I. V. Panasyuk // International Applied Mechanics, 56, issue 1, April 2020, 54–64.

13. Zaliubovskiy M. G. Synthesis and research of the tumbling machine spatial mechanism / M. G. Zaliubovskiy, I. V. Panasiuk, Yu. I. Smirnov, V. V. Malyshev // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2020. – 178, issue 4, 69–75.
14. Zalyubovskiy M. G. Synthesis and analysis of redundant-free seven-link spatial mechanisms of part processing machine / M.G. Zalyubovskiy, I.V. Panasyuk, S.O. Koshel, G.V. Koshel// *International Applied Mechanics*, 57, No. 4, July 2021, 466–476.
15. Zalyubovskii M. G. Studying the main design parameters of linkage mechanisms of part-processing machines with two working barrels / M. G. Zalyubovskii, I. V. Panasyuk // *International Applied Mechanics*, 56, issue 6, November 2020, 762–772.
16. Willy A. Bachofen (WAB). Willy A. Bachofen AG, Maschinenfabrik. 2022. URL: <https://www.wab-group.com/en/> (22.02.2022).
17. Zaliubovskiy M.H. Mashyny zi skladnym rukhom robochych yemkosti dlia obrobky polimernykh detalei : monohrafiia / M.H. Zaliubovskiy, I.V. Panasiuk, V.V. Malyshev. – K. : Universytet «Ukraina», 2018. – 228 s.
18. Artobolevskiy Y.Y. Teoriya mashyn y mekhanyzmov / Artobolevskiy Y.Y. – M. : Nauka, 1988. – 640 s.

Надійшла/Paper received : 25.09.2022 р.    Надрукована/Printed :01.11.2022 р.

ЗАСПА Юрій

Хмельницький національний університет

ORCID ID: 0000-0003-3274-172X

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

## АНТИСИМЕТРИЯ ТА КАВІТАЦІЙНІ ТОПОЛОГІЧНІ РОЗРИВИ КОМПЛЕКСНОГО ПРОСТОРУ Й ІНЕРТНОЇ МАСИ В ОСНОВІ ЕКСИМЕРНИХ СИСТЕМ КВАНТОВОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ОБМІННОГО ІНЕРЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ. МОНОМЕРНА РІВНОВАГА ТА УТВОРЕННЯ РЕЧОВИНИ

Запропонований механізм утворення інертної маси, електричного заряду та гравітаційної маси шляхом кавітаційних топологічних розривів комплексного простору. Стабілізація розривів здійснюється через квантову генерацію обмінного інерційного випромінювання. На основі співвідношень нерелятивістської квантової механіки проведено розділення такого випромінювання на дві складові: зеронне випромінювання з нульового енергетичного рівня розривного квантового осцилятора та хітонне випромінювання з вищих рівнів, заселених в результаті термозбуджень. Різні знаки енергії та температури у двох підпросторах комплексного простору формують антисиметричну ексимерну систему генерації обмінного інерційного випромінювання, в той час, як розпад цих систем на мономери веде до утворення стабільних та квазістабільних форм речовини. Розраховані параметри таких форм в елементарних та космічних системах. Кількісні співвідношення в гравітаційних системах, отримані шляхом універсального використання сталої тонкої структури  $\alpha$  та розширеного аналога  $Y$  сталої Планка  $\hbar$ , узгоджуються з фактичними даними, зокрема, щодо струменевого розширення Метагалактики, нестационарних процесів в надрах та в оболонках небесних тіл, механізмів терморегуляції клімату Землі та генерації геомагнітного поля. Аналізуються турбулентні енергетичні каскади в трибоконтактних та колайдерних системах, проявлені на емісійних спектрах ексимерних структур в цих системах. Розраховані складові інертної маси лептонів, мезонів та адронів, виявлена стабілізація групової швидкості квантів хітонного випромінювання в основі гігантських ядерних резонансів. Аналізуються процеси тунельного пробію енергетичного бар'єру ексимерів, які ведуть до утворення енергетичних вивертів та струменів в природних системах різного рівня організації. На прикладі відомих катастроф в ядерній енергетиці та в гідроенергетиці показані негативні наслідки змішування ексимерних структур поля інерції з мономерними структурами. Показано, що широко розтиражовані Лоренц-інваріантні форми полів та обмеження теорій відносності Ейнштейна на швидкість поширення взаємодій адекватні лише в ізольованих мономерних системах, де діють примітивні закони збереження. Отримані в роботі результати цілком узгоджуються з фундаментальною теологічною концепцією *Creatio ex nihilo*.

Ключові слова: антисиметрія, комплексний простір, кавітаційний топологічний розрив, маса, заряд, спин, інерційне випромінювання, корпускулярно-хвильовий дуалізм, ексимер, мономер

ZASPA Yuriy

Khmelnytskyi National University

## ANTI-SYMMETRY AND CAVITATION TOPOLOGICAL DISRUPTIONS OF COMPLEX SPACE AND INERT MASS ON THE BASIS OF EXCIMER SYSTEMS OF QUANTUM GENERATION OF EXCHANGE INERTIAL RADIATION. MONOMER EQUILIBRIUM AND MATTER FORMATION

The proposed mechanism of formation of inert mass, electric charge and gravitational mass through cavitation topological ruptures of complex space. Stabilization of gaps is carried out through the quantum generation of exchange inertial radiation. On the basis of the relations of non-relativistic quantum mechanics, such radiation was separated into two components: zeron radiation from the zero energy level of the quantum oscillator and heaton radiation from higher levels populated as a result of thermal excitations. Different signs of energy and temperature in two subspaces of the complex space form an antisymmetric excimer system of exchange inertial radiation generation, while the decomposition of these systems into monomers leads to the formation of stable and quasi-stable forms of matter. The parameters of such forms in elementary and cosmic systems are calculated. Quantitative relations in gravitational systems, obtained by the universal use of the constant fine structure and the extended analogue of the Planck constant, are consistent with actual data, in particular, regarding the jet expansion of the Metagalaxy, non-stationary processes in the interior and in the shells of celestial bodies, the mechanisms of thermoregulation of the Earth's climate and the generation of the geomagnetic field. Turbulent energy cascades in tribocontact and collider systems, manifested in the emission spectra of excimer structures in these systems, are analyzed. The components of the inert mass of leptons, mesons, and hadrons were calculated, and the stabilization of the group velocity of heaton radiation quanta in the basis of giant nuclear resonances was found. The processes of tunnel breakdown of the energy barrier of excimers, which lead to the formation of energy vortices and jets in natural systems of different levels of organization, are analyzed. The negative consequences of mixing excimer structures of the inertial field with monomeric structures are shown on the example of well-known disasters in nuclear power and hydropower. It is shown that the widely reproduced Lorentz-invariant forms of the fields and the limitations of Einstein's theories of relativity on the rate of propagation of interactions are adequate only in isolated monomeric systems where primitive conservation laws apply. The results obtained in the work are completely consistent with the fundamental theological concept of *Creatio ex nihilo*.

Key words: anti-symmetry, complex space, cavitation topological gap, mass, charge, spin, inertial radiation, particle-wave dualism, excimer, monomer

## Постановка проблеми у загальному вигляді

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

Природа маси, заряду та спіну залишається головною проблемою сучасної фізики. Її вирішення безпосередньо пов'язане з поняттям симетрії та з адекватним сприйняттям простору та часу. Домінуючі нині штучні унітарні симетрії квантової теорії поля та доктрина однорідного ізотропного простору й однорідного часу з відповідними законами збереження вступають в пряме протиріччя з фактами та породжують цілковито хибні фізичні стандарти на кшталт SM та Lambda-CDM [1–4]. Тотальна більшість законів та співвідношень фізики стосується рівноважних систем, або ж систем, що релаксують до рівноваги. Це відриває фізичні теорії не тільки від описання живих систем, але й від розуміння, зокрема, динаміки, енергетики та еволюції Космосу, спотворених загальною теорією відносності Ейнштейна та абсурдною ідеєю Великого вибуху. Альтернативна ідея антисиметрії нерівноважних фізичних систем [5–6] цілком узгоджується з теологічною концепцією *Creatio ex nigilo*, розділяючи ці системи на дві частини, протилежні за знаком енергії, та здатні до енергообміну в неоднорідному анізотропному комплексному просторі. Такий підхід відповідає також базовим принципам нерелятивістської квантової механіки: корпускулярно-хвильовому дуалізму та принципу невизначеності. Квазікласичне описання тут ґрунтується на нелоренцевому гідродинамічно-хвильовому калібруванні потенціалів в рівняннях Максвелла та в їх аналогах для гравітаційного поля [5], що відкидає релятивістські обмеження на швидкість поширення взаємодій. На відміну від попереднього розгляду [6], нижче основний акцент робиться на кавітаційних топологічних розривах комплексного простору, які власне й формують масу, заряд та спин матеріальних частинок.

Розглянемо динамічну (контактну на першому етапі – шляхом перекриття хвильових функцій) взаємодію двох різних за знаком енергії кавітаційних топологічних розривів комплексного простору, приписуючи їм певну інертну масу  $m$ , знак якої змінюється при переході через розрив (рис.1). Використовуючи відомий апарат нерелятивістської квантової механіки, виділимо відцентровий відштовхувачий потенціал такої взаємодії:

$$U_c = \frac{Y^2 \cdot l(l+1)}{mr^2}, \quad l = 1, 2, 3... \quad (1)$$

Тут  $Y$  – розширений аналог сталої Планка  $\hbar$  [5,6],  $l$  – орбітальне квантове число,  $r$  – відстань від центру до розриву. Потенціал (1) утворений виділенням кутової частини оператора Лапласа (в сферичних координатах) у стаціонарному рівнянні Шредінґера, що описує взаємодію двох масивних частинок у центрально-симетричному полі.

Подальша стабілізація такої пари розривів здійснюється шляхом взаємообміну інерційним випромінюванням, згенерованим розривами. Це формує відповідні енергетичні ями на кривих потенційної енергії взаємодії (рис.1), а також відповідні квазістаціонарні енергетичні рівні пари розривів – осциляторів, кожному з яких приписується напівцілий спин. Інерційне обмінне випромінювання (бозони з цілим спіном) складається з двох частин: низькочастотного хітонного випромінювання, утвореного внаслідок переходів осциляторів між рівнями всередині енергетичної ями, а також високочастотного “зеронного” випромінювання, утвореного внаслідок переходів з нульового енергетичного рівня на дні ями на загальний нульовий (основний) рівень енергії (як показано на рис.1), або ж – безпосередньо між двома найнижчими рівнями (різного знаку енергії) в ямах. Для обох видів інерційного випромінювання характерні наступні співвідношення:

$$E = \vec{p} \cdot \vec{v}, \quad \vec{p} = Y \cdot \vec{k}, \quad (2, 3)$$

де  $E, \vec{p}, \vec{v}, \vec{k}$  – енергія, імпульс, групова швидкість та хвильовий вектор,  $Y$  – розширений аналог сталої Планка. З (2, 3) слідує:

$$E = Y \cdot \vec{k} \cdot \vec{v} = Y\omega, \quad \omega = \vec{k} \cdot \vec{v}, \quad (4, 5)$$

де  $\omega$  – циклічна частота квантів. Інертна маса  $m$  квантів випромінювання співпадає з масою розривів – осциляторів та вводиться наступним чином:

$$m \cdot v = \pm Y \cdot k, \quad k = R^{-1} \quad (6, 7)$$

Тут  $v, k, R$  – відповідно модулі групової швидкості, хвильового числа та оберненої до нього величини з розмірністю довжини. Знаки  $\pm$  в (6) змінюються при переході через розрив, як показано рис. 1 (в дужках для античастинок).

Вектори  $\vec{k}, \vec{v}$  в (2–5) суто дійсні, або ж суто уявні (в залежності від підпростору) та утворюють кут  $\theta$  між собою (для дійсних векторів), або ж між відповідними образами цих комплексних векторів у дійсному підпросторі, причому:

$$|\cos \theta| = \frac{Y_B}{Y} = Q^{-1} \quad (8)$$



де  $Y_B$  – деяке базове значення «плаваючого» параметра  $Y, Q$  – число кратності [6]. Із врахуванням (2–8) маємо:

$$\omega = \frac{Y_B}{mR^2}, \quad E = Q \cdot Y_B \cdot \omega, \quad v = Q \cdot \omega \cdot R \quad (9-11)$$

Для однозначності тут фігурують додатні значення всіх величин.

Положення енергетичних ям на рис.1, взагалі кажучи, довільні та формуються в процесі динамічної самоорганізації фізичної системи, а також змінюються при її еволюції. Слід зауважити, що згідно (9) хітоні частоти в малорозмірних високоенергетичних ямах попадають в діапазон зеронних частот кавітаційних розривів більшого масштабу, що обумовлює каскадний транспорт енергії по системі розривів, добре виражений на відповідних спектрах в фізичних системах різного рівня ієрархії [5, 6].

Базуючись на попередніх результатах [5, 6], розглянемо тут кількісні співвідношення стосовно утворення рівноважних та квазірівноважних форм речовини в такого роду системах за умови:

$$T_{he} \rightarrow 0 \quad (12)$$

де  $T_{he}$  – хітона температура (різного знаку), яка обумовлює заселення вищих енергетичних рівнів у квантових ямах на рис.1. За цієї умови можливе розділення ексимерних пар розривів на мономери, кожен з яких автостабілізується власним інерційним випромінюванням. При цьому слід враховувати як зеронну, так і хітонну складові випромінювання. Для зеронної складової маємо:

$$f_0(\omega_0) = \frac{1}{8\pi^2} \cdot m\omega_0^2 \cdot Q_0^2 \cdot \frac{1}{2}, \quad Q_0^2 = \frac{1}{\cos^2 \theta_0} \quad (13, 14)$$

$$\frac{dP_0}{d\omega_0} = f_0(\omega_0) \cdot 4\pi R_0^2 = \frac{Y_B \cdot \omega_0}{4\pi} \cdot Q_0^2 \quad (15)$$

Тут  $f_0$  – спектральна густина випромінювальної здатності розриву. Коефіцієнт  $\frac{1}{2}$  в (13) відображає характерну особливість нульової енергії квантового осцилятора [4]. Величина спектральної густини потужності зеронного випромінювання (15) має розмірність енергії та відображає долю енергії, запасеної у вигляді інерційного випромінювання в умовах мономерної рівноваги. За цих умов така доля рівна енергії нульових коливань квантового розриву-осцилятора та складає половину енергії спокою без решти енергії хітонного випромінювання. Параметр  $\varepsilon$  враховує цю решту антисиметрично для систем електромагнітного та гравітаційного полів:

$$\frac{dP_0}{d\omega_0} = \frac{1}{2} \cdot (1 \pm \varepsilon) \cdot mc^2 \quad (16)$$

Верхній знак тут стосується гравітаційного поля, нижній – електромагнітного. Для систем електромагнітного поля маємо:

$$Y_B = \hbar, \quad \varepsilon = \frac{e^2}{R_0 \cdot mc^2} = \alpha \cdot \frac{R_c}{R_0}, \quad R_c = \frac{\hbar}{mc} \quad (17-18)$$

Тут  $c, \hbar, R_c, R_0, e, \alpha$  – швидкість світла у вакуумі, стала Планка, комптонівський радіус, рівноважний радіус розриву, елементарний електричний заряд та стала тонкої структури. Зовнішнє електростатичне поле, пов'язане із зарядом  $e$ , являє собою хітонну складову інерційного випромінювання (за умови (12)) з параметрами:

$$R \rightarrow \infty, \quad \omega = 0, \quad Q \rightarrow \infty, \quad \cos \theta = 0, \quad v^2 \propto \frac{1}{R} \quad (19-23)$$

Для зеронного випромінювання всередині кавітаційного топологічного розриву з (13-18) маємо:

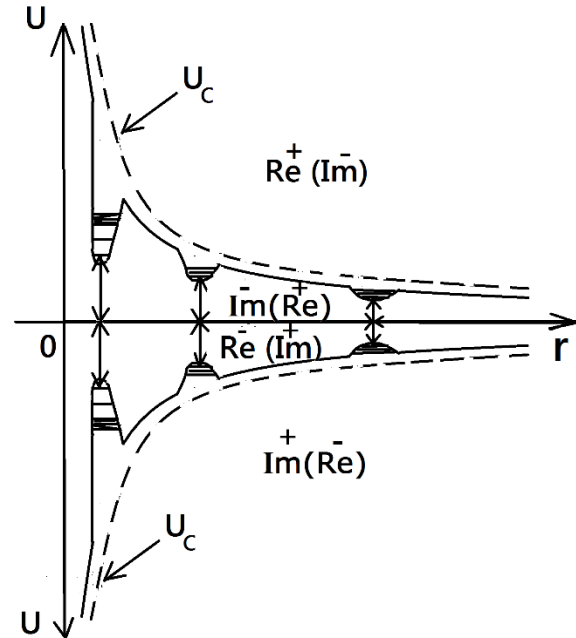


Рис. 1. Енергетична схема ексимерної системи квантової генерації обмінного інерційного випромінювання

$$Q_0^2 = 2\pi(1 \pm \varepsilon) \cdot \left(\frac{R_0}{R_c}\right)^2, \quad \frac{v_0^2}{c^2} = 2\pi \cdot (1 \pm \varepsilon) \quad (24, 25)$$

Зокрема, для лептонів при  $R_0 = R_c$  та  $\varepsilon = \alpha$  маємо:

$$Q_0^2 = \frac{v_0^2}{c^2} = 2\pi(1 \pm \alpha) \quad (26)$$

Для протонів,  $\pi^\pm$  – мезонів та  $K^\pm$  – мезонів при  $R_0 \approx 0,84$  фм; 0,66 фм; 0,53 фм [4] відповідно маємо:  $Q_0 \approx 10, 0; 1, 2; 3, 3$ . Для мезонів ці розрахунки носять наближений характер з огляду на шаруватий характер їх кавітаційної структури: за умови цілого спіну вона повинна містити щонайменше два розриви з напівцілим спіном. Розглянута тут схема утворення речовини цілковито протирічить існуючим кварк-партономним точковим моделям [1–4].

В системі гравітаційного поля параметр  $Y_B$  вводиться через універсальне використання сталої тонкої структури  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{G \cdot M_g^2}{Y_B \cdot c}, \quad Y_B = \frac{G \cdot M_g^2}{\alpha \cdot c} \quad (\text{СГС}) \quad (27, 28)$$

Тут  $G$  – стала всесвітнього тяжіння,  $M_g$  – приєднана гравітаційна маса, яка для стабільних форм рівняється з інертною масою  $m$ . При цьому:

$$\varepsilon = \frac{G \cdot M_g^2}{R_0 \cdot M_g \cdot c^2} = \frac{GM_g}{R_0 \cdot c^2} = \alpha \cdot \frac{R_c}{R_0}, \quad R_c = \frac{G \cdot M_g}{\alpha \cdot c^2} \quad (29, 30)$$

Знак плюс (а не мінус) в (16, 24–25) враховує від'ємний внесок гравітостатичної енергії в енергію спокою космічних об'єктів – на відміну від додатного внеску електростатичної енергії заряджених елементарних частинок. Для Землі та Сонця розрахунки згідно (24, 27–30) приводять до значень  $Q_0 \approx 2, 7 \cdot 10^7$  та  $Q_0 \approx 8, 7 \cdot 10^3$  відповідно.

Квантова генерація обмінного інерційного випромінювання в системах електромагнітного поля

На рис. 2, 3 наведені спектри колайдерних резонансів та гігантських ядерних резонансів, які цілком подібні до акустичних резонансних спектрів в контактних трибосистемах (рис. 2) та відповідають схемі рис. 1. Слід звернути увагу на високочастотний обрив вширених максимумів на рис. 2, пов'язаний з виходом за межі енергетичних ям на рис. 1. Звужені низькоенергетичні резонансні максимуми на рис. 2, 3 відповідають збудженню внутрішніх рівнів розривного квантового осцилятора (рис. 1).

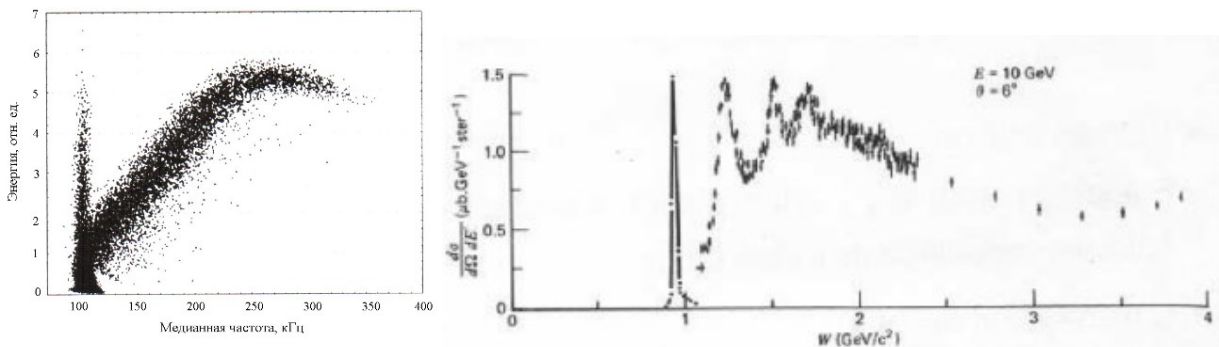


Рис. 2. Акустоемісійний спектр в технічній трибоконтактній системі [10] (зліва) та колайдерний спектр розсіяння електронів на протонах [9] (справа)

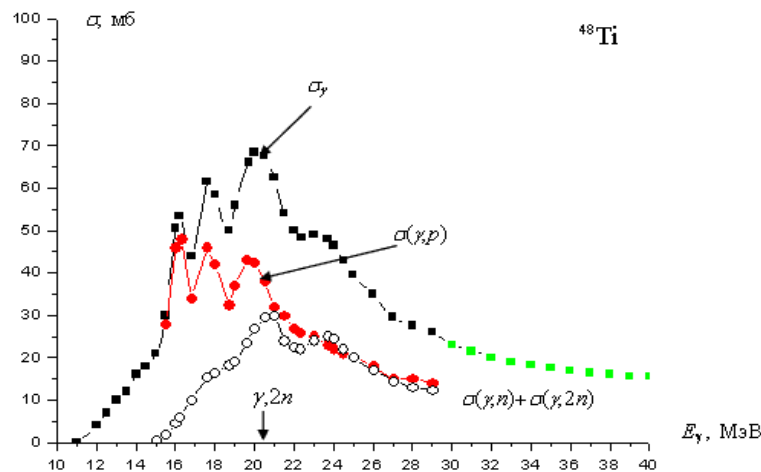


Рис. 3. Типовий спектр гігантських ядерних резонансів [7]

Т.з. гігантський дипольний резонанс ядер (рис. 3), вивчення якого триває вже три чверті століття [7], згідно співвідношень (9–11) обумовлений не колективними коливаннями протонів щодо нейтронів [7], а стабілізацією групової швидкості квантів інерційного випромінювання за умов ( для середніх та важких ядер):

$$E_R = \frac{E_*}{A^{1/3}} = \frac{v \cdot \hbar}{R} = \frac{v \cdot \hbar}{R_* \cdot A^{1/3}}, \quad v = \frac{E_* \cdot R_*}{\hbar} \approx 0,45 c \quad (31, 32)$$

Тут  $E_R$  – енергія резонансу,  $E_* \approx 80$  МеВ,  $R_* \approx 1,12$  фм,  $A, R$  – масове число та радіус ядра.

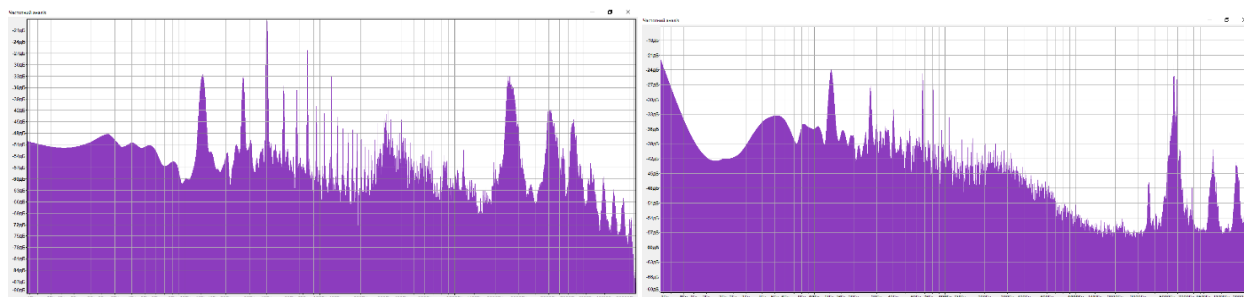


Рис. 4. Акустоемісійні спектри в технічній системі різання в умовах загальної (зліва) та локальної (справа) спектральної когерентності інерційного випромінювання

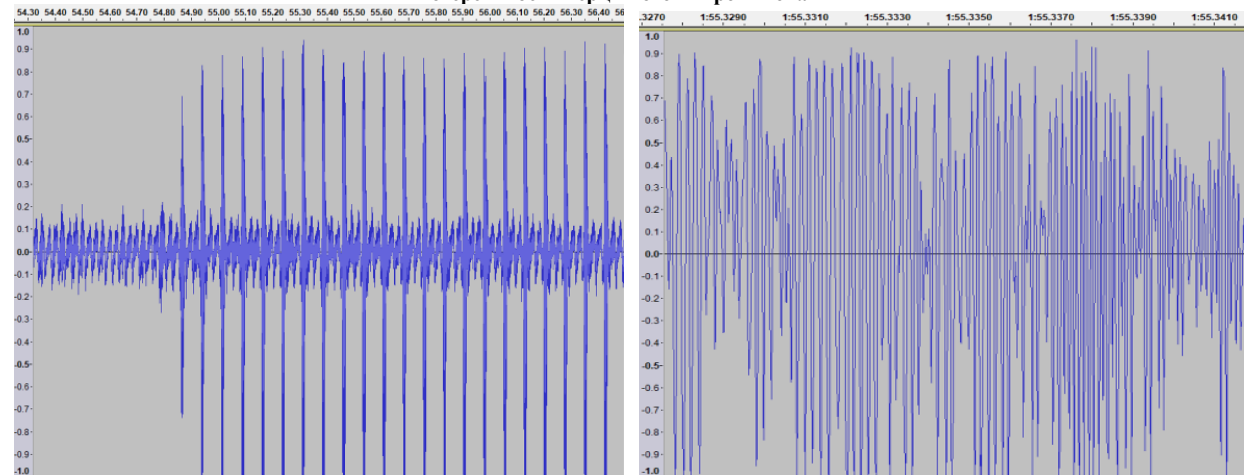


Рис. 5. Акустограми інерційного випромінювання в технічній системі різання за умов загальної (зліва) та локальної (справа) спектральної когерентності

Слід відмітити паралельну енергетичну самонакачку інерційних збурень (в нерівноважних системах) на різних частотах, що в умовах каскадних процесів перенесення енергії та нелінійності системи [5, 6] призводить до самоорганізації процесу генерації в в часі та в частотному вимірі – рис. 4, 5. Енергетичні максимуми, відповідні утворенню окремих ям на рис. 1, добре виражені як на прикладі технічних систем (рис. 4), так і в ядерних та нуклонних системах (рис. 2, 3). Зокрема, енергетична відстань близько 300 МеВ між протонними резонансами на рис. 2 (відповідна хітонним перходам розривного

квантового осцилятора на рис. 1) безпосередньо проявлена у характерному максимумі на спектрах ядерних резонансів [7].

Квантова генерація обмінного інерційного випромінювання в гравітаційних системах

Із вищенаведених співвідношень (9,28) слідує:

$$\omega^2 = \frac{2G \cdot M_g}{\alpha\beta \cdot Q^2 \cdot R^3} = \frac{8\pi G}{3\alpha\beta \cdot Q^2} \cdot \rho_g, \quad \rho_g = \frac{3M_g}{4\pi R^3} \quad (33, 34)$$

Тут радіус розриву  $R$  визначається з умови, аналогічної умові щодо сталої Віна у спектрі рівноважного електромагнітного теплового випромінювання :

$$R = \frac{Y_b \cdot c}{\beta \cdot T_g}, \quad M_g \cdot v^2 / 2 = T_g \quad (35, 36)$$

де  $\beta \approx 4,965$  – характерний корінь тангендентного рівняння на знаходження сталої Віна,  $T_g$  – енергетична гравітаційна температура. При цьому має місце наступний взаємозв'язок інертної маси розриву та приєднаної гравітаційної маси:

$$(mc)^2 = \frac{\beta \cdot G \cdot Q^2 \cdot M_g^3}{2\alpha R} \quad (37)$$

Співвідношення (33,34) дозволяють визначити густину приєднаної гравітаційної маси  $\rho_g$  за відомою частотою інерційного випромінювання. Зокрема, для тривимірного струменевого розширення Метагалактики при  $\omega = H$  (постійна Хаббла) ,  $Q = 1$  з (33) слідує значення середньої густини речовини Метагалактики:

$$\rho_g^{MG} \approx 3,0 \cdot 10^{-31} \frac{\Gamma}{\text{см}^3}, \quad (38)$$

яке цілком узгоджується з експериментальними даними та майже на два порядки величини менше т.з. «критичної густини Всесвіту», якою оперує цілковито хибна загальна теорія відносності Ейнштейна [4].

Виражаючи густину  $\rho_g$  з (33) через період коливань інерційного випромінювання  $\tau$  , отримаємо:

$$\rho_g = \frac{3\pi\alpha\beta \cdot Q^2}{2G \cdot \tau^2}, \quad \tau = \frac{2\pi}{\omega} \quad (39, 40)$$

Як видно, ця густина в космічних системах максимальна для внутрішніх розривів в пульсарах. Тут при  $\tau \approx 1$  мс маємо:

$$\rho_g \geq 5 \cdot 10^{12} \frac{\Gamma}{\text{см}^3} \quad (41)$$

Вищенаведені співвідношення записані для дипольних ( $l=1$ ) форм інерційного випромінювання. Зокрема, добре відома дипольна анізотропія фонового космічного радіовипромінювання обумовлена не ефектом Доплера щодо «релікту» Великого вибуху [3, 4], а анізотропією кавітаційного розриву Хмари Оорта на периферії Сонячної системи, який і генерує це випромінювання [5, 6]. Квадрупольні ( $l=2$ ) форми інерційного випромінювання та кавітаційних розривів у Сонячній системі представлені, зокрема, тороїдальними конфігураціями Головного поясу астероїдів, поясу Койпера, гігантським пиловим кільцем навколо Сатурна, кільцями планет-гігантів та ін.

Відкриті топологічні конфігурації розривів, тунельні вирви та струмені

Крім розглянутих вище закритих топологічних розривів в фізичних системах всіх рівнів організації широко представлені також відкриті топологічні розриви у формі струменів та вирв, утворених тунельним пробоем енергетичних бар'єрів на рис. 1. На мікрорівні слід відзначити добре відомі адронні струмені та космічні промені різних енергій [4]. В геодинамічних та космічних системах – торнадо та циклони, плюми та вулканічні канали, спікули, до- та надсвітлові джети, спіральні рукави галактик, еруптивні викиди, гамма-сплески та ін.

Колапсні енергетичні вирви та пробіи потенційного енергетичного бар'єру в процесі наступного розширення нерідко мають катастрофічні наслідки в потужних енергетичних системах, де змішуються ексимерні та мономерні форми інерційного поля. Це у повній мірі виявилось у катастрофах на ЧАЕС та СШГЕС [8] (рис. 6, 7). На рис. 6 наведена сейсмограма катастрофи на СШГЕС, на якій чітко прослідковується фатальна зміна напрямку ексимерного енергетичного потоку на етапі перекриття пройми направляючого апарату другого гідроагрегату: зі спокійного низькочастотного оберненого енергетичного каскаду вишир уміщуючого геологічного середовища – на потужний струмінь вглиб цього середовища, а саме – в тектонічний розлом безпосередньо під днищем другого агрегату [8] і далі – в енергетичну вирву і кавітаційний розрив в надрах Землі. Відповідні руйнування основи ГА-2 СШГЕС явно виділяються на світлинах катастрофи (рис. 8). Характерні періоди на сейсмограмах (рис. 6) відповідають бафтинговим ударам кавітаційного джута, сформованого в режимі синхронізації ексимерних мод у водяному тракті

другого гідроагрегату.

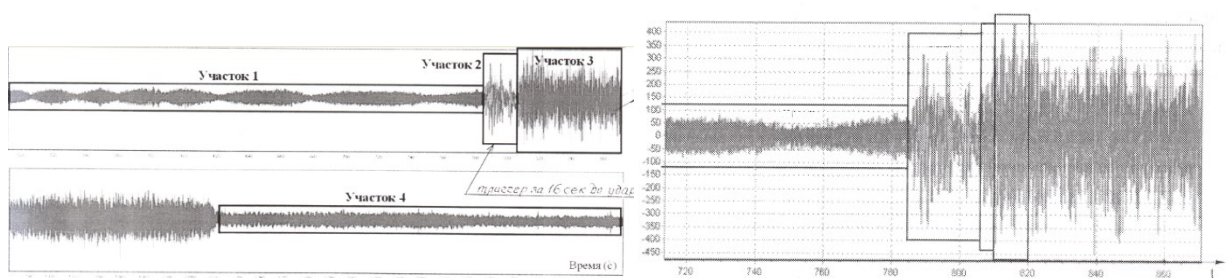


Рис. 6. Сейсмограми катастрофи на СШГЕС [8]

Подібний кавітаційний бафтинг у вигляді надпотужних ударів по четвертому енергоблоку ЧАЕС згадують також очевидці катастрофи на цій станції [8], розташованій (не випадково) в районі тектонічних розломів русла річки Прип'ять. Енергетична вирва в процесі катастрофи тут практично знищила весь південно-східний квадрант днища реактора четвертого енергоблоку [8], переносючи енергію вглиб кавітаційного розриву в надрах Землі. Постколапсне струменеве розширення та пробій енергетичного бар'єру безпосередньо виявились у вигляді інерційного струменя в тропосферу Землі, що обумовило глобальне радіаційне забруднення планети.







Рис. 7. Руїни катастроф на ЧАЕС (зліва) та СШГЕС (справа) [8]

Фізика такого роду катастрофічних процесів виходить далеко за межі нав'язаних спеціальною теорією відносності штучних обмежень на швидкість поширення взаємодій та Лоренц-інваріантних форм поля, адекватних лише в ізованих мономерних системах, де діють примітивні закони збереження. Реальне змішування мономерних форм з їх ексімерними енергетичними кураторами неминуче віддаляє нас від вульгарного матеріалізму, повертаючи до моралі та фундаментальної теологічної концепції *Creatio ex nihilo*.

### Література

1. Ланев А.В. Результаты коллаборации CMS: бозон Хиггса и поиски новой физики / А.В. Ланев // УФН. – 2014. – Т. 184, № 9. – С. 996–1004.
2. Боос Э.Э. Стандартная модель и предсказания для бозона Хиггса / Э.Э. Боос // УФН. – 2014. – Т. 184, № 9. – С. 985–996.
3. Смут Дж.Ф. Анизотропия реликтового излучения: открытие и научное значение : Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2006 / Дж. Ф. Смут // УФН. – 2007. – Т. 177, № 12. – С. 1294–1317.
4. Физическая энциклопедия : [в 5 т. / под ред. А.М. Прохорова]. – Москва : Большая рос. энци., 1999. – 760 с.
5. Заспа Ю.П. Нелінійна контактна динаміка та антисиметрія корпускулярно-вихор-хвильових форм електромагнітного та гравітаційного полів у фоновому середовищі комплексного Евклідового простору / Ю.П. Заспа // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2021. – № 2 (295). – С. 193–205.
6. Заспа Ю.П. Квантова когерентність і кавітація, квазідовимірна бульбашкова турбулентність, резонансна синхронізація мод, каскадна енергетика та самоорганізація в гетерогенних системах масивного хітонного випромінювання / Ю.П. Заспа // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2021. – № 6 (303). – С. 15–25.
7. Ишханов Б.С. Гигантский дипольный резонанс атомных ядер. Предсказание, открытие и исследование / Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов // УФН. – 2021. – Т. 191, № 2. – С. 147–162.
8. Заспа Ю.П. Ядерний та гідродинамічний бафтинг, флаттер та колапс в гетерогенних системах: псевдокооперативна вихор-хвильова динаміка і топологія Чорнобильської та Саяно-Шушенської катастроф / Ю.П. Заспа // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2019. – № 2 (271). – С. 238–248.
9. Probing the Proton: Electron – Proton Scattering. URL: <https://www2.ph.ed.ac.uk/~vjm/Lectures/.../PPNotes3.pdf>
10. Колубаев Е.А. Особенности акустического излучения при трении стали Гадфильда / Е.А. Колубаев, О.В. Сизова, С.А. Пупынин // Известия Томского политехнического университета. – 2011. Т. 319, № 2. – С. 62–66.

### References

1. Lanev A.V. Rezultaty kollaboracii CMS: bozon Higgsa i poiski novoj fiziki / A.V. Lanev // UFN. – 2014. – Т. 184, № 9. – С. 996–1004.
2. Boos E.E. Standartnaya model i predskazaniya dlya bozona Higgsa / E.E. Boos // UFN. – 2014. – Т. 184, № 9. – С. 985–996.
3. Smut Dzh.F. Anizotropiya reliktovogo izlucheniya: otkrytie i nauchnoe znachenie : Nobelevskaya leksiya. Stokgol'm, 8 dekabrya 2006 / Dzh. F. Smut // UFN. – 2007. – Т. 177, № 12. – С. 1294–1317.
4. Fizicheskaya enciklopediya : [v 5 t. / pod red. A.M. Prohorova]. – Moskva : Bolshaya ross. enc., 1999. – 760 s.
5. Zaspа Yu.P. Nelineinа kontaktna dynamika ta antysymetriia korpuskuliarno-vykhор-khvylovyykh form elektromagnitnoho ta hravitatsiinohо poliv u fonovomu seredovyschi kompleksnoho Evklidovohо prostoru / Yu.P. Zaspа // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2021. – № 2 (295). – С. 193–205.

6. Zaspа Yu.P. . Kvantova koherentnist i kavitatsiia, kvazidvovymirna bulbashkova turbulentnist, rezonansna synkhronizatsiia mod, kaskadna enerhetyka ta samoorhanizatsiia v heterohennykh systemakh masynnoho khitonnoho vyprominiuvannia / Yu.P. Zaspа // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2021. – № 6 (303). – S. 15–25.
7. Ishhanov B.S. Gigantskiy dipolnyy rezonans atomnykh yader. Predskazanie, otkrytie i issledovanie / B.S. Ishhanov, I.M. Kapitonov // UFN. – 2021. – T. 191, № 2. – S. 147–162.
8. Zaspа Yu.P. Yadernyi ta hidrodynamichniy baftynh, flatter ta kolaps v heterohennykh systemakh: psevdokooperatyvna vykhorkhvylova dynamika i topolohiia Chornobylskoi ta Saiano-Shushenskoi katastrof / Yu.P. Zaspа // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2019. – № 2 (271). – S. 238–248.
9. Probing the Proton: Electron – Proton Scattering. URL: <https://www2.ph.ed.ac.uk/~vjm/Lectures/.../PPNotes3.pdf>
10. Kolubaev E.A. Osobennosti akusticheskogo izlucheniya pri trenii stali Gadfilda / E.A. Kolubaev, O.V. Sizova, S.A. Pupynin // Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. – 2011. T. 319, № 2. – S. 62–66.

Надійшла/Paper received : 24.08.2022 р.    Надрукована/Printed : 01.11.2022 р.



**КОВАЛЬ Вадим**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ORCID ID: [0000-0002-7427-6507](https://orcid.org/0000-0002-7427-6507)e-mail: [kovalvp1982@gmail.com](mailto:kovalvp1982@gmail.com)**ОРОБЧУК Богдан**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ORCID ID: [0000-0002-6375-2440](https://orcid.org/0000-0002-6375-2440)e-mail: [orobchuk@tu.edu.te.ua](mailto:orobchuk@tu.edu.te.ua)**ОСАДЦА Ярослав**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ORCID ID: [0000-0002-0831-8561](https://orcid.org/0000-0002-0831-8561)e-mail: [osadtca@ukr.net](mailto:osadtca@ukr.net)**КОСТИК Любо**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ORCID ID: [0000-0003-3702-8210](https://orcid.org/0000-0003-3702-8210)e-mail: [kostyklm1968@gmail.com](mailto:kostyklm1968@gmail.com)

## АВТОМАТИЗОВАНА ВИМІРЮВАЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ

В роботі описано розроблену та виготовлену вимірювальну установку для вимірювання електричних характеристик фотоелектричних модулів в залежності від їх температури та спектру випромінювання. З використанням вимірювальної установки досліджено вольт-амперні та вольт-ватні характеристики фотоелектричного модуля в залежності від його температури та спектру випромінювання. Зроблено висновки щодо чутливості фотоелектричного модуля до спектру випромінювання видимого діапазону та спаду енергоефективності із ростом температури.

Ключові слова: вимірювальна установка, фотоелектричний модуль, спектр випромінювання, температура.

KOVAL Vadym, OROBCHUK Bogdan, OSADTSA Yaroslav, KOSTYK Liubov  
Ternopil National Ivan Puluj Technical University

## AUTOMATIC MEASURING DEVICE FOR RESEARCHING THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF PHOTOELECTRIC MODULES

The article describes the developed and manufactured measuring device for measuring the electrical characteristics of photovoltaic modules depending on their temperature and radiation spectrum. The measuring device consists of a hardware and a software part. The basis for the hardware part is a personal computer with a built-in measuring board of a 16-bit analog-to-digital converter. The analog-to-digital converter processes signals from measuring current, voltage and temperature converters. As measuring current converters, shunts made of high-precision non-inductive resistance resistors were used. To measure a voltage greater than 5 V, dividers of the HP-9258 and HP-9251 type with conversion factors of 1:100 and 1:10, respectively, were used. The measuring device controls the load made of non-inductive active elements.

In order to change the spectral composition of radiation, four light filters are used, which transmit light with wavelengths in the red, yellow, green and blue region of the spectrum. After replacing them on the radiation source, the energy of the incident radiation must be set at the level of 1000 W/m<sup>2</sup>.

The software that provides the measurement process is written in the Delphi programming language and works, according to the algorithm, in automatic and manual modes. Using the measuring device the volt-ampere and volt-watt characteristics of the photovoltaic module were obtained depending on its temperature and radiation spectrum. The measuring device works in manual and automatic modes. In manual mode you can measure at least one volt-ampere characteristic, and if necessary, any number of them. In automatic mode, measurements of the current-voltage characteristics of the photovoltaic module are performed as many times as necessary to complete the transition process of heating the photovoltaic module to a certain temperature.

The developed measuring device was used to study the monocrystalline photovoltaic module. The volt-ampere and volt-watt dependences of the photovoltaic module were obtained, depending on its temperature and radiation spectrum. Conclusions were made regarding the sensitivity of the photovoltaic module to the spectrum of radiation in the visible range and the decrease in energy efficiency with increasing temperature.

Keywords: measuring device, photovoltaic module, radiation spectrum, temperature.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

Основною перешкодою до глобального впровадження фотоелектричних модулів на сьогодні є їх висока ціна та низька ефективність, яка залежить від багатьох експлуатаційних факторів, серед яких не останнє місце займають температура фотоелектричного модуля та спектр випромінювання Сонця. Вплив спектру випромінювання Сонця на енергоефективність фотоелектричних модулів особливо відчутний у ранковий та вечірній час та при наявності хмарності, та високої температури – у полудневий час.

У світі постійно ведуться роботи по дослідженню та підвищенню ефективності фотоелектричних перетворювачів та систем живлення на їх основі. Для розрахунку таких систем використовують вольт-амперні та спектральні характеристики фотоелектричних модулів, які надаються виробником в технічній документації. Проте при виготовленні фотоелектричної панелі постає питання енергетичної ефективності не

лише фотоелектричного модуля, але й цілої фотоелектричної панелі з захисним лакованим покриттям чи склінням, яке чинить вплив на оптичні характеристики та температурний режим.

Саме тому актуальним завданням при впровадженні нових матеріалів для створення фотоелектричного перетворювача та захисного покриття є розробка автоматизованих засобів вимірювання його електричних характеристик і встановлення залежності вольт-амперної характеристики від власної температури та спектрального складу падаючого випромінювання.

### Аналіз досліджень та публікацій

Аналіз останніх досліджень та публікацій показав, що вивченню процесів у фотоелектричних модулях при їх нагріванні присвячена значна кількість публікацій, проте вимірювання їх електричних характеристик проводилося, в основному в ручному режимі [1, 2]. Не достатньо вивчена і чутливість фотоелектричних модулів до різного спектру випромінювання, оскільки автори опираються на їх технічні дані із паспортів [3]. Проте у цьому випадку не враховується світлотехнічні характеристики захисного покриття чи скління.

Авторами [4] розроблено вимірювально-обчислювальну систему для визначення в реальних умовах електричних характеристик фотоелектричних модулів методом змінного активного навантаження, яка по суті є портативною вимірювальною установкою і дозволяє оперативно на місці встановлення фотоелектричних панелей провести вимірювання їх вольт-амперних характеристик. При цьому використано метод змінного опору навантаження, коли в якості комутуючих елементів використано реле марки Songle SRD-05VDC-SL-C, які мають гірші за герконові реле дугогасильні властивості, що зменшує максимальну швидкість перемикання навантажувальних опорів. Також вимірювання проведені при енергії падаючого випромінювання, яке не відповідає рівню  $1000 \text{ Вт/м}^2$ .

При імітації випромінювання Сонця дослідники можуть використовувати ксенонові [5] та світлодіодні лампи [6], проте їх спектр випромінювання суттєво відрізняється від сонячного. Лише галогенна лампа (лампа розжарення) має суцільний спектр, який повторює по своїй інтенсивності сонячне випромінювання.

Для нагрівання фотоелектричного модуля, як правило застосовують додаткове джерело теплової енергії. Так автор статті [7] використовує ТЕН. Проте більш зручніше сумістити джерело випромінювання та нагрівання.

В результаті проведеного аналізу літературних джерел виявлено недоліки в конструкції та методиках вимірювань і сформульовано мету даної роботи: розробити та виготовити автоматизовану вимірювальну установку для вимірювань електричних характеристик фотоелектричних модулів (панелей) в залежності від температури та спектрального складу падаючого випромінювання.

### Виклад основного матеріалу

Для проведення автоматизованих вимірювань електричних характеристик фотоелектричних модулів виготовлено вимірювальну установку (рис.1). Вона виконана на базі персонального комп'ютера із вмонтованою платою 14 розрядного АЦП типу SDI-ADC14-32H [8], яка оцифровує дані від датчиків струму, напруги та температури. Змінне активне навантаження, кероване персональним комп'ютером, забезпечує скорочення часу вимірювання та підвищує його точність. Джерелом випромінювання є лампа КГ 500, яка виконує функції як імітатора джерела сонячного випромінювання, так і засобу нагрівання фотоелектричного модуля шляхом теплового випромінювання. Температура фотоелектричного модуля додатково контролюється візуально на мультиметрі або з допомогою пірометра. Для зміни спектрального складу випромінювання використовуються світлофільтри на джерелі випромінювання. Після їх заміни, обов'язково встановлюється енергія падаючого випромінювання на рівні  $1000 \text{ Вт/м}^2$ , як вимагається у державних стандартах. Даний показник контролюється приладом для вимірювання потужності сонячного випромінювання DT-1307.

У якості керованого навантаження використано цифровий (набірний) резистор, опір якого варіюється в широких межах з малим кроком у відповідності із заданим цифровим сигналом. У ньому використано високоточні безіндуктивні резистори, які забезпечують чисто активне навантаження без реактивної складової. Перемикання виконуються за допомогою контактів герконового реле, що забезпечує повну електричну ізоляцію керуючої (цифрової) частини пристрою.

Принцип роботи схеми не складний. У ній використовується набір послідовно включених резисторів, опір яких при переході від одного до іншого змінюється шляхом множення на 2, що відповідає зміні ваги розрядів двійкового керуючого сигналу. Паралельно виводам кожного резистора підключений нормально замкнутий контакт герконового реле, на обмотку якого подається цифровий сигнал відповідного розряду. У стані спокою загальний опір дорівнює нулю. Поява керуючого сигналу, відповідного одиниці молодшого розряду, замикає контакт, першого резистора. Число розрядів і найменший опір в наборі можуть задаватися з урахуванням конкретних вимог. Управління реле здійснюється за допомогою електронних ключів. Подібний варіант схеми можна використовувати в поєднанні з двійковим лічильником, який реалізує рахунок вперед або назад, або з мікроконтролером.

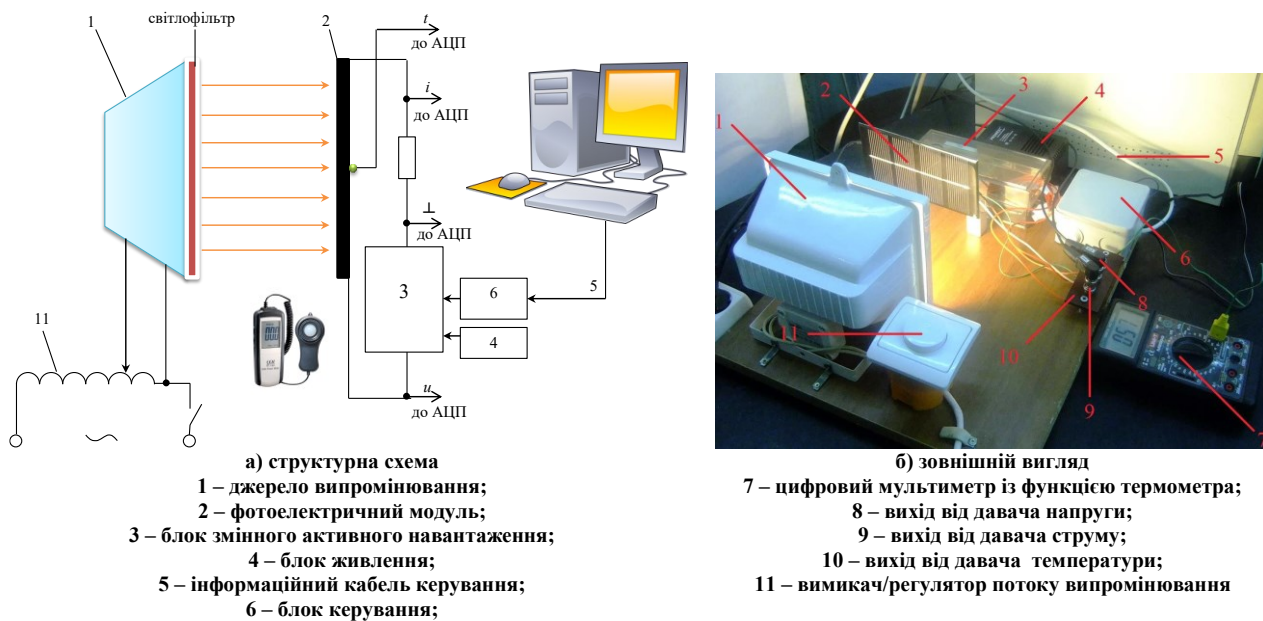


Рис. 1. Вимірювальна установка для дослідження електричних характеристик фотоелектричного модуля

**Вимірювальні перетворювачі струму та напруги.** Для вимірювання часових характеристик фізичних величин в електричних колах з фотоелектричними модулями застосовано вимірювальні перетворювачі струму та напруги. В якості вимірювальних перетворювачів струму використано шунти із високоточних безіндуктивних резисторів (допустиме відхилення величини опору від номіналу 0,1 %) опором  $0,1 \pm 0,0003 \text{ Ом}$  і  $1 \pm 0,008 \text{ Ом}$ , на яких вимірюється спад напруги. Таке значення опорів вибране згідно наступних міркувань. Опір резистора повинен якнайменше впливати на струм досліджуваного електричного кола і разом з тим забезпечити спад напруги на ньому не більше 5 В (згідно вимог щодо вхідної напруги каналів аналого-цифрового перетворювача  $U_{\text{вх}} < \pm 5 \text{ В}$ ). Ці шунти пройшли перевірку в Тернопільському науково-виробничому центрі стандартизації, метрології та сертифікації, що підтверджено свідоцтвами про перевірку № 60 і 61. Таким чином коефіцієнти перетворення вимірювальних перетворювачів струму становлять 1:10 та 1:1.

Так як аналого-цифровий перетворювач може вимірювати значення напруги в межах від -5 В до +5 В, то для вимірювання напруг більших значень використано серійні подільники у вигляді щупів до осцилографа типу HP-9258 та HP-9251 із коефіцієнтами перетворення 1:100 та 1:10 відповідно.

**Програмне забезпечення.** Використання розробленої вимірювальної установки, як автоматизованого вимірювального засобу, в основному базується на використанні спеціалізованого та стандартного програмного забезпечення. Спеціалізованим програмним забезпеченням задається алгоритм вимірювання, згідно з методикою проведення експериментальних досліджень, та обробляються отримані результати. Для проведення власне вимірювань та обробки їх результатів написано спеціалізоване програмне забезпечення. Для графічної та математичної обробки результатів вимірювань використано пакети прикладних програм Microsoft Excel, MathCAD і Advanced Grapher.

Реалізація алгоритму проведення експериментальних досліджень здійснена на основі алгоритмічної мови програмування Delphi. Це обумовлено тим, що вона має набір команд, використання яких дозволяє напряму звертатися до портів персонального комп'ютера. Саме цей факт дуже важливий, оскільки спеціалізоване програмне забезпечення, крім обробки результатів експерименту, передбачає запис і зчитування даних з послідовних та паралельних портів, до яких під'єднано аналого-цифровий перетворювач та електронні комутуючі пристрої.

**Алгоритм роботи програмного забезпечення вимірювальної установки.** Вимірювальна установка може працювати у двох режимах: ручному та автоматичному (рис. 2). Перехід між ними здійснюється після увімкнення живлення схеми вимірювання.

В кожному із режимів здійснюється вимірювання температури фотоелектричного модуля ( $T_{\text{фм}}$ ), максимального струму ( $I_{\text{макс}}$ ) при навантаженні 0 Ом ( $R_{\text{н}} = 0$ ). Воно приймається програмою як базове, відносно якого проводиться відлік величини струму, який генерує фотоелектричний модуль. В кожному із циклів вимірювання здійснюється приріст опору навантаження на 1 Ом, що призводить до зменшення струму та підвищення напруги на навантаженні (фотоелектричному модулі), які також вимірюються в циклі вимірювання. Цей процес здійснюється до того моменту, коли струм навантаження не буде менший чи рівний максимальному струму ( $I_{\text{н}} \geq 0,1 \cdot I_{\text{макс}}$ ). Така умова прийнята на основі аналізу вольт-амперних характеристик фотоелектричного модуля. Тобто струм, при якому із фотоелектричного модуля знімається максимальна потужність, знаходиться в межах від  $I_{\text{макс}}$  до  $0,1 \cdot I_{\text{макс}}$ . Таким чином знімається одна вольт-амперна характеристика.

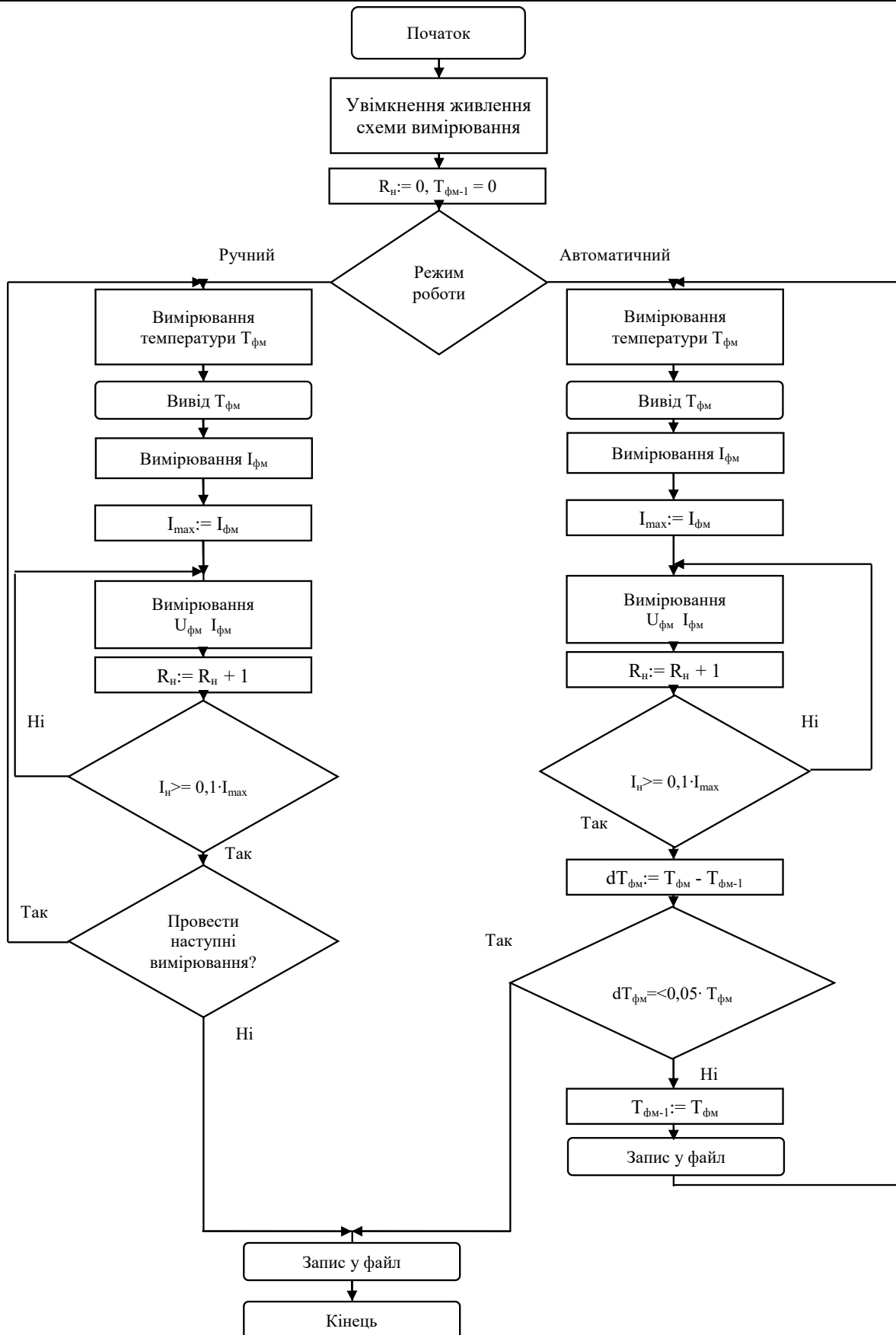


Рис. 2. Алгоритм роботи програмного забезпечення

У ручному режимі можна обмежитися однією вольт-амперною характеристикою, а можна зняти ще довільну їх кількість. Цю можливість дає оператор вибору «Провести наступні вимірювання?».

В автоматичному режимі вимірювання вольт-амперних характеристик фотоелектричного модуля виконуються стільки разів скільки необхідно для того щоб закінчився перехідний процес нагрівання

фотоелектричного модуля. Цю функцію виконує оператор « $dT_{\text{фм}} \leq 0,05 \cdot T_{\text{фм}}$ ». Тобто коли різниця температур між вимірюваннями буде меншою чи рівною 5 % від початкової температури, вимірювання припиняться. Кількість вимірювань можна регулювати встановивши часову затримку після оператора циклу.

Після закінчення всіх необхідних вимірювань, їх результати записуються у файл для подальшої обробки в математичних та табличних редакторах.

Розроблену вимірювальну установку використано для дослідження монокристалічного фотоелектричного модуля, який зображено на рис. 1. Отримано залежності струму та потужності, які генерує фотоелектричний модуль, від напруги при різних його температурах (рис. 3) та спектрі випромінювання (рис. 4). При проведенні вимірювань потужність випромінювання на поверхні фотоелектричного модуля контролювалася на рівні 1000 Вт/м<sup>2</sup>. Спектр випромінювання змінювався шляхом зміни світлофільтрів. Температура фіксувалася за допомогою термопари та контролювалася пірометром.

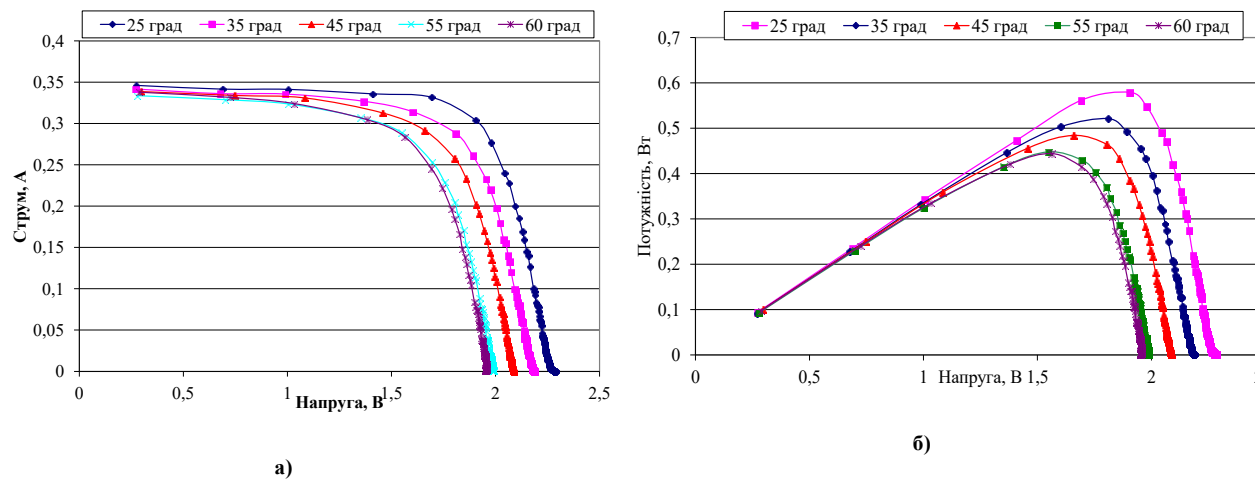


Рис. 3. Залежність струму (а) та потужності (б), які генерує фотоелектричний модуль, від напруги при зміні температури від 25 до 60 °C

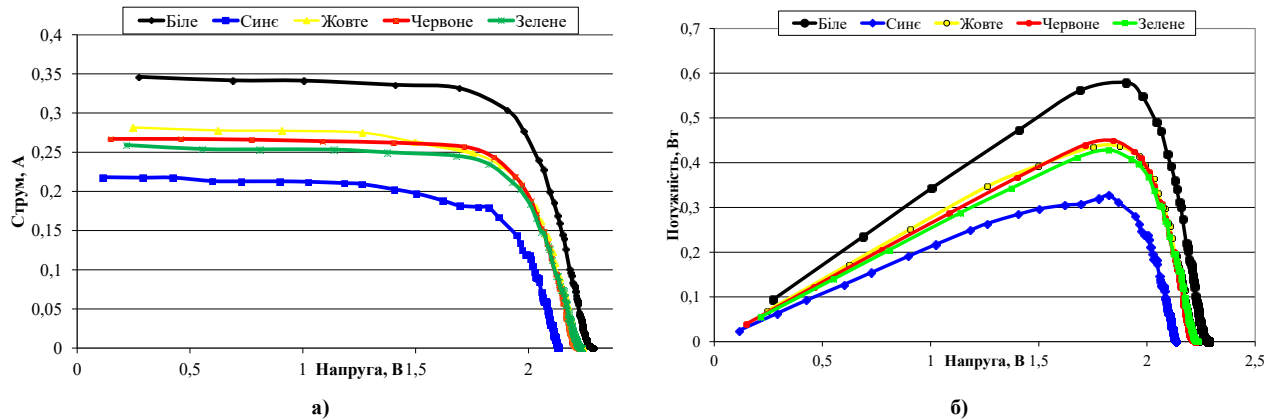


Рис. 4. Залежність струму (а) та потужності (б), які генерує фотоелектричний модуль, від напруги при зміні спектру випромінювання

### Висновки

1. Розроблено та виготовлено вимірювальну установку на основі персонального комп'ютера із використанням 16-ти розрядного модуля аналого-цифрового перетворювача, яка здійснює вимірювання електричних характеристик фотоелектричних модулів як в автоматичному так і в ручному режимах.

2. Вимірювальна установка дозволяє проводити дослідження при наявності додаткового скління фотоелектричних модулів, лакових покриттів та інших оптично прозорих захисних середовищ.

3. Так як у розробленій вимірювальній установці для зміни спектрального складу випромінювання використовуються світлофільтри, то вимірювання спектральної чутливості фотоелектричного модуля і захисного скла здійснюється лише для декількох довжин хвиль.

4. Для керування роботою вимірювальної установки та обробки експериментальних даних написано програмне забезпечення, яке дало змогу автоматизувати процес вимірювань і має гнучку структуру для переорієнтації алгоритму відповідно зміни методики вимірювання, а також дозволяє відображати і зберігати великі масиви цифрових даних.

5. Перевагою розробленої установки є відсутність додаткових джерел нагрівання фотоелектричного модуля. Його температура змінюється шляхом нагрівання від випромінювання джерела, що імітує випромінювання Сонця.

6. На основі одержаних результатів вимірювань характеристик монокристалічного фотоелектричного модуля можна стверджувати, що при зростанні його температури від 25 до 60 °C спостерігається зменшення максимуму потужності на 25 %, а сині лінії спектру поглинаються в меншій мірі ніж жовті, зелені та червоні.

7. На основі аналізу результатів експериментальних досліджень із використанням розробленої вимірювальної установки встановлено перспективні напрями подальшої роботи з метою підвищення точності та якості її роботи. Отож, слід розробити джерело живлення стабілізованої постійної напруги для джерела випромінювання, щоб уникнути пульсацій потоку випромінювання. Також планується провести роботу в напрямку дослідження впливу світлопрозорих захисних покриттів при різному куті падіння випромінювання на енергоефективність фотоелектричної панелі.

### Література

1. Priyanka Singh. Temperature dependence of I-V characteristics and performance parameters of silicon solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2008. Vol. 92. P. 1611–1616.
2. Cuce E., Cuce P.M. An experimental analysis of illumination intensity and temperature dependency of photovoltaic cell parameters. *Applied Energy*. 2013. Vol. 111. P. 374–382.
3. Libra M., Poulek V., Kouřim P. Temperature changes of I-V characteristics of photovoltaic cells as a consequence of the Fermi energy level shift. *Res. Agr. Eng.* 2017. Vol. 63. P. 10–15.
4. Гаєвський О. Ю. Система вимірювання параметрів фотоелектричних модулів в реальних умовах експлуатації / О. Ю. Гаєвський, В. Ю. Іванчук, І. О. Корнієнко // *Відновлювана енергетика*. - 2019. - № 2. - С. 32-39.
5. Андрійчук В. А. Система автономного живлення зовнішнього освітлення / В. А. Андрійчук, Я. О. Філюк // *Світлотехніка та електроенергетика*. - 2017. - № 1. - С. 17-22.
6. Іванов В.С. Визначення параметрів сонячної комірки при освітленні штучним джерелом світла / В.С.Іванов, А.Ф. Дяденчук // *Наукові записки молодих учених*. – 2021. – № 7. – С. 64-68.
7. Gedik E. Experimental investigation of module temperature effect on photovoltaic panels efficiency. *J. Polytech.* 2016. Vol. 19(194). P. 569-576.
8. Тарасенко М.Г. Віртуальний вимірювальний комплекс для дослідження перехідних процесів в електричних колах довільної конфігурації / М.Г. Тарасенко, В.П. Коваль // *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. – 2006. – Т. 8, № 1. – С. 84–91.

### References

1. Priyanka Singh. Temperature dependence of I-V characteristics and performance parameters of silicon solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2008. Vol. 92. P. 1611–1616.
2. Cuce E., Cuce P.M. An experimental analysis of illumination intensity and temperature dependency of photovoltaic cell parameters. *Applied Energy*. 2013. Vol. 111. P. 374–382.
3. Libra M., Poulek V., Kouřim P. Temperature changes of I-V characteristics of photovoltaic cells as a consequence of the Fermi energy level shift. *Res. Agr. Eng.* 2017. Vol. 63. P. 10–15.
4. Haievskiy O. Yu. Systema vymiriuvannya parametriv fotoelektrychnykh moduliv v realnykh umovakh ekspluatatsii / O. Yu. Haievskiy, V. Yu. Ivanchuk, I. O. Kornienko // *Vidnovliuvana enerhetyka*. - 2019. - № 2. - S. 32-39.
5. Andriichuk V. A. Systema avtonomnoho zhyvlenня zovnishnoho osvittlenня / V. A. Andriichuk, Ya. O. Filiuk // *Svitlotekhnika ta elektroenerhetyka*. - 2017. - № 1. - S. 17-22.
6. Ivanov V.S. Vyznachennia parametriv soniachnoi komirky pry osvittleni shtuchnym dzherelom svitla / V.S.Ivanov, A.F. Diadenchuk // *Naukovi zapysky molodykh uchenykh*. – 2021. – № 7. – S. 64-68.
7. Gedik E. Experimental investigation of module temperature effect on photovoltaic panels efficiency. *J. Polytech.* 2016. Vol. 19(194). P. 569-576.
8. Tarasenko M.H. Virtualnyi vymiriuvalniy kompleks dlia doslidzhennia perekhidnykh protsesiv v elektrychnykh kolakh dovilnoi konfiguratcii / M.H. Tarasenko, V.P. Koval // *Reiestratsiia, zberihannia i obrobka danykh*. – 2006. – Т. 8, № 1. – С. 84–91.

Надійшла/Paper received : 19.08.2022 р.    Надрукована/Printed : 01.11.2022 р.



КРИВЕНЧУК Юрій

Національний університет "Львівська політехніка"

ORCID ID: 0000-0002-2504-5833

e-mail: [Yurii.P.Kryvenchuk@lpnu.ua](mailto:Yurii.P.Kryvenchuk@lpnu.ua)

ВАСИЛИК Ростислав

Національний університет "Львівська політехніка"

e-mail: [rostyslav.vasylyk.mknssh.2021@lpnu.ua](mailto:rostyslav.vasylyk.mknssh.2021@lpnu.ua)

## РОЗРОБЛЕННЯ ІНТЕРАКТИВНОГО ГРАФІЧНОГО ЗАСТОСУНКУ КОЛЬОРИЗАЦІЇ ЗОБРАЖЕННЯ

В роботі наведено результати розроблення інтерактивного графічного застосунку кольоризації зображення, мета якого покращення якості та збільшення функціоналу даного типу застосунків, їх поширення та впровадження у відповідні сфери в Україні. Виділено та описано такі основні етапи: перетворення текстових фраз у кольорові палітри, визначення ознак, кольоризація зображення за допомогою згенерованих палітр. Після проведення аналізу результатів було виявлено, що розроблення інтерактивного графічного застосунку кольоризації зображення є актуальним та доцільним завданням на сьогодні, а найбільш ефективним інструментом для цього є використання таких математичних методів, як K-means, методів глибокого навчання та згорткових нейронних мереж.

Ключові слова: кольоризація зображення, згорткові нейронні мережі, графічні редактори.

KRYVENCHUK Yurii, VASYLYK Rostyslav

Lviv Polytechnic National University

## INTERACTIVE GRAPHIC APPLICATION FOR IMAGE COLORATION

Nowadays we have thousands of products related to image adjusting adding filters, blurring, removing noise, etc. Also, we have applications related to image coloration, however, their functionality is quite narrow. With the help of the interactive graphic application for image coloration, it would be easier to adjust, particularly recolor, fully recolor, and even color black and white images from scratch. The application considers users' choices by interactive instruments: texting the preferred color by some phrase "once in a blue moon", choosing colors with a color picker, choosing a palette, choosing a palette with random colors, and adjusting a palette. All these instruments are applied to both color and black & white images. An example of using this application is in urban planning or design, where it is quite taught work for architects to make up with the idea of a new color palette for the particular project. For such cases, we have provided functionality for fully coloring some raw project in form of black & white image. The paper has the description and the results of the creation of a graphic application, the basis of which are: windows graphical user interface, mathematical clustering method K-means, and a convolutional neural network. Using of clustering method K-means deserves a separate section, as there was used not the primary method, but modified - the applying of k-means to colors of an image, each iteration of the algorithm touches every pixel in the image, it is expensive for volumetric images, thus after analyzing different approaches, I decided to choose the so-called weighted K-means approach, in which each point C represents a certain number of pixels, the array of C point is called bins. In addition to the clustering method, the system uses the recurrent neural network to process text values or generate colors. As the result, user can connect to the system through a simple windows graphical interface that allows him to upload the image for further processing. The practical value of this work is the developed high-quality application which is ready for use and implementation in the relevant fields.

Keywords: image coloration, convolutional neural networks, graphical editors.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

Існує доволі багато програм з різними способами кольоризації зображень, проте всі вони не універсальні, також, дані застосунки не передбачають кольоризації за допомогою текстових фраз, що значно спрощує використання програми.

Для вирішення описаної проблеми пропонується застосунок, який враховує вибір користувача за допомогою інтерактивних інструментів: текстове повідомлення бажаного кольору за допомогою інформативної фрази (напр. «жовтневий дощ»), вибір кольорів за допомогою палітри кольорів, вибір палітри, вибір палітри з випадковими кольорами, налаштування палітри.

Прикладом доцільного використання даної розробки є моделювання міського планування чи дизайну, де архітектури витрачають додатковий час, щоб згенерувати нову ідею колірної палітри для конкретного проекту. Для даних випадків передбачена також функція повного фарбування деякого необробленого проекту у вигляді чорно-білого зображення.

### Аналіз досліджень та публікацій

Запропонована в [1] робота заснована на розфарбовуванні ескізу. У даній статті пропонується напівавтоматична система навчання для розфарбовування ескізів за допомогою певного кольору, текстури та градієнта. Робота складається з двох етапів. На першому етапі модель вгадує кольорові області та розливає різноманітні кольори по ескізу, щоб отримати кольорову чернетку. На другому етапі вдосконалення модель виявляє неприродні кольори та артефакти, намагається виправити та вдосконалити результат. Порівняно з існуючими підходами, цей двоетапний дизайн ефективно розділяє складне завдання розфарбовування на дві простіші та більш зрозумілі підзадачі. Це полегшує навчання та підвищує якість



розфарбовування. Модель усуває такі артефакти, як: розмиття акварелі, спотворення кольорів, тьмяні текстури.

У публікації [2] пропонується нова технологія забарвлення, яка поширює колір на області, демонструючи безперервність візерунка, а також безперервність інтенсивності. Запропонований метод ефективно працює при розфарбовуванні чорно-білої манги, яка містить інтенсивну кількість штрихів, штрихування, напівтонування та растра. Такі тонкі деталі та розриви інтенсивності створюють багато труднощів для методів забарвлення на основі інтенсивності. Після того, як користувач накреслює малюнок, для вимірювання безперервності шаблону застосовується локальна статистична характеристика шаблону, отримана за допомогою вейвлет-фільтрів Габора. Області з відкритими межами або кілька роз'єднаних областей із подібними візерунками можна сегментувати однією дією. За допомогою сегментованих областей можна застосувати різні методи розфарбовування, щоб замінити кольори, розфарбувати зі збереженням обведення або навіть перетворити візерунок на затінення.

У роботі [3] представляється новий інтерактивний інструмент для малювання мультфільмів і анімацій. Його головна перевага - простота та гнучкість. Програма не покладається на специфічні особливості стилю, такі як однорідні області чи безперервність візерунка, але все ще пропонує порівнянню або навіть меншу ручну роботу для широкого класу стилів малювання. Крім того, програма не чутлива до неточного розміщення кольорових мазків, що робить малювання менш виснажливим і значно економить час у контекстній анімації мультфільму. LazyBrush впливає з аналізу вимог, проведеного професійними ілюстраторами чорнила та фарби, які створили список корисних функцій ідеального інструменту для малювання. У цей список входить система оптимізації, що веде до варіанту енергії Поттса з кількома цікавими теоретичними властивостями. Також показується як його ефективно мінімізувати, і демонструється його корисність у різних практичних сценаріях, включаючи конвеєр виробництва чорнила та фарби.

Автори [4] намагались вирішити наступну проблему – створення цифрового мистецтва розфарбовування та штрихування часто займають багато часу і виконуються за тими самими загальними шаблонами. Рішення для автоматичного розфарбовування необробленого штрихового зображення мало б багато практичних застосувань. Саме тому пропонується програма, що використовує дві мережі в тандемі: мережу передбачення кольору, засновану лише на контурах, і мережу затінення, що обумовлюється як контурами, так і кольоровою схемою. Представляються методи обробки для обмеження інформації, що передається в колірній схемі.

У дослідженні [5] пропонується підхід глибокого навчання для розфарбовування зображень під керуванням користувача. Система безпосередньо відображає зображення в градаціях сірого разом із розрідженими локальними «підказками» користувача для розфарбування виходу за допомогою згорткової нейронної мережі (CNN). Замість того, щоб використовувати правила, визначені вручну, мережа розповсюджує редагування користувача, поєднуючи підказки низького рівня разом із семантичною інформацією високого рівня, отриманою з великомасштабних даних. Система тренується на мільйонах зображень із симуляцією введення користувачами. Щоб скерувати користувача до ефективного вибору вхідних даних, система рекомендує ймовірні кольори на основі вхідного зображення та поточних даних користувача. Кольоризація виконується за один прохід, що дозволяє використовувати його в режимі реального часу.

У дослідженні [6] демонструється система синтезу зображень на основі ескізу, яка дозволяє користувачам писати на ескізі, щоб вказати бажаний колір для об'єктів. Тоді мережа може генерувати переконливі зображення, які задовольняють обмеження користувача щодо кольору та ескізу. Мережа є прямою, що дозволяє користувачам бачити ефект своїх змін у режимі реального часу. Порівнюється з нещодавною роботою над синтезом ескізу до зображення та показується, що розглянутий підхід створює більш реалістичні, різноманітні та контрольовані результати. Архітектура також ефективна для керованого користувачем фарбування зображень у градаціях сірого.

Дослідження [7] пропонує модель під назвою автомаляр, яка може автоматично генерувати сумісні кольори за ескізом. Відстань Вассерштейна використовується при навчанні cGAN, щоб подолати колапс моделі та забезпечити набагато кращу її конвергенцію. Нова модель не тільки здатна розфарбовувати намальований вручну ескіз сумісними кольорами, але також дозволяє користувачам вказувати бажані кольори. Експериментальні результати на різних наборах ескізних даних показують, що автоматичний малюнок працює краще, ніж інші існуючі методи «зображення в зображення».

Автори дослідження [8] інтегрують умовну структуру з критеріями WGAN-GP, а також втрати сприйняття, щоб мати змогу надійно навчити глибоку мережу, яка робить синтезовані зображення більш природними та реальними. Автори також представляють мережу локальних функцій, яка не залежить від синтетичних даних. Завдяки GAN, обумовленим функціями такої мережі, помітно збільшуються можливості узагальнення порівняно з «дикими» штриховими зображеннями. Крім того, збираються два набори даних, які забезпечують високоякісні барвисті ілюстрації та автентичні штрихові зображення для навчання та порівняльного аналізу. За допомогою запропонованої моделі, навченої на даному наборі ілюстраційних даних, демонструється, що зображення, синтезовані за допомогою представленого підходу, значно реалістичніші та точніші, ніж альтернативні підходи.

У дослідженні [9] представляється альтернатива: кондиціонування низьковимірної структурованої інформації, яка може бути автоматично витягнута з вхідних даних без потреби в людських анотаторах. Зокрема, пропонується Palette-conditioned Generative Adversarial Network (Pal-GAN), архітектурно-агностичну модель, яка обумовлює як колірну палітру, так і маску сегментації для високоякісного синтезу зображення. Показуються покращення показників умовної узгодженості, перетину через об'єднання та початкової відстані Фреше. Крім того, ми показується, що вибірка кольорових палітр значно змінює стиль створених зображень.

Автори [10] пропонують новий глибокий метод розфарбовування зображення на основі прикладів, який називається мережею пірамід щільного кодування. У дослідженні визначається розфарбовування як багаточленна проблема класифікації. Враховуючи зображення в градаціях сірого та еталонне зображення, запропонована мережа використовує великомасштабні дані, а потім прогнозує кольори, аналізуючи розподіл кольорів еталонного зображення. Структура мережі – пірамідна, це для того, щоб використовувати притаманну багатомасштабну пірамідальну ієрархію представлень кольорів. Між двома суміжними рівнями пропонується ієрархічний фільтр декодер-кодер для передачі розподілу кольорів з нижчого рівня на вищий, щоб у процесі розфарбовування враховувати як семантичну інформацію, так і дрібні деталі. Експериментальні результати показують, що мережа здатна створювати барвисті, семантично правильні та візуально приємні кольорові зображення. Крім того, на відміну від повністю автоматичного розфарбовування, яке створює зображення фіксованого кольору, еталонне зображення мережі є гнучким. Для розфарбовування можна використовувати як природні зображення, так і прості кольорові палітри.

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є створення зручного інтерактивного та якісного графічного застосунку кольоризації зображення з можливістю модифікації як кольорових так і чорно-білих зображень.

### Виклад основного матеріалу

#### Огляд наборів даних

Проаналізувавши роботи у численних джерелах, я зробив висновок, що необхідно підібрати кілька наборів даних для моделі. Необхідно було підібрати різні набори даних: один для тренування генерування палітр з тексту, другий для розфарбовування зображення за допомогою згенерованих палітр. У таблиці 1 наведено основні характеристики датасетів з різновидами палітр.

Таблиця 1 [1]

Огляд наборів даних різновидів палітр

База даних	Кількість прикладів	Кількість унікальних слів	Особливості
PAT Dataset	10183	4312	Слова відрізняються залежно від їхнього зв'язку з кольорами
RAL Standard Color Table	214	214	Слова містять переклади
Java Palette Database	1070	1070	Доступні два механізми підказки: за семантичною спорідненістю та за колірною близькістю.

Другий набір даних – зображення, які модель повинна розмальовувати. У таблиці 2 наведено основні характеристики датасетів з різновидами зображень.

Таблиця 2 [2]

Огляд наборів даних різновидів зображень

База даних	Кількість прикладів	Кількість унікальних типів	Особливості
Bird256	49829	500	Містить зображення птахів
ImageNet	14000000	20000+	Анотовані вручну зображення

### Функціональні етапи роботи застосунку

Функціональні етапи роботи застосунку поділяються на три основні етапи: Визначення основних кольорів зображення (палітр); Генерація палітри кольорів з тексту; Кольоризація зображення за допомогою палітр.

*Визначення основних кольорів зображення.* Визначення основних кольорів зображення є доволі складним завданням через велике розсіювання та змішування кольорів. Дане завдання можна визначити за допомогою відомого математичного методу кластеризації K-means – потрібно визначити цільове число k, яке вказує на кількість центротидів, що потрібні в наборі даних. Центроїд – це уявне або реальне

розташування, яке представляє центр кластера. Кожна точка даних розподіляється для кожного з кластерів шляхом зменшення внутрішньокластерної суми квадратів.

Принцип роботи даного етапу наведено на рис. 1.

Іншими словами, алгоритм К-середніх визначає  $k$  кількість центрів, а потім призначає кожному точці даних для найближчого кластера, зберігаючи центроїди якомога меншими. Ціль використання даного методу у визначенні основних кольорів зображення – обрати сет з  $k$  кластерів, які можуть бути використані як контрольні точки під час модифікації зображення. Для цього виділяється  $N$  кольорів (у даному прикладі 5), які і є кластерами  $K$ .

*Генерація палітри кольорів з тексту.*

Даний етап передбачає навчання моделі з використанням датасету, що містить палітри з їхніми назвами. Необхідно зробити так, щоб при введенні тексту застосунок (а точніше модель) визначав палітру кольорів, яка найбільш підходить до заданої фрази. Під час навчання генератор №1 вчиться створювати палітру кольорів із заданим набором умовних змінних, оброблених із вхідного тексту  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ .

*Кольоризація зображення за допомогою кольорових палітр.* Для кольоризації зображення також найоптимальніше використовувати згортовку нейронну мережу. Метою цієї мережі є автоматичне розфарбовування зображення в градаціях сірого, керуючись палітрою кольорів як змінною кондиціонування. Вхідними даними є зображення в градаціях сірого, що представляє освітленість у просторі, і колірна палітра, що складається з п'яти кластерів  $K$  (кольорів). Вихідні дані є передбачуваними кольоровими каналами зображення. Генератор №2 навчається передбачати розфарбований вихід зображення у градаціях сірого, заданого палітрою  $p$ , отриманої з основного зображення. Під час тестування навчені генератори №1 і №2 використовуються для створення кольорової палітри з заданого тексту, а потім розфарбовують зображення сірого відтінку, що відображає згенеровану палітру.

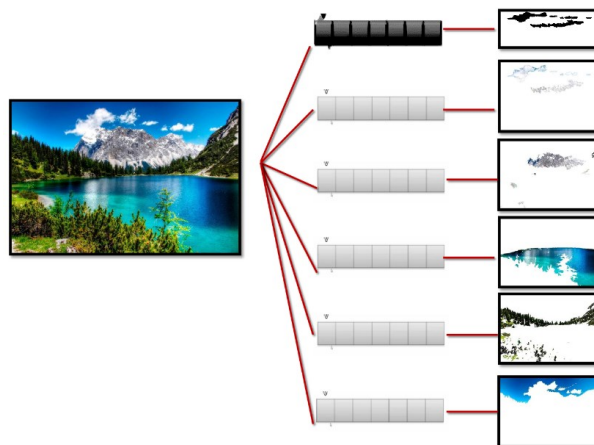


Рис. 1. Принцип роботи визначення основних кольорів зображення

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

В результаті проведеної роботи було розроблено інтерактивний графічний застосунок кольоризації зображення. Дана розробка передбачає кольоризацію за допомогою текстових фраз, що значно спрощує використання програми. Застосунок враховує вибір користувача за допомогою інтерактивних інструментів: текстове повідомлення бажаного кольору за допомогою інформативної фрази (напр. «жовтневий дощ»), вибір кольорів за допомогою палітри кольорів, вибір палітри, вибір палітри з випадковими кольорами, налаштування палітри.

Точність розробленої моделі перетворення пелетів становить 82%, що є хорошим показником, проте його можна покращити, збільшивши набір даних палітр.

Функціональні етапи розробки скомпоновані в одному застосунку зі зручним графічним інтерфейсом, у якому користувач може завантажити чорно-біле або кольорове зображення, визначити його кольори, модифікувати кольори зображення та зберегти його, або ж зберегти палітру для подальшої роботи.

Результати роботи можуть бути спрямовані на моделювання міського планування чи дизайну, де архітектури витрачають додатковий час, щоб генерувати нові ідеї кольорових палітр для різних проектів.

### References

1. Jeong Y., Lymin Zhang, Chengze Li, Tien-Tsin Wong, Yi Ji, and Chunping Liu. 2018. Two-stage sketch colorization. ACM Trans. Graph. 37, 6, vol. 261 (2018), 14 p. doi: <https://doi.org/10.1145/3272127.3275090>.
2. Yingge Qu, Tien-Tsin Wong, and Pheng-Ann Heng. 2006. Manga colorization. ACM Trans. Graph. 25, 3 (2006), 1214–1220. doi: <https://doi.org/10.1145/1141911.1142017>.
3. Sýkora D., Dingliana J. and Collins S. (2009), LazyBrush: Flexible Painting Tool for Hand-drawn Cartoons. Computer Graphics Forum, вип. 28: 599-608. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2009.01400.x>.
4. Frans K., Ho J., Chen X., Abbeel P., Schulman J. arXiv preprint, 2017. 309, 2017. Outline colorization through tandem adversarial networks.
5. Richard Zhang, Jun-Yan Zhu, Phillip Isola, Xinyang Geng, Angela S. Lin, Tianhe Yu, and Alexei A. Efros. 2017. Real-time user-guided image colorization with learned deep priors. ACM Trans. Graph. 36, 4, vol. 119 (2017), 11 p. doi: <https://doi.org/10.1145/3072959.3073703>.
6. Sangkloy, Patsorn, Jingwan Lu, Chen Fang, Fisher Yu and James Hays. "Scribbler: Controlling Deep Image Synthesis with Sketch and Color." 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (2017): 6836-6845.

Надійшла/Paper received : 22.09.2022 р. Надрукована/Printed : 01.11.2022 р.

**КУДЛАЙ Святослав**

Національний технічний університет України  
«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID ID: [0000-0003-3972-405X](https://orcid.org/0000-0003-3972-405X)  
e-mail: [slava-16@ukr.net](mailto:slava-16@ukr.net)

**БОНДАРЕНКО Наталія**

Національний технічний університет України  
«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID ID: [0000-0002-9237-8187](https://orcid.org/0000-0002-9237-8187)  
e-mail: [nalbondarenko@gmail.com](mailto:nalbondarenko@gmail.com)

**БОНДАРЕНКО Віктор**

Національний технічний університет України  
«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID: [0000-0003-1663-4799](https://orcid.org/0000-0003-1663-4799)  
e-mail: [vicbondarenko@gmail.com](mailto:vicbondarenko@gmail.com)

## ПОБУДОВА ТА ВЕРІФІКАЦІЯ МОДЕЛІ ЦИФРОВОГО ЕКВАЛАЙЗЕРА

Запропоновано підхід до розробки еквалайзера шляхом побудови його математичної моделі, завдяки якій всі операції, в тому числі розрахунок ядра еквалайзера та обробка сигналу, здійснюються єдиним мікроконтролером. Розрахунок ядра зводиться до багаторазового виконання відносно простих операцій, що дозволяє зекономити час та програмну пам'ять. Еквалайзер забезпечує задовільну якість обробки при невеликому порядку фільтра, в якості якого обрано цифровий фільтр з кінцевою імпульсною характеристикою через його лінійну ФЧХ, гарантію стабільності при складній АЧХ, а також властиві йому асоціативність та лінійність, що дозволяє легко відтворити складну АЧХ. Схемо технічна реалізація базується на паралельних смугових фільтрах та фільтрах низьких частот з наступним складанням відфільтрованих та підсилених сигналів. Модель еквалайзера і ядро фільтра низьких частот верифіковані в середовищі GNU Octave. Змодельоване ядро еквалайзера повністю відповідає заданій АЧХ, що підтверджує працездатність моделі.

Ключові слова: еквалайзер, ЦОС, КІХ-фільтр, згортка, Фур'є-образ, модель, GNU Octave

KUDLAI Vladyslav, BONDARENKO Nataliia, BONDARENKO Viktor  
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

## CONSTRUCTION AND VERIFICATION OF A DIGITAL EQUALIZER MODEL

An approach to the development of an equalizer by building its mathematical model based on a microcontroller is proposed. All operations, including signal processing and equalizer kernel calculation, are performed by a single microcontroller. Thanks to the created mathematical model of the equalizer, the calculation of the kernel is reduced to multiple uses of relatively simple operations, which saves time and memory of the program. The equalizer provides satisfactory processing quality at a small filter order which is selected as a digital filter with final impulse response (FIR) because of its linear phase-frequency response, a guarantee of stability at the complex amplitude-frequency response, and also its associativity and linearity allowing it easily reproduce a complex amplitude-frequency response. Schematic implementation is based on parallel bandpass filters and a low-pass filter followed by adding filtered and amplified signals. It is the distributive property of the FIR filter that makes it possible to obtain a new kernel that includes all the amplified ranges by the sum of the corresponding kernel elements, instead of adding amplified ranges. The associativity and linearity of the FIR filter gives the opportunity to easily implement different types of filters on the basis of a low-pass filter, for the calculation of which the cardinal sine function is used together with the window function, which in combination gives qualitative frequency characteristics. The low-pass filter kernel and equalizer model are verified in the GNU Octave environment, which is an open-source analogue of Matlab. The model is checked by setting the frequency response of the test equalizer, and for individual filters the allowable width of the transition band and the maximum value of pulsation in the suppression band are set. The low-pass filter kernel is created with an arbitrary cutoff frequency, and the filter consists of 129 elements, which were multiplied by the Kaiser window with a value of parameter equal to 4.5. As a result of verification of the mathematical model in the GNU Octave environment, the width of the transition band and the maximum value of pulsation in the suppression band meet the specified conditions. The simulated equalizer kernel fully corresponds to the specified frequency response. Verification of the mathematical model confirmed its efficiency and compliance of the obtained characteristics of the equalizer with the specified requirements.

Keywords: equalizer; DSP; FIR filter; convolution; Fourier image; model; GNU Octave.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

В роботі пропонується підхід до розробки еквалайзера шляхом побудови його математичної моделі, яка дає змогу мікроконтролеру на основі заданої амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) розрахувати коефіцієнти ядра еквалайзера. При розрахунку ядра з нуля на мікроконтролері слід врахувати як його швидкодію, так і наявну для зберігання програми пам'ять. Також при самій обробці сигналу, враховуючи швидкодію мікроконтролера, ядро має забезпечити задовільний результат фільтрації при обмеженій кількості коефіцієнтів. Отже метою роботи є розробка математичної моделі еквалайзера, що дає змогу мікроконтролеру на основі заданої АЧХ розрахувати коефіцієнти ядра еквалайзера і здійснювати обробку сигналу з врахуванням обмежень на пам'ять і швидкодію мікроконтролера.

## 1. Проектування еквалайзера

Еквалайзер – радіоелектронний пристрій або комп'ютерна програма в складі висококласних стереофонічних комплексів (High Fidelity – Hi-Fi), що дозволяють коригувати амплітуду сигналу в різних діапазонах частот залежно від бажаних частотних характеристик [1]. Тобто, для кожної смуги частот, є свій коефіцієнт підсилення.

Типова реалізація еквалайзера базується на фільтрах частот, що використовуються для відсікання непотрібних складових сигналу, таких як гармоніки з зазначеними частотами. Із всього різноманіття фільтрів (низьких частот (ФНЧ), високих частот (ФВЧ), смугових (СФ), режекторних (РФ), всепропускних (ВФ) [2]) для створення еквалайзера використовуються СФ та ФНЧ.

Типову реалізацію еквалайзера з паралельним з'єднанням фільтрів та подальшим об'єднанням усіх складових в єдиний сигнал показано на рис. 1 [3]. Кожному діапазону частот, а саме  $[0; \omega_1]$  та  $[\omega_{i1}; \omega_{i2}]$ ,  $i = 2, 4$  відповідає свій

коефіцієнт підсилення  $K_i$ ,  $i = \overline{1, 4}$ . Для

встановлення цього підсилення кожний діапазон виділяється з загального сигналу і вже підсилений у діапазоні сигнал додається в загальний вихідний сигнал  $S_{out}$ .

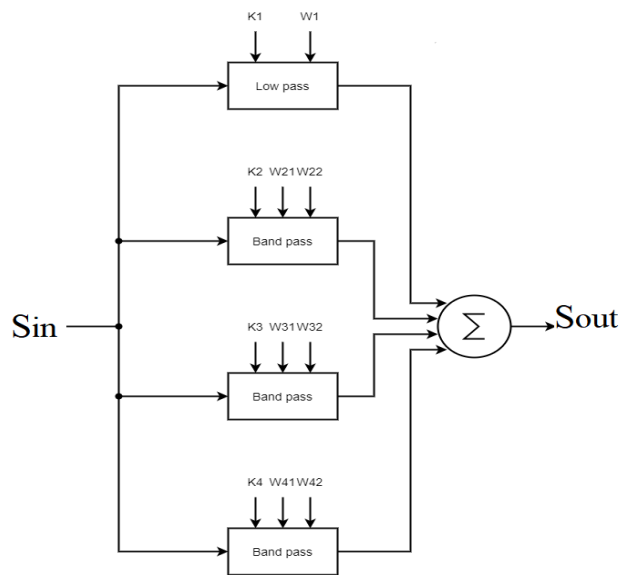


Рис. 1. Функціональна схема еквалайзера

## Цифрові фільтри

Цифрові фільтри, з розвитком цифрової та обчислювальної техніки, набули широкого застосування, адже їх реалізація базується на типових для цифрових пристроїв операціях [4, 5]. Вимоги до фільтрів: відносно легкий розрахунок ядра, використовуючи якомога більше одноманітних операцій, та задовільний результат фільтрації при обмеженій кількості коефіцієнтів ядра.

Цифрові фільтри поділяються на два типи:

- з кінцевою імпульсною характеристикою (КИХ);
- з нескінченною імпульсною характеристикою (НІХ).

Також, НІХ фільтри називають рекурсивними. КІХ фільтри ж, в свою чергу, можуть бути як рекурсивними, так і нерекурсивними. Проте на практиці, зазвичай використовуються нерекурсивні, які ще називають згортковими фільтрами. Такі назви пов'язані з принципом роботи фільтрів та виявляють суттєву різницю між ними.

КИХ фільтр є класичним інструментом в цифровій обробці сигналів (ЦОС), що описується виразом наступного вигляду [6]:

$$y(k) = \sum_{i=0}^m b_i x_{k-i}, \quad (1)$$

де  $y(k)$  – вихідне значення,  $x_{k-i}$  – вхідні відліки,  $b_i$  – коефіцієнти ядра фільтра.

Схематично КІХ фільтр реалізується за допомогою блоків:

- затримки;
- множення на константу;
- додавання сигналів.

Фільтрація сигналу в таких фільтрах виконується шляхом згортки вхідного сигналу з ядром фільтра. Ключовою властивістю згортки є те, що згортка двох сигналів еквівалентна перемноженню їх Фур'є образів. В якості ядра фільтра виступає сигнал (послідовність чисел) кінцевої довжини, який має бажану АЧХ.

НІХ фільтр схожий на КІХ фільтр, проте має зворотній зв'язок. Саме зворотній зв'язок забезпечує нескінчену імпульсну характеристику, оскільки в зворотному зв'язку зберігається імпульсна характеристика з попередніх обчислень. В рівнянні (2) зворотній зв'язок реалізується згортою попередніх вихідних значень з послідовністю  $a_j$ ,  $j = \overline{1, n}$ :

$$y(k) = \frac{1}{a_0} \left( \sum_{i=0}^m b_i x_{k-i} - \sum_{j=1}^n a_j y_{k-j} \right), \quad (2)$$

де  $b_i$  та  $a_j$  є відповідно коефіцієнтами чисельника та знаменника передавальної характеристики. Фактично, в КІХ фільтрі усі коефіцієнти  $a_j$  (окрім  $a_0$ ) дорівнюють нулю, тобто немає зворотного зв'язку.

НІХ фільтр при тій же кількості операцій, що необхідна для КІХ фільтра, має значно кращу амплітудно-частотну характеристику, але фазо-частотна характеристика (ФЧХ) є нелінійною. При проектуванні фільтра даного типу слід враховувати критерій стабільності. КІХ фільтри, в свою чергу, є завжди стабільними та мають лінійну ФЧХ [7, 9]. Недоліком НІХ фільтра є складніше обчислення ядра, в порівнянні з КІХ фільтром.

Не дивлячись на кращу фільтрацію НІХ фільтра, КІХ фільтр має ключову особливість для моделювання еквалайзера. Оскільки для фільтрації використовується лише операція згортки, то КІХ фільтр має ті ж властивості, що й згортка. Насамперед, нас цікавлять властивості асоціативності та лінійності. Дані властивості дозволяють створювати нові ядра з вже наявних, таким чином утворюючи ядра зі складними АЧХ. НІХ фільтру вищезазначені властивості згортки не притаманні, що ускладнює створення фільтрів зі складними АЧХ. До того ж такі фільтри можуть бути нестабільними, що обмежує функціональність.

Враховуючи всі переваги та недоліки, в якості основи ядра еквалайзера обрано КІХ фільтр як компромісне рішення між складністю обчислення ядра та якістю фільтрації.

### Розрахунок ядра ФНЧ

Існує багато способів розрахунку ядра ФНЧ [5,6,7], але в проектуванні фільтра для еквалайзера використовуємо *sinc* функцію. Серед переваг даного ядра – якісні частотні характеристики, що звісно впливає на якість часових. Нас цікавлять саме частотні характеристики, тому *sinc* ядро підходить.

*Sinc* функція є симетричною та визначена на множині вхідних значень  $(-\infty; +\infty)$  [8]. КІХ фільтри за визначенням не можуть вмістити усієї імпульсної характеристики такої функції, що впливає на спектр ядра, а також при стандартному розрахунку ядро втрачить симетричність.

Для збереження симетричності достатньо зсунути відліки на половину від розміру послідовності.

Тобто, якщо ядро має  $M$  відліків, то його першим елементом вважається  $-\frac{M}{2}$ -й відлік, а значення, на яких визначена сама функція ядра, змінюються з  $[0; M]$  на  $\left[-\frac{M}{2}; +\frac{M}{2}\right]$ . Хоча таке рішення змінить фазову характеристику, проте вона залишиться лінійною.

При розширенні ядра до його країв приєднують нульові значення. Це обумовлює обрив сигналу, а разом з тим й втрату частини спектру, що приводить до ефекту Гіббса. Для запобігання ефекту Гіббса використовують віконну функцію. Множення коефіцієнтів ядра на дану функцію дає поступове ослаблення сигналу від центральної точки, і таким чином *sinc* функція не буде різко обриватися. Враховуючи віконну функцію, формула ядра ФНЧ має вигляд:

$$\begin{cases} h_i = K \frac{\sin(2\pi f_c \cdot (i - M/2))}{i - M/2} \cdot W(i - M/2), i \neq M/2, \\ h_i = 2\pi f_c \cdot K \cdot W(0), i = M/2 \end{cases}, \quad (3)$$

де  $K$  – константа нормування одиничного підсилення на нульовій частоті;

$f_c$  – частота зрізу відносно частоти дискретизації,  $f_c \in [0; 0,5]$ ;

$W(i - M/2)$  – віконна функція.

### Віконна функція Кайзера

Існує велика кількість віконних функцій та їх модифікацій [7, 8]. Серед них вирішено обрати параметричне вікно Кайзера [8], яке широко використовується в ЦОС, оскільки є апроксимацією оптимального розподілу з точки зору концентрації енергії в головному пелюстку спектра. Такий вибір дозволив отримати близьку до мінімально можливої перехідну смугу цифрового фільтра. Крім того, можливість регулювання рівня бічних пелюсток за рахунок зміни параметра вікна, робить його дуже зручним в задачах проектування КІХ фільтра віконним методом. Вікно Кайзера представляється наступним рівнянням:

$$w(n) = \frac{I_0\left(\beta \sqrt{1 - (2(n - N/2)/N)^2}\right)}{I_0(\beta)}, \quad (4)$$

де  $-\frac{N}{2} \leq n \leq \frac{N}{2}$ ;

$I_0$  – модифікована функція Бесселя першого роду нульового порядку;

$\beta$  – параметр вікна.

На практиці  $\beta$  приймає значення в межах  $2 < \beta < 16$ , але з (4) можна бачити, що при збільшенні параметра  $\beta$  рівень бічних пелюсток віконної функції зменшується.

Обчислення вікна Кайзера відносно інших вікон – задача не складна. Модифікована функція Бесселя першого роду нульового порядку [9] на множині натуральних чисел приймає вигляд:

$$I_0(n) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{n}{2}\right)^{2k}}{k!^2} . \quad (5)$$

Таку функцію легко реалізувати одним циклом, що буде обмежений деякою точністю  $\varepsilon$ , при досягненні якої ряд буде обрізано. Функція кореня доволі швидко обчислюється, а у STM 32 (Cortex M4) навіть наявна команда асемблера для обчислення кореня чисельним методом Ньютона-Рафсона [10].  $I_0(\beta)$  при фіксованому  $\beta$  є константою, а отже обчислюється при компіляції.

#### Побудова складних фільтрів

На основі ФНЧ та ВФ можна побудувати інші типи фільтрів. Теоретичним підґрунтям слугують вищезазначені властивості згортки, а саме: асоціативність та лінійність.

Завдяки лінійності, властивій Фур'є - образам сигналів, ФВЧ можна описати як різницю між сигналом, пропущеним крізь ВФ, та сигналом, пропущеним через ФНЧ:

$$\Phi ВЧ(s) = ВФ(s) - ФНЧ(s) .$$

Враховуючи, що фільтрація в КІХ фільтрах реалізується згорткою, вищезазначене рівняння можна скоротити до вигляду:

$$s * b_{\Phi ВЧ} = s * (b_{ВФ} - b_{ФНЧ}) .$$

Прибираючи згортку з сигналом, отримуємо формулу ядра ФВЧ:

$$b_{\Phi ВЧ} = (b_{ВФ} - b_{ФНЧ}) . \quad (6)$$

Ядро ВФ являє собою одиничний імпульс, саме таке ядро дозволить пропустити сигнал без змін [8].

Враховуючи зсув на  $\frac{M}{2}$ , виходить, що для отримання ядра ФВЧ достатньо від нульового відліку (з врахуванням зсуву) ядра ФНЧ відняти одиницю. А отже фінальна формула ядра ФВЧ наступна:

$$\begin{cases} h_i = -K \frac{\sin(2\pi f_c \cdot (i - M/2))}{i - M/2} \cdot W(i - M/2), i \neq M/2 \\ h_i = K(1 - 2\pi f_c) \cdot W(0), i = M/2 \end{cases} \quad (7)$$

СФ отримується шляхом згортки ядер ФВЧ та ФНЧ.

$$b_{СФ}^{f_1, f_2} = b_{\Phi ВЧ}^{f_1} * b_{ФНЧ}^{f_2}, f_1 < f_2 . \quad (8)$$

При згортці даних двох ядер, залишиться лише спільний для двох фільтрів діапазон частот, всі інші частоти будуть взаємно пригнічені. Цей діапазон частот якраз складає  $[f_1; f_2]$ . Для побудови СФ беруться попередньо виведені фільтри. При цьому розмір такого ядра згідно операції згортки:  $2M - 1$ . Слід зазначити, що при рівності двох частот зрізу, фільтр пропускати дану частоту з підсиленням  $(\frac{1}{\sqrt{2}})^2$ ,

оскільки на частоті зрізу підсилення сигналу дорівнює  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  [5].

Отже, розглянуті підходи до побудови СФ та ФНЧ дають змогу отримати ядра фільтрів, необхідних для побудови еквалайзера, представленого на рис. 1. Для підсилення відфільтрованого сигналу, необхідно всі елементи ядра фільтра помножити на заданий коефіцієнт підсилення, враховуючи, що початково ядра проєктуються з одиничним підсиленням. Притаманна згортці лінійність дозволяє побудувати ядро еквалайзера як доданок ядер, попередньо створених фільтрів

$$b_k^{екв} = \sum_{i=0}^I K_i b_k^i, k = 0, 2N - 2, \quad (9)$$

де  $b_k^{екв}$  –  $k$ -й елемент ядра еквалайзера,  $K_i$  – коефіцієнт підсилення  $i$ -го фільтра,  $b_k^i$  –  $k$ -й елемент  $i$ -го фільтра,

$I$  – загальна кількість фільтрів. Всі фільтри мають однаковий порядок. Слід зазначити, що фільтр  $b^0$  є ФНЧ розміру  $2M - 1$ .

Побудована математична модель дає змогу мікроконтролеру розрахувати ядро еквалайзера для подальшої обробки сигналу. Проте, перед використанням для довільного кристалу, слід врахувати його обчислювальну здатність, оскільки за час періоду дискретизації сигналу мікроконтролер має встигнути обчислити нове значення вихідного сигналу.



### Верифікація математичної моделі еквалайзера

Для верифікації математичної моделі обрано програмне середовище GNU Octave [11], яке є аналогом з відкритим кодом відомого середовища Matlab. Зокрема, в ньому наявний пакет для роботи з сигналами (signal), необхідний для перевірки ядра еквалайзера. Додатково в цьому середовищі створені функції для розрахунку ядра еквалайзера.

В якості вхідних даних задається АЧХ конкретного еквалайзера, а також вимоги до окремих фільтрів. Процедура верифікації включає в себе створення ядра еквалайзера з заданими параметрами та перевірку на їх відповідність за допомогою функції freqz.

Тестовий еквалайзер має характеристики підсилення діапазонів, вказані в таблиці.

Таблиця

АЧХ тестового еквалайзера	
Діапазон частот, Гц	Коефіцієнт підсилення
0000 – 1000	1,0
1000 – 2000	1,5
2000 – 3000	1,0
3000 – 4000	2,0
4000 – 5000	0,8

При цьому перехідна смуга не перевищує 300 Гц, а на одиничному підсиленні максимальна амплітуда пульсації в зоні пригнічення не перевищує  $-50$  дБ.

Оскільки смугові фільтри будуються з ФНЧ та ФВЧ, а ФВЧ, в свою чергу, утворюється з ФНЧ, тому є сенс перевірити на якість фільтрації саме ФНЧ. В даному випадку береться ядро розміром 129 з частотою зрізу 3000 Гц.

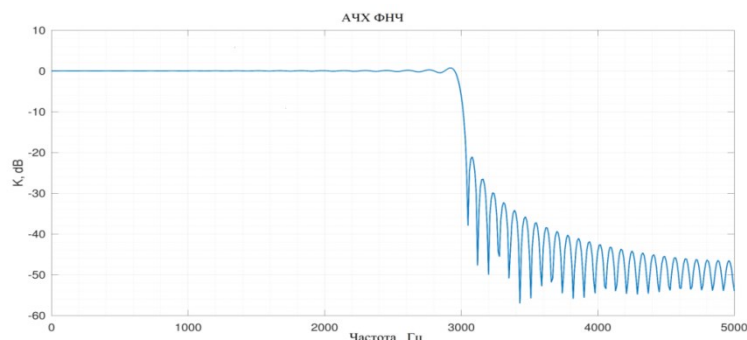


Рис. 2. АЧХ тестового ФНЧ

Як видно з рис. 2, перехідна смуга складає приблизно 200 Гц, що обумовлено вибраним порядком.

Проте максимальне значення пульсації в смузі пригнічення досягає майже  $-20$  дБ, що забагато для обраних умов. Для зменшення ефекту пульсації використовується віконна функція.

У ФНЧ, АЧХ якого зображена на рис. 3, *sinc* функція згладжена вікном Кайзера з коефіцієнтом  $\beta = 4,5$ . Тепер максимальне значення пульсації складає приблизно  $-50$  дБ, що вже є прийнятним. А пригнічення в кінці перехідної смуги дорівнює  $-76$  дБ, проти  $-38$  дБ без використання вікна. Також дане вікно згладило пульсацію в кінці смуги пропускання. Надалі, для побудови ядра еквалайзера, використовується саме такий параметр вікна. Результат верифікації наведено на рис. 4.

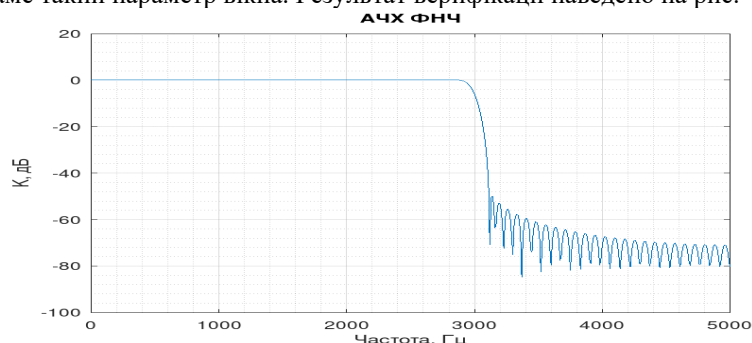


Рис. 3. АЧХ ФНЧ з використанням вікна Кайзера

На графіку з рис. 4 коефіцієнт підсилення вже вимірюється не в децибелах. Це зроблено для ілюстрації відповідності АЧХ еквалайзера, заданої в таблиці, отриманій характеристичі.

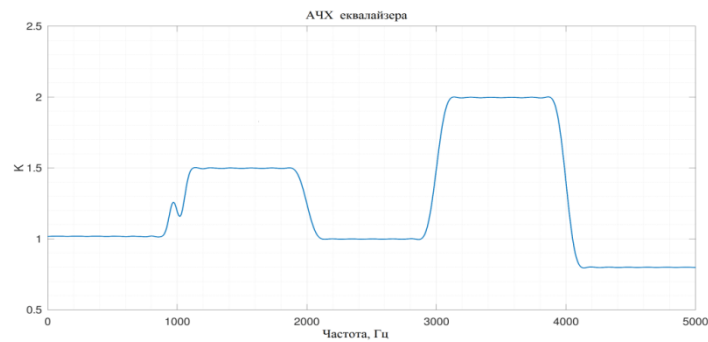


Рис. 4. АЧХ еквалайзера

Пулсація на частоті 1000 Гц обумовлена різними порядками ядер ФНЧ та ФВЧ, які мають одну й ту саму частоту зрізу. Проте її вплив на роботу є достатньо малим, тому їм можна знехтувати. Таким чином, працездатність математичної моделі еквалайзера практично перевірена комп'ютерним моделюванням.

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

В роботі запропоновано підхід до розробки еквалайзера, результатом якого є побудована математична модель, що дає змогу мікроконтролеру розрахувати ядро еквалайзера без попереднього розрахунку ядра на комп'ютері. Дана модель розроблена з оглядом на відносно простий розрахунок з використанням одноманітних операцій задля економії програмної пам'яті мікроконтролера. При цьому отримане ядро еквалайзера має задовільні характеристики, що в сукупності з використанням єдиного ядра дозволяє підвищити максимальну робочу частоту дискретизації. В результаті верифікації математичної моделі в середовищі GNU Octave, отримана ширина смуги переходу і максимальне значення пулсації в смузі пригнічення відповідають заданим умовам. Змодельоване ядро еквалайзера повністю відповідає заданій АЧХ. Таким чином, верифікація математичної моделі підтвердила її працездатність і відповідність отриманих характеристик еквалайзера заявленим вимогам.

#### Література

1. Солонина А.И. Цифровая обработка сигналов в зеркале MATLAB : учеб.пособие. СПб : БХВ-Петербург, 2018. 560 с. ISBN: 978-5-9775-3946-3
2. Капитонов А. Основы цифровой обработки сигналов : курс лекций. Хабр., 2019. <https://habr.com/ru/post/460445/>
3. Välimäki V., Reiss J.D. All About Audio Equalization: Solutions and Frontiers. *Applied Sciences*, 2016; 6(5):129. URL: <https://doi.org/10.3390/app6050129>
4. Умняшкин С.В. Основы теории цифровой обработки сигналов. Изд. 5-е. М.: Техносфера, 2019. 549 с. ISBN 978-5-94836-557-2
5. Emmanuel C. Ifeachor, Barrie W. Jervis. Digital Signal Processing: A Practical Approach, 2nd Edition, 2002. ISBN-13: 978-0201596199
6. Oppenheim A., Schaffer R. Discrete-Time Signal Processing, 3rd ed. 2014. ISBN-9781292025728 1292025727
7. Lyons R. Streamlining Digital Signal Processing (2nd Edition). Monography, Wiley-IEEE Press, 2012. 496 p. ISBN-13: 978-1-118-27838-3
8. Smith S. Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists, 1st ed. 2013. 672p. ISBN: 0080477321, 9780080477329
9. Weisstein E. Modified Bessel Function of the First Kind. Wolfram. 2021. URL: <https://mathworld.wolfram.com/ModifiedBesselFunctionoftheFirstKind.html>
10. Zhu Y. Embedded Systems with ARM Cortex-M Microcontrollers in AssemblyLanguage and C, Ed. Orono, Maine. 2017. 722 p.
11. John W. Eaton David Bateman Søren Hauberg Rik Wehbring GNU Octave version 6.3.0: A high-level interactive language for numerical computations, 6th ed., 2021. 1125 p.

#### References

1. Solonina A.I. Cifrovaya obrabotka signalov v zerkale MATLAB : ucheb.posobie. SPb : BHV-Peterburg, 2018. 560 s. ISBN: 978-5-9775-3946-3
2. Kapitonov A. Osnovy cifrovoj obrabotki signalov : kurs lekcij. Habr., 2019. <https://habr.com/ru/post/460445/>
3. Valimaki V., Reiss J.D. All About Audio Equalization: Solutions and Frontiers. *Applied Sciences*, 2016; 6(5):129. URL: <https://doi.org/10.3390/app6050129>
4. Umnyashkin S.V. Osnovy teorii cifrovoj obrabotki signalov. Izd. 5-e. M.: Tehnosfera, 2019. 549 s. ISBN 978-5-94836-557-2

- 
5. Emmanuel C. Ifeakor, Barrie W. Jervis. Digital Signal Processing: A Practical Approach, 2nd Edition, 2002. ISBN-13: 978-0201596199
  6. Oppenheim A., Schaffer R. Discrete-Time Signal Processing, 3rd ed. 2014. ISBN-9781292025728 1292025727
  7. Lyons R. Streamlining Digital Signal Processing (2nd Edition). Monography, Wiley-IEEE Press, 2012. 496 p. ISBN-13: 978-1-118-27838-3
  8. Smith S. Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists, 1st ed. 2013. 672p. ISBN: 0080477321, 9780080477329
  9. Weisstein E. Modified Bessel Function of the First Kind. Wolfram. 2021. URL: <https://mathworld.wolfram.com/ModifiedBesselFunctionoftheFirstKind.html>
  10. Zhu Y. Embedded Systems with ARM Cortex-M Microcontrollers in AssemblyLanguage and C, Ed. Orono, Maine. 2017. 722 p.
  11. John W. Eaton David Bateman Søren Hauberg Rik Wehbring GNU Octave version 6.3.0: A high-level interactive language for numerical computations, 6th ed., 2021. 1125 p.

Надійшла/Paper received : 13.08.2022 p.    Надрукована/Printed : 01.11.2022 p.

ПЕЛИК Леся

Львівський торговельно-економічний університет

ORCID ID: [0000-0002-3365-0312](https://orcid.org/0000-0002-3365-0312)e-mail: [lpelyk@gmail.com](mailto:lpelyk@gmail.com)

ОСТАПЧУК Ольга

ПРАТ «Едельвіка», м. Луцьк

e-mail: [olga.ostapchuk@edelvika.com](mailto:olga.ostapchuk@edelvika.com)

ПЕЛЕХ Юлія

Хмельницький кооперативний торговельно-економічний інститут

ORCID ID: [0000-0002-2818-9381](https://orcid.org/0000-0002-2818-9381)e-mail: [annasofiya12@gmail.com](mailto:annasofiya12@gmail.com)

## ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНИХ ТА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗМІШАНИХ ТКАНИН ДЛЯ СПЕЦОДЯГУ ТИПУ «RIPSTOP»

*В статті досліджено показники структурних та механічних властивостей тканин для спецодягу типу «Ripstop» зі змішаним волокнистим складом. Проаналізовано їх вплив на зносостійкість спецодягу. Встановлено, що розривальні характеристики тканини залежать від виду волокнистого складу, міцності ниток, структури тканини і способів її оброблення. Виявлено, що при розтягуванні в напрямку основи або утку міцність тканин залежить від міцності і кількості поздовжніх ниток у структурі тканини, які безпосередньо приймають навантаження. Досліджено, що в міру збільшення щільності і заповнення тканини збільшується взаємний зв'язок її елементів, тобто волокон і ниток, що призводить до збільшення міцності текстильного матеріалу. У текстильному матеріалі нитки, маючи взаємне переплетення, зв'язані тертям в єдину систему.*

*Ключові слова: розривальне навантаження, видовження на момент розірвання, поверхневе заповнення, поверхнева густина.*

PELYK Lesia

Lviv University of Trade and Economics,

OSTAPCHUK Olga

PJSC "Edelvika", Lutsk

PELEH Yulia

Khmelnytskyi Cooperative Trade and Economic Institute

## STUDY OF STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF MIXED FABRICS FOR SPECIAL CLOTHING TYPE «RIPSTOP»

*The article examines the indicators of the structural and mechanical properties of fabrics for special clothing of the "Ripstop" type with a mixed fiber composition. Their influence on the wear resistance of workwear was analyzed. The fiber composition of mixed fabrics for sewing military clothing includes polyester fibers and cotton fibers. At the same time, cotton fibers provide hygienic properties, and the synthetic component provides good wear and weather resistance. Mixed fabrics are easy to care for and practically do not wrinkle. The fiber composition of the textile material "Greta" of Ukrainian production includes 53% cotton fiber and 47% polyester fiber. A distinctive feature is the special interweaving of fibers, due to which the cotton fibers are on the wrong side, which improves hygienic properties. Due to the polyester fibers, the fabric is durable, resistant to pollution, and is the least prone to change in linear dimensions. It was established that the tearing characteristics of the fabric depend on the type of fibrous composition, the strength of the threads, the structure of the fabric and the methods of its processing. It was found that when stretched in the direction of the warp or weft, the strength of fabrics depends on the strength and number of longitudinal threads in the structure of the fabric, which directly accept the load. It has been studied that as the density and filling of the fabric increases, the mutual connection of its elements, that is, fibers and threads, increases, which leads to an increase in the strength of the textile material. It was established that with an increase in the thickness of the threads and the surface density of the fabric, the strength of the fabric increases. In a textile material, the threads, having mutual interweaving, are bound by friction into a single system. The use of weaves with short overlaps also contributes to the growth of fabric strength, therefore, all things being equal, the reinforced canvas weave provides fabrics with high strength. Conducted studies have shown that elongation indicators during tearing are related, first of all, to the elongation of textile fibers, which is most fully manifested in the structure of the fabric, with the twisting of yarn or threads, with interweaving.*

*Keywords: breaking load, elongation at break, surface filling, surface density.*

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

Головними функціями спецодягу є захисні та ергономічні властивості, які б забезпечували міцність, зносостійкість, довговічність, зручність і комфорт. Щоб забезпечити все це, необхідно, підібрати відповідні текстильні матеріали потрібного переплетення і правильного поєднання різних типів волокнистого складу (натуральні, змішані, синтетичні волокна), утеплювач і необхідну фурнітуру. Безумовно, і від якості пошиття, і від способу кріплення швів, і навіть від якості обраної фурнітури та ниток буде залежати подальша експлуатація спецодягу.

В даний час військовий одяг стрімко став популярним серед людей, які живуть мирним життям. Відмінним параметром мілітарі-одягу є універсальність його використання, оскільки він ефективно виконує всі призначені функції. Військовий одяг повинен забезпечувати наступні вимоги: комфорт при використанні при температурі повітря від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ , захист від вітру, стійкість до вологості, повітропроникність; захищати

від відкритого полум'я щонайменше 4 секунди, зберігати міцність після контакту з нагрітими твердими поверхнями; хорошу стійкість до зносу; маскувати особовий склад від виявлення у видимому, інфрачервоному та радіолокаційному діапазонах; теплоізоляцію та виведення поту; комфорт та функціональність при тривалій експлуатації; форма має бути безшумною при носінні; можливість комбінувати предмети польового одягу, виходячи з кліматичних умов та поставлених завдань. Незаперечні переваги військової форми роблять її зручною для занять спортом та туризмом. Військова форма в Україні тепер заборонена, як повсякденний одяг для цивільних осіб. Верховна Рада прийняла відповідний законопроект № 9217, яким пропонується встановити штраф за незаконне носіння військової форми або будь-якої іншої форми чи одягу, які нагадують військову та можуть вводити в оману під час війни.

Для виготовлення форменого (спеціального) одягу для військовослужбовців, інших військових формувань та правоохоронних органів України застосовуються бавовняні та змішані текстильні матеріали, які відповідають вимогам ДСТУ 21790:2008 «Тканини бавовняні і змішані для одягу. Загальні технічні умови». Як правило, до волокнистого складу змішаних тканин для пошиття мілітарі-одягу входять волокна поліестеру та бавовняні волокна. При цьому волокна бавовни забезпечують гігієнічні властивості, а синтетична складова – хорошу зносо- та атмосферостійкість. Змішані тканини легкі у догляді і практично не мнуться. Військова форма української армії зразка 2014 року виготовляється з тканини «Грета» українського виробництва. До волокнистого складу текстильного матеріалу входить 53% бавовняного волокна та 47% волокна поліестеру. Відмінною рисою є особливе переплетення волокон, через що волокна бавовни знаходяться з виворітного боку, що покращує гігієнічні властивості. Через волокна поліестеру тканина відрізняється міцністю, стійкістю до забруднень, найменше піддається зміні лінійних розмірів [1]. Текстильний матеріал стійкий до зовнішніх дій і буває різної щільності, проте найбільш вживаною, з якої шиється одяг мілітарі, є щільність 220 г/м<sup>2</sup>. За тактико-технічними вимогами тканина може захистити від відкритого полум'я близько 4 секунд, вона не плавиться і не горить, добре гріє, вбирає піт і не продувається.

### Формулювання цілей статті

Метою статті було дослідження структурних та механічних властивостей змішаних тканин для спецодягу типу «Ripstop».

### Виклад основного матеріалу

Об'єктами досліджень слугували змішані тканини, які виготовлялися на ткацьких верстатах СТБ-4-180 у виробничих умовах ПРАТ «Едельвіка» (м. Луцьк). Досліджувані змішані тканини відрізнялися за такими ознаками: за лінійною густиною пряжі або ниток; за поверхневою густиною, щільністю та товщиною. Механічні властивості досліджуваних змішаних тканин визначалась за стандартною методикою, а саме двомірними випробуваннями: за основою та за утком. В даній роботі розглянуті напівциклічні розривальні характеристики зразків одягових тканин побутового призначення, а саме розривальне навантаження (Н), видовження на момент розірвання (%), відносне розривальне навантаження (Н/м·г) та розрахункове розривальне навантаження (Н/нитку). Результати дослідження розривальних характеристик бавовняно-поліестерових тканин наведені у табл. 1.

Таблиця 1

#### Характеристика досліджуваних змішаних тканин для спецодягу типу «Ripstop»

Вар. зр.	Вміст складників сировинного складу пряжі/ вид і лінійна густина пряжі, %		Вид переплетення	Товщина, мм	Поверхнева густина, г/м <sup>2</sup>	Розривальне навантаження, Н	
	основа	уток				основа	уток
1	65 % Бавовна 35 % Поліестер 20,0 текс×2	65 % Бавовна 35 % Поліестер 20,0 текс×2	підсилене полотняне	0,49	232	950	710
2	65 % Бавовна 35 % Поліестер 14,7 текс×2	65 % Поліестер 35 % Бавовна 20,0 текс×2	підсилене полотняне	0,43	231	1150	980
3	100 % Бавовна 20,0 текс×2	65 % Поліестер 35 % Бавовна 20,0 текс×2	підсилене полотняне	0,50	230	930	1040

Аналіз табл. 1 показує, що розривальне навантаження тканин для спецодягу залежить від їх структурних показників і перш за все від міцності волокон, що входять у структуру текстильного матеріалу, а також від лінійної густини пряжі або ниток. Так, найбільше розривальне навантаження знаходиться у вар.2 і становить за основою – 1150 Н та за утком – 980 Н при лінійній густині пряжі (за основою – 14,7 текс×2 текс, за утком – 20,0 текс×2). Висока міцність тканини із бавовняно-поліестерового волокна забезпечує довготривалий термін придатності при використанні цієї тканини у швейному виробі, що являється перевагою порівняно з іншими тканинами для спецодягу. Найбільше розривальне навантаження за утком знаходиться у вар. 3 і становить – 1040 Н при лінійній густині пряжі за утком –

20,0 текс×2. У досліджуваному зразку вар.1 розривальне навантаження є найменшим і становить: за основою – 950 Н і за утком – 710 Н при лінійній густині пряжі за основою та за утком – 20 текс×2. Таким чином, 65% бавовняного волокна за основою та 65 % волокна поліестеру за утком забезпечують високу зносостійкість текстильного матеріалу.

Міцність тканин для спецодягу із бавовняно-поліестерових волокон сильно змінюється залежно від поверхневої густини, тому важко порівнювати між собою величини розривальних навантажень із різною поверхневою густиною та товщиною. З даних табл. 1 випливає, що розривальне навантаження збільшується зі збільшенням товщини матеріалу. Так, при найвищій товщині тканин 0,50 мм найбільше розривальне навантаження за утком знаходиться у бавовняно-поліестеровій тканині вар. 3 і становить – 1040 Н при поверхневій густині 230 г/м<sup>2</sup>. Найбільше розривальне навантаження за основою знаходиться у вар. 2 і становить 1150 Н при поверхневій густині – 231 г/м<sup>2</sup>.

Виявлено також, що визначальний вплив на розривальне навантаження має щільність тканини. Це підтверджує зіставлення щільності ниток за основою й утком до розривального навантаження, збільшення щільності ниток за основою призводить до збільшення розривального навантаження за основою [2]. Так, у вар. 2 найвища щільність за основою і становить 429 відповідно при високому розривальному навантаженні за основою – 1150 Н. Із збільшенням щільності ниток у тканині збільшуються кути обхвату ниток, і відповідно, площа тертя, зв'язаність елементів тканини збільшується, збільшується сила взаємного тиску між нитками основи та утку і ступінь зчеплення волокон у пряжі, внаслідок чого зростає міцність тканини. Так, із досліджуваних бавовняно-поліестерових зразків найбільшою щільністю ниток на 10 см за утком характеризується вар.3 і становить 205 при найбільшому розривальному навантаженні за утком – 1040 Н.

Результати дослідження механічних властивостей тканин для спецодягу наведені у табл. 2.

Таблиця 2

**Дослідження розривальних характеристик змішаних тканин для спецодягу типу «Ripstop»**

Вар. зразка	Поверхнєве заповнення тканини, E <sub>s</sub> , %	Щільність, кількість ниток на 10 см		Відносне розривальне навантаження, Н/м-г		Розрахункове розривальне навантаження, Н/нитку		Видовження на момент розірвання, %	
		основа	уток	основа	уток	основа	уток	основа	уток
1	73,9	334	200	2,73	2,04	5,7	7,1	19,5	14,0
2	77,8	429	200	3,30	2,81	5,4	9,8	22,0	20,2
3	74,3	334	205	2,70	3,01	5,6	10,1	19,4	22,0

З аналізу отриманих даних видно, що на міцність тканин для спецодягу впливають показники заповнення. Досліджувана тканина вар.1 має найменше поверхнєве заповнення – 73,9 %, що і призвело до зниження міцності (за основою – 950 Н, за утком – 710 Н). При розтягуванні в напрямку основи або утку міцність тканин залежить від міцності і кількості поздовжніх ниток у досліджуваному зразку, які безпосередньо приймають навантаження [3]. У досліджуваній тканині нитки, маючи взаємне переплетення посилене полотняне, зв'язані тертям в єдину систему. Тому середня міцність на одну нитку смужки тканини, яка розташована у напрямку діючої сили, більша від міцності тієї ж нитки у вільному стані, незважаючи на те, що в процесі ткання основні нитки втрачають приблизно 5 – 20% своєї початкової міцності.

Розривальне навантаження базового зразка вар. 2 становить за основою – 1150 Н та за утком - 980 Н, відносне розривальне навантаження 3,30 Н/м-г та 2,81 Н/м-г відповідно. Показники розривальних характеристик вар. 2 за основою більші за значення утку в зв'язку з більшим числом ниток на 10 см – 429 та 200 відповідно. Проте ми можемо спостерігати зменшення розрахункового розривального навантаження ниток основи 5,4 Н/нитку в порівнянні з розрахунковим розривальним навантаження ниток утку 9,8 Н/нитку, що свідчить про вплив механічних дій тертя та розтягнення на нитки основи під час процесів снування та ткання.

У досліджуваних зразках тканин в утку використано пряжу бавовняно-поліестерову пряжу лінійною густиною 20,0 текс ×2, число ниток в утку становить 200, 200, та 205 відповідно. Незважаючи на практично однакову кількість ниток в утку спостерігаємо збільшення показника розривального навантаження за утком 3 вар. - 1040 Н, а також збільшення відносного розривального навантаження – 3,01 Н/м-г. Встановлено, що зі збільшенням поверхневого заповнення досліджуваних зразків тканин (вар. 2), яке становить – 77,8 %, збільшується відносне розривальне навантаження тканини для спецодягу і становить 3,30 Н/м-г. Також спостерігаємо збільшення розрахункового розривального навантаження зразків тканин за утком, яке становить - 7,1 Н/нитку, 9,8 Н/нитку та 10,1 Н/нитку відповідно. У зв'язку із дії зчеплення ниток утку з нитками основи в результаті процесів оздоблення тканини (відварювання та вибивання), показник розрахункового розривального навантаження за утком збільшується.

У досліджуваному зразку вар. 2 розривальне навантаження за основою становить 1150 Н, розрахункове розривальне навантаження – 5,4 Н/нитку, що є найменшим показником, який характеризує нитки основи досліджуваного зразка. Тканина для спецодягу вар. 2 виготовлена в основі з бавовняно-поліестерової пряжі лінійною густиною 14,7 текс ×2, що є найменшою лінійною густиною пряжі серед досліджуваних тканин. Розривальне навантаження тканини вар. 3 є більшим за вар. 1 і становить 930 Н за

основою та 1040 Н за утком. Досліджувана тканина вар. 3 виготовлена в основі з бавовняної крученої пряжі і в утку з поліестерово-бавовняної пряжі лінійною густиною 20,0 текс  $\times 2$ , має більше поверхнєве заповнення – 74,3 % в порівнянні з поверхневим заповненням вар. 1 – 73,9 %, тому характеризується більшим розрахунковим розривальним навантаженням 10,1 Н/нитку за утком. Встановлено, що тканина вар. 1 має найменші відносне розривальне навантаження за основою – 2,73 Н/м-г та за утком – 2,04 Н/м-г, при найменшому поверхневому заповненні тканини 73,9 %. Досліджуваний зразок вар. 1 виготовлений в основі та утку з бавовняно-поліестерової пряжі лінійною густиною 20,0 текс  $\times 2$ .

Варіанти тканин для спецодягу типу «Ripstop» виготовлені в основі зі змішаної пряжі із вмістом поліестерових волокон, а саме бавовняно-поліестерової (вар. 1 та 2) та поліестерово-бавовняної (вар. 3). Поліестерові волокна в структурі тканини покращують її зносостійкість, незминальність, розривні характеристики. Застосування змішаної крученої пряжі в основі дозволяє знизити вартість виготовлення тканини за рахунок вилучення з технологічного процесу виготовлення тканин операцій шліхтування та розшліхтовування.

У досліджуваних тканинах для спецодягу виготовлених в основі з бавовняно-поліестерової пряжі показник видовження на момент розірвання є найбільший і становить 19,5 %, 22 % та 19,4 %. Також у вар. 3 виготовленому в утку з поліестерово-бавовняної пряжі цей показник становить 22 %. Показники видовження на момент розірвання тканини, особливо на початку її розтягування, знаходяться у прямій залежності від щільності ниток. Досліджувані тканини виготовлені переплетенням посилене полотняне, для яких характерна велика кількість згинів ниток, тому вони характеризуються найбільшим подовженням. Тканини для спецодягу вар. 2 та вар. 3 виготовлені в утку зі змішаної пряжі мають показник видовження на момент розірвання 20,2 % та 22 % відповідно з високими показниками поверхневого заповнення 77,8 % та 74,3 % відповідно. Аналізуючи результати дослідження доведено, що додавання у склад тканини для спецодягу поліестерової пряжі призводить до збільшення видовження на момент розірвання.

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

У процесі експлуатації зменшення зносостійкості спецодягу відбувається внаслідок багаторазової дії розтягуючого навантаження, стиснення, згину, тертя. Тому велике значення для збереження вигляду і форми одягу і збільшення терміну його носіння має здатність тканини протистояти різним механічним впливам. Показники міцності використовуються як критерій оцінювання зносостійкості текстильних матеріалів під дією різних факторів зношування. Вони характеризують якість волокон, пряжі та ниток, наявність або відсутність пошкодження тканин в процесі виробництва.

Досліджено, що міцність тканини при розтягненні залежить від її волокнистого складу, товщини пряжі або нитки, поверхневої густини, виду переплетення, характеру оброблення. Встановлено, що із збільшенням товщини ниток і поверхневої густини тканини збільшується міцність тканини. Застосування переплетень з короткими перекриттями також сприяє зростанню міцності тканини, тому при всіх рівних умовах посилене полотняне переплетення забезпечує тканинам високу міцність. Проведені дослідження показали, що показники видовження під час розірвання пов'язані, перш за все, з подовженням текстильних волокон, яке найповніше проявляється у структурі тканини, з крутою пряжі або ниток, з переплетенням.

### Література

1. Пелик Л.В. Матеріалознавство та основи технологій виробництва товарів : навчально-наочний посібник / Л.В. Пелик. – Львів : Видавництво Львівської торговельно-економічного університету, 2022. – 108 с.
2. Пелик Л.В. Дослідження зносостійкості льономісних текстильних матеріалів / Л.В. Пелик, Д.Ю. Шелька, А.А. Сокальська // Вісник Львівського торговельно-економічного університету. – 2020. – Випуск 23. – С. 5-10.
3. Захаренко В.О. Матеріалознавство та основи технології виробництва товарів : навч. посіб. / В.О. Захаренко. – Харків : ХДУХТ, 2016. – 195 с.

### References

1. Pelyk L.V., Polikarpov I.S., Kyrlychuk R.V. et al. Material science and fundamentals of commodity production technologies. Tutorial-manual. Lviv: Publisher of the Lviv University of Trade and Economics, 2022. 108 p.
2. Pelyk L.V., Shelka D.Y., Sokalska A.A. Research of wear resistance of flax-containing textile materials. Bulletin of Lviv University of Trade and Economics, 2020. Issue 23, P. 5-10.
3. Zakharenko V.O. Material Science and Fundamentals of Product Manufacturing Technology: Tutorial. tool. Kharkiv: KhDUKT, 2016. 195 p.

Надійшла/Paper received : 26.09.2022 p. Надрукована/Printed : 01.11.2022 p.



РУТКЕВИЧ Володимир

Вінницький національний аграрний університет

ORCID ID: [0000-0002-6366-7772](https://orcid.org/0000-0002-6366-7772)e-mail: [v\\_rut@ukr.net](mailto:v_rut@ukr.net)

КУШНИР Віталій

Вінницький національний аграрний університет

e-mail: [v\\_kushnir@gmail.com](mailto:v_kushnir@gmail.com)

ГАНЖА Вадім

Вінницький національний аграрний університет

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

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГІДРАВЛІЧНОГО ПРИВОДА РІЗАКА ДЛЯ ВІДОКРЕМЛЕННЯ ТА ВИВАНТАЖЕННЯ БЛОК-ПОРЦІЇ КОРМУ ВІД КОРМОВОГО МОНОЛІТУ

Розглядається питання підвищення ефективності і якості відокремлення та вивантаження блок-порції стеблових кормів від кормового моноліту в траншейному сховищі. Проаналізовано сучасні тенденції розвитку обладнання для вивантаження стеблових кормів з траншейних сховищ. Представлено принципово нову конструктивно-технологічну схему різача для відокремлення та вивантаження блок-порції від кормового моноліту, що дозволяє виконувати процес вивантаження стеблових кормів з траншейних сховищ згідно з зоотехнічними вимогами та з врахуванням змінного технологічного навантаження на робочих органах різача. Зазначені основні переваги використання гідравлічного привода на даного роду обладнанні та визначений недолік: окремі непов'язані між собою гідродвигуни привода різального механізму відокремлювача та гідроциліндра приводів подачі, що призводять до використання гідродвигунів завищеної потужності.

Розроблено гідравлічний привод та математичну модель гідропривода різача для відокремлення та вивантаження силосу з траншейних сховищ, що дозволяє узгодити роботу привода ножевого механізму з його подачею. Використання запропонованого гідравлічного привода забезпечить оптимальну подачу ножевого механізму і захист гідромотора від перевантаження. Це зумовлене тим, що при відрізання стеблових кормів від кормового моноліту виникають умови (промерзання, змінність фракційного складу та вологості корму, попадання сторонніх предметів та інше), коли необхідно регулювати подачу ножевого механізму.

Дана задача вирішується завдяки тому, що рідина, яка нагнітається насосом, рівномірно розподіляється об'ємним роздільником потоку між гідромотором привода ножевого механізму і поворотним гідроциліндром подачі ножевого механізму. Керування подачею ножевого механізму при необхідності здійснюється регульованим дроселем, який частково відводить рідину в бак з нагнітальної порожнини лінії поворотного гідроциліндра.

Ключові слова: силос, траншея, робочий орган, гідравлічний привод, математична модель, гідроциліндр, гідромотор, змінне навантаження.

VRUTKEVYCH Volodymyr, KUSHNIR Vitaly, GANZHA Vadim

Vinnytsia National Agrarian University

## MATHEMATICAL MODEL OF THE HYDRAULIC CUTTER DRIVE FOR CUTTING AND UNLOADING THE BLOCK-PORTION OF FEED FROM THE FEED MONOLITH

The question of improving the efficiency and quality of separating and unloading a block portion of stem fodder from a fodder monolith in a trench storage is under consideration. Modern trends in the development of equipment for unloading stalk fodder from trench storages are analyzed. A fundamentally new design and technological scheme of the cutter for separating and unloading a portion block from a fodder monolith is presented, which allows for the process of unloading stem fodder from trench storages in accordance with zootechnical requirements and taking into account the variable technological load on the working organs of the cutter. The main advantages of using a hydraulic drive on this type of equipment and a certain disadvantage are indicated: separate hydraulic motors of the drive of the cutting mechanism of the separator and the hydraulic cylinder of the feed drives, which lead to the use of hydraulic motors of overpowered power.

A hydraulic drive and a mathematical model of the hydraulic drive of the cutter for the separation and unloading of silage from trench storages have been developed, which allows you to coordinate the operation of the drive of the knife mechanism with its feed. The use of the proposed hydraulic drive will ensure optimal feeding of the knife mechanism, and protection of the hydraulic motor from overload. This is due to the fact that when cutting off the stem fodder from the fodder monolith, conditions arise (freezing, variability of the fractional composition and moisture content of the fodder, ingress of foreign objects, etc.) when it is necessary to adjust the feed of the knife mechanism.

This task is solved due to the fact that the liquid pumped by the pump is evenly distributed by the volumetric flow divider between the hydraulic motor of the blade mechanism drive and the rotating hydraulic cylinder of the blade mechanism feed. If necessary, the feed of the knife mechanism is controlled by an adjustable throttle, which partially diverts the liquid to the tank from the injection cavity of the line of the rotary hydraulic cylinder.

Key words: silo, trench, working body, hydraulic drive, mathematical model, hydrocylinder, hydromotor, change of drive.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

При розробці та експлуатації гідроприводу важливим є забезпечення його енергетичної ефективності [1]. У гідравлічних системах вивантажувальних механізмів стеблових кормів, як і інших вітчизняних сільськогосподарських машинах, використовуються гідроприводи постійної витрати, що виключають адаптацію виконавчих гідродвигунів до стану технологічної системи. Окремі непов'язані між собою гідродвигуни привода різального механізму відокремлювача та гідроциліндра приводів подачі призводять до використання гідродвигунів завищеної потужності. В результаті чого потужність кожного з приводів даних машин зростає до 25 кВт при умові визначення розрахунковим та експериментальним шляхом максимально необхідної потужності привода різального механізму відокремлювача в межах 4,5–

6,0 кВт, а привода подачі – до 0,8 кВт [2]. Тому задача забезпечення оптимальної подачі ножового механізму від зміни технологічного навантаження на робочих органах є актуальною та своєчасною.

### Аналіз останніх джерел

Енергетична ефективність більшості промислових гідравлічних систем, в тому числі і відокремлювачів стеблових корму залежить, насамперед, від двох чинників – схемного рішення і типу насосного агрегата та режимів роботи виконавчих пристроїв [3].

Вирізаючі механізми для відокремлення блок-порції від кормового моноліту з траншейних сховищ випускають різні фірми: Strautmann, BvL van Lengerich, V. d. Heid, Vicon, Kuhn, Fella, Trioliet, Henrich Schaffer; Bressel und Lade; STOLL(Німеччина); Emily, KUHN, LUCAS. G, Jeantil, Belair(Франція); Seko, Agm(Італія); TRIOLET (Голандія); GEHL(США); Maddelande(Швейцарія) та ін [4]. Дане обладнання має різне конструктивне виконання робочих органів та різні приводи, але спостерігається чітка тенденція до гідрофіксації даного обладнання у зв'язку із великою перевагою даного привода порівняно з іншими приводами [5, 6]. До недоліків гідравлічного привода даного обладнання слід віднести окремі непов'язані між собою гідродвигуни привода різального механізму відокремлювача та гідроциліндра приводів подачі, що призводять до використання гідродвигунів завищеної потужності.

Відомо багато підходів до зменшення енерговитрат в системах гідропривода. Наприклад, в гідроприводах, які працюють нетривало використовують схеми з розвантаженням насоса від тиску. Завдяки цьому зменшується експлуатаційні витрати, збільшується ККД системи та підвищується довговічність насосного агрегату [3].

На практиці поширено ряд способів узгодження роботи насосного агрегату та системи приводів: дроселюванням, розвантаженням через розподільник, використанням регульованих насосів з різними типами регуляторів (регулятор витрати, регулятор тиску, регулятор тиску і витрати, регулятор потужності), використанням гідроаккумуляторів, штучним «голодуванням» насоса, машинним регулюванням, ступінчастим регулюванням, введенням штучних витоків та інше [3, 7]. Але відсутні факти впровадження в практику сільськогосподарського машинобудування систем приводів, які дозволяють змінювати режим роботи відповідно зміни стану технологічної системи. Значне перевищення потужності застосованих гідроприводів від визначених для стеблових кормів викликано можливістю перевантажень при попаданні в зону різання міжвузля кукурудзи, камінців та інших твердих включень, що при нерегульованих режимах різальних механізмів призводить до значних перевантажень, що викликає необхідність багаторазового запасу потужності таких гідроприводів [2, 8].

В різних галузях техніки використовують системи керування роботою приводів, які забезпечують адаптацію режимів їх роботи до зміни значень параметрів стану технологічної системи. В галузі металообробки широко використовуються методи керування процесами різання матеріалів, розроблені Б.С. Балакшиним та його учнями, які передбачають стабілізацію сил різання шляхом зміни в процесі обробки параметрів режиму різання. Високу ефективність даного метода керування технологічним процесом підтверджує його широке розповсюдження в практиці верстатобудування та інших машин, призначених для обробки різанням різних матеріалів. На сьогодні даний метод керування процесом різання, який забезпечує значне підвищення продуктивності при мінімальних енерговитратах не отримав розповсюдження у сільськогосподарському машинобудуванні. Запровадження засобів адаптації роботи робочих органів сільськогосподарських машин до умов їх функціонування спроможне суттєво підвищити ефективність використання даних машин.

### Формулювання цілей статті

Мета роботи – розробити математичну модель гідравлічного привода різача для відокремлення та вивантаження блок-порції від кормового моноліту, що дозволить на проєктній стадії оцінити пристосованість створюваного механізму до конкретних умов роботи.

### Виклад основного матеріалу

Принципову конструктивно-технологічну схему різача для відокремлення та вивантаження блок-порції стеблових корму від кормового моноліту представлено на рис. 1.

Навісне обладнання складається з вантажопідійомної системи навантажувача ПКУ-0,8 і нового робочого органу (різача для силосу), який містить раму 1 з виловним захватом 2, механізми подачі 5 (поворотний гідроциліндр) і приводу ножа 4 (гідромотор). Ніж 6 з приводним механізмом 4 рухається по направляючій рамці 3. Рама являє собою зварну конструкцію та складається з двох вертикальних стійок з кронштейнами кріплення до стріли навантажувача, верхнього і нижнього горизонтальних брусів. На нижньому брусі кріпляться вила 2. Для запобігання осипання корму рама має грати.

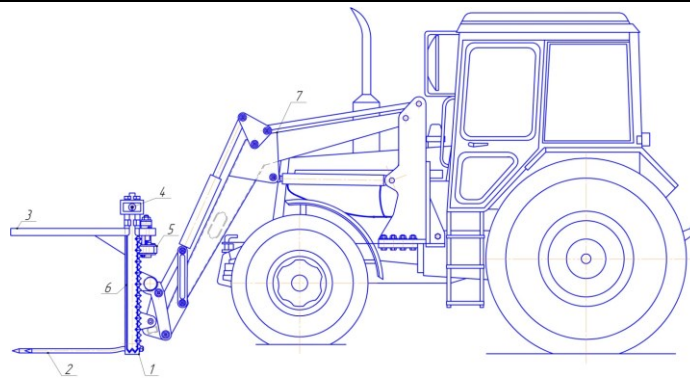


Рис. 1. Конструктивно-технологічна схема різача для силосу:  
1 – рама, 2 – вила, 3 – направляюча рамка, 4 – гідромотор, 5 – поворотний гідроциліндр, 6 – ніж, 7 – фронтальний навантажувач

Механізм подачі 5 призначений для пересування й орієнтації ножа паралельно траєкторії переміщення. Він містить телескопічний важіль з опорним роликом, що встановлено в направляючій рамці різача (на рис. 1 не показано) для силосу і приводиться в рух від поворотного гідроциліндра 5, направляюча рамка з'єднана з верхнім брусом рами та з метою забезпечення жорсткості посилена розкосами. Ролик розташований в направляючій рамці та може перекочуватися по ній. Телескопічний важіль орієнтує ніж в площині, паралельній траєкторії переміщення ножа в будь-якій її точці.

Механізм приводу забезпечує зворотно-поступальний рух ножа 6 і містить каретку, гідромотор 4, направляючі, водило, в пазу якого розміщений ексцентрик. Він насаджений на вал гідромотора і приводить водило з ножем в коливальний рух. Каретка оснащена двома кронштейнами. Привод виконавчих гідродвигунів різача для силосу здійснюється від вільного каналу гідросистеми трактора.

Розрахункову схему гідравлічного привода різача для відокремлення та вивантаження блок-порції стеблових кормів від кормового моноліту наведено на рис. 2.

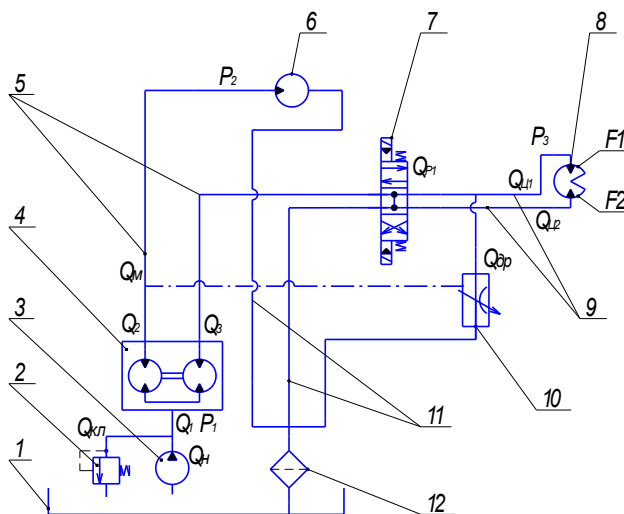


Рис. 2. Розрахункова схема гідравлічного привода ножового механізму різача для відокремлення та вивантаження блок-порції стеблових кормів від кормового моноліту: 1 – гідробак, 2 – запобіжний клапан, 3 – гідронасос, 4 – об'ємний розподільник потоку, 5 – напірна гідролінія, 6 – гідромотор, 7 – чотирьохлінійний трипозиційний розподільник з електрогідравлічним керуванням, 8 – поворотний гідроциліндр, 9 – гідролінія зливу, 10 – керований дросель, 11 – лінії зливу, 12 – фільтр, 13 – лінія підйому

Основна задача даного гідравлічного привода – забезпечення оптимальної подачі ножового механізму і захист гідромотора від перевантаження. Це зумовлене тим, що при відокремленні стеблових кормів від кормового моноліту виникають умови (промерзання, змінність фракційного складу та вологості корму, попадання сторонніх предметів та інше), коли необхідно регулювати подачу ножового механізму.

Дана задача вирішується завдяки тому, що рідина, яка нагнітається насосом, рівномірно розподіляється об'ємним розподільником потоку між гідромотором привода ножового механізму і поворотним гідроциліндром подачі ножового механізму. Керування подачею ножового механізму при необхідності здійснюється регульованим дроселем, який частково відводить рідину в бак з нагнітальною порожниною лінії поворотного гідроциліндра.

Принцип дії гідравлічного привода різача для відокремлення та вивантаження блок-порції стеблових кормів: робоча рідина (масло) насосом 3 із бака 1 через об'ємний розподільник потоку 4 розподіляється в робочі порожнини гідромотора 6 та поворотного гідроциліндра 8 через чотирьохлінійний трипозиційний розподільник 7 з електрогідравлічним керуванням. Відпрацьована рідина з порожнини поворотного гідроциліндра 6 через розподільник 7 і фільтр 12 зливається в бак. Гідропривод має запобіжний

клапан 2. Надлишок робочої рідини, що нагнітається до поворотного гідроциліндра 8 відводиться з нагнітальної порожнини лінії зливу 9 в бак через регульований дросель 10.

Відомі переваги гідравлічного привода, в тому числі адаптивного до технологічного навантаження, неодноразово доведені теоретичними дослідженнями, а також широким практичним досвідом використання їх в різних галузях промисловості. В той же час слід зазначити, що практика використання гідравлічного привода адаптивного до зміни технологічного навантаження на робочих органах в аграрному виробництві достатньо обмежена.

Тому недостатньо розроблені методики розрахунку та вибору параметрів гідравлічного привода робочих органів сільгоспмашин з врахуванням особливостей технологічних процесів, пов'язаних з цим навантаженням, умов різання стеблових корму та ін. [2, 9].

Розробленню досліду зразка має передувати детальний аналіз можливих режимів роботи гідравлічного привода, який дозволить обґрунтовано вибрати параметри даного привода.

Найбільш ефективним методом вирішення поставленої задачі є математичне моделювання процесу роботи досліджуваної системи з врахуванням особливостей характеристик та впливу факторів, притаманних для відповідного технологічного процесу агропромислового виробництва.

Математична модель гідравлічного привода різача для відокремлення та вивантаження силосу розроблялася на основі закономірностей та характеристик, якими визначається робота гідравлічної та механічної систем. Відповідно складається рівняння балансу (нерозривності) потоків робочої рідини, опор потоків рідини при її протіканні через гідролінії та гідроагрегати, а також рівняння сил та моментів, діючих на робочі органи різача силосу та вихідні ланки виконавчих гідро двигунів [10].

При складанні математичної моделі гідропривода робочих органів різача для відокремлення та вивантаження силосу прийняті припущення, які дозволяють не враховувати ряд факторів, вплив яких за умов роботи даного гідропривода є другорядним або незначним.

Відповідно до умов роботи гідропривода різача для відокремлення та вивантаження блок порції стеблових корму від кормового моноліту прийнято наступні припущення:

- відстань між елементами гідросистеми незначна, що дозволяє розглядати її як систему з зосередженими параметрами і не розглядати вплив хвильових процесів;
- течія рідини в зазорах у з'єднаннях деталей гідроагрегатів та гідроапаратури має ламінарний характер;
- пульсація подачі насоса, яка звичайно становить 1-3 %, з урахуванням високої частоти обертання вала насоса не викликає збудження коливань тиску у гідросистемі;
- течія рідини через робочі вікна золотника має турбулентний характер;
- гідролінії, які з'єднують насос та керуючу і виконавчу гідроапаратуру, достатньо короткі і мають невеликий поперечний переріз, тому втрати тиску в них по довжині та на місцевих опорах можна знехтувати;
- густина, в'язкість та коефіцієнт витрати робочої рідини не залежать від температури завдяки роботі гідрооб'ємної системи в усталеному температурному режимі;
- коефіцієнт податливості рідини не залежить від тиску і вмісту газової складової, так як в усталеному режимі роботи гідромеханізму його величина змінюється незначно;
- тиск підпору на злив незначний і практично незмінний;
- коефіцієнт витоків і перетоків рідини у складових гідроагрегатів постійний і не залежить від розмірів та форми щілин;
- люфти у шарнірах відокремлювача та корпусу ножа завдяки регулюванню незначні і не викликають відповідних автоколивань системи в цілому.

Відповідно до схеми, яка зображена на рисунку 2, рівняння балансу (нерозривності) потоків робочої рідини в гідролініях та порожнинах гідропривода різача для відокремлення та вивантаження блок корції корму з врахуванням зазначених вище припущень мають наступний вигляд:

$$Q_H = Q_{кл} + Q_2 + Q_3 + Q_{ум1} + Q_{деф1}, \quad (1)$$

де  $Q_H$  – витрата рідини, що подається від насосної станції,  $Q_{кл}$  – витрата рідини, що потрапляє в бак гідросистеми через запобіжний клапан,  $Q_2$  – витрата рідини у порожнині роздільника потоку, що забезпечує рух гідромотора,  $Q_3$  – витрата рідини у порожнині роздільника потоку, що забезпечує рух поворотного ротора з заданою швидкістю,  $Q_{ум1}$  – витрата витікання рідини,  $Q_{деф1}$  – витрата рідини на компенсацію деформації порожнини, що знаходиться під тиском  $P_1$ .

Витрати рідини для напірної порожнини мотора:

$$Q_2 = Q_m + Q_{ум2} + Q_{пер} + Q_{деф2}, \quad (2)$$

де  $Q_m$  – витрата рідини, що подається на гідромотор,  $Q_{ум2}$  – витрата витікання рідини з даної порожнини внаслідок її негерметичності,  $Q_{пер}$  – витрата на перетікання рідини з порожнини гідромотора під дією перепаду тисків  $P_1$  та  $P_2$ ,  $Q_{деф2}$  – витрата рідини на компенсацію деформації порожнини, що знаходиться під тиском  $P_2$ .

Витрати рідини для напірної порожнини поворотного гідроциліндра має вигляд:

$$Q_3 = Q_{ц1} + Q_{др} + Q_{ум3} + Q_{пер} + Q_{деф3}, \quad (3)$$

де  $Q_{ц1}$  – витрата рідини у кільцевій порожнині, що забезпечує рух поворотного ротора з заданою швидкістю,  $Q_{др}$  – витрата рідини, що перетікає через регульований дросель,  $Q_{ум3}$  – витрата витікання рідини з даної

порожнини внаслідок її негерметичності,  $Q_{пер}$  – витрати на перетікання рідини з порожнини поворотного гідроциліндра під дією перепаду тисків  $P_1$  та  $P_3$ ,  $Q_{деф2}$  – витрати рідини на компенсацію деформації порожнини, що знаходиться під тиском  $P_3$ .

Фактична витрата рідини, що подається від нерегульованого насоса, визначається згідно виразу [3]

$$Q_i = q_i \cdot n_i \cdot \eta_{i\alpha i}, \quad (4)$$

де  $q_i$  – робочий об'єм насоса;  $n_i$  – частота обертання вала насоса;  $\eta_{i\alpha i}$  – об'ємний коефіцієнт корисної дії (ККД) насоса.

Витрата рідини, що потрапляє до гідромотора та поворотного гідроциліндра, обчислюється за наступними залежностями:

$$Q_2 = q_1 \cdot n_{\partial n1} \cdot \eta_{об \partial n1}, \quad (5)$$

$$Q_3 = q_2 \cdot n_{\partial n2} \cdot \eta_{об \partial n2}, \quad (6)$$

де  $q_1, q_2$  – робочий об'єм роздільника потоку,  $n_{\partial n1}, n_{\partial n2}$  – частота обертання вала роздільника потоку,  $\eta_{об \partial n1}, \eta_{об \partial n2}$  – об'ємний коефіцієнт корисної дії роздільників потоку.

Витрати на витікання рідини крізь зазори в з'єднаннях деталей гідроапаратури і гідромеханізмів обчислюються, як витрати рідини крізь плоску щілину при прийнятих припущеннях:

- форма поверхонь, утворюючих канал витікання, досконала;
- шорсткість поверхонь до уваги не приймається;
- зазор симетричний.

В цьому випадку витрати рідини на витікання крізь поперечний перетин зазору будуть визначатися такими залежностями:

$$Q_{ум1} = \sigma_1 \cdot p_1, \quad (7)$$

$$Q_{ум2} = \sigma_2 \cdot p_2, \quad (8)$$

$$Q_{ум3} = \sigma_3 \cdot p_3, \quad (9)$$

де  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – коефіцієнти витоків рідини з порожнин, які знаходяться під дією тисків  $p_1, p_2, p_3$  відповідно.

Витрати, які виникають при деформації об'ємів порожнин гідропривода, заповнених рідиною, завдяки зміні тиску в цих порожнинах, визначаються залежностями:

$$Q_{деф1} = K_1 \cdot W_1 \cdot \frac{dP_1}{dt}, \quad (10)$$

$$Q_{деф2} = K_2 \cdot W_2 \cdot \frac{dP_2}{dt}, \quad (11)$$

$$Q_{деф3} = K_3 \cdot W_3 \cdot \frac{dP_3}{dt}, \quad (12)$$

де  $K_1, K_2, K_3$  – коефіцієнти податливості відповідної магістралі та порожнин даної гідросистеми;  $W_1$  – об'єм магістралі від насосної станції до входу в об'ємний роздільник потоку,  $W_2$  – об'єм магістралі, що з'єднує об'ємний роздільник потоку з гідромотором,  $W_3$  – об'єм магістралі, що з'єднує об'ємний роздільник потоку з поворотним гідроциліндром,  $dP_1/dt, dP_2/dt, dP_3/dt$  – швидкість зміни тиску в порожнинах.

Витрати, які виникають при перетіканні рідини через запобіжний клапан та регульований дросель:

$$Q_{кл1} = \mu \cdot f_{np} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{|P_1 - 0|} \cdot \text{sign}(P_1), \quad (13)$$

$$Q_{др} = \mu \cdot f(P_2) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{|P_3|} \cdot \text{sign}(P_3), \quad (14)$$

$$f(P_2) = f(x_3), \quad (15)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт витрати,  $f_{np}, f$  – площа прохідного перерізу робочого вікна клапана,  $f(x_3)$  – площа прохідного вікна дроселя,  $\rho$  – густина робочої рідини,  $p_1$  – тиск в нагнітальній порожнині,  $p_2$  – тиск в нагнітальній порожнині гідромотора,  $p_3$  – тиск в кільцевій порожнині поворотного гідроциліндра.

Фактична витрата рідини гідромотором визначається згідно виразу

$$Q_M = q_M \cdot \omega_1 / \eta_{обм}, \quad (16)$$

де  $q_M$  – робочий об'єм мотора,  $\omega_1$  – кутова швидкість мотора,  $\eta_{обм}$  – об'ємний коефіцієнт корисної дії мотора.

Витрати, які виникають при перетіканні рідини в поворотному гідроциліндрі мають вигляд:

$$Q_{ц1} = F_{1ц} \cdot v_{ц} = F_{1ц} \cdot \frac{dx_{ц}}{dt}, \quad (17)$$

де  $F_{1ц}$  – ефективна площа поршня гідроциліндра,  $v_{ц}$  – швидкість руху поршня.

Витрата, яка виникає при перетіканні рідини між кільцевими порожнинами поворотного гідроциліндра 8:

$$Q_{i\delta\delta 3} = \sigma_{35} \cdot p_3 \quad (18)$$

Рівняння руху вала гідромотора розглядаємо з аналізу балансу моментів

$$\dot{I}_i = \dot{I}_{\delta} + \dot{I}_{\delta i} + \dot{I}_{\delta\delta}, \quad (19)$$

$M_{in}$  – момент інерції механізму,  $M_{mn}$  – момент технологічного навантаження,  $M_{mp}$  – момент сили тертя.

$$q_i \cdot P_2 = I_{i\delta} \cdot \frac{d^2\varphi_i}{dt} + M_{\delta i} + \beta_{\delta\delta} \cdot \frac{d\varphi_i}{dt}, \quad (20)$$

де  $I_{np}$  – приведений момент інерції до вала гідромотора,  $d^2\varphi_M/dt$  – кутове прискорення вала гідромотора,  $M_{mn}$  – момент від технологічного навантаження,  $\beta_{mp}$  – коефіцієнт рідинного тертя в гідромоторі,  $d\varphi_M/dt$  – кутова швидкість обертання.

Рівняння руху поворотного гідроциліндра розглянемо з аналізу балансу сил

$$F_l v_{\delta} = F_{mn} + F_{mp} + F_{in} = F_{in} v_{\delta} = F_{mn} + \beta_{\delta} \cdot v_{\delta} + I_{np} \cdot \frac{dv_{\delta}}{dt} \quad (21)$$

де  $F_{mn}$  – момент технологічного навантаження на гідроциліндрі,  $F_{mp}$  – момент сили тертя,  $F_{in}$  – момент інерційного навантаження на гідроциліндрі,  $v_{\delta}$  – швидкість руху поршня,  $\beta_{\delta}$  – коефіцієнт рідинного тертя в гідроциліндрі,  $I_{np}$  – приведений момент інерції механізму,  $dv_{\delta}/dt$  – швидкість переміщення.

Слід відмітити, що розглянуті процеси не взаємозв'язані, структурно описуються відмінними рівняннями, тому подальший їх аналіз здійснюється окремо.

Складену математичну модель відмічає високий порядок похідних, а також наявність ряду нелінійних залежностей, що визначають залежність витрат через дроселююче вікно. У зв'язку з цим найбільш раціональним являється вирішення даної системи диференціальними рівняннями з використанням програмного продукту MathCad.

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

Розроблена математична модель гідравлічного привода різача для відокремлення та вивантаження блок-порції стеблових кормів від кормового моноліту враховує основні характеристики об'ємного гідропривода та дозволяє врахувати особливості технологічного навантаження на робочих органах при різних умовах роботи машин, що дозволяє досліджувати вплив конструктивних параметрів привода на різних етапах та вибирати значення параметрів, що забезпечують задану подачу ножового механізму при мінімальних регулюваннях.

### Література

1. 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.
2. Руткевич В.С. Адаптивний гідравлічний привод блочно-порційного відокремлювача консервованого корму / В.С. Руткевич // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2017. – № 4(99). – С. 108–113.
3. Фінкельштейн З.Л. Експлуатація, обслуговування та надійність гідравлічних машин і гідроприводів : навч. посіб. / Фінкельштейн З.Л., Андренко П.М., Дмитрієнко О.В. – Харків : Видавничий центр. НТУ “ХПІ”, 2014. – 308 с.
4. 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.
5. Іванов М.І. Підвищення експлуатаційної ефективності блочно-порційного вивантажувача консервованих кормів шляхом гідрофікації привода робочих органів / М.І. Іванов, С.А. Шаргородський, В. С. Руткевич // Промислова гідравліка і пневматика. – 2013. – № 1 (39). – С. 91–96.
6. 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>
7. Shargorodskiy S. Investigation of drive power of the mechanism for separation of stem feed from feed monolith / S. Shargorodskiy, V. Rutkevych // Slovak international scientific journal. – 2021. – № 54. – P. 10–20.
8. Ivanov M.I. Research on the block-portion separator parameters influence on the adjustment range of operating elements speed / M.I. Ivanov, V.S. Rutkevych, O.M. Kolisnyk, I.O. Lisovoy // INMATEH - Agricultural Engineering. – 2019. – Vol. I, № 1 (57). – P. 37–44.
9. Руткевич В.С. Математичне моделювання роботи гідравлічного привода секцій широкозахватного культиватора з послідовним спрацюванням гідроциліндрів / В.С. Руткевич // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2018. – № 2 (101). – С. 37–47.

10. Rutkevych V. Numerical simulation of the liquid distribution problem by an adaptive flow distributor / V. Rutkevych, I. Kupchuk, V. Yaropud, V. Hraniak, S. Burlaka // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2022. – № 2 (98). – P. 64–69.

#### References

1. Ratushna N. Metodichni pidkhody do stvorennia novoi silskohospodarskoi tekhniki u vidpovidnosti z vymohamy rynku naukoiemnoi produktsii / N. Ratushna, I. Mahmudov, A. Kokhno // *MOTROL*. – 2007. – № 9A. С. 119–123.
2. Rutkevych V.S. Adaptivnyi hidravlichnyi pryvod blochno-portsiinoho vidokremliuvacha konservovanoho kormu / V.S. Rutkevych // *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. – 2017. – № 4(99). – С. 108–113.
3. Finkelshtein Z.L. Ekspluatatsiia, obsluhovuvannia ta nadiinist hidravlichnykh mashyn i hidropryvodiv : navch. posib. / Finkelshtein Z.L., Andrenko P.M., Dmytrienko O.V. – Kharkiv : Vydavnychiy tsentr. NTU “KhPI”, 2014. – 308 s.
4. Rutkevych V.S. Innovatsiini zasoby dlia vyvantazhennia steblovykh kormiv z transheinykh skhovyshch
5. / V.S. Rutkevych, V.P. Kushnir, O.O. Ostapchuk // *Herald of Khmelnytskyi National University*. – 2022. – № 1 (305). – С. 261–269.
6. Ivanov M.I. Pidvyshchennia ekspluatatsiinoi efektyvnosti blochno-portsiinoho vyvantazhuvacha konservovanykh kormiv shliakhom hidrofikatsii pryvoda robochykh orhaniv / M.I. Ivanov, S.A. Sharhorodskiy,
7. V. S. Rutkevych // *Promyslova hidravlika i pnevmatyka*. – 2013. – № 1 (39). – С. 91–96.
8. 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>
9. Shargorodskiy S. Investigation of drive power of the mechanism for separation of stem feed from feed monolith / S. Shargorodskiy, V. Rutkevych // *Slovak international scientific journal*. – 2021. – № 54. – R. 10–20.
10. Ivanov M.I. Research on the block-portion separator parameters influence on the adjustment range of operating elements speed / M.I. Ivanov, V.S. Rutkevych, O.M. Kolisnyk, I.O. Lisovoy // *INMATEH - Agricultural Engineering*. – 2019. – Vol. I, № 1 (57). – P. 37–44.
11. Rutkevych V.S. Matematychno modeliuвання roboty hidravlichnoho pryvoda sektsii shyrokozakhvatnoho kultyvatora z poslidovnym spratsiuvanniam hidrotsylindriv / V.S. Rutkevych // *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. – 2018. – № 2 (101). – С. 37–47.
12. Rutkevych V. Numerical simulation of the liquid distribution problem by an adaptive flow distributor
13. / V. Rutkevych, I. Kupchuk, V. Yaropud, V. Hraniak, S. Burlaka // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2022. – № 2 (98). – P. 64–69.

Надійшла/Paper received : 04.10.2022 р.    Надрукована/Printed : 01.11.2022 р.



СТРЕЛЬБИЦЬКИЙ Віктор

Одеський національний морський університет

ORCID ID: [0000-0001-7027-9498](https://orcid.org/0000-0001-7027-9498)e-mail: [vict141174@gmail.com](mailto:vict141174@gmail.com)

## ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ МЕХАНІЗМІВ ПОРТАЛЬНИХ КРАНІВ АЛЬБАТРОС

В роботі проведено аналіз відмов механізмів, які виникають у процесі експлуатації портальних кранів з понаднормовими термінами експлуатації, за отриманими даними розраховано коефіцієнти відмов та відновлення. Аналіз отриманих результатів показав, що найбільше число відмов спостерігається у механізмах підйому та повороту, найменше – у механізмах підйому вантажу та переміщення кранів. Значна частка відмов та часу на відновлення припадає на редуктори механізмів повороту та зміни вильоту, а також котки механізму повороту.

Ключові слова: портальний кран, механізм, відмова, надійність.

STRELBITSKIY Victor

Odesa National Maritime University, Odesa

### EVALUATION OF THE RELIABILITY OF ALBATROSS GANTRY CRANE MECHANISMS

Portal cranes are widely used to perform transshipment operations in sea and river areas. Since they are the main link in the technological process, so the performance of Port lines directly depends on their reliable and continuous operation. 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 overtime and long-term operation of metal structures of overhead cranes in the mode of intensive cyclic loading leads to the formation of fatigue defects and subsequent failure of components and accidents. Therefore, ensuring safe and reliable operation is one of the main tasks in the design, modernization and operation of cranes. The analysis of works on the reliability of complex technical systems indicates that the issue of reliability of gantry crane mechanisms, which have been soldered for more than 35 years in seaports, is not sufficiently studied. The purpose of the work is: analysis of failures of mechanisms that occur during the operation of gantry cranes with overtime service life, based on the obtained data, failure and recovery coefficients are calculated. Operating time affects the mechanical characteristics of materials ambiguously. The aim of the study is to analyze the failure statistics of gantry crane mechanisms with overtime periods to determine, determine the failure and recovery rates. The 30 identical Albatross cranes with a lifting capacity of 16 tons were selected for research, which operate in Grab mode and operate in seaports. Cranes are divided into 3 groups by year of production. The average annual capacity of cranes was 520 thousand tons, according to the warehouse-ship option. From the obtained data, the largest number of failures is observed in the lifting and turning mechanisms, the smallest – in the load lifting mechanism. Thus, the analysis of the results obtained showed that the largest number of failures is observed in the mechanisms of lifting and turning, the smallest – in the mechanisms of lifting the load and moving the crane.

Keywords: portal crane, mechanism, failure, reliability.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

Портальні крани широко використовують для виконання перевантажувальних робіт у морських та річкових [1–4]. Так як вони є основною ланкою технологічного процесу, тому від їх надійної та безперервної роботи залежить продуктивність портових ліній.

Однак, на сьогодні у річкових та морських портах України більше 88% кранів відпрацювали нормативний термін служби та продовжують експлуатуватися [1–4].

Слід відмітити, що понаднормова та тривала експлуатація портальних кранів в режимі інтенсивного циклічного навантаження призводить до утворення втомних дефектів та подальшої відмови вузлів та аварій [2–6]. Тому, забезпечення безпечної та надійної роботи є одним з головних завдань при проектуванні, модернізації та експлуатації кранів.

### Аналіз досліджень та публікацій

Аналіз робіт з надійності складних технічних систем показав що:

- 1) питання надійності механізмів портальних кранів, які пропрацювали більше 30 років у морських портах вивчені недостатню [5–11];
- 2) напруження впливають неоднозначно на механічні характеристики матеріалів [1–4].

### Формулювання цілей статті

Метою дослідження є аналіз статистики відмов механізмів портальних кранів з понаднормовими термінами експлуатації визначити, визначення показників надійності.

### Виклад основного матеріалу

Для досліджень було обрано 30 ідентичних кранів Альбатрос, вантажопідйомністю 16 тонн, які працюють у грейферному режимі та експлуатують у морських портах.

Крани розподілені на 3 групи за роками випуску:

- 1) 1978–1980 рр;
- 2) 1980–1982 рр ;

3) 1982–1984 рр.

Середній коефіцієнт використання кранів у навігацію склав 0,49, річна продуктивність – 520 тисяч тонн, за варіантом склад судно.

Для статистичного аналізу використано інформацію яка міститься у відповідних журналах обліку, технічного обслуговування та ремонту відповідних кранів з 2014 до 2020 р.

Оцінку надійності кранів проводили за комплексним показником – коефіцієнт готовності, який розраховували для кожної групи (рис. 1).

Отримане значення середнього коефіцієнту готовності кранів, складає 0,83, перевищує граничне значення 0,82 [5, 6, 9].

На рис. 2 наведено розподіл відмов та час відновлення вузлів для 3-х груп кранів.

Аналіз отриманих статистичних даних показав, що:

1) найбільша кількість відмов спостерігалась у механізмі повороту та металоконструкції стріли крана;

2) найбільш небезпечними з виявлених дефектів були тріщини у стріловій системі та механізмах повороту;

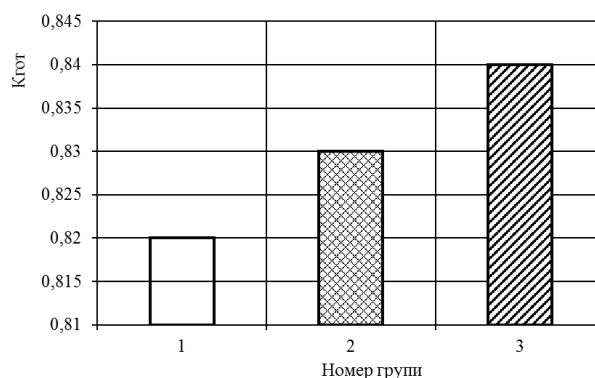
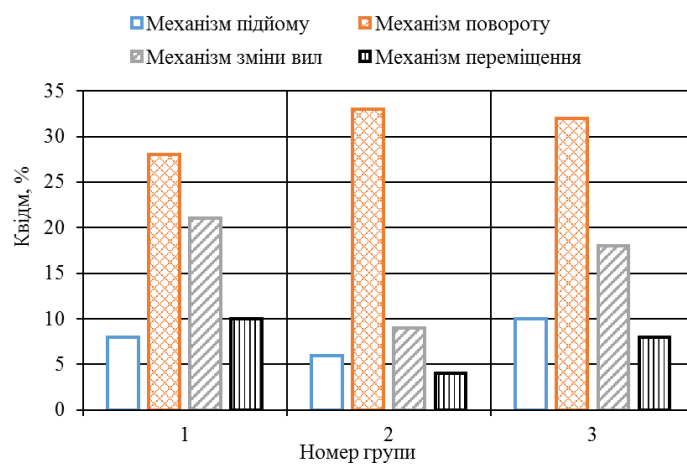
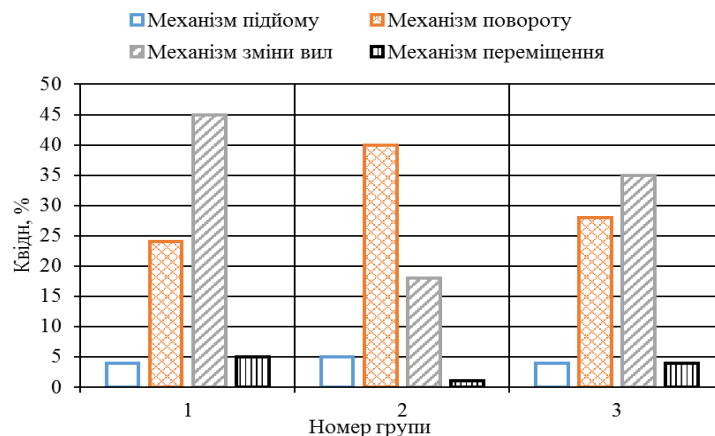


Рис. 1. Коефіцієнти готовності для 3-х груп кранів



а)



б)

Рис. 2. Розподіл коефіцієнтів відмов Квідм (а) та часу відновлення Квідм (б) вузлів для 3-х груп кранів

3) майже у всіх кранах спостерігались відмови болтових з'єднань стрілових пристроїв з подальшою їх заміною;

4) значна частка відмов та часу на відновлення припадає на редуктори механізмів повороту та зміни вильоту, а також котки механізму повороту.

5) майже у всіх кранів було виявлено знос зубців рейок механізму вильоту.

У 2 кранах було виявлено критичні дефекти у вигляді вибоїни зубців та тріщини у рейці механізму вильоту стріли, які не вимагають її заміни.

Виявлений знос, вибоїни та відколи зубців рейки механізму зміни вильоту стріли виникли внаслідок порушення умов експлуатації та технології їх ремонту.

З наведеного на рис. 2 розподілу видно, що найбільше число відмов спостерігається у механізмах підйому та повороту, найменше – у механізмах підйому вантажу та переміщення крану.

Виявлені тріщини у металевих конструкціях механізмів виникають внаслідок порушення умов експлуатації, а також вібраційних навантажень які виникають у процесі роботи та призводяться до зміни напружено-деформованого стану елементів крана [1–4].

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

Таким чином аналіз отриманих результатів показав, що найбільше число відмов спостерігається у механізмах підйому та повороту, найменше – у механізмах підйому вантажу та переміщення кранів. Найбільш небезпечними з виявлених дефектів були тріщини у стріловій системі та механізмах повороту, які виникають внаслідок порушення умов експлуатації, а також вібраційних навантажень та призводять до відмови елементів крана. Виявлений знос, вибоїни та відколи зубців рейки механізму зміни вильоту стріли виникли внаслідок порушення умов експлуатації та технології їх ремонту. Левова частка відмов та часу на відновлення припадає на редуктори механізмів повороту та зміни вильоту, а також котки механізму повороту.

### Література

1. Григоров О. В., Петренко Н. О. Вантажопідйомні машини : навч. посібник. Харків : НТУ «ХПІ», 2005. 304 с.
2. Стрельбіцький В.В., Немчук О.О. Експериментальне дослідження впливу напручування та асиметрії циклу на тріщиностійкість сталей порталних кранів. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2020. № 1. С. 245–248.
3. Стрельбіцький В.В. Експериментальне дослідження впливу напручування на тріщиностійкість сталей мостових кранів. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2020. № 4. С. 138–142.
4. Немчук О.О., Стрельбіцький В.В. Експериментальне дослідження впливу напручування на тріщиностійкість сталей порталних кранів. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2019. № 1. С. 17–20.
5. Брауде В.И., Семенов Л.Н. Надежность подъемно-транспортных машин. Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. 183 с.
6. Зубко Н.Ф., Постан М.Я., Корниец Т.Е. Проблема определения эксплуатационной надежности портовых перегрузочных комплексов. 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.
11. Pan Yang, Liang Chengji and Zheng Huiqiang. Analysis of Operational Safety of Quayside Container Gantry Cranes Based on Human Factors. China Safety Science Journal. 2012, 22(10): 65.

### References

1. Hryhorov O. V., Petrenko N. O. Vantazhopidionni mashyny : navch. posibnyk. Kharkiv : NTU «KhPI», 2005. 304 s.
2. Strelbitskiy V.V., Nemchuk O.O. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu napratsiuvannia ta trishchynostiikist stalei portalnykh kraniv. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. 2020. № 1. S. 245–248.
3. Strelbitskiy V.V. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu napratsiuvannia na trishchynostiikist stalei mostovykh kraniv. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. 2020. № 4. S. 138–142.
4. Nemchuk O.O., Strelbitskiy V.V. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu napratsiuvannia na trishchynostiikist stalei portalnykh kraniv. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. 2019. № 1. S. 17–20.
5. Braude V.I., Semenov L.N. Nadezhnost podemno-transportnykh mashin. L. : Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1986. 183 s.
6. Zubko N.F., Postan M.Ya., Korniec T.E. Problema opredeleniya ekspluatatsionnoy nadezhnosti portovykh peregruzochnykh kompleksov. 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.
  11. Pan Yang, Liang Chengji and Zheng Huiqiang. Analysis of Operational Safety of Quayside Container Gantry Cranes Based on Human Factors. China Safety Science Journal. 2012, 22(10): 65.

Надійшла/Paper received : 22.08.2022 р.    Надрукована/Printed :01.11.2022 р.

**ХОРОЛЬСЬКИЙ Валентин**

Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського

ORCID ID: [0000-0003-4040-3229](https://orcid.org/0000-0003-4040-3229)e-mail: [khorolv@ukr.net](mailto:khorolv@ukr.net)**КОРЕНЕЦЬ Юрій**

Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського

ORCID ID: [0000-0002-5873-7908](https://orcid.org/0000-0002-5873-7908)e-mail: [korenets@donnuet.edu.ua](mailto:korenets@donnuet.edu.ua)**ОМЕЛЬЧЕНКО Олександр**

Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського

ORCID ID: [0000-0003-0704-5909](https://orcid.org/0000-0003-0704-5909)e-mail: [omelchenko@donnuet.edu.ua](mailto:omelchenko@donnuet.edu.ua)**ГОНЧАРЕНКО Володимир**

Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського

e-mail: [Vladimir.Goncharenko94@gmail.com](mailto:Vladimir.Goncharenko94@gmail.com)

## **ХОЛОДИЛЬНІ МАШИНИ В СИСТЕМІ УЗГОДЖЕНОГО УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯМ КОМПЛЕКСУ ПІДПРИЄМСТВО – ПРОМИСЛОВИЙ ХОЛОДИЛЬНИК**

Запропоновано стратегію узгодженого управління електроспоживанням промислового холодильника підприємства харчового комплексу з виробництва продуктів харчування. Розроблено структуру інтегрованої інтелектуальної системи управління електроспоживанням підприємства-холодильника, в якій вбудовані системи автоматизованого контролю обліку електрики та управління траєкторією холодозабезпечення холодильних камер. У системі використано ситуаційний центр, промисловий Інтернет-речей (IIoT), цифрову платформу «ІЖА» з програмним забезпеченням (заморожування виробленої харчової продукції). По команді АСУЕ-АСУ верхній рівень промислового холодильника та його програмне забезпечення відпрацьовує задані параметри портфеля замовлення активної та реактивної потужностей підприємств харчового комплексу. Розроблено алгоритм управління промисловим холодильником у періоди обмежень потужності енергосистеми. Доведено, що зменшення питомих енерговитрат на виробництво однієї тонни заморожуваного продукту харчування в період обмежень потужності енергосистеми та віялових відключень можливо лише за рахунок оптимізації технологічних та енергетичних параметрів холодильних машин. Наведено технології зменшення енерговитрат управлінням реактивною та активною потужностями синхронних двигунів поршневих компресорів та частотного керування асинхронних двигунів гвинтових компресорів та асинхронних двигунів конденсаторів-випарників. Виконано моделювання геометрії внутрішньо-камерного завантаження холодильних камер промислового холодильника. Розроблено нові підходи до вибору установок адаптивних регуляторів збудників синхронних двигунів, узгоджених в реальному масштабі часу з енергетичними режимами роботи холодильних машин та геометрією завантаження холодильних камер. Доведено можливість підвищення ефективності управління режимами електроспоживання підприємств харчової промисловості за рахунок узгодженого автоматизованого управління технологічними процесами охолодження та заморожування м'ясної продукції, птиці, риби, молочних продуктів, фруктів тощо та застосування автоматизованих систем управління електроспоживанням шляхом побудови експертних та людино-машинних систем прийняття рішень. Розроблені системи дозволять забезпечити вимоги енергогенеруючих компаній щодо активних й реактивних навантажень, знизити витрати у електромережах та підтримати напругу у вузлах електроприймачів в межах встановлених норм.

Ключові слова: траєкторія електроспоживання, енерговитрати, моделі, промислові холодильники, холодильні камери, синхронні двигуни, збудники, адаптація, інтелектуальні системи.

KHOROLSKY Valentyn, KORENETS Yurii,

OMELCHENKO Oleksandr, HONCHARENKO Volodymyr

Donetsk National Economy and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky

## **REFRIGERATION MACHINES IN THE SYSTEM OF CONSISTENT MANAGEMENT OF ELECTRIC ENERGY CONSUMPTION OF THE COMPLEX ENTERPRISE-INDUSTRIAL REFRIGERATOR**

The strategy of the coordinated management of electric consumption of the industrial refrigerator of the enterprise of a food complex on production of foodstuff is offered. The structure of the integrated intelligent power management system of the refrigerator enterprise has been developed, in which the systems of automated control of electricity metering and control of the refrigeration trajectory of refrigeration chambers are built-in. The system uses a situation center, industrial Internet of Things (IIoT), digital platform "FOOD" with software (freezing of food products). According to the ASUE-ACS command, the upper level of the industrial refrigerator and its software fulfill the set parameters of the portfolio of orders for active and reactive capacities of the food complex enterprises. An algorithm for controlling an industrial refrigerator during periods of power system power limitations has been developed. It is proved that the reduction of specific energy consumption for the production of one ton of frozen food during the period of power system power limitations and fan outages is possible only by optimizing the technological and energy parameters of refrigeration machines. Technologies for reducing energy consumption by controlling the reactive and active power of synchronous motors of reciprocating compressors and frequency control of asynchronous motors of screw compressors and asynchronous motors of evaporating condensers are presented. Simulation of the geometry of the in-chamber loading of the refrigerating chambers of an industrial refrigerator is performed. New approaches to the choice of adaptive regulators of synchronous motor exciters have been developed, which are coordinated in real time with the energy modes of operation of refrigeration machines and the geometry of refrigeration chamber loading. The possibility of improving the efficiency of power management

*regimes of food industry enterprises through coordinated automated control of cooling and freezing of meat products, poultry, fish, dairy products, fruits and the use of automated power management systems by building expert and human-machine decision making systems. The developed systems will allow to meet the requirements of energy generating companies for active and reactive loads, reduce costs in the power grid and maintain the voltage in the nodes of electrical receivers within the established norms.*

*Key words: power consumption trajectory, energy consumption, models, industrial refrigerators, cold rooms, synchronous motors, exciters, adaptation, intelligent systems.*

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

Основним завданням підприємств з виробництва холоду для переробної та харчової галузей України у стратегічному періоді, розрахованому до 2035 року, є підвищення конкурентоспроможності продуктів харчування до вимог світового ринку та зменшення питомих енерговитрат для їх виробництва на 25-35% від рівня 2013 року [1].

Високий рівень енерговитрат на виробництво підприємствами харчування однієї тонни продукції стимулює їх енергоменеджмент до корпоративної реструктуризації процесів обліку та оптимізації споживання електрики, газу, води, пари, дизельного палива, оливи та інших матеріалів [2].

З метою зменшення собівартості продукції та підвищення її якості до рівня європейських стандартів на підприємствах харчової промисловості розроблені методи управління виробництвом охолодженої й замороженої продукції харчування в умовах ринкових тарифів на електроенергію [3].

Отже, зниження енергетичних витрат на ці виробничі процеси є актуальним завданням енергоменеджменту до 2035 року. Цього можна досягти впровадженням на підприємствах з виробництва холоду автоматизованих систем управління електроспоживанням холодильних машин та промислових холодильників. Робота таких систем повинна бути узгодженою з оптимізацією технологічних процесів виробництва холоду – холодопостачання  $N$  холодильних камер [4] та енергетичними параметрами синхронних й асинхронних двигунів поршневих і гвинтових компресорів холодильних машин.

Таким чином, задача подальшого удосконалення принципів інтелектуального управління процесами електроспоживання потужних комплексів з виробництва продуктів харчування високої якості в системі енергозабезпечення «підприємство – промисловий холодильник» в умовах обмежень енергопотужності системи електропостачання є актуальною та своєчасною.

### **Аналіз досліджень та публікацій**

Проблема ефективності систем енергопостачання підприємств різних галузей тісно пов'язана зі стратегією розвитку енергетики України до 2035 року [5]. Пріоритетність напрямку державної політики щодо енергозбереження на підприємствах харчової промисловості, створення зон високої енергоефективності висвітлено в працях [5–7]. Принципи науково обґрунтованого управління енергозбереженням промислових холодильників підприємств харчової галузі на основі оптимізації технологічних режимів енергоємного обладнання розроблено вченими [8–10]. Системи автоматизованого комерційного обліку й управління електроспоживанням підприємств на базі сучасних SCADA-систем розроблено в [11]. У реферованих працях доведено, що ефективність процесів електрозбереження у багатьох випадках залежить від удосконалення систем контролю витрат електрики і автоматизації енергоємних технологічних комплексів, методів штучного вирівнювання графіків навантаження [12], а також використання технологій управління збудженням синхронних двигунів з метою зниження плати за перетоки реактивної потужності та сплати за них [13].

Разом з тим, ефективність споживання електрики залежить від багатьох не вирішених питань. Серед них: автоматизація електропостачання, вміння проєктантів розробити системи інтелектуального управління інваріантними до збурень технологічних процесів в періоди обмежень потужності енергосистеми та віялових відключень. Крім цього, ще недостатньо досліджень проведено стосовно розробки багаторівневих систем управління електроспоживанням харчових комплексів з впровадженням інтелектуальних систем управління реактивними та активними потужностями підприємств у періоди обмежень потужності енергосистеми та віялових відключень.

### **Формулювання цілей статті**

Метою роботи є розв'язання актуальної наукової задачі автоматизованого управління траєкторією електроспоживання комплексу «підприємство харчової промисловості – промисловий холодильник – підприємство-споживач смарт-продуктів харчування» у періоди обмежень потужності енергосистеми.

Вперше перед проєктантами поставлено завдання: за рахунок розробки системи інтелектуального керування комплексом і прогнозування витрат активної й реактивної потужностей електроприводів холодильних машин з постійним контролем геометрії внутрішньо-камерного завантаження (в період термічного оброблення продуктів (вантажів), що супроводжуються відведенням теплоти від продуктів технологічними процесами охолодження, заморожування, доморожування) досягти зменшення витрат електрики та впливу збурень вхідних характеристик продукції на параметри електроспоживання комплексу.

Сформульована мети конкретизується в таких завданнях:

- дослідити процес електроспоживання харчового комплексу як об'єкта траєкторного управління активною та реактивною потужностями;

- побудувати інтегровану інтелектуальну систему управління електроспоживанням підприємств-холодильників;
- синтезувати управління траєкторією електроспоживання комплексу виробництва смарт-продуктів харчування та їх охолодження або заморожування залежно від ринкового тарифу на електроенергію.

### Виклад основного матеріалу

Корпоративні підприємства харчової промисловості Придніпровського регіону (м'ясокомбінати, молокозаводи, рибокомбінат, підприємства з переробки плодоовочевої продукції, промислові холодильники), об'єднані в єдиний комплекс з виробництва смарт-продуктів харчування із загальним навантаженням від 200 до 1000 МВт, відносяться до великих споживачів електрики. Більшість технологічних виробництв електропостачання цих підприємств згідно ПУЕ відносяться до I-II категорій електроприймачів [14].

У цілому електричне господарство (ЕГ) такого комплексу підприємств та траєкторію електроспоживання можна описати залежністю виду:

$$EG = \{P_{\max} \cdot K_{\text{ПОП}} \cdot T \cdot D \cdot P_{\text{сер}} \cdot A_{\text{П}} \cdot A_{\text{ЕП}}\}, \quad (1)$$

де  $P_{\max}$  – півгодинний максимум навантаження підприємства;  
 $K_{\text{ПОП}}$  – коефіцієнт попиту;  
 $T$  – річне число годин використання максимального навантаження  $T_{\max}$ , год;  
 $D$  – кількість встановлених електродвигунів (шт.);  
 $P_{\text{сер}}$  – активна потужність двигунів, умовних електродвигунів, кВт;  
 $A_{\text{П}}$  – електроозброєність праці (МВт·год/люд);  
 $A_{\text{ЕП}}$  – продуктивність праці електротехнічного персоналу (МВт·год/люд).

Оптимізація процесів електропостачання підприємств-холодильників харчової галузі виконується шляхом управління траєкторією електроспоживання комплексу на основі причинно-наслідкової моделі, розробленої авторами статті.

На рис. 1 наведено причинно-наслідкову модель управління електроспоживанням комплексу «група підприємств з виробництва смарт-продуктів харчування – промисловий холодильник (ПРХ) – споживачі», яка відрізняється деталізацією впливів груп чинників на траєкторію електроспоживання комплексу (електричне господарство промислового комплексу, управління електроспоживанням, збурення траєкторії електроспоживання холодильних машин (ХМ), електроспоживання компресорних установок та енергоефективність холодильних камер промислового холодильника).

Необхідність економії електроенергії на підприємствах харчової галузі України на усіх стадіях виробництва замороженої продукції харчування (ЗПХ) також обумовлено зростанням у 2021 році цін на електроенергію.

У той же час, зростання її частки у собівартості продукції енергоємних технологій охолодження та заморожування складає до 20–25 % і тому потребує виконання проектних рішень щодо узгодженого керування електрообладнанням комплексу в періоди обмежень потужності енергосистеми [1, 2, 9].

Особливістю сучасного управління електроспоживанням підприємств харчової галузі є впровадження систем енергоменеджменту і автоматизованих систем контролю та обліку електроенергії (АСКОЕ). Усі підприємства харчової галузі та холодильні підприємства підприємств споживачів (супермаркетів) Придніпровського регіону розраховуються за спожиту електроенергію з ПАТ «ДТЕК ДНІПРОБЛЕНЕРГО» України за ринковим тарифом [1, 3]. Перехід на цей тариф стимулює енергоменеджмент підприємств харчової галузі та холодильних підприємств до виокремлення деяких цехів (фабрик) як енергоспоживачів-регуляторів, диференційованих за категоріями та часу їх роботи протягом доби. Наприклад, допоміжні цехи підприємств з виробництва продуктів харчування і холодокомбінатів можуть стати в періоди максимального навантаження енергосистеми споживачами-електрорегуляторами (СЕР), при цьому компресорне господарство стає не лише електрорегулятором, а ще й компенсатором реактивної потужності, що дозволяє знизити вартість електроенергії на 5–10% від лімітних значень.

Іншою особливістю підприємств харчової галузі є те, що в якості електроприводів найбільш енергоємних технологічних процесів виробництва холоду використовуються синхронні двигуни (СД) поршневих компресорів потужністю від 25 кВт до 600 кВт, асинхронні двигуни гвинтових компресорів потужністю від 25 кВт до 600 кВт і двигуни змінного струму насосів конденсаторів, вентиляторів потужністю від 3 до 35 кВт, тиристорні перетворювачі частоти (ТПЧ), конденсаторні батареї тощо.

З метою аналізу і оптимізації електроспоживання на підприємствах харчової галузі структуру електричної мережі представимо у вигляді множини  $J = [j], j = 1, 2, \dots, n$  – рівнів ієрархії, до яких відносяться: вхідні фідери на підприємстві; трансформаторні підстанції; силові трансформатори; групи електроприймачів, що розподілені на значній території комплексу (підприємств – виробників смарт-продуктів харчування; підприємств – промислових холодильників; підприємств – споживачів охолоджуваної та замороженої продукції транспортних цехів, холодильних камер). Тобто групи електроприймачів, що задіяні від однієї секції шин та/або групи електроприймачів, задіяні від одного фідера з найбільш енергоємними споживачами (поршневими компресорами з типовими синхронними



електроприводами (СД) потужністю  $P_{QM} = 250-500$  кВт і більше; гвинтовими компресорами з асинхронними електроприводами потужністю до 350 кВт; конденсаторами; вентиляторами; насосами тощо).

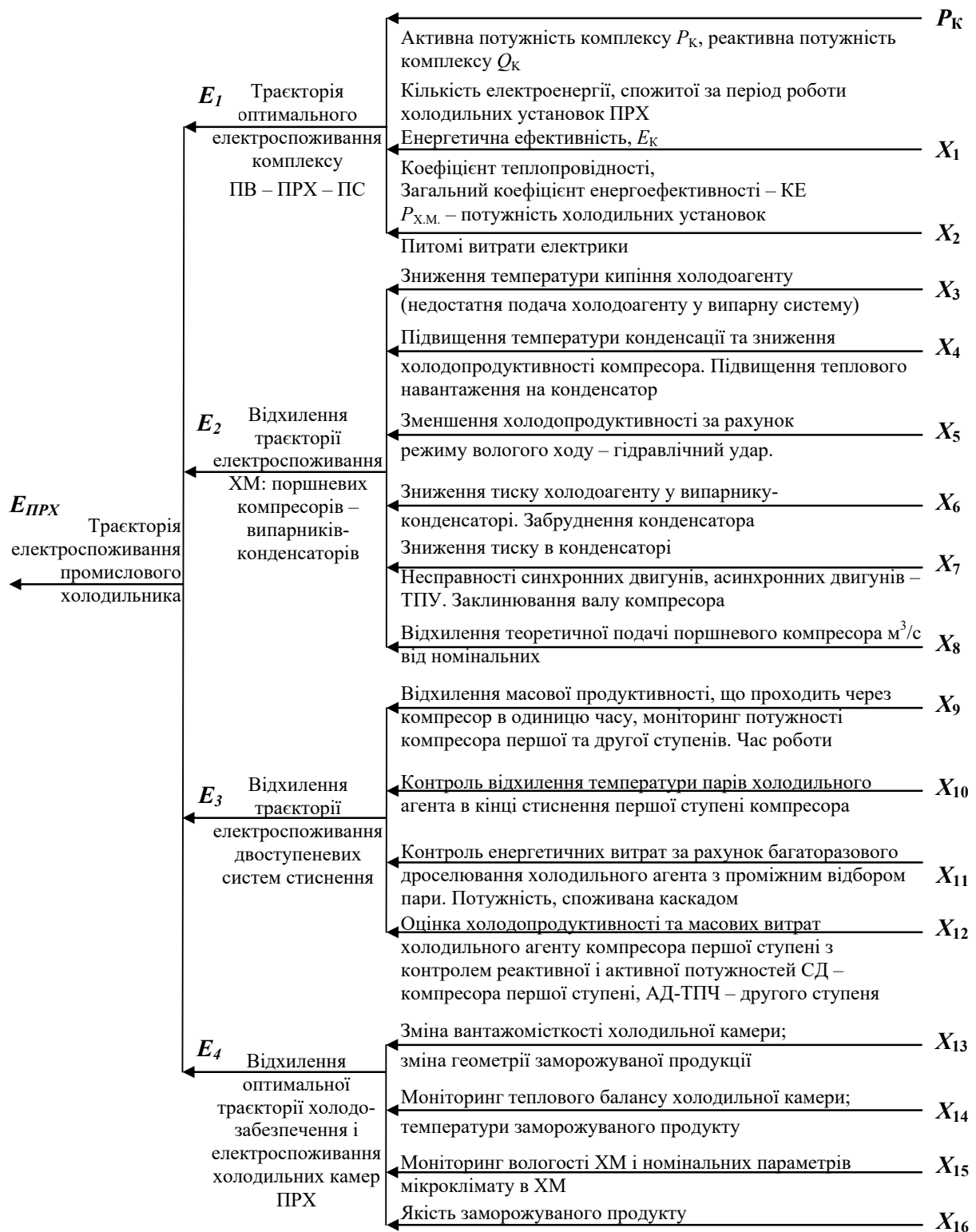


Рис. 1. Причинно-наслідкова модель управління енергоспоживанням підприємства-холодильника

У системах виробництва холоду будемо використовувати холодильні машини з інтелектуальними системами керування потенціалом енергозбереження до 20 % за рахунок автоматизованого контролю продуктивності двоступеневого стиснення (поршневий компресор з СД – перший каскад і гвинтовий компресор з АД-ТПЧ) та одержання температурних режимів заморожування м'ясних продуктів (великої рогатої худоби, ВРХ), птиці, риби, м'ясних напівфабрикатів, фруктів, ягід, молочних продуктів та ін.

Процеси заморожування характеризуються такими робочими характеристиками:

- тривалістю заморожування, параметрами середньої кінцевої температури продукту, кількістю відведеної теплоти, вологовмістом продукту, густиною охолоджуваного продукту, геометрією продукту (формою та розмірами шматка);
- тривалістю холодильного зберігання різних продуктів харчування та підтримування стабільної низької температури в холодильних камерах ПРХ, що допомагає сповільнити зміни у продуктах, які є наслідками фізичних, хімічних та біологічних процесів і призводять до втрати маси, зміни зовнішнього вигляду, хімічного складу, консистенції.
- усушенням продуктів, тобто оцінкою втрати маси через випаровування вологи, що призводить до втрати маси та погіршення якості продуктів;
- рівнем вологості, що випаровується з поверхні продукту і конденсується на поверхні охолоджувальних пристроїв у вигляді снігової шуби (шар снігу створює додатковий термічний опір, що змушує систему інтелектуального керування знижувати температуру та тиск кипіння холодоагенту, тому потрібно в реальному масштабі часу (РМЧ) контролювати витрати електроенергії);
- рівнем окислення продуктів харчування (сала, масла, жирних порід риби та ін.), що призводить до зміни смаку і кольору продуктів.

Експерти з питань заморожування та охолодження продуктів харчування [2–5] вважають, що технологічні чинники, наведені в моделі на рис. 1, визначають енергетичну ефективність  $X_1$  та кількісні параметри електроенергії за період роботи холодильних установок ПРХ, а загальний коефіцієнт енергоефективності, коефіцієнт теплопровідності, потужність компресорних установок тісно корелюють з питомими витратами електрики на одну тону заморожуваної харчової продукції.

Експерти з енергетичного аудиту [6] вважають, що на відхилення траєкторії електроспоживання ХМ ПРХ (поршневих компресорів, гвинтових компресорів, випарників-конденсаторів, насосів, приладів охолодження тощо) впливають як технологічні, так і енергетичні заходи. Поєднання цих двох методів дозволяє знизити енергоємність процесу виробництва холоду.

Наведена методика аналізу електричного господарства ПРХ дозволяє автоматизувати процес управління траєкторією електроспоживання підприємства харчової галузі на єдиній інформаційній платформі SCADA-систем, АСКОЕ, автоматизованих систем управління електроспоживанням (АСУЕ). У свою чергу, траєкторія електроспоживання підприємств в умовах обмежень потужності енергосистеми визначає траєкторію оптимального виробництва продукції за допомогою автоматизованих систем управління технологічним процесом (АСУТП) [16]. Звідси слідує, що інтегровану автоматизовану систему управління підприємства, можливо представити у вигляді трьох взаємозв'язаних рівнів управління.

При цьому нижній рівень утворюють: АСУТП цехів з виробництва м'ясних продуктів, транспортування сировини (туш ВРХ), переробні цехи підприємства, цеха із заморожування м'ясної продукції; АСУЕ технологічних операцій і цехів пов'язаних між собою за допомогою SCADA-систем та автоматизованих систем управління збудниками СД, СЕР та джерелами реактивної потужності (ДРП).

Середній рівень утворюють MES-системи (Manufacturing Execution System) [17], які орієнтовані на інформатизацію задач оперативного планування і управління виробництвом охолодженої або замороженої продукції, оптимізацію виробничих процесів та витрат електроенергії, газу, води, мастильних матеріалів, дизельного палива, контролю та диспетчеризації використання планів і портфеля замовлень супермаркетів і диспетчеризації електропостачання.

Верхній рівень автоматизованого управління підприємством (АСУП) утворюють ERP-системи, які забезпечують рішення стратегічних задач виконання портфеля замовлень виробництва продукції, управління ресурсами, інвестиціями та забезпечують підтримку бізнес-процесів підприємства в цілому [1]. Цей рівень управління підприємством харчового комплексу регіону також зв'язаний з підсистемами інформаційного забезпечення, програмного забезпечення (ПЗ), прийняття стратегічних рішень, ситуаційного управління, Промислового Інтернету-речей (IIoT) та утворює з Центром ситуаційного управління (ЦСУ) підприємств-виробників продуктів харчування підприємства-холодильника цифрову платформу «ІЖА».

На рис. 2 представлена структура інтегрованої інтелектуальної системи, яка забезпечує оптимізацію виробництва портфеля замовлень споживачів (підприємств торгівлі) в періоди обмежень електроенергії за допомогою експертних систем (ЕС) шляхом побудови бази даних (БД), бази знань (БЗ), динамічної бази оперативних технологічних даних, динамічної бази оперативного стану енергосистеми та бази правил (БП).

Особливістю розробленої системи є:

1) інтегрованість ЕС з АСУТП – MES – ERP системами, Ситуаційним Центром (СЦ) комплексу, Промисловим Інтернетом-речей (IIoT), цифровою платформою «ІЖА»;

2) інтегрованість з експертною оцінкою параметрів холодопродуктивності холодильних камер, геометрії їх завантаження, температурних режимів, вологості, якості продукції тощо в реальному масштабі часу;

3) використання холодильних машин, до складу яких входять поршневі компресори великої продуктивності, гвинтові компресори, конденсатори-випарники, системи контролю і регулювання холодопродуктивності та холодопостачання холодильних камер.

Такий підхід забезпечує узгоджену роботу управлінської та інформаційної підсистем АСУ підприємства; діагностику проблемних ситуацій та оцінку технологічно-енергетичних ситуацій; прийняття рішень щодо параметрів  $P_i$ ,  $Q_i$ ; пошук оптимальних рішень щодо визначення СЕР і ДРП.

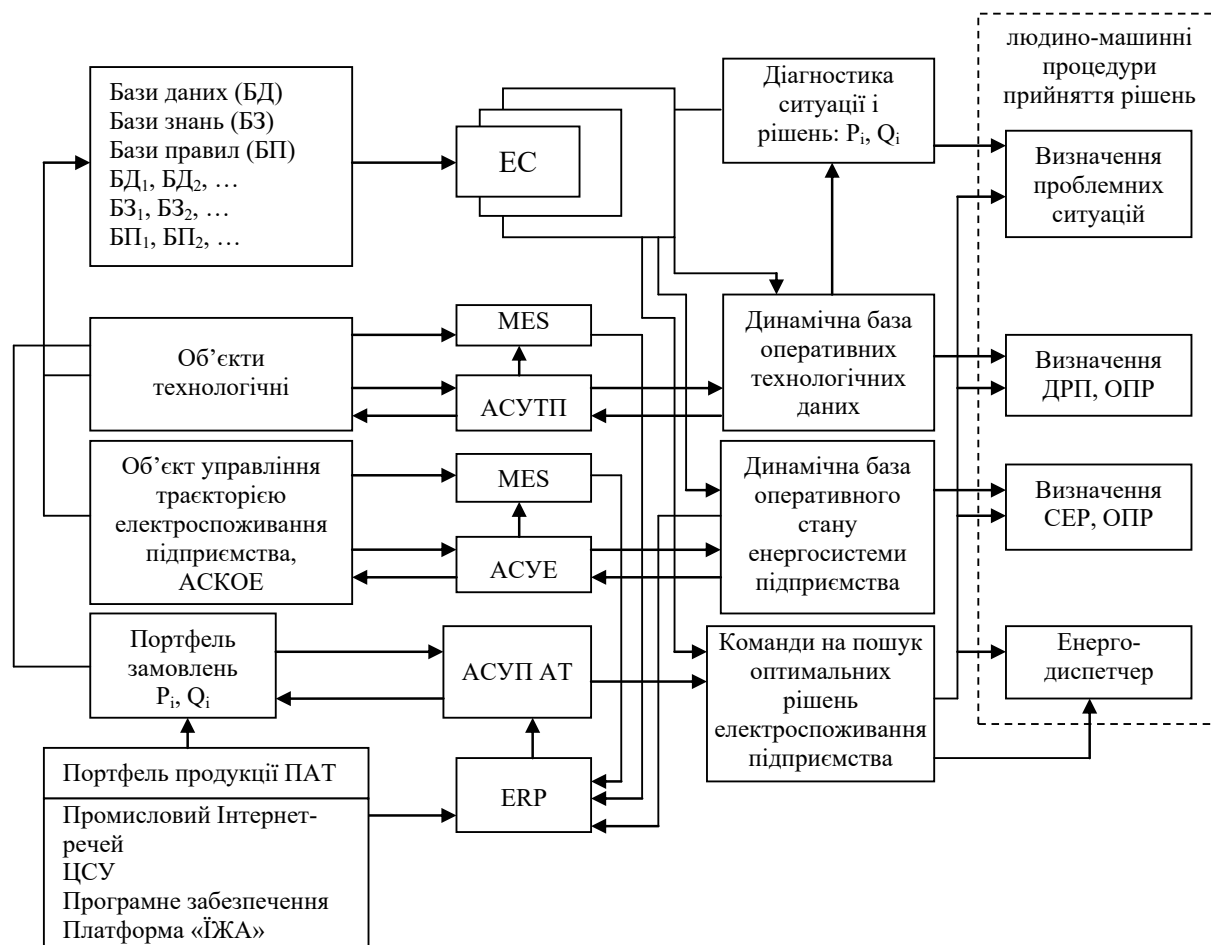


Рис. 2. Структура інтегрованої інтелектуальної системи управління електроспоживанням підприємств харчового комплексу

Нижній рівень (АСУТП, АСУЕ) є найбільш інтенсивним за об'ємом інформації. Він також є обмеженим у часі щодо реакції на збурення, як в енергетичній системі так і в технологічній системі виробництва продукції.

В АСУТП-, АСУЕ-, SCADA-системах накопичується і обробляється велика кількість технологічних, енергетичних параметрів та створюється інформативна база вихідних даних для MES-систем та цифрової платформи «ІЖА»

Накопичена в SCADA-системах інформація, у свою чергу, утворює базу даних (БД) для прогнозування як технологічних параметрів виробництва продукції, так і прогнозування параметрів  $P_i$ ,  $Q_i$ . Для прогнозування  $P_i$ ,  $Q_i$  в темпі з процесом у роботі використані штучні нейронмереві моделі (ШНМ) [18].

На рисунку 3 наведені навчання ШНМ: а) для прогнозування реактивної потужності підприємства  $Q_{Ep}$ ; б) для прогнозування активної потужності  $P_{Ep}$ .

ШНМ, рис. 3, а), складається із трьох шарів мережі на вхід якої надходять  $Q_i, \dots, Q_k$  – сигнали. На виході системи одержуємо  $Q_{Ep}(t+\tau^*)$  – вихідні сигнали мережі з ваговими коефіцієнтами  $w_{ij1}, w_{ij2}$ .

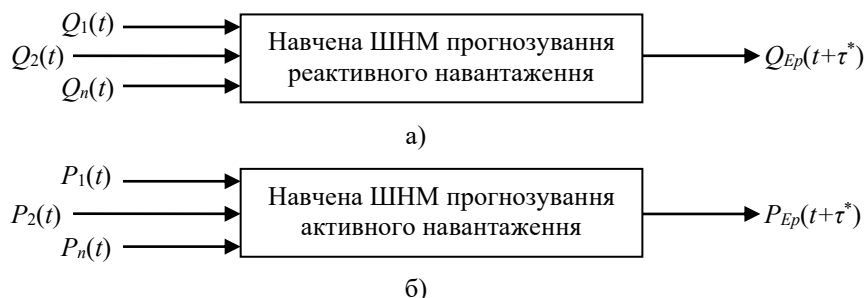


Рис. 3. Навчені ШНМ для прогнозування:  
а) реактивної потужності  $Q_{Ep}$ ; б) активної потужності  $P_{Ep}$

Конфігурація мережі для прогнозування реактивного навантаження представляє структуру, у вхідному шарі якої знаходиться 4, в середньому 3, а у вихідному – 1 нейрон (ШНМ зі структурою 4-3-1). Навчання мережі проведене за допомогою комбінованого методу, послідовність навчання складає 150 вибірок, час навчання 10 с при числі ітерації (кроків) навчання 450-500.

Час навчання ШНМ, рис. 4, б), для прогнозування активних навантажень РЕР підприємства при навчанні мережі за алгоритмом зворотного розповсюдження помилки складає 5 с при 50-250 ітераціях навчання, а за комбінованим алгоритмом – 12-16 с при 1000 ітераціях навчання мережі. Після виконання прогнозу модель видає рекомендації щодо вибору числа ДРП на вводах електричної енергії та керує збудниками СД поршневих компресорів, СД насосів холодопостачання, СД – екстаустерів фабрики з виробництва ковбас, заморожуваних продуктів і т. п.

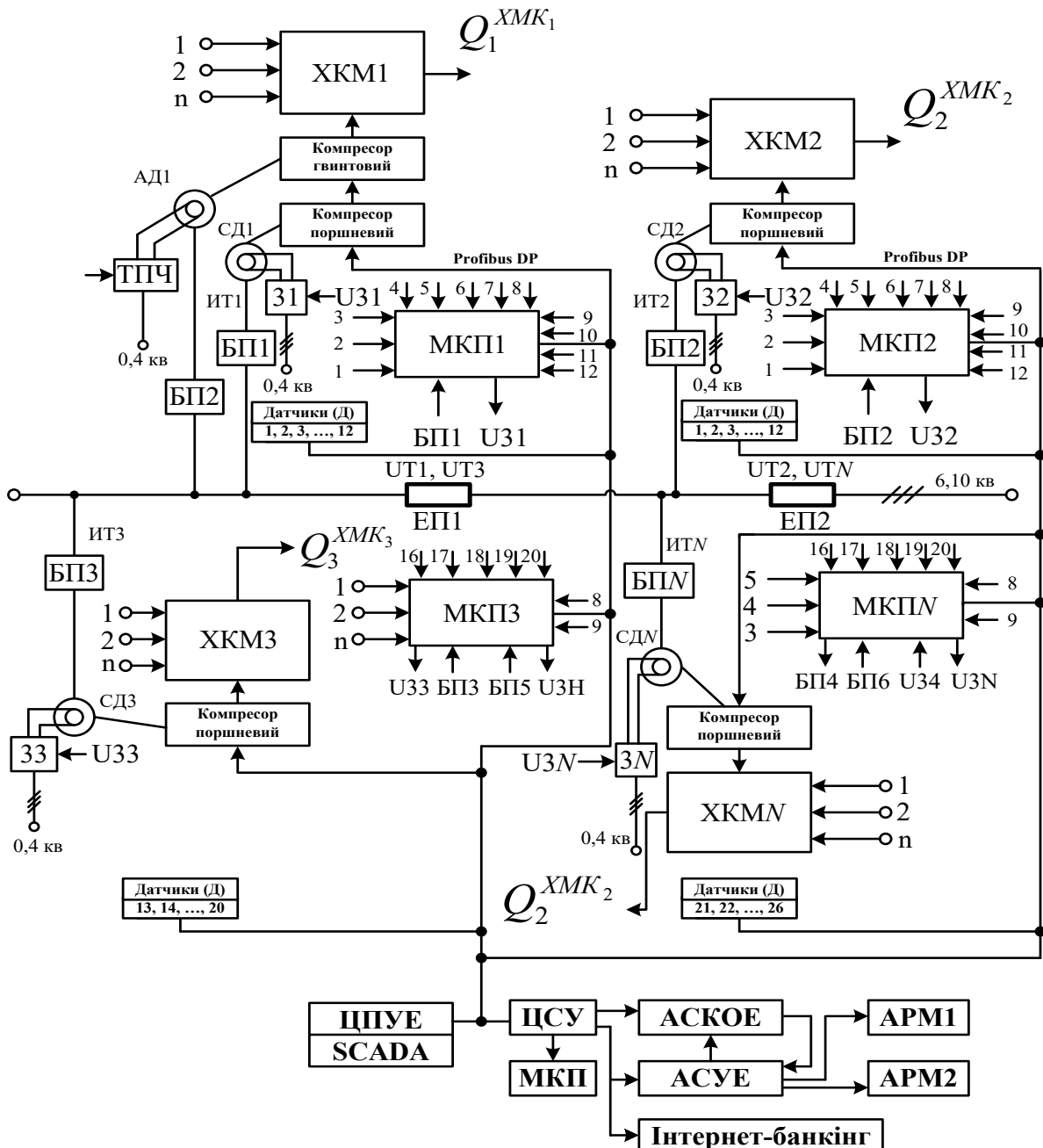


Рис. 4. Автоматизована система управління електроспоживанням промислового холодильника: ЦПУЕ – центральний нейропроцесор управління електроспоживанням ПРХ; ЦСУ – центр ситуаційного управління; МКП – монітор корпоративної продуктивності; АСКОЕ – автоматизована система контролю й обліку електроенергії; АСУЕ – автоматизована система управління електроспоживанням промислового холодильника; ХМК1, ХМК2, ХМК3, ..., ХМКN – холодильні камери 1, 2, ..., N промислового холодильника; МКП – мікроконтролер; АД1 – асинхронний двигун з ТПЧ (тиристорним перетворювачем частоти); СД1, СД2, СДN – синхронні двигуни; УТ1, УТ2, УТN – напруга електроприймачів синхронних двигунів поршневих компресорів та асинхронних двигунів гвинтових компресорів; U31, U32, U3N – напруга збудників СД; ЕП1, ЕП2 – електроприймачі холодильних установок; БП1, БП2, ..., БПN – блоки-електроприймачі електроприводів компресорних установок;  $Q_1^{XMK_1}$ ,  $Q_2^{XMK_2}$ ,  $Q_3^{XMK_3}$ ,  $Q_N^{XMK_N}$  – вантажомісткість холодильних камер

Розглянемо більш детально управління траєкторією електроспоживання ПРХ в залежності від технологічних режимів роботи холодильних камер.

На рисунку 4 наведено схему автоматизованої системи управління електроспоживанням холодильних машин  $N$  холодильних камер промислового холодильника підприємства. Система електроспоживання кожної з  $N$  компресорних станцій ПРХ адаптована до нестационарних технологічних режимів роботи обладнання і характеризується інваріантністю до типу продуктів, що надходять на заморожування [3]. Траєкторії електроспоживання холодильного підприємства (холодильного комбінату) в момент  $T_i$  відповідає своя траєкторія виробництва холоду з робочими параметрами і технологічними параметрами, які визначають геометрію внутрішньо-камерного завантаження продуктами харчування першої, другої, третьої і т. д. холодильних камер, відповідно  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4 \dots$ , та холодопродуктивності холодильних машин.

Температурні параметри холодильних камер характеризуються також технологічними параметрами, які визначають енергоефективність процесу заморожування. Серед них масова холодопродуктивність, кДж/кг холодильних машин  $Q_{1c}(XKM1), Q_{1c}(XKM2), Q_{2c}(XKM3), Q_{3c}(XKM4)$  та, відповідно, продуктивність холодильників (т/год) – першої, другої і третьої холодильних камер; витрати вологи, що надходить до холодильних камер  $W_B(XKM1), W_B(XKM2)$ , та інші технологічні параметри, що контролюються датчиками Д1, Д2, ..., Д20.

Роботу холодильного комплексу оцінюють за вихідними показниками: наприклад,  $Q_{Фм'яс}$  – фактична продуктивність підприємства за видами заморожуваної м'ясної продукції;  $Q_{Фриб}$  – фактична продуктивність промислового холодильника з виробництва заморожуваних рибних продуктів харчування, і т. д. по кожній із  $N$  камер промислового холодильника і набором параметрів холодопродуктивності та якості продукції ( $\alpha_{якВ}$ ) тощо.

При цьому вартість активної потужності залежить від ринкових чинників та визначається ринковим тарифом. Вартість реактивної потужності залежить від характеру навантаження електроприводів підприємств харчової продукції – холодильного комплексу та оснащення його засобами компенсації реактивного навантаження. У той же час, в якості компенсаторів реактивної потужності в системі електроспоживання електрики промисловим комплексом «підприємства-виробники – промисловий холодильник – підприємства-споживачі» використано СД компресорних установок.

У цьому випадку важливими питаннями узгодженого управління траєкторією електроспоживання будуть:

- розробка способу керування збудженням синхронних двигунів електроприводу поршневих компресорів ХКМ1, ХКМ2, ХКМ3, ХКМ4 і т. д. з метою зниження плати за перетоки реактивної потужності [13];
- розробка алгоритму енергетичної ефективності компенсації реактивної енергії за допомогою синхронних двигунів поршневих компресорів;
- розробка методів корегування адаптивних регуляторів збудників синхронних двигунів поршневих компресорів.

Перейдемо до обговорення результатів інтелектуального управління енергоспоживанням харчового комплексу регіону з промисловим холодильником.

Вплив коливання якісних властивостей характеристик заморожуваної продукції на активну потужність електроприводу компресорів конденсаторів-випарників досліджено у [8]. Такий підхід дозволяє опосередковано оцінити витрати електроенергії на виробництво запланованих технологічних параметрів:  $Q_{Фм'яс}, Q_{Фриб}, \beta, \alpha$ . При зміні характеристик м'ясних продуктів змінюються і параметри питомих витрат електрики на нормовані параметри холодопродуктивності [3].

Тоді розрахункові витрати електрики будемо оцінювати по формулі:

$$W_K = Q_{\text{конц}}^{\Phi} * K_{c.p} * (\beta_{-0.056}^K - \beta_{-0.056}^{c.p.}) * e_{\text{пт}}^{\Phi}, \quad (2)$$

де  $K_{c.p}$  – коефіцієнт, що відображає залежність температурних режимів тіла замороженого продукту від холодопродуктивності, що надходить на заморожування;

$(\beta_{\text{тем}1}^K - \beta_{\text{тем}2}^{c.p.}) = \Delta_{\text{тем}}$  – приріст температури в тілі продукту в процесах охолодження, заморожування і доморожування;

$e_{\text{пт}}^{\Phi}$  – питомі витрати електрики на виробництво одної тонни замороженого продукту харчування із заданими параметрами якості  $\beta_{як}, \alpha_{як}$  і вологи  $B_{зод} < 10\%$ .

Якщо енергосистема встановила підприємству ліміт електрики в періоди обмежень потужності, тоді

$$\max \left[ \sum_{j=1}^n \int_0^{t+30} P(t) dt \right] \leq \sum_{j=1}^n P_{\text{лім}} = K_{\text{поп}} \cdot P_{\text{ном}} \\ \max \left[ \sum_{i=1}^n \int_0^{t+30} P(t) dt \right] \leq \sum_{i=1}^n P_{\text{лім}} = K_{\text{поп}} \cdot P_{\text{ном}}, \quad (3)$$

де  $P(t)$  – активна максимальна потужність підприємства в періоді обмеження потужності енергосистеми;

$P_{\text{ЛІМ}}$  – розрахункова лімітна потужність;

$P_{\text{НОМ}}$  – номінальна потужність;

$N$  – кількість технологічних холодильних камер ПРХ;

$t_0 < t \leq t_{-30}$ .

Розрахована реактивна та повна потужності дорівнюють:

$$Q_p = P_{\text{ЛІМ}} \cdot \tan \varphi, \quad S_p = \sqrt{P_{\text{ЛІМ}}^2 + Q_p^2}. \quad (4)$$

Значенням  $E_k$ ,  $P(t)$ ,  $P_{\text{ЛІМ}}$ ,  $Q_p$ ,  $S_p$  в кожний з періодів прогнозування  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  будуть відповідати експертні значення холодопродуктивності  $Q^{\Phi}_{\text{холод}1}$ ,  $Q^{\Phi}_{\text{холод}2}$  і поточні значення параметрів  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$ ,  $\varphi_4$ ,  $Q_{1c}^{\text{хкм}1}$ ,  $Q_{1c}^{\text{хкм}2}$ ,  $Q_{2c}^{\text{хкм}3}$ ,  $Q_{3c}^{\text{хкм}4}$ ,  $W_{\text{вх}}^{\text{хкм}1}$ ,  $W_{\text{вх}}^{\text{хкм}2}$ .

Перераховані вище параметри будемо вважати нечіткими множинами, для оцінки яких як і раніше, використаємо штучні нейронні мережі (ШНМ) [17], по інформації датчиків Д1, Д2, ..., Д20. У автоматизованій системі управління електроспоживанням (АСУЕ) нейронні мережі можуть бути використаними також в задачах оброблення інформації, ідентифікації нелінійних систем, прогнозування, фільтрації, адаптованого управління, розпізнавання образів та діагностики.

В АСУЕ виконується автоматизований контроль параметрів витрат електрики по кожній із  $N$  технологічних холодильних камер. За допомогою системи АСКОВЕ побудовано прогноуюча нейромережева модель і управлінська нейромережева модель:  $P_i$  – активної потужності;  $Q_i$  – реактивної потужності;  $U_i$  – напруги.

Отже, в АСУЕ виконується моніторинг траєкторії електроспоживання ПРХ  $T_E^{\Phi}$  по кожній із  $N$  технологічних холодильних камер:

$$\bar{T}_E^{\Phi} = \left\{ \bar{T}_{E1}^1, \bar{T}_{E2}^2, \bar{T}_{E3}^3, \dots, \bar{T}_{EN}^N \right\}, \quad (5)$$

якій буде відповідати траєкторія  $\bar{T}_{\beta}^{\Phi} = \left\{ \bar{T}_{\beta K1}^1, \bar{T}_{\beta K2}^2, \bar{T}_{\beta K3}^3, \dots, \bar{T}_{\beta KN}^N \right\}$  виробництва заданої якості продукції заморожування. У випадку аварій в системі енергопостачання або зменшення ліміту  $P_{\text{ЛІМ}}$ , та віялових відключень  $\bar{T}_{\Delta Q}^{\Phi} = \left\{ \bar{T}_{\Delta Q1}^1, \bar{T}_{\Delta Q2}^2, \bar{T}_{\Delta Q3}^3, \dots, \bar{T}_{\Delta QN}^N \right\}$  траєкторії виробництва продукції заморожування будуть відповідати ситуації невиконання портфеля замовлень підприємств України та країн ЄС.

Вище наведеним технологічним траєкторіям будуть відповідати технологічні, фінансові, економічні ризики [27, 36, 40]. Які обумовлені змінами характеристик заморожуваної продукції, що надходить на споживання, станом технологічного обладнання та електрообладнання і відповідно електропостачанням ПРХ.

Таким чином, нормальній ситуації  $\left\{ \bar{S}_E^H \right\}$  буде відповідати своя траєкторія електроспоживання  $\left\{ \bar{T}_E^{\Phi} \right\}$ , траєкторія

виробництва заданої якості продукції заморожування  $\left\{ \bar{T}_{\beta}^{\Phi} \right\}$ , траєкторія мінімізації втрати продукції  $\left\{ \bar{T}_{\Delta Q}^{\Phi} \right\}$  і

мінімальні ризики не виконання планових показників щодо зниження прибутку  $\bar{P}_{\Phi}^H \rightarrow \bar{P}_{\Phi}^H \text{ зад. зн.}$

У випадку проблемних, аномальних, аварійних і після аварійних ситуацій в енергосистемі АСУЕ діє таким чином. Видає рекомендації оперативному персоналу (АРМ начальнику зміни ПРХ, АРМ енергодиспетчера ПРХ). приймає рішення виведення електроспоживання на траєкторію  $\left\{ \bar{T}_E^{\Phi} \right\}$ . Оптимізує

параметри:  $P_1(t)$ ,  $P_2(t)$ , ...,  $Q_{1P}(t)$ ,  $Q_{2P}(t)$ ,  $Q_{3P}(t)$ , ...,  $Q_{1BX}(t)$ ,  $Q_{2BX}(t)$ , ...,  $Q^{\Phi}_{\text{Ім'ясо}}$ ,  $Q^{\Phi}_{\text{2риба}}$  по інформації датчиків як електричних так і технологічних змінних. Крім цього ряд параметрів, що визначають, наприклад чинники холодопостачання і характеристики термічної обробки продуктів, параметри геометрії внутрішньо камерного завантаження холодильних камер  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$ ,  $\varphi_4$ , ...,  $\varphi_N$  параметри заморожування та якості продукції будемо оцінювати за допомогою штучної п'ятишарової нейронної мережі, яка навчається за допомогою процедури зворотного розповсюдження [15].

Для прогнозування реактивного навантаження  $Q_P(t)$  ПРХ у роботі використана трьохшарова ШНМ. У вхідному шарі знаходяться 4 нейрони, в середньому 3, а у вихідному 1 нейрон, тобто зі структурою 4-3-1. Для прогнозування активних навантажень  $P_1(t)$ ,  $P_2(t)$ , ... в роботі використана архітектура 5-3-1 нейромережі ШНМ за допомогою алгоритму зворотного розповсюдження [17].

Виключення технологічного перевищення активної потужності підприємством  $P_{\text{НОМ}}(t)$  в період  $T_{\text{обм}}$  досягнуто контролем значення цієї потужності системою АСКОВЕ через фіксовані проміжки часу  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  і т. д.

Для забезпечення економічно вигідних режимів функціонування виробництва технологічних процесів заморожування(охолодження) енергосистема встановлює обмеження на рівень реактивної потужності споживачів електроенергії: максимальне і мінімальне значення реактивної потужності. Ці обмеження звичайно диференціюються в часі доби (є функціями поточного часу). Напруга на затискачах електроприймачів СД КМ UT1, UT2, UT3, UT4 при цьому не повинна виходити за допустимі межі:

максимальне і мінімальне значення, які встановлені нормативними документами (коливання напруги на електроприймачах допустимо в межах  $\pm 5\%$  або від  $-5\%$  до  $+10\%$  від номінальної напруги) [14].

Підтримання напруги в межах установлених норм дозволяє мінімізувати втрати активної потужності в асинхронних двигунах (АД) конденсаторів, випарників і насосних агрегатів холодопостачання, тобто зменшити додаткове споживання ними реактивної потужності. Це значення суттєво, так як при підвищенні напруги на  $1\%$  реактивна потужність, яку споживає АД, збільшується на  $3\%$  [14].

Такий підхід дозволяє підвищити ефективність керування багатоступеневими компресорними холодильними машинами щодо заморожування та доморожування м'ясних продуктів харчування шляхом вибору раціональних параметрів термічного оброблення, та відповідно використати СД поршневих компресорів для генерування реактивної потужності  $Q_{2P}(t)$ ,  $Q_{3P}(t)$ . Ці функції в АСУЕ виконують мікропроцесори МКП 1, 2, 3, ...,  $N$ , інформація з яких надходить до центрального нейропроцесора управління електроспоживанням (ЦПУЕ) і відповідно систем АСКОВЕ і АСУЕ, АРМ.

У проєктних рішеннях (рис. 4) це інтелектуальна система управління, в якій інформація з датчиків Д1-Дп стадії завантаження холодильних камер ХКМ1, ХКМ2, з датчиків технологічних параметрів поршневих та гвинтових компресорів ХМ і холодопродуктивності  $D_{13}^2 - D_{20}^2$ , заморожування рибопродуктів ХКМ3, з датчиків  $D_{21}^3 - D_{26}^3$  холодильних камер для зберігання ягід і фруктів ХКМ15,... ХКМ $N$  з електроприладів (АД) технологічних апаратів, виконуючих механізмів через шину Р надходить в підсистему інформаційного забезпечення ЦСУ. Вони утворюють нижній рівень управління технологічним процесом і електроспоживанням поршневих і гвинтових компресорних установок (рівень управління контролерів).

Верхній рівень управління електроспоживанням ПРХ з ЦПУЕ і МКП моніторингу технології виробництва холоду та контролю енергетичної ефективності та холодопродуктивності з АСКОВЕ і АСУЕ утворює рівень диспетчерського керування (АРМ1 – начальника зміни і АРМ2 – енергодиспетчера).

Основою диспетчерського керування є монітор корпоративної продуктивності (МКП), на якому виконується візуалізація не лише елементів системи електроспоживання ПРХ, технологічного процесу холодозабезпечення, але і їх взаємозв'язки та комунікації у динаміці. Все це створює умовну картину (схеми) енергетичного і технологічного процесу ПРХ. Крім цього АСУЕ ПРХ через інформаційні канали зв'язку MES і ERP утворюють інтелектуальну систему управління електроспоживанням підприємства (рис. 2). У таких інтелектуальних системах керування збудження від впливу характеристик харчових продуктів на параметри витрат електрики будемо також оцінювати за допомогою нейромереж [11, 12].

Нейропроцесор ЦПУЕ виконує розпізнавання параметрів геометрії завантаження холодильних камер  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ , і т. д. оцінює  $\bar{U}_{T1}, \bar{U}_{T2}, \bar{U}_{T3}, \bar{U}_{T4}$  та визначає екстремум функції ЕК (економічного критерію) вигоди від генерування реактивної потужності синхронними двигунами електроприводів поршневих компресорів ПРХ.

$$EK = EP_Q - EPP_m = C_Q - C_{P_m} = f(\alpha_{OPT}), \quad (6)$$

де  $EP_Q$  – економічний показник виробництва (споживання) реактивної потужності;

$EPP_m$  – економічний показник витрат активної потужності;

$C_Q$  – величина (ціна) сплати за генеровану потужність за час  $t$ ;

$C_{P_m}$  – величина сплати за витрачену на це активну потужність.

Чинник ЕК функціонально залежить від  $\alpha_{OPT}$  – оптимального куту завантаження синхронного двигуна поршневого компресора по реактивній потужності. Йому відповідає оптимальний режим сплати за спожиту активну потужність, що витрачається на генерацію реактивної потужності на затискачах синхронних двигунів ХКМ1, ХКМ2, ХКМ3, ХКМ4, ХКМ5 (м'ясо ВРХ).

Тобто умовою отримання такого режиму буде прогнозування ЦПУЕ за технологічними параметрами стану електроспоживання кожною холодильною камерою ПРХ  $P_1, P_2, P_3, P_4, Q_{P1}, Q_{P2}, Q_{P3}, Q_{P4}$  при  $\bar{U}_{T1}, \bar{U}_{T2}, \dots, \bar{U}_{T4} = const$  і  $e^{\Phi_{ПИТ}} \rightarrow e^{\Phi_{ПИТ\ заод}}$ . За допомогою навчених НМ ЦПУЕ по параметрах:

$$\begin{aligned} \{\varphi_1, Q_{1C}^{KM1}(t), ЦН1\} &\rightarrow \text{оцінює } \alpha_{OPT} \text{ СД1} \\ \{\varphi_2, Q_{1C}^{KM2}(t), ЦН2\} &\rightarrow \text{оцінює } \alpha_{OPT} \text{ СД2} \\ \{\varphi_3, Q_{3C}^{KM3}(t), \beta^2\} &\rightarrow \text{оцінює } \alpha_{OPT} \text{ СД3} \\ \{\varphi_3, Q_{4C}^{KM4}(t), \beta^3\} &\rightarrow \text{оцінює } \alpha_{OPT} \text{ СД4, і т. д.} \end{aligned}$$

Оптимальні уставки збудників СД поршневих компресорів визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{31}[n+1] &= \bar{U}_{31}[n] + K1(\bar{U}_{B\max} - \bar{U}_{BO})e^{-\frac{t}{T_{B1}}}, \\ \bar{U}_{32}[n+1] &= \bar{U}_{32}[n] + K2(\bar{U}_{B\max} - \bar{U}_{BO})e^{-\frac{t}{T_{B2}}}, \\ \bar{U}_{33}[n+1] &= \bar{U}_{33}[n] + K3(\bar{U}_{B\max} - \bar{U}_{BO})e^{-\frac{t}{T_{B3}}}, \end{aligned} \quad (7)$$



$$\bar{U}_{34}[n+1] = \bar{U}_{34}[n] + K4(\bar{U}_{B\max} - \bar{U}_{Bo})e^{-\frac{t}{\tau_{B4}}}, \text{ і т. д.}$$

де  $\bar{U}_{B\max}$  – максимальна напруга, яка підведена до обмотки збудника;

$\bar{U}_{31}, \bar{U}_{32}, \dots$  – напруга збудника у номінальному режимі;

$\tau_{B1}, \tau_{B2}, \tau_{B3}, \tau_{B4}$  – постійні часу збудників СД поршневих компресорів;

$K1, K2, K3, K4$  – коефіцієнти, які залежать від ступеню заповнення холодильних камер  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_N$ .

Адаптивні системи управління збудниками синхронних двигунів поршневих компресорів побудовані за допомогою алгоритмів оптимального безпощукового керування [18]. Якщо підприємства комплексу працюють з споживачами-регуляторами використовуючи диференційований тариф, то ЦПУЕ, одержуючи прогностичні значення  $P_1(t), P_2(t), P_3(t), \dots, P_N(t)$ , оцінює траєкторію електропостачання ПРХ в моменти часу доби «ніч», У випадку відхилення  $P_{\text{ФАКТ}}$  від  $P_{\text{ЛІМ}}$  ЦПУЕ відпрацьовує підпрограму «збитки». Для цього в пам'ять ЦПУЕ внесена таблиця пріоритетів електроспоживачів ПРХ, диференційованих за категоріями «збитки», щодо виробництва найбільш низькотемпературних заморожуваних м'ясних продуктів  $Q^{\Phi}_{\text{м'ясо}}$ .

При цьому ЦСУ відпрацьовує наступне правило: якщо  $P_{\text{ФАКТ}} \gg P_{\text{ЛІМ}}$ , а  $\beta_{\text{е м'ясо}} \rightarrow \beta_{\text{е зад}}$ ,  $Q^{\Phi}_{\text{м'ясо}}$  і  $T^{\Phi}_{\Delta Q_{\text{м'ясо}}}$  відповідає заданому значенню, то необхідно відключити АД гвинтових компресорів другої ступені холодильних машин системи холодопостачання на період  $t_{\text{ЛІМ}}$  від мережі та включити дизель-генератори для компенсації холодопродуктивності з метою стабілізації параметрів холодозабезпечення ХКМ1, ХКМ2 і т. д.

У цій ситуації одночасно енергопотужність ПРХ буде зменшено на 10 %. По команді АСУЕ-АСУ технологічні апарати холодильних машин будуть відпрацьовувати траєкторію виробництва холоду, забезпечуючи виконання планових показників виробництва продукції.

Для періоду «перевищення ліміту» розроблено наступне правило: якщо  $P_{\text{ФАКТ}} \gg P_{\text{ЛІМ}}$ , а  $\beta_{\text{м'ясо}} \rightarrow \beta_{\text{зад}}$ ,  $Q^{\Phi}_{\text{м'ясо}}$  і  $T^{\Phi}_{\Delta Q_{\text{м'ясо}}}$  відповідає заданому значенню, то необхідно відключити лише тих споживачів-регуляторів, які не пов'язані з виробництвом продуктів харчування. У цьому випадку одночасно енергопотужність комплексу буде зменшена на 20 %. По команді АСУЕ-АСУ ПРХ технологічні холодильні апарати першої, другої, третьої та інших холодильних камер м'ясної групи продукції для періоду обмежень потужності енергосистеми відпрацьовують за допомогою інтелектуальних технологій алгоритм мінімізації втрати якості замороженої (охолодженої) продукції, використовуючи технології накопичення криогенної енергії в спеціальних холодильних резервуарах [19].

Для періоду «ніч» розроблено наступне правило: якщо  $P_{\text{ФАКТ}} = P_{\text{ЛІМ-НІЧ}}$ , а  $\beta_{\text{м'ясо-НІЧ}} \rightarrow \beta_{\text{зад}}$ ,  $Q^{\Phi}_{\text{м'ясо}}$  і  $T^{\Phi}_{\Delta Q_{\text{м'ясо-НІЧ}}}$  відповідає заданому значенню, то необхідно максимізувати виробництво криогенного холоду, шляхом постійного моніторингу чинників  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_N$  та  $\alpha_{\text{як}}$  вихідного продукту.

У цьому випадку АСКОЕ-АСУЕ відпрацьовують задані значення траєкторії електроспоживання ПРХ  $T^{\Phi}_{\text{Е}}$ , максимізуючи чинники  $Q^{\Phi}_{\text{м'ясо}}$  і максимізуючи  $\alpha_{\text{яктах}}$  і відповідно і  $e^{\Phi}_{\text{ПІТ зад}} \rightarrow e^{\Phi}_{\text{ПІТ min}}$ , а отже  $\alpha_{\text{ОПТ СД1}}, \alpha_{\text{ОПТ СД2}}, \alpha_{\text{ОПТ СД3}}, \alpha_{\text{ОПТ СД4}}$  та відповідно мінімальні витрати електрики  $W_k$ .

Завдання ЕС АСУЕ – організувати своєчасне та повне використання обладнання, поточної інформації з метою визначення стану електроспоживання підприємства й надання необхідної інформації персоналу (ОПР) для прийняття рішення щодо виробництва продуктів харчування – ПРХ.

Отже, підвищення ефективності управління режимами електроспоживання підприємств харчової промисловості може бути досягнуто за рахунок узгодженого автоматизованого управління технологічними процесами охолодження та заморожування м'ясної продукції, птиці, риби, молочних продуктів, фруктів та іншої харчової продукції та використанням АСУЕ для управління процесами електроспоживання шляхом побудови ЕС та людино-машинних систем прийняття рішень.

Розроблені системи дозволять забезпечити вимоги енергогенеруючих компаній щодо активних і реактивних навантажень, знизити витрати у електромережах та підтримувати напругу у вузлах електроприймачів в межах встановлених норм.

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

На основі моделі причинно-наслідкових зв'язків траєкторії електроспоживання холодильного комплексу з групою чинників, що визначають його енергоефективність, продуктивність, якість замороженої продукції та прибутковість розроблено:

- концепцію управління виробництвом продукції харчування в умовах обмеження потужності енергосистеми за рахунок оптимального керування холодопостачанням холодильних камер;
- виокремлено такі енергоспоживачі, як регулятори, компенсатори реактивної потужності для штучного вирівнювання графіків електронавантаження системи підприємства та визначено найбільш енергоємних споживачів електрики.

Побудовано багаторівневу систему управління електроспоживанням холодильного комплексу, в якій оптимізація виробництва продукції портфеля замовлень споживачів в періоди обмежень електроенергії виконують: інтелектуальні системи управління електроспоживанням; автоматизовані системи управління технологічним процесом; експертні системи для розпізнавання та класифікації ситуацій за допомогою штучних нейромережових систем.

Розроблено конфігурацію мережі для прогнозування активного та реактивного навантаження енергосистеми підприємства.

Визначено структуру штучних нейронних мереж, методи їх навчання та сфери їх використання в системі узгодженого ситуаційного управління траєкторіями виробництва продукції харчування і електроспоживання холодильного комплексу.

Визначено виробничі ситуації щодо вибору раціональних режимів роботи холодильних камер ПРХ в періоди обмеження потужності енергосистеми та розпізнавання ступеня їх завантаження.

Досліджено модель залежності економічного критерію від показників: виробництва (споживання) реактивної потужності; витрат активної потужності; потоків грошей за генеровану потужність та витрачену на це активну потужність.

Визначено оптимальні кути завантаження синхронного двигуна поршневих компресорів за реактивною потужністю.

Розроблено модель оптимальних уставок збудників синхронних двигунів поршневих компресорів.

Наведено продукційні правила для відпрацювання експертною системою виконання планових показників виробництва продукції в періоди обмежень потужності енергосистеми.

Таким чином, розроблено інтелектуальну систему узгодженого управління електроспоживанням холодильного комплексу групи підприємств виробників та підприємств споживачів харчової продукції в періоди обмежень енергосистеми потужностей за активним і реактивним навантаженням. Вона дозволяє зменшити втрати виробництва продуктів харчування в періоди обмежень потужності енергосистеми та максимізувати продуктивність комплексу в період «ніч», виконавши, «точно у термін» замовлення супермаркетів та підприємств-споживачів продуктів харчування, а також виконати портфель замовлень переробних заводів України та країн ЄС.

### Література

1. Хорольський В. П. Теорія та практика інноваційно-інтелектуального розвитку регіону з техногенними територіями : монографія / В. П. Хорольський, К. Д. Хорольський, К. Г. Рябікіна ; за заг. ред. В.П. Хорольського, О.Б. Чернеги. – Кривий Ріг : Видавець ФО-П Чернявський Д. О., 2019. – 484 с.
2. Хмельнюк М. Г. Енергетичний менеджмент і аудит / М. Г. Хмельнюк, О. Ю. Яковлева, О. В. Остапенко. – Херсон : ФОП Грін Д. С., 2017. – 224 с.
3. Хмельнюк М. Г. Холодильні установки та сфери їх використання : підручник / М. Г. Хмельнюк, О. С. Подмазко, І. О. Подмазко. – Херсон : ФОП Грін Д. С., 2014. – 484 с.
4. Хорольський В.П. Теоретичні основи багаторівневого автоматизованого керування холодозабезпеченням промислових холодильників / В.П. Хорольський, Ю.М. Коренець, В.А. Гончаренко, Д.В. Яровий, І.В. Расчихмаров // Обладнання та технології харчових виробництв. – Кривий Ріг : ДонНУЕТ, 2021. Вип. 2 (43). – С. 122–130.
5. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» : схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605 р.
6. Правила роздрібного ринку електричної енергії : затверджені постановою НКРЕКП від 14 березня 2018 р. № 312.
7. Теплохолодотехніка : навч. посіб. / С. М. Василенко, В.І. Павелко, А. В. Форсюк та ін. ; за заг. ред. С. М. Василенко – К. : Ліра-К, 2019. – 258 с.
8. Холодильні установки : підручник / І. Г. Чумак, В. П. Чепурненко, С. Ю. Лар'яновський та ін.; За ред. І. Г. Чумака. – Одеса : Рефпринтінфо, 2006. – 550 с.
9. Курылев Е. С. Холодильные установки / Е. С. Курылев, В. В. Оносовский, Ю. Д. Румянцев. – СПб : Политехника, 2002. – 576 с.
10. Чернявський А. Практичний посібник з енергетичного аудиту промислових підприємств. Консультування підприємств щодо енергоефективності / Чернявський А. – Київ, 2020. – 148 с.
11. Системи енергоменеджменту та їх математичне забезпечення : навч. посібник / Г. Г. Півняк, С. І. Випанасенко, О. І. Хованська та ін. – Д. : Національний гірничий університет, 2013. – 214 с.
12. Соловей О. І. Основи енергоефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств : навч. посібник / О. І. Соловей, В. П. Ройзен, П. Г. Плешков. – Черкаси : видавець Чабаненко Ю., 2015. – 316 с.
13. Григорьев И. В. Локальные задачи измерений и вычислений при использовании SCADA – OASyS / И. В. Григорьев, И. А. Шишков // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2001. – № 8. – С. 37–41.
14. Ханаев В. В. Потребители – регуляторы: возможности и перспективы применения / В. В. Ханаев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2008. – № 1. – С. 59–64.
15. ПУЕ (Правила Улаштування Електроустановок) : затверджені Наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 21.07.2017 № 476. Київ, 2017.
16. Леньшин В. Н. Производственные исполнительные системы (MES) – путь к эффективному предприятию / Леньшин В. Н., Куминов В. В., Фролов Е. Б., Будник Р. А. // САПР и графика. – 2003. – № 26. – С. 42–43.
17. Kharlamov A. A. Attention mechanism usage to form framework structures on a semantic net. Neurocomputers and Attention. Manchester; New York: Manchester University Press. 1991. Vol. 11. P. 747–756.

18. Шубладзе А. М. Синтез оптимальных линейных регуляторов / А. М. Шубладзе // Автоматика и телемеханика. – 1984. – № 12. – С. 22–23.
19. Литвинова Е. В. Сравнительная оценка способов замораживания мясного сырья с различным характером автолиза / Литвинова Е. В., Артамонова М. П., Бухтеева Ю. М. // Health, Food & Biotechnology. – 2020. – № 2. Том 2. – С. 103–115.

#### References

1. Khorolskyi V. P. Teoriia ta praktyka innovatsiino-intelektualnoho rozvytku rehionu z tekhnohennymy terytoriiamy : monohrafiia / V. P. Khorolskyi, K. D. Khorolskyi, K. H. Riabykina ; za zah. red. V.P. Khorolskoho, O.B. Chernyehy. – Kryvyi Rih : Vydavets FO-P Cherniavskyi D. O., 2019. – 484 s.
2. Khmelniuk M. H. Enerhetychni menedzhment i audyt / M. H. Khmelniuk, O. Yu. Yakovleva, O. V. Ostapenko. – Kherson : FOP Hrin D. S., 2017. – 224 s.
3. Khmelniuk M. H. Kholodylni ustanovky ta sfery yikh vykorystannia : Pidruchnyk / M. H. Khmelniuk, O. S. Podmazko, I. O. Podmazko. – Kherson : FOP Hrin D. S., 2014. – 484 s.
4. Khorolskyi V.P. Teoretychni osnovy bahatorivnevoho avtomatyzovanoho keruvannia kholodozabezpechenniam promyslovykh kholodylnykh / V.P. Khorolskyi, Yu.M. Korenets, V.A. Honcharenko, D.V. Yarovyi, I.V. Raschekharov // Obladnannia ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv. – Kryvyi Rih : DonNUET, 2021. Vyp. 2 (43). – S. 122–130.
5. Enerhetychna stratehiia Ukrainy na period do 2035 roku «Bezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentospromozhnist» : skhvalena rozporiadzhenniam Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 18 serpnia 2017 r. № 605 r.
6. Pravyla rozdrobnoho rynku elektrychnoi enerhii : zatverdzeni postanovoioi NKREKP vid 14 bereznia 2018 r. № 312.
7. Teplokhodotekhnika : navch. posib. / S. M. Vasylenko, V.I. Pavelko, A. V. Forsiuk ta in. ; za zah. red. S. M. Vasylenko – K. : Lira-K, 2019. – 258 s.
8. Kholodylni ustanovky : Pidruchnyk / I. H. Chumak, V. P. Chepurmenko, S. Yu. Larianovskyi ta in. ; Za red. I. H. Chumaka. – Odesa : Refpryntinfo, 2006. – 550 s.
9. Курьлев Е. С. Холодильные установки / Е. С. Курьлев, В. В. Оносовский, Ю. Д. Румянцев. – СПб : Политехника, 2002. – 576 s.
10. Cherniavskyi A. Praktychni posibnyk z enerhetychnoho audytu promyslovykh pidpriemstv. Konsultuvannia pidpriemstv shchodo enerhoefektyvnosti / Cherniavskyi A. – Kyiv, 2020. – 148 s.
11. Systemy enerhomenedzhmentu ta yikh matematychni zabezpechennia : navch. posibnyk / H. H. Pivniak, S. I. Vypanasenko, O. I. Khovanska ta in. – D. : Natsionalnyi himychnyi universytet, 2013. – 214 s.
12. Solovei O. I. Osnovy enerhoefektyvnoho vykorystannia elektrychnoi enerhii v systemakh elektrospozhyvannia promyslovykh pidpriemstv : navch. posibnyk / O. I. Solovei, V. P. Roizen, P. H. Pleshkov. – Cherkasy : vydavets Chabanenko Yu., 2015. – 316 s.
13. Grigorev I. V. Lokalnye zadachi izmerenij i vychislenij pri ispolzovanii SCADA – OASyS / I. V. Grigorev, I. A. Shishkov // Promyshlennye ASU i kontroliery. – 2001. – № 8. – S. 37–41.
14. Hanaev V. V. Potrebiteli – regulatory: vozmozhnosti i perspektivy primeneniya / V. V. Hanaev // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. – 2008. – № 1. – S. 59–64.
15. PUE (Pravyla Ulashtuvannia Elektrostanovok) : zatverdzeni Nakazom Ministerstva enerhetyky ta vuhilnoi promyslovosti Ukrainy vid 21.07.2017 № 476. Kyiv, 2017.
16. Lenshin V. N. Proizvodstvennye ispolnitelnye sistemy (MES) – put k effektivnomu predpriyatiyu / Lenshin V. N., Kuminov V. V., Frolov E. B., Budnik P. A. // SAPR i grafika. – 2003. – № 26. – S. 42–43.
17. Kharlamov A. A. Attention mechanism usage to form framework structures on a semantic net. Neurocomputers and Attention. Manchester; New York: Manchester University Press. 1991. Vol. 11. P. 747–756.
18. Shubladze A. M. Sintez optimalnykh lineynykh regulyatorov / A. M. Shubladze // Avtomatika i telemekhanika. – 1984. – № 12. – S. 22–23.
19. Litvinova E. V. Sravnitel'naya ocenka sposobov zamorazhivaniya myasnogo syrya s razlichnym harakterom avtoliza / Litvinova E. V., Artamonova M. P., Buhteeva Yu. M. // Health, Food & Biotechnology. – 2020. – № 2. Том 2. – S. 103–115.

Надійшла/Paper received : 23.09.2022 р. Надрукована/Printed : 01.11.2022 р.

**ЩЕРБАНЬ Володимир**

Київський національний університет технологій та дизайну

ORCID ID: [0000-0002-4274-4425](https://orcid.org/0000-0002-4274-4425)e-mail: [scherbanvu@ukr.net](mailto:scherbanvu@ukr.net)**ЩЕНКО Валентин**

Київський національний університет технологій та дизайну

ORCID ID: [0000-0003-2180-5257](https://orcid.org/0000-0003-2180-5257)e-mail: [kipt@i.com.ua](mailto:kipt@i.com.ua)**КОЛИСКО Оксана**

Київський національний університет технологій та дизайну

ORCID ID: [0000-0003-4043-1238](https://orcid.org/0000-0003-4043-1238)e-mail: [kipt@i.com.ua](mailto:kipt@i.com.ua)**ГОЛЬДБЕРГ Мар'яна**

Київський національний університет технологій та дизайну

ORCID ID: [0000-0002-9982-7264](https://orcid.org/0000-0002-9982-7264)e-mail: [kipt@i.com.ua](mailto:kipt@i.com.ua)**ЩЕРБАНЬ Юрій**

Київський фаховий коледж прикладних наук

ORCID ID: [0000-0001-5024-8387](https://orcid.org/0000-0001-5024-8387)e-mail: [scherban@i.ua](mailto:scherban@i.ua)

## ВПЛИВ ГРАНИЧНИХ УМОВ НА ЦІЛЬОВУ ФУНКЦІЮ ПРИ КОМП'ЮТЕРНОМУ ВИЗНАЧЕННІ ОПТИМАЛЬНОГО ШЛЯХУ ДЛЯ НЕОРІЄНТОВАНОГО ГРАФА

Мінімально необхідний натяг буде визначатися цільовою функцією, яка представляє собою мінімальну суму кутів охоплення ниткою напрямних поверхонь. Використовується рекурсивний підхід для визначення натягу нитки в робочій зоні, за якого вихідний натяг після перешкоди у попередній зоні буде вхідним перед перешкодою у наступній зоні. Використані алгоритми та комп'ютерні програми для пошуку оптимального шляху неорієнтованого графа з використанням алгоритму Дейкстри, що дозволило визначати вплив граничних умов на цільову функцію, з урахуванням специфіки конструкції системи подачі нитки. Це призводить до зменшення обривності ниток.

Ключові слова: граничні умови, цільова функція, неорієнтований граф, оптимальний шлях, комп'ютерна програма.

SHCHERBAN Volodymyr, ISHCHENKO Valentin,

KOLISKO Oksana, GOLDBERG Marjana

Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, Ukraine

SHCHERBAN Yuryj

Kyiv Professional College of Applied Sciences

## INFLUENCE OF BOUNDARY CONDITIONS ON THE OBJECTIVE FUNCTION IN THE COMPUTER DETERMINATION OF THE OPTIMAL PATH FOR AN UNDIRECTED GRAPH

The minimum necessary tension will be determined by the objective function, which is the minimum sum of the angles of coverage of the guiding surfaces by the thread. A recursive approach is used to determine the thread tension in the working zone, in which the output tension after the obstacle in the previous zone will be the input before the obstacle in the next zone. Algorithms and computer programs were used to find the optimal path of an undirected graph using Dijkstra's algorithm, which made it possible to determine the influence of boundary conditions on the objective function, taking into account the specifics of the design of the thread feeding system. This leads to a decrease in thread breakage. Minimizing thread tension on technological machines allows to reduce the probability of breakage in the working area. The minimum necessary tension will be determined by the objective function, which is the minimum sum of the angles of coverage of the guiding surfaces by the thread. The use of algorithms and computer programs for finding the optimal path of an undirected graph using Dijkstra's algorithm allows determining the influence of boundary conditions on the objective function. Determination of tension and changes in relative tension in the filling zones of knitted and textile machines, taking into account the specifics of the design of the thread feeding system, allows to reduce the breakage of threads, to optimize thread tension in the working zone of the formation of the output product. Determining the influence of boundary conditions on the objective function during the computer determination of the optimal path for an undirected graph in the search for the optimal path is an important component of the optimization of thread tension in the working zone of the formation of the output product.

Reducing the friction force between the thread and the guide surfaces is achieved by optimizing the geometric parameters of the thread feeding system on the technological equipment. Practically, this is realized by building such a broken form of the thread, in which the total angle of coverage of the constructive structural elements of the technological equipment will have a minimal value. Constructive structural elements are presented in the form of guides of cylindrical shape and in the form of a torus, elements of tensioning devices, devices for monitoring breakage. Construction of the optimal path of an undirected graph will allow obtaining the minimum tension in the working area. Taking into account the large number of structural elements of the thread feeding system on technological machines, their location in the plane and space, there is a need to use modern information technologies.

Keywords: boundary conditions, objective function, undirected graph, optimal path, computer program.

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

Мінімізація натягу нитки на технологічних машинах дозволяє зменшити ймовірність обриву в робочій зоні. Мінімально необхідний натяг буде визначатися цільовою функцією, яка представляє собою мінімальну суму кутів охоплення ниткою напрямних поверхонь. Використання алгоритмів та комп'ютерних програми для пошуку оптимального шляху неорієнтованого графа з використанням алгоритму Дейкстри дозволяє визначати вплив граничних умов на цільову функцію. Визначення напруженості та зміни відносного натягу по зонам заправки трикотажних та текстильних машин, з урахуванням специфіки конструкції системи подачі нитки, дозволяє зменшити обривність ниток, оптимізувати натяг ниток в робочій зоні формування вихідного продукту. Визначення впливу граничних умов на цільову функцію при комп'ютерному визначенні оптимального шляху для неорієнтованого графа при пошуку оптимального шляху є важливою складовою задачею оптимізації натягу ниток в робочій зоні формування вихідного продукту.

Зменшення величини сили тертя між ниткою та напрямними поверхнями досягається шляхом оптимізації геометричних параметрів системи подачі нитки на технологічному обладнанні. Практично це реалізується побудовою такої ламаної форми нитки, за якої сумарний кут охоплення конструктивних структурних елементів технологічного обладнання буде мати мінімальне значення. Конструктивні структурні елементи представлені у вигляді направляючих циліндричної форми та у формі тора, елементів пристроїв для натягу, пристроїв для контролю обриву. Побудова оптимального шляху неорієнтованого графа дозволить отримати в робочій зоні мінімальний натяг. Враховуючи велику кількість структурних елементів системи подачі нитки на технологічних машинах, їх розташування у площині та просторі виникає необхідність використання сучасних інформаційних технологій.

### Аналіз досліджень та публікацій

Мінімально необхідний натяг визначається мінімальною сумою кутів охоплення ниткою напрямних поверхонь та залежить від граничних умов на вході та виході з системи [1–4]. Недосконала форма графа лінії заправки нитки на технологічних машинах легкої промисловості, низька якість комплексних ниток та пряжі при зростанні натягу по глибині заправки призводить до їх обривів. Удосконалення процесу переробки ниток полягає в мінімізації натягу і повинно базуватися на теоретичних та експериментальних дослідженнях процесу взаємодії ниток з структурними елементами системи подачі [2, 5–9]. До них можна віднести пристрої для натягу, для контролю обриву та спрямовувачі великої та малої кривизни [2]. Використання алгоритмів та комп'ютерних програм для пошуку оптимального шляху графа з використанням алгоритму Дейкстри дозволяє визначати напруженість та зміни відносного натягу по зонам заправки трикотажних та текстильних машин.

Визначення впливу граничних умов на цільову функцію при комп'ютерному визначенні оптимального шляху для неорієнтованого графа дозволяє отримати сумарний [3–7], мінімальний кут охоплення конструктивних структурних елементів технологічних машин. Це дозволяє зменшити напруженість та відносний натяг по зонах заправки технологічного устаткування. Перешкоди неорієнтованого графа утворюються структурними елементами технологічного устаткування, які представляють базу направляючих циліндричної форми та у формі тора, елементів пристроїв для натягу, пристроїв для контролю обриву [1, 5–7].

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є визначення впливу граничних умов на цільову функцію при комп'ютерному визначенні оптимального шляху для неорієнтованого графа.

### Виклад основного матеріалу

Граф лінії заправки можна розбити на зони, у кожній з яких буде одна перешкода. Тоді система рівнянь, яка описує зміну натягу між перешкодами, матиме вигляд

$$P_2 = P_1 f_1(P_1), P_3 = P_2 f_2(P_2), \dots, P_i = P_{i-1} f_{i-1}(P_{i-1}),$$

$$i = 1 \dots n,$$
(1)

де  $P_1$  - натяг нитки в зоні входу в систему;  $P_2, P_3 \dots P_i$  - натяг нитки після перешкоди;  $f_1(P_1), f_2(P_2) \dots f_{i-1}(P_{i-1})$  - функції, які пов'язують натяг нитки до і після перешкоди;  $i$  - поточний номер перешкоди;  $n$  - кількість перешкод.

Використовуючи рекурсивний підхід до визначення натягу нитки перед зоною формування, при якому вихідний натяг після напрямника у попередній зоні буде вхідним значенням натягу перед напрямником у наступній зоні, представимо систему рівнянь (1) у вигляді

$$P_n = P_1 \prod_{i=1}^n e^{\mu(\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_i)} = P_1 \prod_{i=1}^n e^{\mu \sum_{i=1}^n \alpha_i}.$$

Мінімально необхідний натяг буде визначатися мінімальною сумою кутів охоплення ниткою напрямних поверхонь. Тобто  $\sum_{i=1}^n \alpha_i \rightarrow \min$ .

На рис. 1 представлені елементи неорієнтованого графа. На рис. 1а представлені граничні умови для входу. На рис. 1б представлені граничні умови для виходу.

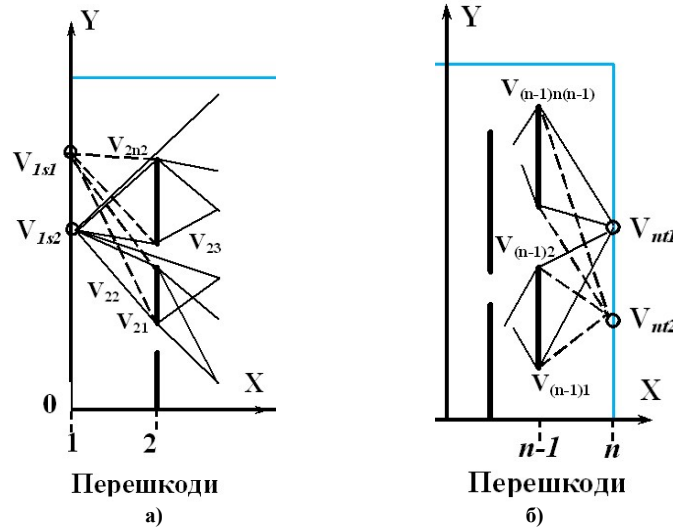


Рис. 1. Елементи неорієнтованого графа: а) граничні умови для входу; б) граничні умови для виходу

Геометрична ідентифікація між вершинами та відповідним ребром для зони між першою та другою перешкодами. Верхній індекс вказує між якими перешкодами розташовані ребра. Нижній індекс вказує для яких вершин на попередній та поточній перешкодах відноситься ребро

$$e_{(1s-21)}^{[(1)-(2)]} = (v_{1s}, v_{21}), e_{(1s-22)}^{[(1)-(2)]} = (v_{1s}, v_{22}), \dots, e_{(1s-2n_2)}^{[(1)-(2)]} = (v_{1s}, v_{2n_2}),$$

де  $V_k$  - підмножина вершин контакту нитки з перешкодами  $k$  рівня;  $n$  - кількість перешкод;  $V_{1s}, V_{2n_2}, \dots, V_{(n-1)n_{n-1}}, V_{nt}$  - відповідно точки вершин контакту з перешкодами 1, 2, ...  $n-1, n$  рівня;  $1s, n_2, \dots, n_{n-1}, nt$  - відповідно кількість точок вершин контакту з 1, 2 ...  $n-1, n$  перешкодами.

Геометрична ідентифікація між вершинами та відповідним ребром для зони між передостанньою та останньою перешкодами

$$e_{[(n-1)1-nt]}^{[(n-1)-(n)]} = (v_{(n-1)1}, v_{nt}), e_{[(n-1)2-nt]}^{[(n-1)-(n)]} = (v_{(n-1)2}, v_{nt}), \dots, e_{[(n-1)n_{n-1}-nt]}^{[(n-1)-(n)]} = (v_{(n-1)n_{n-1}}, v_{nt}).$$

Граничні умови для першого варіанту точки входу (рис. 1а) визначаються значенням кутів охоплення для зони між першою та другою перешкодами, які визначаються наступною системою (верхній індекс вказує між якими перешкодами розташовані ребра, нижній індекс вказує для якої вершини на поточній перешкоді відноситься ребро)

$$\alpha_{(1s1-21)}^{[(1)-(2)]} = \arctg\left[\frac{|Y_{21} - Y_{1s1}|}{|X_{21} - X_{1s1}|}\right], \alpha_{(1s1-22)}^{[(1)-(2)]} = \arctg\left[\frac{|Y_{22} - Y_{1s1}|}{|X_{22} - X_{1s1}|}\right], \quad (2)$$

...

$$\alpha_{(1s1-2n_2)}^{[(1)-(2)]} = \arctg\left[\frac{|Y_{2n_2} - Y_{1s1}|}{|X_{2n_2} - X_{1s1}|}\right]$$

або для другого варіанту точок входу неорієнтованого графа

$$\alpha_{(1s2-21)}^{[(1)-(2)]} = \arctg\left[\frac{|Y_{21} - Y_{1s2}|}{|X_{21} - X_{1s2}|}\right], \alpha_{(1s2-22)}^{[(1)-(2)]} = \arctg\left[\frac{|Y_{22} - Y_{1s2}|}{|X_{22} - X_{1s2}|}\right],$$

...

$$\alpha_{(1s2-2n_2)}^{[(1)-(2)]} = \arctg\left[\frac{|Y_{2n_2} - Y_{1s2}|}{|X_{2n_2} - X_{1s2}|}\right]$$

Граничні умови для першого варіанту точки виходу (рис.1б) визначаються значенням кутів охоплення між передостанньою та останньою перешкодами, які визначаються наступною системою

$$\alpha_{[(n-1)-(n)]_{[(n-1)1-nt1]}} = \arctg\left[\frac{|Y_{nt1} - Y_{(n-1)1}|}{|X_{nt1} - X_{(n-1)1}|}\right],$$

$$\alpha_{[(n-1)-(n)]_{[(n-1)2-nt1]}} = \arctg\left[\frac{|Y_{nt1} - Y_{(n-1)2}|}{|X_{nt1} - X_{(n-1)2}|}\right],$$

(3)

...

$$\alpha_{[(n-1)-(n)]_{[(n-1)n_{n-1}-nt1]}} = \arctg\left[\frac{|Y_{nt1} - Y_{(n-1)n_{n-1}}|}{|X_{nt1} - X_{(n-1)n_{n-1}}|}\right],$$

або для другого варіанту точок виходу неорієнтованого графа

$$\alpha_{[(n-1)-(n)]_{[(n-1)1-nt2]}} = \arctg\left[\frac{|Y_{nt2} - Y_{(n-1)1}|}{|X_{nt2} - X_{(n-1)1}|}\right],$$

$$\alpha_{[(n-1)-(n)]_{[(n-1)2-nt2]}} = \arctg\left[\frac{|Y_{nt2} - Y_{(n-1)2}|}{|X_{nt2} - X_{(n-1)2}|}\right],$$

...

$$\alpha_{[(n-1)-(n)]_{[(n-1)n_{n-1}-nt2]}} = \arctg\left[\frac{|Y_{nt2} - Y_{(n-1)n_{n-1}}|}{|X_{nt2} - X_{(n-1)n_{n-1}}|}\right].$$

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

Використані алгоритми та комп'ютерні програми для пошуку оптимального шляху неорієнтованого графа з використанням алгоритму Дейкстри, що дозволило визначати вплив граничних умов на цільову функцію, з урахуванням специфіки конструкції системи подачі нитки.

### Література

1. Щербань В.Ю. Механіка нитки / В.Ю.Щербань. – К. : Освіта України, 2018. – 533 с.
2. Щербань В.Ю. Базове проектує забезпечення САПР в індустрії моди / В.Ю. Щербань, Ю.Ю. Щербань, О.З. Коліско, Г.В. Мельник, М.І. Шолудько, В.Ю. Калашник. – К. : Освіта України, 2018. – 902 с.
3. Scherban V. Yu., Krasnitsky S.M., Rezanov V.G. Mathematical Models in CAD. Selected sections and examples of application. K.: KNUTD, 2011. 220 p.
4. Щербань В.Ю. САПР оборудования и технологических процессов легкой и текстильной промышленности / В.Ю. Щербань, О.И. Волков, Ю.Ю. Щербань. – К. : Бумсервис, 2004. – 519 с.
5. Щербань В.Ю. Дослідження впливу матеріалу нитки і анізотропії тертя на її натяг і форму осі / В.Ю. Щербань, В.Ю.Калашник, О.З.Коліско, М.І. Шолудько // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – 223(2). – С. 25-29.
6. 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.
7. 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.
8. Shcherban V., Melnyk G., Sholudko M., Kalashnyk V. Warp yarn tension during fabric formation. *Fibres and Textiles*. 2018. volume 25. №2. P. 97-104.
9. Yakubitskaya I.A., Chugin V.V., Shcherban V.Yu. Differential equations of the relative motion of the filament element on the end sections of the coil of the winding drum. *Technology of the textile industry*. 1997. № 6. P. 50-54.

### References

1. Scherban V.Yu. Mechanics of Threads. K.: Formation of Ukraine, 2018. 533 p.
2. 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.
3. Scherban V. Yu., Krasnitsky S.M., Rezanov V.G. Mathematical Models in CAD. Selected sections and examples of application. K.: KNUTD, 2011. 220 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., 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.



- 
6. 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.
  7. 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.
  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.

Надійшла/Paper received : 08.09.2022 р.    Надрукована/Printed :01.11.2022 р.

БОЙКО Юлій

Хмельницький національний університет

ORCID ID: [0000-0003-0603-7827](https://orcid.org/0000-0003-0603-7827)e-mail: [boiko\\_julius@ukr.net](mailto:boiko_julius@ukr.net)

СВАЧІЙ Олег

Хмельницький національний університет

e-mail: [oleg.svachiy.ninety-nine19@gmail.com](mailto:oleg.svachiy.ninety-nine19@gmail.com)

## ДОСЛІДЖЕННЯ ІНЕРЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ВІДХИЛЕННЯ ВАНТАЖУ БПЛА ВІД НУЛЬОВОЇ ТОЧКИ

В статті наведено результати калібрування та досліджень можливостей інерційної системи відслідковування відхилення від нульової точки на базі використання акселерометричного датчика MPU6050, для подальшої стабілізації вільно падаючого вантажу, як покращення використання БПЛА.

Ключові слова: інерційна навігаційна система, MPU6050, БПЛА, стабілізація, вантаж, акселерометр, гіроскоп, датчик.

BOIKO Juliy, SVACHII Oleh

Khmelnytskyi National University

### RESEARCH OF THE INERTIAL DEVIATION MEASUREMENT SYSTEM UAV CARGO FROM ZERO POINT

Inertial measurement units (IMUs) can consist of one or more sensors that collect data designed to measure inertial motions in a specific frame of reference. Acceleration, rotational speed are examples of data that can be obtained from the sensors contained in the IMU. IMUs can be found in a variety of smart devices, medical rehabilitation, general robotics, UAV control and navigation enhancement systems, sports devices, and virtual reality systems. Some engineering solutions and displacement sensors have a number of limitations, such as systems that do not have a clear initial reference point. In such systems, it is difficult to track deviations from the starting point. However, the acceleration of a moving object is usually easy to measure, so the given deflection of the object can easily be obtained using the integral of the acceleration. To solve such problems, a distance measurement system based on a microelectromechanical system (MEMS) accelerometer has been developed. The hardware structure of the system includes a data measurement module and integrated data collection and data processing modules. Due to the physical properties of the sensor, such a system can be used in a small space, with large overloads and other adverse conditions. This article describes a system calibration method and proposes a deviation tracking algorithm based on acceleration integration. Fixed output error caused by sensor mounting position is analyzed. The analysis shows that if this factor is not taken into account, the error will lead to a serious error. The experiment of measurement of the deviation from the zero point is carried out on a horizontal, flat surface, and the calculation results show that the average accuracy of the deviation measurement of this system can reach 99.05%. The results of the experiment indicate the feasibility of the system in the conditions of short-term free fall and the validity of the data processing algorithm. The accuracy of the distance measurement system can meet most engineering needs.

Keywords: inertial navigation system, MPU6050, UAV, stabilization, cargo, accelerometer, gyroscope, sensor.

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

Застосування додаткових модулів є одним з методів покращення керування вантажних БПЛА, адже вони можуть зменшити час реагування, або збільшити зручність роботи з дроном, що значно збільшує час руху безпілотної. На сьогоднішній день не має автоматичних стабілізаторів вільно падаючого вантажу. Є системи спуску вантажу, але вони є повільними, що є мінусом адже є типи корисного вантажу які потребують швидкого та точного приземлення. Даний стабілізатор має відслідковувати відхилення вантажу від нульової точки, тому що на вільно падаючий об'єкт діє сила вітру, що може змінювати його траєкторію польоту. В даній статті описано один з методів вимірювання відхилення вантажу за допомогою акселерометричного датчика.

Сьогодні мікроконтролерні акселерометри широко використовуються в авіаційній навігації, побутовій електроніці, машинобудуванні, медичній, військових і цивільних галузях.

На рис. 1 графічно зображено вплив бокового вітру на відхилення від точки падіння на прикладі математичних параметрів коробки (20смх20см) з корисним вантажем масою 1 кг [1].

З графіку, що було отримано у результаті симуляції вільного падіння вантажу скинутого з БПЛА, враховуючи вплив бокового вітру швидкістю 5 м/с, було визначено, що при скиданні з висоти 200 метрів, вплив вітру на тіло з урахуванням його фізичних параметрів відхиляється приблизно на 12 метрів, що є суттєвою похибкою.

Тому в даній статті запропоновано метод, який враховує відхилення за допомогою мікроконтролерного (MEMS) акселерометра.

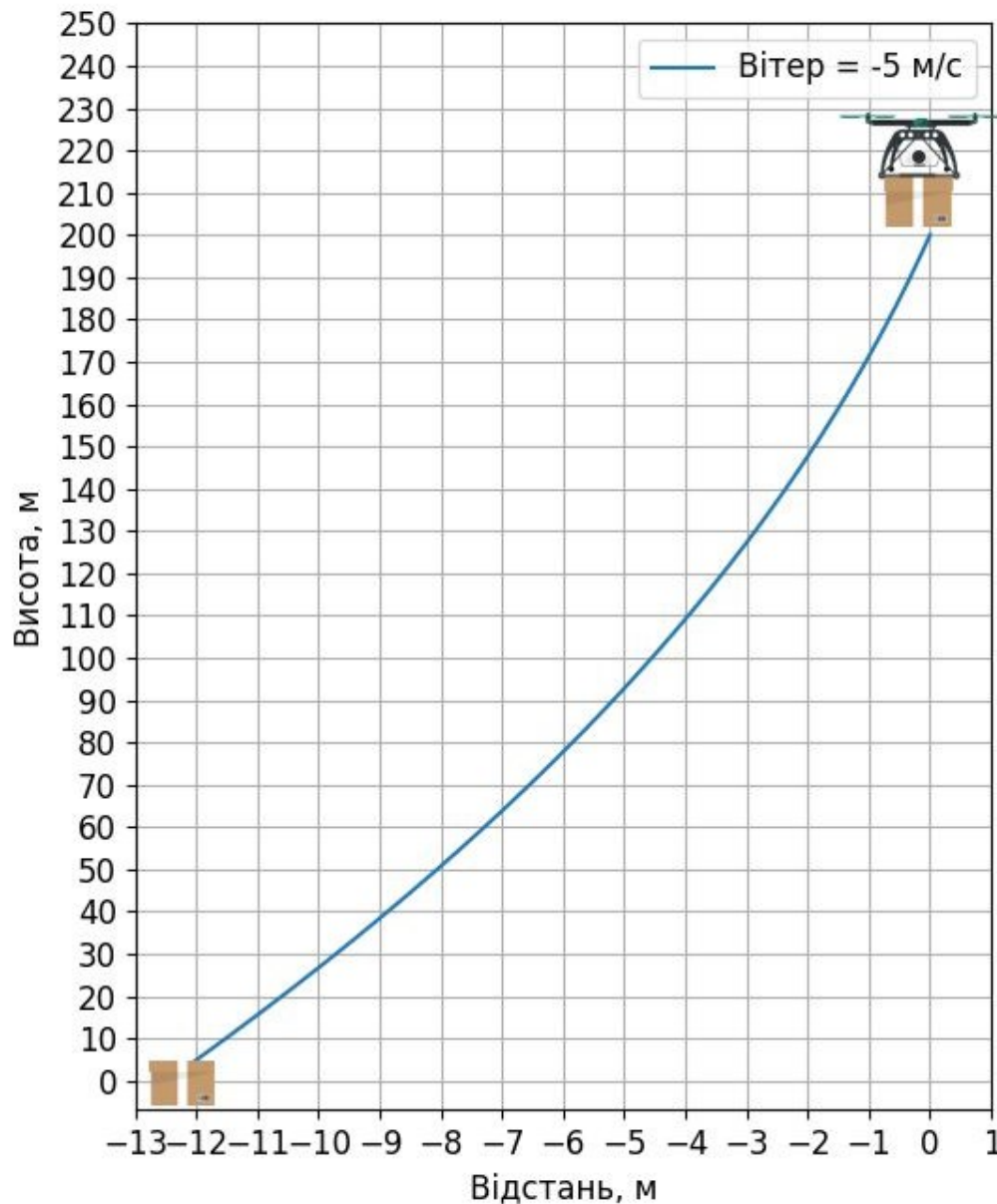


Рис. 1. Графічне зображення впливу бокового вітру на відхилення від точки падіння

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є: створення інерційної системи відслідковування відхилення від нульової точки, для її подальшого використання у розробці методу покращення керування вантажним безпілотним літальним апаратом шляхом створення автоматичного стабілізатора вантажу у вільному падінні.

У даній роботі буде розглядатись можливість відслідковування переміщення тіла використовуючи інерційну систему створену на базі датчика акселерометра MPU6050. В статті запропоновано методи калібрування датчика та знайдено похибку вимірювання відхилення.

### Аналіз досліджень та публікацій

З розвитком технологій мікроконтролерні акселерометри проникають у все більшу і більшу кількість галузей життя, таких як аеронавігація, виявлення землетрусів, вимірювання сили тяжіння та інші [2, 3]. Завдяки різноманітним новим принципам вимірювання та впровадженню технології, акселерометри MEMS мають такі покращені характеристики:

- малий розмір;
- легка вага;
- ударна стійкість;
- роздільна здатність вихідного сигналу.

У розвитку наукової теорії та практичних інженерних застосувань були спроби точно виміряти швидкість і переміщення. Розроблено багато методів вимірювання, і було досягнуто хороших результатів у вимірюванні відстані, наприклад, лазерний далекомір. Шляхом модуляції та демодуляції оптичного сигналу він впізнає перешкоди на основі відбитого сигналу і розраховує положення перешкоди. Іншим прикладом є

вимірювач на основі ефекту Доплера [4], який випромінює електромагнітні хвилі в сторону цілі і приймає сигнал відлуння. Однак ці методи вимірювання відстані мають значні обмеження [5, 6]. Вони занадто сильно залежать від сигналу відбиття і потребують взаємодії з іншим тілом для здійснення вимірювання відстані. Однак у реальному середовищі застосування на передану хвилю впливатиме не лише середовище розповсюдження, але й електромагнітні перешкоди, погода та інші фактори [7].

Постійні інновації та розвиток даної технології призвели до того, що такий тип акселерометрів поступово витісняють традиційні датчики механічної структури.

### Виклад основного матеріалу

Технологія вимірювання відстані на основі прискорення має довгу історію. Її широко використовували для виявлення стану будівель, вимірювання мікропереміщень доріг і мостів, інерціальної навігації тощо. Ще в 1960-х роках Берг припустив, що існує дуже проста залежність перетворення між сигналами прискорення, швидкості та переміщення в кожній точці процесу руху об'єкта. Після отримання сигналу прискорення за допомогою інтегрування можна отримати сигнали швидкості або переміщення [8].

Система вимірювання складається з акселерометра MEMS, мікропроцесора AVR, модуля живлення та периферійної схеми. Загальна структура системи показана на рис. 2, вона включає в себе такі модулі:

- модуль керування системою;
- модуль вимірювання даних;
- модуль живлення.

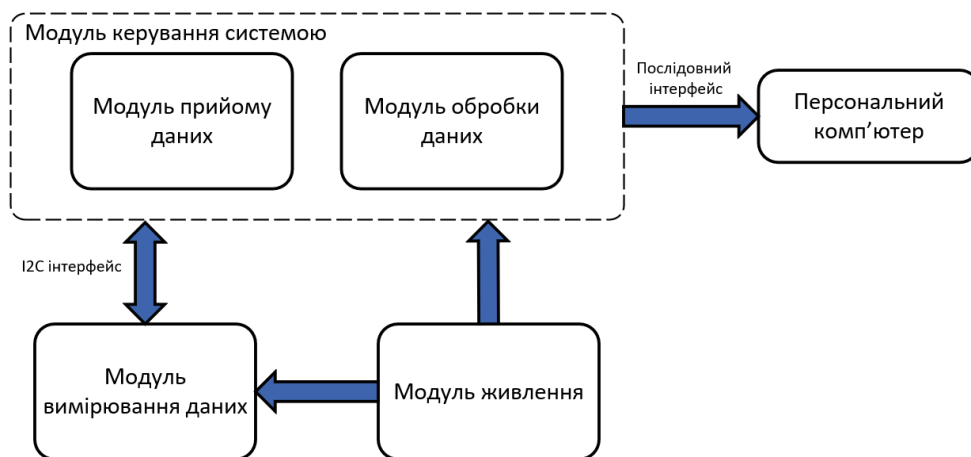


Рис. 2. Структура системи вимірювання відхилення вантажу від нульової точки

Модуль керування використовує мікропроцесор AVR. Він включає в себе модуль збору даних та модуль обробки даних (рис. 2). Основною роботою мікропроцесора є отримання, обчислення та передавання даних акселерометра на персональний комп'ютер. Мікропроцесор AVR має можливість здійснення операцій з плаваючою комо, що є необхідним у даному випадку. Прийом даних відбувається по інтерфейсу I2C, завдяки чому відбувається відділення процесу зняття показів датчика та їх обробки.

Акселерометр MEMS може вимірювати прискорення рухомого об'єкта в реальному часі. Зв'язок з модулем прийому даних забезпечує шина I2C, яка включає тактову лінію SCL (Serial Clock) і лінію даних SDA (Serial Data). Контакти VCC і GND є виводами джерела живлення акселерометра. Схема з'єднань [9] та опис виводів акселерометра MPU6050 показані на рис. 3. Для покращення роботи акселерометра та гіроскопа можна під'єднати додатковий датчик магнітометр згідно з схемою з'єднання.

Модуль призначений для визначення розташування та переміщення об'єкта в просторі за допомогою 3-осьового гіроскопа та 3-осьового акселерометра. Також на борту модуля є датчик температури. Гіроскоп модуля вимірює кутове прискорення тіла по 3 осях (X, Y, Z), а акселерометр обчислює прискорення тіла також враховуючі вісь прискорення. Для визначення прискорення акселерометр використовує п'єзоелектричний ефект. У стані спокою модуль постійно проводить калібрування датчика. Також датчик може визначати і реєструвати динамічні параметри під час руху.

MPU6050 — це інерціальний вимірювальний пристрій (IMU), який містить комбінований датчик акселерометра та гіроскопа. Як читувати дані з акселерометра або гіроскопа можна найкраще зрозуміти, дослідивши офіційну технічну документацію [9], на рис. 4 зображено систему координат датчика. Система координат акселерометра використовує традиційну декартову систему координат [10-12]. Подібним чином гіроскоп використовує обертання проти годинникової стрілки як позитивний напрям обертання.

Врахування системи координати є важливим для розуміння даних, які зчитує MPU6050, і розробки методів калібрування IMU.

Діапазони датчиків:

- Акселерометр - калібрується в діапазоні 0g-2g;
- Гіроскоп – калібрується в діапазоні 0– 250°/s.

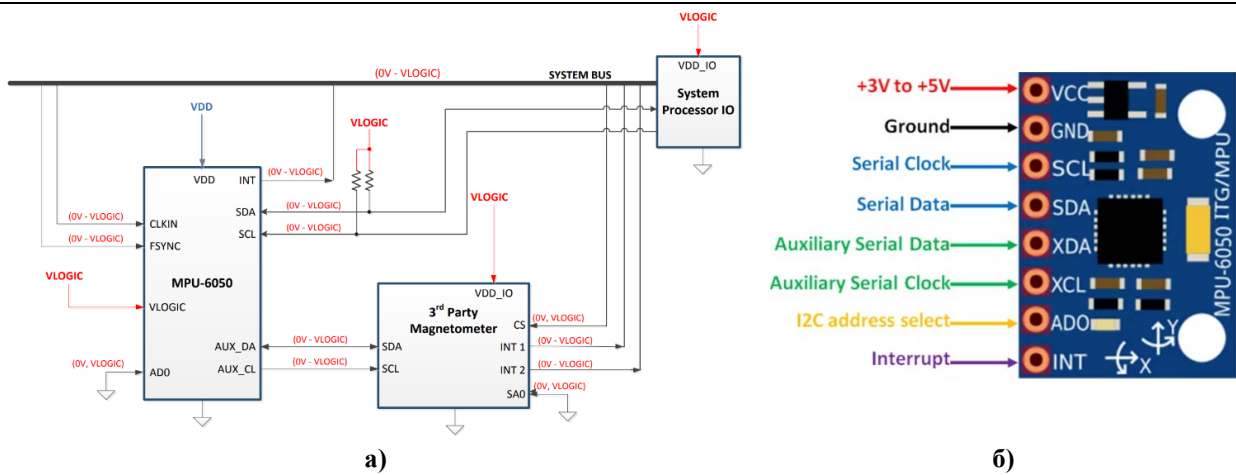


Рис. 3. Датчик MPU6050: а) – схема з'єднання; б) – опис виводів

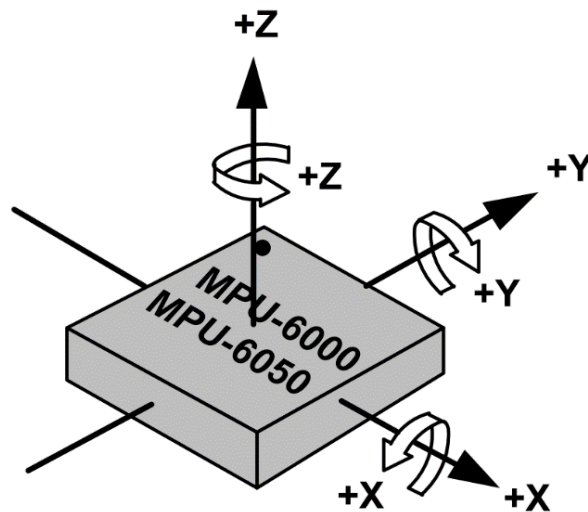


Рис. 4. Зображення системи координат датчика MPU6050

MPU6050 прикріплено до калібрувального кубу, який забезпечує стабільність положення у вздовж кожної осі, цим полегшує калібрування та узгодження з силою тяжіння (акселерометр) і обертання навколо кожної осі (гіроскоп). Калібрувальний куб було створено у програмному середовищі SOLIDWORKS та надруковано на 3D-принтері, 3D-модель та готовий виріб зображено на рис.5.

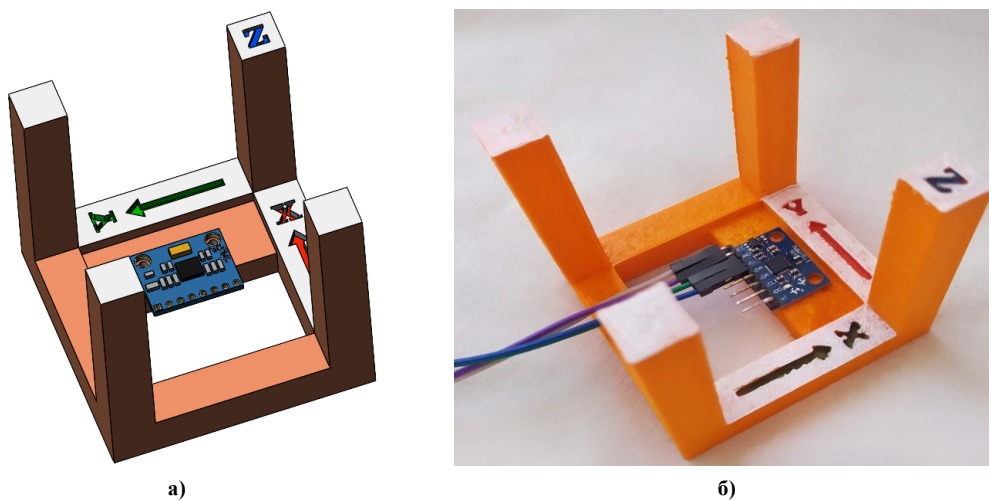


Рис. 5. Калібрувальний куб: а) 3D-модель; б) – готовий виріб

Калібрування гіроскопа полягає у обчисленні зсуву для кожної осі. Гіроскоп має найпростіший спосіб калібрування, тому що легко передбачити показники датчика, які виводяться у стані спокою. Кожна з трьох осей гіроскопа має показувати 0 градусів за секунду ( $^{\circ}/s$ ), коли датчик не рухається. Зміщення можна виміряти, отримавши покази датчика у нерухомому положенні, а потім використовувати ці значення як «зміщення» під час зчитування значень гіроскопа в майбутньому. Це найпростіший метод калібрування

датчика, якого достатньо для більшості випадків його використання.

На рис. 6 наведено графіки значень гіроскопа до та після калібрування. При калібруванні гіроскопа немає потреби калібрувати його використовуючи куб калібрування.

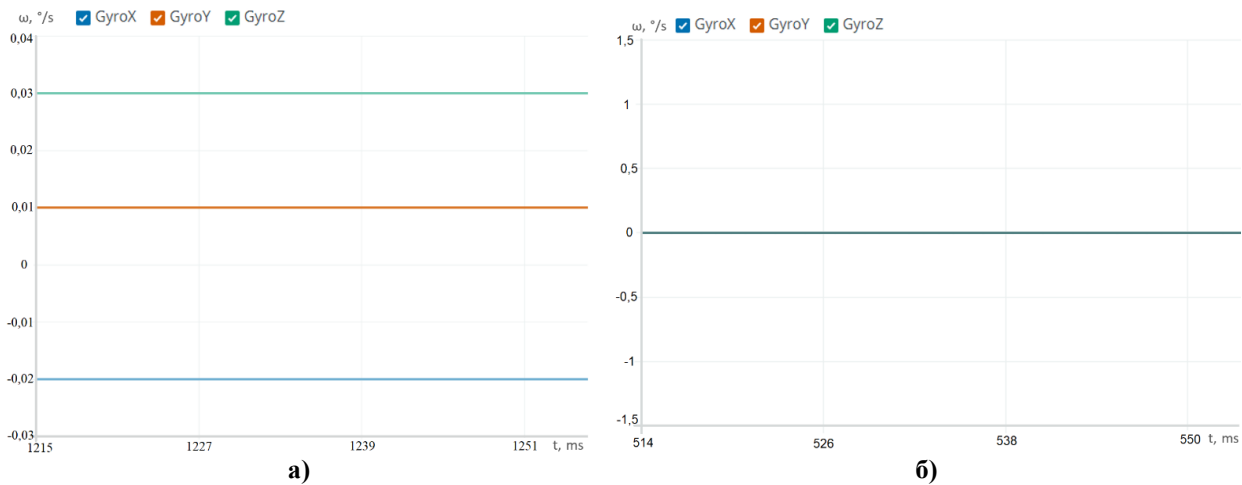


Рис. 6. Зображення графіків значень гіроскопа: а) до калібрування; б) – після калібрування

Нижче описано спосіб перевірки калібрування гіроскопа, інтегруючи масив значень кутової швидкості в часі за відомого куту обертання. Для прикладу в таблиці 1 перевірено даний метод на значеннях  $-180^\circ$ ,  $90^\circ$  та  $-90^\circ$ , щоб переконатися, що гіроскоп функціонує належним чином.

Інтегруючи кутову швидкість гіроскопа, можна зробити наближення кутового зміщення (1):

$$\int_{t_1}^{t_2} \omega_i dt = \theta_i, \quad (1)$$

Для дискретних точок використовується спосіб чисельного інтегрування, в статті використовується чисельне інтегрування за правилом трапеції (2):

$$\theta_i = \int_{t_1}^{t_2} \omega_i dt \approx \sum_{j=N}^N \left( \frac{f_i(t_{j-1}) + f_i(t_j)}{2} \Delta t_j \right), \quad (2)$$

Таблиця 1

Результати калібрування датчика гіроскопа

Кут нахилу	Отриманий результат	Похибка
$-90^\circ$	$-90,14^\circ$	$-0,14^\circ$
$90^\circ$	$89,87^\circ$	$-0,13^\circ$
$180^\circ$	$179,82^\circ$	$-0,18^\circ$

Після калібрування гіроскопу відбувається калібрування датчика акселерометра. Воно має схожий спосіб, але потребує калібрування у трьох положеннях відносно напрямку сили тяжіння для кожної осі (рис. 7).

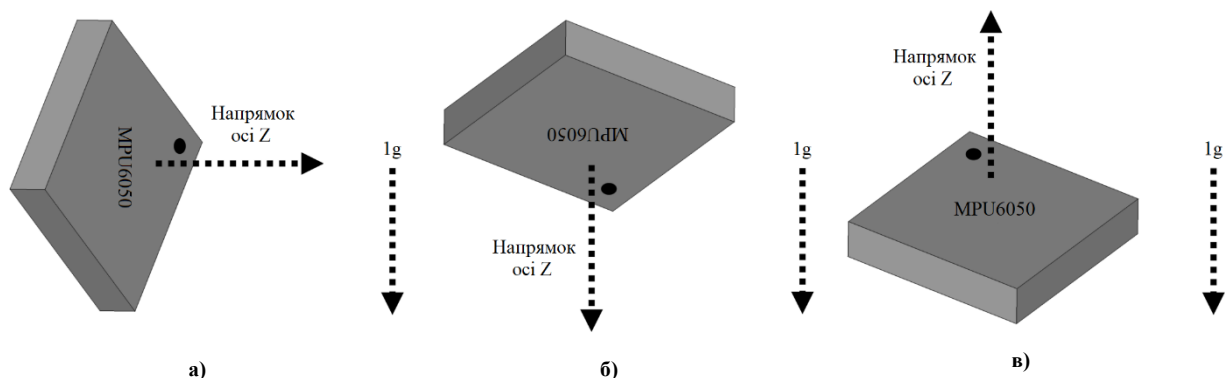


Рис. 7. Зображення положення датчику: а) перпендикулярно до сили тяжіння ( $0g$ ); б) – у напрямку сили тяжіння ( $-1g$ ); в) – проти напрямку сили тяжіння ( $1g$ )

Нижче вказані та прокоментовані стрічки коду, що відповідають за отримання даних для визначення похибки.

```

#include <Adafruit_MPU6050.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Wire.h>
// підключення бібліотек
Adafruit_MPU6050 mpu; // задання назви датчику
sensors_event_t a, g, temp;
float ax, ay, az;
// створення змінних
void setup(void) {
  Serial.begin(115200); // ініціалізація та задання швидкості передачі послідовного порту
  mpu.begin(); // ініціалізація датчика
  mpu.setAccelerometerRange(MPU6050_RANGE_2_G);
  mpu.setGyroRange(MPU6050_RANGE_250_DEG);
  mpu.setFilterBandwidth(MPU6050_BAND_94_HZ);
  // налаштування режимів роботи датчика MPU6050
  delay(100); // реалізація затримки для проведення датчиком налаштування режимів
}
void loop() { // основний цикл програми
  ax, ay, az = 0;
  // скидання даних для подальшого використання в циклі отримання похибки
  for (int i = 1; i < 101; i++) // цикл отримання середньої похибки у вибірці зі 100 значень
  {
    mpu.getEvent(&a, &g, &temp); // команда отримання значень з датчика
    ax += a.acceleration.x;
    ay += a.acceleration.y;
    az += a.acceleration.z;
    // присвоєння та сумування даних
    delay(10);
  }
  Serial.print("DelAccelX:");
  Serial.print(ax/100);
  Serial.print(",");
  Serial.print("DelAccelY:");
  Serial.print(ay/100);
  Serial.print(",");
  Serial.print("DelAccelZ:");
  Serial.print(az/100-9.81);
  Serial.println("");
  // виведення похибки у послідовний порт
}

```

В даній статті на рис. 8 зображено результати калібрування датчика акселерометра для випадку коли вісь Y є перпендикулярною до сили тяжіння. У результаті виконання програмного коду, для описаного вище випадку було виявлено такі похибки:

- DelAccelX = 0.40;
- DelAccelY = -0.09;
- DelAccelZ = 2.55.

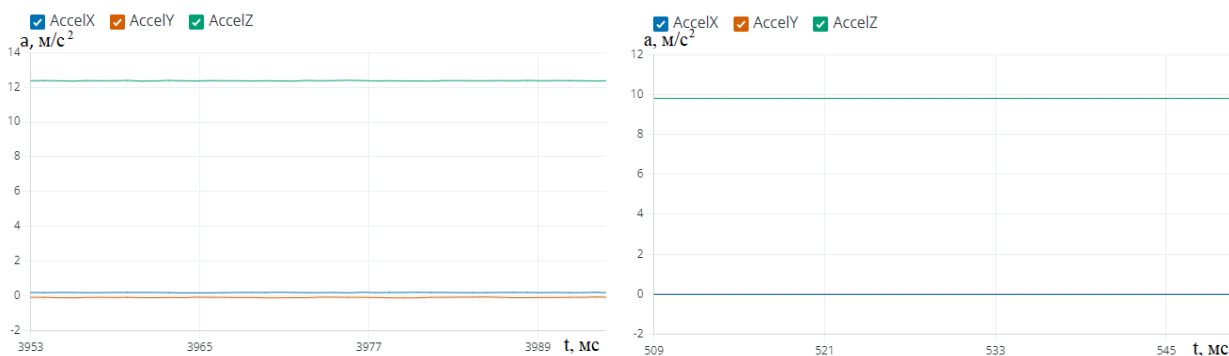


Рис. 8. Зображення графіків значень акселерометра: а) до калібрування;  
б) – після калібрування

Кінцевим результатом написання статті є перевірка калібрування акселерометра. Перевірка включає



в себе відслідковування похибки при зміщенні з нульової точки. Різниця між інтегруванням даних гіроскопа та акселерометра полягає в тому, що значення прискорення будуть інтегровані двічі для виведення переміщення (3).

$$a_i = \frac{d^2x}{dt^2} \rightarrow \frac{dx_i}{dt} = \int a_i dt \rightarrow x_i = \int \left( \int a_i dt \right) dt \quad (3)$$

Наведену вище послідовність потрібно поділити на два кроки. Спочатку необхідно інтегрувати прискорення до швидкості (4).

$$v_i = \sum_{j=1}^N \left( \frac{a(t_{j-1}) + a(t_j)}{2} \right) \Delta t, \quad (4)$$

На наступному кроці потрібно інтегрувати масив швидкостей, щоб визначити переміщення (5).

$$x_i = \sum_{j=1}^N \left( \frac{v(t_{j-1}) + v(t_j)}{2} \right) \Delta t, \quad (5)$$

Після виконання кроків вище, можна отримати значення відхилення від нульової точки. На рис. 9 зображено графік одного з вимірювань, що включає в себе прискорення, швидкість та переміщення при зміщенні на 0,25 м.

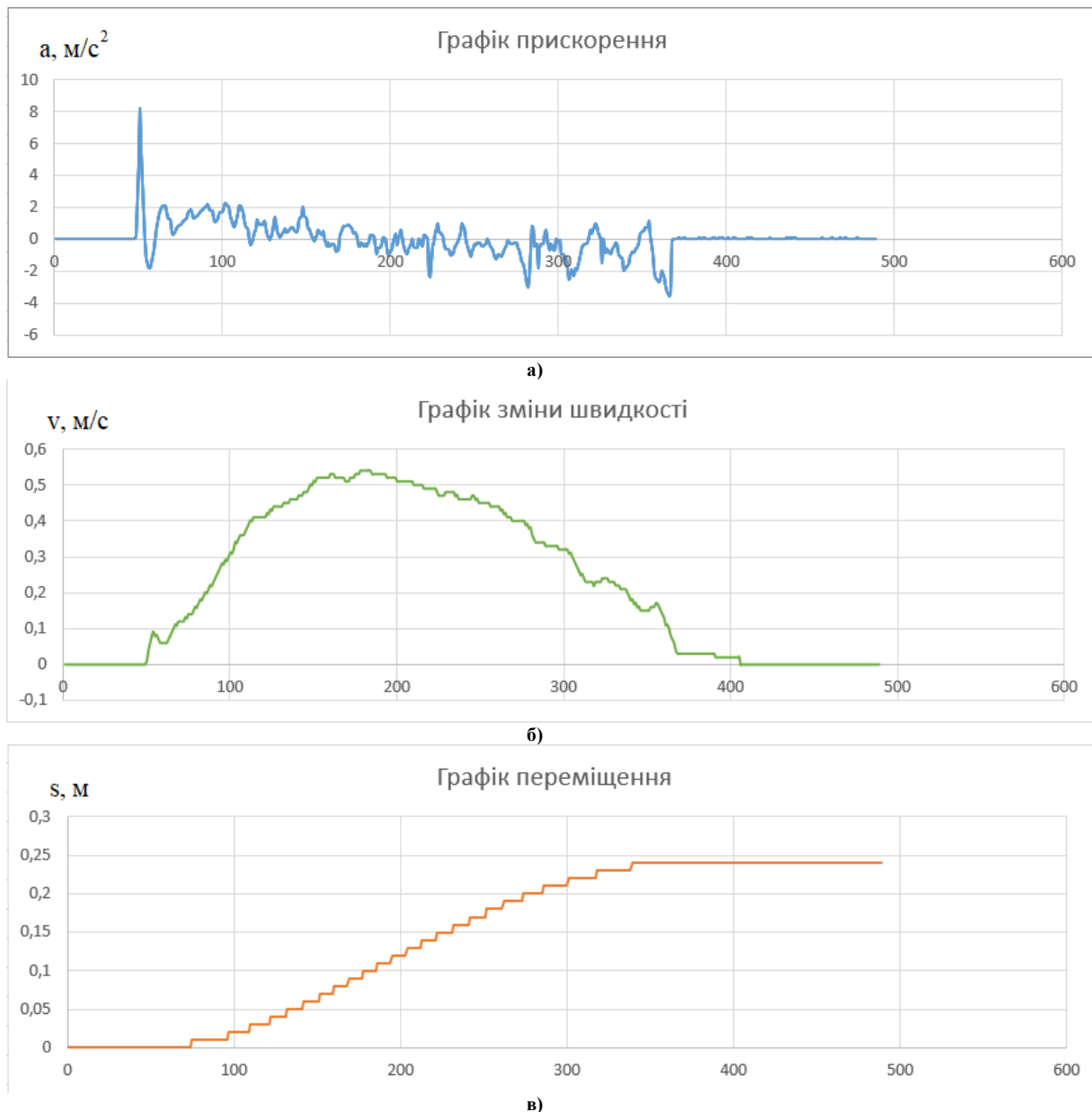


Рис. 9. Зображення графіків тестового вимірювання : а) прискорення; б) – швидкість; в) - переміщення

В таблиці 2 наведені дані шести вимірювань, що було отримано в результаті перевірки похибки у випадку коли фактичне відхилення від центру по осі Y дорівнює 30 см.

Таблиця 2

**Результати калібрування датчика  
акселерометра**

№	Фактичне відхилення, см	Дані з датчика, см	Похибка, см	Похибка, %
1	30	30,11	0,11	0,37
2	30	29,73	0,27	0,9
3	30	30,65	0,65	2,17
4	30	30,16	0,16	0,53
5	30	29,93	0,07	0,24
6	30	29,56	0,44	1,46

Середня похибка дорівнює 0,95%, що є гарним результатом у випадку стабілізації вільно падаючого вантажу. На рис. 10 зображено алгоритм роботи коду програми, що використовувався для отримання результатів.

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

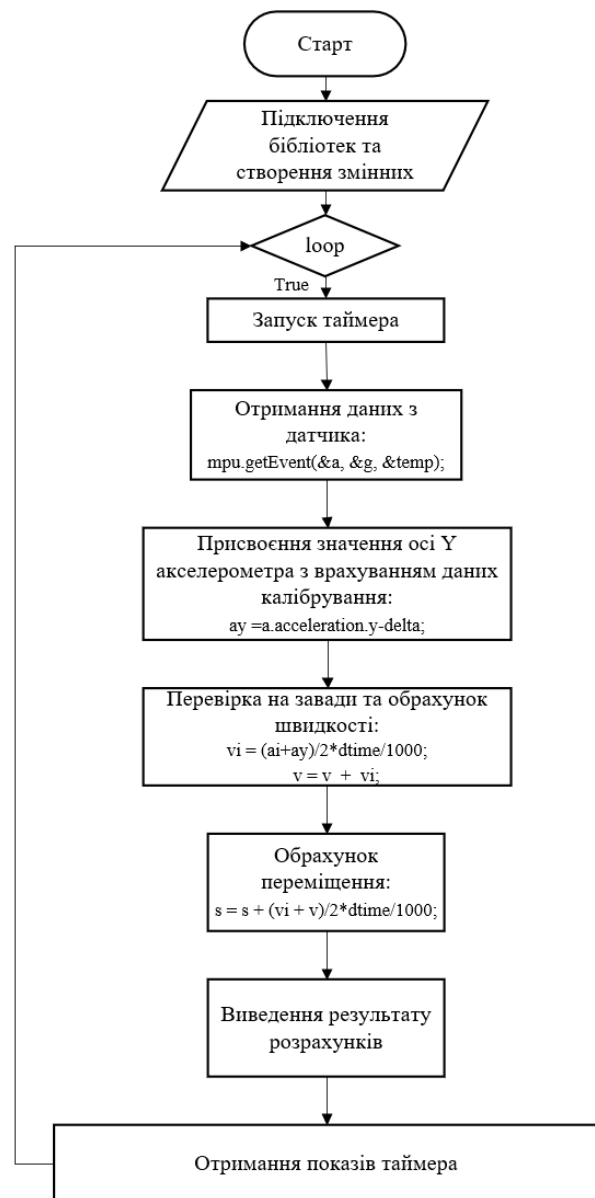
У статті досліджено спосіб вимірювання відхилення від нуля вантажу вантажного БПЛА [13], шляхом використання інерційної системи, основною складовою якої є акселерометр MEMS. Також у цій статті запропоновано алгоритм отримання відстані за допомогою інтегрування значень прискорення отриманих з датчика. Було виконано калібрування гіроскопа та акселерометра датчику MPU6050 за допомогою виготовленого калібрувального кубу, що дало змогу зменшити похибку вимірювань. Невеликий розмір вимірювальної системи дає можливість адаптування до безпілотного літального апарату, або до його модулів. Шляхом практичних вимірювань виявлено, що середня похибка такої системи дорівнює 0.95%.

Експеримент показав, що враховуючи похибку, можливо використовувати даний метод відслідковування відхилення тіла у пристрої стабілізації вільно падаючого вантажу.

Мінусом цієї системи є її неактуальність у разі нахилу пристрою. Для подальшого покращення інерційної системи варто використати магнітометр, тому що за допомогою цього датчика в поєднанні з гіроскопом є можливість отримання точнішого значення нахилу системи. Саме це дасть змогу корегувати значення акселерометра у відношенні до кута.

**Література**

1. How Does Wind Speed Affect Homerun Chances? [Електронний ресурс] // Random Problems. – Режим доступу: <https://www.somesolvedproblems.com/2019/10/how-does-wind-speed-affect-homerun.html> (дата звернення: 19.10.2022). – Назва з екрана.
2. Novel capacitive sensing system design of a microelectromechanical systems accelerometer for gravity measurement applications / Z. Li [та ін.] // Micromachines. – 2016. – Т. 7, № 9. – С. 167–169.
3. Process development of an all-silicon capacitive accelerometer with a highly symmetrical spring-mass structure etched in TMAH+Triton-X-100 / B. Tang [та ін.] // Sensors and Actuators. – 2014. – Т. 217. – С. 105–110.
4. Proceedings of the 9th International Symposium on Antennas / R. Yang et al. Qingdao : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2010.
5. Absolute distance measurement based on spectral interferometry using femtosecond optical frequency comb / G. Tang et al. Optics and Lasers in Engineering. 2019. Vol. 120. P. 71–78.
6. Absolute distance measurement based on spectral interferometer using the effect of the FSR of a Fabry–Perot etalon / M. Chen et al. Optics and Lasers in Engineering. 2019. Vol. 123. P. 20–27.
7. Small Displacement Measuring System Based on MEMS Accelerometer / W.-m. Niu et al. Mathematical



**Рис. 10. Зображення алгоритму програмного коду**

Problems in Engineering. 2019. No. 1. P. 1–7.

8. Berg G. V. Integrated velocity and displacement of strong earthquake ground motion / G. V. Berg // Bull. Seismol. Soc. – 1961. – Т. 51, № 2. – С. 175–189.

9. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4 [Електронний ресурс]. – 1197 Borregas Ave, Sunnyvale, CA 94089 U.S.A. : InvenSense Inc, 2013. – 52 с. – Режим доступу: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf> (дата звернення: 05.10.2022). – Назва з екрана.

10. Parkhomey I. Radar Technique for Aircraft with an Artificially Reduced RCS under Conditions of Application a Resonant Electromagnetic Field / I. Parkhomey, J. Boiko // Вісник Хмельницького національного університету. – 2022. – № 1. – С. 184–190.

11. Parkhomey I., Boiko J., Eromenko O. Methodology for the Development of Radar Control Systems for Flying Targets with an Artificially Reduced RCS //Journal of Robotics and Control (JRC). – 2022. – Т. 3. – №. 4. – С. 402–408.

12. Бойко Ю. М. Моделювання характеристик широкопasmової антенної системи для пеленгації БПЛА /Ю. М. Бойко, О.І. Полікаровських, В. П. Ткачук, В.М. Авдєєв, О.С. Свістунів // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2022. – № 3. – С. 158–167.

13. Ghamari M. et al. Unmanned aerial vehicle communications for civil applications: a review //IEEE Access. – 2022.

#### References

1. How Does Wind Speed Affect Homerun Chances? [Elektronnyi resurs] // Random Problems. – Rezhym dostupu: <https://www.somesolvedproblems.com/2019/10/how-does-wind-speed-affect-homerun.html> (data zvernennia: 19.10.2022). – Nazva z ekrana.

2. Novel capacitive sensing system design of a microelectromechanical systems accelerometer for gravity measurement applications / Z. Li [ta in.] // Micromachines. – 2016. – Т. 7, № 9. – С. 167–169.

3. Process development of an all-silicon capacitive accelerometer with a highly symmetrical spring-mass structure etched in TMAH+Triton-X-100 / B. Tang [ta in.] // Sensors and Actuators. – 2014. – Т. 217. – С. 105–110.

4. Proceedings of the 9th International Symposium on Antennas / R. Yang et al. Qingdao : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2010.

5. Absolute distance measurement based on spectral interferometry using femtosecond optical frequency comb / G. Tang et al. Optics and Lasers in Engineering. 2019. Vol. 120. P. 71–78.

6. Absolute distance measurement based on spectral interferometer using the effect of the FSR of a Fabry–Perot etalon / M. Chen et al. Optics and Lasers in Engineering. 2019. Vol. 123. P. 20–27.

7. Small Displacement Measuring System Based on MEMS Accelerometer / W.-m. Niu et al. Mathematical Problems in Engineering. 2019. No. 1. P. 1–7.

8. Berg G. V. Integrated velocity and displacement of strong earthquake ground motion / G. V. Berg // Bull. Seismol. Soc. – 1961. – Т. 51, № 2. – С. 175–189.

9. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4 [Elektronnyi resurs]. – 1197 Borregas Ave, Sunnyvale, CA 94089 U.S.A. : InvenSense Inc, 2013. – 52 s. – Rezhym dostupu: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf> (data zvernennia: 05.10.2022). – Nazva z ekrana.

10. Parkhomey I. Radar Technique for Aircraft with an Artificially Reduced RCS under Conditions of Application a Resonant Electromagnetic Field / I. Parkhomey, J. Boiko //Herald of Khmelnytskyi national university. – 2022. – № 1. – С. 184–190.

11. Parkhomey I., Boiko J., Eromenko O. Methodology for the Development of Radar Control Systems for Flying Targets with an Artificially Reduced RCS //Journal of Robotics and Control (JRC). – 2022. – Т. 3. – №. 4. – С. 402–408.

12. Boiko J. Modeling the characteristics of a broadband antenna system for UAV direction finding / J. Boiko, O. Polikarovskiykh, V. Tkachuk, V. Avdieiev, O. Svistunov //Herald of Khmelnytskyi national university. – 2022. – № 3. – С. 158–167.

13. Ghamari M. et al. Unmanned aerial vehicle communications for civil applications: a review //IEEE Access. – 2022.

Надійшла/Paper received : 05.08.2022 p.    Надрукована/Printed :01.11.2022 p.

КОПИТИНА Ірина

Київський національний університет технологій та дизайну

e-mail: [i.v.kopytina@gmail.com](mailto:i.v.kopytina@gmail.com)

АНДРЕЄВА Ольга

Київський національний університет технологій та дизайну

ORCID ID: [0000-0001-8374-2306](https://orcid.org/0000-0001-8374-2306)e-mail: [wayfarer14@ukr.net](mailto:wayfarer14@ukr.net)

МОКРОУСОВА Олена

Київський національний університет технологій та дизайну

Державний торговельно-економічний університет

ORCID ID: [0000-0003-1943-8048](https://orcid.org/0000-0003-1943-8048)e-mail: [olenamokrousova@gmail.com](mailto:olenamokrousova@gmail.com)

ОХМАТ Олена

Київський національний університет технологій та дизайну

ORCID ID: [0000-0003-0927-8706](https://orcid.org/0000-0003-0927-8706)e-mail: [oxmat.ou@knuutd.edu.ua](mailto:oxmat.ou@knuutd.edu.ua)

## ФЕРМЕНТИ ТА ПІДХОДИ ДО ЇХ ВИКОРИСТАННЯ У ВИРОБНИЦТВІ НАТУРАЛЬНОЇ ШКІРИ

*В роботі викладено усталені уявлення про ферменти і традиційні підходи до їх практичного використання у шкіряному виробництві. Розкрито особливості будови та властивості цих сполук як білків та як каталізаторів. На підставі аналізу літературних джерел показано переваги ферментативних процесів порівняно з хімічними, що полягають у підвищенні продуктивності, якості натуральної шкіри та культури виробництва, більш раціональному використанні природних ресурсів.*

*Ключові слова: традиційні уявлення та підходи, ферменти, технологічні процеси, натуральна шкіра*

KOPYTINA Iryna

Kyiv National University of Technologies and Design

ANDREYEVA Olga

Kyiv National University of Technologies and Design

MOKROUSOVA Olena

Kyiv National University of Technologies and Design

State University of Trade and Economics

OKHMAT Olena

Kyiv National University of Technologies and Design

## ENZYMES AND APPROACHES TO THEIR APPLICATION IN THE LEATHER PRODUCTION

*In a market economy, the leather industry faces new challenges, including the need to improve and optimize technological processes to achieve the required quality of final products and comply with environmental legislation. The practical experience and long-term achievements of the authors in the field of natural leather production indicate the importance of choosing the right method and materials for processing raw and semi-finished hides. One proven solution is the use of enzymes. Based on the results of the analysis of literary sources, information on traditional ideas about enzymes and approaches to their use in the production of natural leather is systematized.*

*According to established ideas, enzymes are not just organic substances, proteins, but also high-speed catalysts for multiple chemical and biochemical reactions. Preparations based on enzymes have been commercially studied in detergents, food, light, pharmaceutical, diagnostic, chemical and other industries, in the agro-industrial complex. This prevalence is explained by the fact that the use of these funds contributes to improving the quality of products, culture and the level of greening of production, more rational use of raw materials and material resources. In the leather industry, enzymatic processes have gone through a long evolutionary path - from the use of primitive improvised means to the use of preparations that are more up to date with the requirements of the time. According to the modern classification, enzymes are divided into six main classes according to the nature of the catalyzed reaction. In the manufacture of genuine leather, taking into account the nature of the substrate (proteins, carbohydrates, lipids), preparations based on enzymes are used that belong to the class of hydrolases (proteases, amylases, lipases) and differ from each other in the active center and mode of action. The preparations used can either accelerate processes that usually proceed slowly (soaking), or provide a specific transformation of raw material (bating), or replace known chemical reagents (unhairing). The results obtained will be taken into account in the future when studying innovative approaches to the enzymization of leather production.*

*Keywords: traditional representations and approaches, enzymes, technological processes, genuine leather.*

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

Шкіряна промисловість — одна з провідних галузей легкої промисловості, головною метою якої є виготовлення натуральної шкіри зі шкур тварин. З урахуванням вимог сьогодення готова продукція відомих підприємств має бути не лише високоякісною, конкурентоспроможною, а й вироблятися за умов дбайливого відношення до матеріальних та енергетичних ресурсів, екології навколишнього середовища [1].

Технологія виробництва натуральної шкіри є сукупністю багатьох складних фізико-хімічних процесів та механічних операцій, спрямованих на формування структури та властивостей шкірного покриття тварин у напрямку одержання готового продукту, який, завдяки своїм унікальним споживчим

характеристикам (насамперед, високій міцності, довговічності та гігієнічним властивостям), здатний задовольняти вимоги споживачів різноманітних верств населення та вподобань. І, безумовно, значною мірою ця здатність визначається технологічним регламентом, вибором та способом застосування хімічних матеріалів [1-3].

### Аналіз досліджень та публікацій

Аналіз діяльності вітчизняних та іноземних підприємств галузі, а також науково-технічної літератури свідчать про перспективність застосування ферментів для оброблення шкіри [4-11]. Це пов'язано з їх високою каталітичною активністю, специфічним впливом на основну складову дерми колаген, що за сукупністю дозволяє покращити якість шкіряного напівфабрикату, готової шкіри та промислових стоків, підвищити культуру виробництва й дотримуватися політики енерго- та ресурсозбереження.

До ефективного застосування ферментів шкіряна галузь прийшла поступово – від застосування примітивних підручних засобів до тих, які більшою мірою відповідали й відповідають вимогам часу. Так, спочатку шкіри обробляли ферментовмісними біологічними рідинами, продуктами життєдіяльності тварин та процесу бродіння (слина, підшлункова залоза, пташиний і тваринний послід, хлібні кваси тощо). Це супроводжувалось низькою продуктивністю виробництва. На більш пізніх етапах розвитку шкіряного виробництва стали залучати більш ефективні ферментні препарати, які виготовляли, головним чином, на основі підшлункової залози (панкреатин, протосубтилін) та продуктів життєдіяльності мікроорганізмів й традиційно застосовували при відмочуванні, зневолошуванні, м'якшенні [4, 9, 11].

Останнім часом завдяки успіхам хімічної інженерії, біотехнології та мікробіології, розширенню асортименту шкірсировини і виготовлених з неї виробів все більше уваги надається пошуку ефективних ферментних препаратів різного походження, призначених не лише для підготовчих, а й наступних стадій шкіряного виробництва, а також для перероблення відходів [1, 3, 11-12].

Виходячи з унікальної ролі ферментів у біотехнологічних процесах та розвитку шкіряної промисловості, співробітниками кафедри біотехнології, шкіри та хутра КНУТД запланована низка публікацій, присвячених дослідженню ферментів та їх застосуванню у виробництві натуральної шкіри.

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є теоретичний аналіз типології ферментних препаратів та ефективності їх застосування на різних етапах виробництва шкіри. За *об'єкт* дослідження обрано технологічні процеси шкіряного виробництва, а також ферменти та ферментні препарати. *Предмет* дослідження – традиційні уявлення про ферменти і підходи до їх використання у шкіряному виробництві. Для кращого пізнання предмету дослідження, виявлення та визначення закономірностей його розвитку, уявного сполучення частин предмета, встановлення взаємодії та зв'язків частин і пізнання цього предмета як єдиного цілого, застосовано такі поширені загальнонаукові методи як аналіз та синтез.

### Виклад основного матеріалу

Ферменти або ензими – це біологічні каталізатори білкової природи, які утворюються в живих організмах і здатні прискорювати хімічні та біохімічні реакції. Чисті ферменти використовуються, головним чином, у медицині та наукових дослідженнях, а з промисловою метою застосовуються ферментні препарати – суміші, які, крім основного цільового ферменту з домінуючою активністю, містять інші, менш активні ферменти та баластні речовини [4, 13-14].

Оскільки ферменти є білками з особливими, каталітичними функціями, вони виявляють властивості, притаманні як білкам (наприклад, висока молекулярна маса, амінокислотний склад, кольорові реакції та реакції осадження, загальна схема будови тощо), так і каталізаторам; це обумовлено особливостями будови ферментів. У складі молекул всіх ферментів є білкова частина, яка має кілька рівнів структури – первинну, вторинну, третинну, четвертинну. У третинній структурі розташований активний центр, який саме і визначає каталітичну здатність цих сполук.

Первинна структура ферментів, як і будь-яких інших протеїнів, обумовлена послідовністю розташування амінокислотних залишків у поліпептидних ланцюгах. Уявлення про вторинну структуру пов'язане з конформацією цих ланцюгів, наявністю в них спіралізованих (на їх долю припадає незначна частина молекули) і укладених нерегулярно неспіралізованих (основна частина молекули) ділянок. Особливостями третинної структури ферментів є те, що поліпептидні ланцюги знаходяться у складеному стані, при цьому між спіралізованими ділянками розташовані неспіралізовані ділянки. Поліпептидні ланцюги укладені таким чином, що гідрофобні залишки амінокислот знаходяться всередині молекули, гідрофільні бічні групи – на її поверхні. Від поверхні всередину молекули є заглиблення-кишені, в яких знаходяться активні центри. Субстрат проникає в такі заглиблення і далі там перебігає відповідна реакція. Утримується субстрат в кишені завдяки певному розташуванню бічних груп амінокислотних залишків, локалізованих на стінках кишені. Четвертинна структура ферментів утворюється внаслідок об'єднання кількох третинних структур і складається, як правило, з двох-чотирьох однакових або різних субодиниць, зв'язаних між собою, наприклад, атомами металів, коферментами. У кожній молекулі ферменту є один невеличкий активний центр, утворений через зближення віддалено розташованих угруповань під час появи вторинного і третинного рівнів структури. Активний центр є сукупністю кількох груп атомів, тому

знаходиться не в межах якоїсь невеликої ділянки одного ланцюга, а у двох чи кількох ланцюгах, або на різних ділянках одного ланцюга. Іноді утворюється один поліпептидний ланцюг з двома активними центрами, що каталізують різні реакції [13].

Розпізнають ферменти одно- та двокомпонентні. Однокомпонентні (або прості) ферменти містять лише білкову частину – поліпептидні ланцюги, які при гідролізі розпадаються до амінокислот. До них належать пепсин, трипсин, уреаз, рибонуклеаза тощо. Двокомпонентні (або складні) ферменти, крім білкової частини (так званого апоферменту, що забезпечує специфічність дії та відповідає за вибір типу хімічного перетворення субстрату), містять небілкову частину – кофактор, що служить акцептором і донором хімічних груп, атомів та електронів на каталітичній ділянці активного центра фермента. Молекула складного фермента, в цілому, називається холоферментом. Зв'язок білкової частини ферменту з небілковою здійснюється за рахунок ковалентних і нековалентних зв'язків і може бути різної міцності. Якщо небілкова частина ферменту міцно пов'язана з білком і в циклі біохімічних реакцій не відокремлюється від нього, її прийнято називати простетичною групою (наприклад, ФАД, ФМН, біотин тощо) [15].

Ферменти, як каталізатори, не викликають нових реакцій, а прискорюють вже існуючі, знаходячись в системі зовсім у незначній кількості. Разом з тим, швидкість ферментних реакцій зазвичай в  $10^6$ - $10^{12}$  разів вища від швидкості неферментних реакцій. Приклад ефективності перебігу реакції розкладання пероксиду водню за участю ферменту каталази наведено у таблиці 1 [14].

Таблиця 1

**Ефективність перебігу реакції розкладання пероксиду водню за наявності різних каталізаторів**

Каталізатор	Енергія активації, кДж/моль	Відносна швидкість реакції при температурі 300 °К
Без каталізатора	70	1
Платина (гетерогенний каталізатор)	45	$2 \cdot 10^3$
Іони заліза (гомогенний каталізатор)	42	$8 \cdot 10^3$
Каталаза (фермент)	7	$9 \cdot 10^{10}$

У ферментативній реакції можна виокремити кілька основних етапів:

1. Приєднання субстрату ( $S$ ) до ферменту ( $E$ ) з утворенням фермент-субстратного комплексу ( $E-S$ ).
2. Перетворення фермент-субстратного комплексу на один або кілька перехідних комплексів ( $E-X$ ) за одну або кілька стадій.

3. Перетворення перехідного комплексу ( $E-X$ ) на комплекс фермент-продукт ( $E-P$ ).

4. Відділення кінцевих продуктів ферментної реакції ( $P$ ):



Перша стадія ферментативного каталізу зазвичай нетривала і залежить від концентрації субстрату у середовищі, а також від його дифузії до активного центру ферменту. Фермент-субстратний комплекс утворюється практично миттєво. Друга стадія найбільш повільна і лімітує швидкість всього каталізу в цілому. Її тривалість залежить від енергії активації даної хімічної реакції. По завершенні реакції (кінцевий стан) фермент-субстратний комплекс розпадається на продукт (продукти) реакції та фермент. Третя стадія практично миттєва й визначається швидкістю дифузії продуктів реакції в оточуюче середовище. Після закінчення реакції фермент повертається до свого вихідного стану та знову здатний взаємодіяти з новою молекулою субстрату [13-15].

До найбільш характерних властивостей ферментів слід віднести:

- термолабільність (чутливість до дії високої температури);
- чутливість до дії рН;
- чутливість до дії хімічних речовин;
- каталітична здатність;
- специфічність.

Через чутливість ферментів до дії температури і рН середовища кожен фермент має свої оптимальні значення температури та рН, за яких його активність максимальна.

Специфічність дії ферментів полягає у здатності прискорювати перебіг однієї певної реакції, не впливаючи на швидкість інших, навіть дуже схожих. Специфічність ферментів обумовлена їхньою унікальною амінокислотною послідовністю, від якої залежить конформація активного центру, що взаємодіє з компонентами реакції.

Структура молекули субстрату (або якоїсь її частини) повинна знаходитись у точній геометричній відповідності ферменту, тобто ключ відповідає замку, тобто повинен дотримуватися принцип компліментарності – вибіркового злипання поверхні ферменту та поверхні субстрату [8]:

Розпізнають абсолютну, відносну та стереохімічну специфічність ферментів.

За сучасною класифікацією, прийнятою Комітетом з номенклатури Міжнародного союзу біохіміків і молекулярних біологів (NC-IUBMB), всі ферменти поділяються на шість основних класів відповідно до каталізованої реакції [16]: *оксидоредуктази* (окиснювально-відновлювальні реакції); *трансферази* (реакції перенесення груп); *гідролази* (реакції приєднання чи відщеплення молекули води); *ліази* (реакції

відщеплення або приєднання груп негідролітичним шляхом подвійного зв'язку); *ізомерази* (реакції ізомеризації); *лігази* або *синтетази* (реакції приєднання одна до одної двох молекул, пов'язані з розщепленням пірофосфатного зв'язку).

Ферменти знайшли поширення у різних сферах науки та економіки: в медицині, фармації, харчовій, хімічній та легкій промисловості, сільському господарстві тощо. Практичне застосування ферментів зумовило створення нової галузі – виробництво ферментних препаратів – одного з розділів біотехнології. Сучасна промисловість випускає десятки чистих ферментів та ферментних препаратів [4, 13].

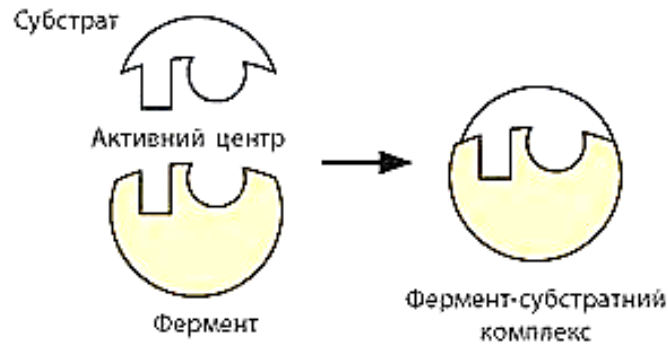


Рис. 1. Ілюстрація принципу компліментарності поверхні ферменту та субстрату

Ферменти здавна використовувалися у виробництві натуральної шкіри та хутра у вигляді різних засобів: від слини, посліду, підшлункової залози у стародавніх та вже застарілих методиках минулих років до більш ефективних ферментних препаратів нового покоління, синтезованих на сучасних біотехнологічних та хімічних підприємствах [4, 8, 13].

Шкіряне виробництво характеризується багатостадійністю, складністю та екологічною небезпечністю хімічного перетворення сировини на готову продукцію. На різних стадіях виробництва застосовуються різноманітні біологічно активні сполуки, у тому числі ферменти й одержані на їх основі ферментні препарати [10]. Це обумовлене сильною специфічною і каталітичною дією останніх у чисельних хімічних перетвореннях. Із відомих шести класів ферментів [16] у шкіряному виробництві найчастіше застосовуються ферменти третього класу – гідролази, що включають підкласи естерази, глікозил-гідролази, пептидази, амідази, які суттєво прискорюють реакції розщеплення пептидних, амідних, естерних зв'язків, де карбоксильні групи належать основним амінокислотам колагену – лізину та аргініну. Внаслідок цього досягаються різні результати ферментативного оброблення сировини – обводнення, знежирення, зневолошення, м'якшення. Найбільш суттєвим з них вважається м'якшення, ефективність якого значною мірою визначає фізико-хімічні та гігієнічні властивості шкіри.

Відмочування, яке є першим важливим процесом у виробництві шкіри, проводиться за допомогою амілолітичних, ліполітичних і протеолітичних ферментів. Специфічні ферменти протеази та ліпази збільшують поглинання води, розщеплюючи розчинні білки усередині матриці й тим самим полегшують видалення солей, гіалуронової кислоти, диспергування жирів разом з брудом та іншими забрудненнями в шкірі. Відмочування попереджає утворення зморшок на шкірі, покращує розкриття структури колагенових волокон, якість готової продукції, оскільки не лише очищає шкіру, видаляючи бруд, кров тощо, а й обводнює її до стану парної сировини [2, 4, 8].

Процес зневолошування полягає у видаленні волосу та епідермісу зі шкіри без пошкодження лицьової поверхні. Зазвичай зневолошування передбачає використання вапна та сульфиду натрію, які викликають забруднення навколишнього середовища. Ферментне видалення волосу пропонується в якості екологічно чистої альтернативи традиційному хімічному процесу. За допомогою ферментного зневолошування можна зменшити негативний хімічний вплив на протеїни шкіри, підвищити м'якість та вихід шкіри по площі. У якості зневолошувачого ферменту найкраще підходить протеаза. І якщо використання хімікатів повністю розчиняє волос, то фермент допомагає його зберегти та відфільтрувати. До переваг ферментного зневолошування слід віднести й підвищення рівня екологічної чистоти та культури виробництва [2, 11].

Здатність ферментів «розкривати» структуру колагену, його волокна, дозволяє знизити шкідливе навантаження на довкілля та потребу в очищенні води, що доводить еколого-економічну ефективність ферментативного оброблення. Як відомо, основна білкова речовина шкірного покриву тварин – колаген – пов'язана з протеогліканами, які містять протеїни та вуглеводи, з'єднані глікозидними зв'язками [2, 4]. Механізм розкриття волокон за допомогою ферментів відповідає методу біооброблення, який повністю відрізняється від звичайного хімічного процесу. Карбогідролази – це ті ферменти, які застосовуються для розкриття волокон в результаті руйнації протеогліканів та розкриття волокна для проникнення води, що викликає набухання. Видалення протеогліканів призводить до підвищення пружно-пластичних властивостей дерми. У звичайному процесі для розпушення волокон використовується вапно, яка забруднює навколишнє середовище. Отже, ферментативний метод допомагає зменшити проблему з вапняним шламом [4, 6].



М'якшення є ще одним фізико-хімічним процесом, у якому дуже важливу роль відіграють ферменти, призначення яких – розпушення та пептизація неколагенових компонентів структури дерми за рахунок видалення залишків міжфібрилярних білків. Під час м'якшення використовуються протеолітичні ферменти. Вони допомагають видалити вапно та неколагенові білки, які викликають ущільнення структури дерми, що призводить до втрати її пружно-пластичних властивостей [2, 4, 10, 13].

Процес знежирювання проводиться за допомогою ліпаз – ферментів, які руйнують жирові речовини без пошкодження самої шкіри. При цьому ліпази гідролізують жир не лише на зовнішній поверхні шкіри або шкіряного напівфабрикату, а й всередині її структури. Після видалення більшої частини натурального жиру підвищується ефективність подальших фізико-хімічних процесів (дублення, додублювання, фарбування). Основними перевагами використання ліпаз є більш однорідне забарвлення та покращення зовнішнього вигляду шкіри. Ліпази також застосовуються при виробництві гідрофобної (водонепроникної) шкіри [4].

Ферменти знаходять застосування і при обробленні відходів. Якщо утворювані відходи не обробляються належним чином, стоки підприємств з виробництва натуральної шкіри створюватимуть серйозну небезпеку для здоров'я людей та навколишнього середовища. Міздрю та основні тверді відходи, що утворюються на стадії підготовчих процесів, раніше піддавали гідролізу з використанням ферментів підшлункової залози. Оскільки голинні обрізки після зоління мають лужність, відповідну рН 10, у подальшому їх стали обробляти лужною протеазою. Цей процес зазвичай проводиться при постійній температурі 55 °С, найбільш сприятливій для активності ферменту. Рекомендується застосовувати комбінацію таких гідролітичних ферментів як протеази, карбогідрази та ліпази [4]. У роботі [16] повідомляється про можливість використання протеолітичних ферментів і трипсину для перероблення хромвмісних відходів.

Зазначений аналіз розкриває ефективність застосування ферментних препаратів на стадії підготовчих процесів виробництва шкіри для забезпечення ефектів розпушування структури дерми на мікрорівні, видалення ліпідних та кератиновмісних складових шкіряної сировини.

Інноваційними можуть бути дослідження щодо ефективності та доцільності застосування ферментних препаратів у післядубильних процесах виробництва шкіри.

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

Проведений теоретичний аналіз дозволив обґрунтувати типологію ферментів та ферментних препаратів, механізми взаємодії та доцільність їх застосування у підготовчих процесах виробництва шкіри. Встановлено, що ферменти є особливими білковими сполуками, які здатні суттєво прискорювати хімічні та біохімічні процеси. Ці сполуки виявляють властивості, притаманні як білкам, так і каталізаторам. Проте, на відміну від звичайних каталізаторів, ферменти діють на декілька порядків швидше з мінімальною кількістю побічних реакцій.

Завдяки дуалістичній природі ферментів одержані на їх основі препарати поширені у багатьох галузях промисловості. Практичний досвід роботи та результати наукових досліджень переконливо вказують на те, що використання ферментів у виробництві натуральної шкіри – виробу біогенного походження – цілком виправдано завдяки їх унікальним властивостям, важливими з яких є нетоксичний характер, швидкісний каталіз у достатньо м'яких умовах оточуючого середовища, підвищення якості продукції та культури виробництва, більш чисті стічні води.

З метою удосконалення діючих технологій виготовлення натуральної шкіри у напрямку ресурсоощадження та зменшення екологічного навантаження на довкілля й враховуючи технологічні можливості ферментів, подальше дослідження планується присвятити інноваційним підходам до ензимізації шкіряного виробництва.

#### **Література**

1. Основи створення сучасних технологій виробництва шкіри та хутра : монографія / А. А. Горбачов [та ін.]. – Київ : КНУТД, 2007. – 190 с.
2. Журавський В. А., Касьян Е. Є., Данилкович А. Г. Технологія шкіри та хутра : підручник / В. А. Журавський, Е. Є. Касьян, А. Г. Данилкович. – Київ : ВІПОЛ, 1996. – 744 с.
3. Грищенко І. М. Поліфункціональні шкіряні матеріали : монографія / І. М. Грищенко, А. Г. Данилкович, О. Р. Мокроусова ; за ред. А. Г. Данилковича. – Київ : Фенікс, 2013. – 267 с.
4. Гаркавенко С. С. Використання ензимів у шкіряно-взуттєвому виробництві : монографія / С. С. Гаркавенко, Д. В. Стаценко, Б. М. Злотенко. – Київ : КНУТД, 2016. – 188 с.
5. Aline Dettmer. Special Review Paper: Enzymes in the Leather Industry / Aline Dettmer, Patrícia Schacker dos Anjos and Mariliz Gutterres // JALCA. – 2013. – Vol. 108. – P. 146–158.
6. F. R. de Souza. Application of enzymes in leather processing: a comparison between chemical and coenzymatic processes / F. R. de Souza, M. Gutterres // Braz. J. Chem. Eng. – 2012. – 29 (3). – P. 473–481.
7. Khambhaty Y. Applications of enzymes in leather processing / Y. Khambhaty // Environ. Chem. Lett. – 2020. – 18. – P. 747–769.
8. Колесник Т. О. Дослідження процесу відмочування шкіряної сировини в присутності ферментних препаратів / Т. О. Колесник, О. А. Андреева // Вісник ХНУ. Технічні науки. – 2020. – 2 (283). – С. 251–254.

9. Атаманова А. А. Сучасні дослідження властивостей та використання ферментів / А. А. Атаманова, Т. О. Колесник, О. А. Андреева // Вісник ХНУ. Технічні науки. – 2020. – 5 (267). – С. 257–263.
10. Данилкович А. Г. Ферментна обробка шкіряного напівфабрикату в процесі м'якшення / А. Г. Данилкович, О. О. Романюк // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2014. – 3/6 (69). – С. 23–27.
11. Данилкович А. Г. Unhairing animal hides using probiotic *Bacteria bacillus subtilis* / А. Г. Данилкович, П. І. Гвоздяк, О. О. Романюк, О. В. Ковтуненко // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2013. – 5/6 (65). – С. 43–46.
12. Choundhary R. B. Enzyme technology applications in leather processing / R. B. Choundhary, A. K. Jana, M. K. Jha // Indian Journal of Chemical Technology. – 2004. – Vol. 11. – P. 659–671.
13. Андреева О. А. Фізика та хімія протеїнів : підручник / О. А. Андреева. – Київ : КНУТД, 2003. – 223 с.
14. Ogurtsov A. N. Biochemistry [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sites.google.com/site/anogurtsov/lectures/biochem/>.
15. Ферменти : метод. посіб. / К. В. Александрова [та ін.]. – Запоріжжя : ЗДМУ, 2015. – 115 с.
16. Nomenclature Committee of the International Union of Biochemistry and Molecular Biology. Enzyme Nomenclature 1992 // Recommendation of the Nomenclature Committee of the International Union of Biochemistry and Molecular Biology on Nomenclature and classification of enzymes. – San Diego : Academic Press, 1992. – 372 p.

#### References

1. Osnovy stvorennia suchasnykh tekhnolohii vyrobnytstva shkiry ta khutra : monohrafiia / A. A. Horbachov [ta in.]. – Kyiv : KNUTD, 2007. – 190 s.
2. Zhuravskiy V. A., Kasian E. Ye., Danylkovich A. H. Tekhnolohiia shkiry ta khutra : pidruchnyk / V. A. Zhuravskiy, E. Ye. Kasian, A. H. Danylkovich. – Kyiv : VIPOL, 1996. – 744 s.
3. Hryshchenko I. M. Polifunktsionalni shkiriani materialy : monohrafiia / I. M. Hryshchenko, A. H. Danylkovich, O. R. Mokrousova ; za red. A. H. Danylkovicha. – Kyiv : Feniks, 2013. – 267 s.
4. Harkavenko S. S. Vykorystannia enzymiv u shkiriano-vzuttievomu vyrobnytstvi : monohrafiia / S. S. Harkavenko, D. V. Statsenko, B. M. Zlotenko. – Kyiv : KNUTD, 2016. – 188 s.
5. Aline Dettmer. Special Review Paper: Enzymes in the Leather Industry / Aline Dettmer, Patricia Schacker dos Anjos and Mariliz Gutterres // JALCA. – 2013. – Vol. 108. – P. 146–158.
6. F. R. de Souza. Application of enzymes in leather processing: a comparison between chemical and coenzymatic processes / F. R. de Souza, M. Gutterres // Braz. J. Chem. Eng. – 2012. – 29 (3). – P. 473–481.
7. Khambhaty Y. Applications of enzymes in leather processing / Y. Khambhaty // Environ. Chem. Lett. – 2020. – 18. – P. 747–769.
8. Kolesnyk T. O. Doslidzhennia protsesu vidmochuvannia shkiriano syrovyny v prysutnosti fermentnykh preparativ / T. O. Kolesnyk, O. A. Andreieva // Visnyk KhNU. Tekhnichni nauky. – 2020. – 2 (283). – S. 251–254.
9. Atamanova A. A. Suchasni doslidzhennia vlastyvoستي ta vykorystannia fermentiv / A. A. Atamanova, T. O. Kolesnyk, O. A. Andreieva // Visnyk KhNU. Tekhnichni nauky. – 2020. – 5 (267). – S. 257–263.
10. Danylkovich A. H. Fermentna obrobka shkirianoho napivfabrykatu v protsesi miakshennia / A. H. Danylkovich, O. O. Romaniuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2014. – 3/6 (69). – S. 23–27.
11. Danylkovich A. H. Unhairing animal hides using probiotic *Bacteria bacillus subtilis* / A. H. Danylkovich, P. I. Hvozdiak, O. O. Romaniuk, O. V. Kovtunencko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2013. – 5/6 (65). – S. 43–46.
12. Choundhary R. B. Enzyme technology applications in leather processing / R. B. Choundhary, A. K. Jana, M. K. Jha // Indian Journal of Chemical Technology. – 2004. – Vol. 11. – P. 659–671.
13. Andreieva O. A. Fyzyka ta khimiia proteiniv : pidruchnyk / O. A. Andreieva. – Kyiv : KNUTD, 2003. – 223 s.
14. Ogurtsov A. N. Biochemistry [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://sites.google.com/site/anogurtsov/lectures/biochem/>.
15. Fermenty : metod. posib. / K. V. Aleksandrova [ta in.]. – Zaporizhzhia : ZDMU, 2015. – 115 s.
16. Nomenclature Committee of the International Union of Biochemistry and Molecular Biology. Enzyme Nomenclature 1992 // Recommendation of the Nomenclature Committee of the International Union of Biochemistry and Molecular Biology on Nomenclature and classification of enzymes. – San Diego : Academic Press, 1992. – 372 p.

Надійшла/Paper received : 13.09.2022 р. Надрукована/Printed : 01.11.2022 р.

СІНЧУК Ігор

Криворізький національний університет

ORCID ID: [0000-0003-3938-0744](https://orcid.org/0000-0003-3938-0744)E-mail: [lab.133.136@gmail.com](mailto:lab.133.136@gmail.com)

КОТЯКОВА Марина

Криворізький національний університет

ORCID ID: [0000-0001-5667-1354](https://orcid.org/0000-0001-5667-1354)E-mail: [kotyakova@ukr.net](mailto:kotyakova@ukr.net)

## ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМІВ ТРИФАЗНИХ ЧОТИРИПРОВІДНИХ МЕРЕЖ З РОЗОСЕРЕДЖЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ

Використання джерел електричної енергії розосередженої генерації дозволяє ефективно використовувати енергоресурси, у тому числі наявні відновлювальні джерела енергії, сприяє зменшенню шкідливих викидів при традиційній генерації електричної енергії, покращує якість електричної енергії для споживачів та зменшує перевантаження ліній передачі. Між тим, якщо навантаження, що живиться від джерела розосередженої генерації, є несиметричним, то напруга на нульовій точці інверторного інтерфейсу, що живить нейтральний провідник, може досить помітно відхилятися від встановленого рівня. Це призведе до несиметрії вихідної напруги, тобто до зниження її якості, наявності в змінних напругах значних постійних складових, а також до протікання струму значної величини у нейтральному провіднику. У зв'язку з цим було запропоновано метод тривимірної просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції для керування інвертором з чотирма плечима, що відрізняються від існуючих можливістю мінімізації складових напруг негативної та нульової послідовності в мережах з розподіленою генерацією з паралельним підключенням інверторів з трьома та чотирма плечима. Для розробки підходів щодо керування інверторами таких систем необхідно отримати аналітичні залежності, що описуватимуть перетік активної та реактивної потужності між інверторами в залежності від параметрів їх сформованих вихідних напруг.

Ключові слова: розосереджена генерація, несиметричні режими, чотири провідні мережі, електрична мережа, широтно-імпульсна модуляція.

SINCHUK Igor, KOTIAKOVA Maryna  
Kryvyi Rih National University

## STUDY OF NON-SYMMETRICAL MODES OF THREE-PHASE FOUR-WIRE NETWORKS WITH DISTRIBUTED GENERATION

The use of distributed generation electric energy sources allows efficient use of energy resources, including available renewable energy sources, contributes to the reduction of harmful emissions during traditional electric energy generation, improves the quality of electric energy for consumers and reduces overloading of transmission lines. Meanwhile, if the load supplied by the source of distributed generation is asymmetrical, then the voltage at the zero point of the inverter interface feeding the neutral conductor can deviate quite noticeably from the set level. The easiest way to provide a neutral point for connecting the neutral conductor is to use two capacitors with balancing resistors connected in parallel to them, that is, to create a zero voltage by dividing the total voltage of the direct current link in half. Circuits with voltage separation in the direct current circuit are widely used in electric drives with three-level energy converters, since in this case there is no need to connect the zero point of the direction to the load, and the main purpose of this electrical circuit is to obtain equal halves of the total voltage in the direct current circuit. This will lead to asymmetry of the output voltage, that is, to a decrease in its quality, the presence of significant constant components in alternating voltages, as well as to the flow of a significant current in the neutral conductor. In this regard, a three-dimensional space-vector pulse-width modulation method was proposed for controlling a four-arm inverter, which differs from the existing ones by the possibility of minimizing the components of negative and zero-sequence voltages in networks with distributed generation with parallel connection of three- and four-arm inverters. To develop approaches to control the inverters of such systems, it is necessary to obtain analytical dependencies that describe the flow of active and reactive power between inverters depending on the parameters of their generated output voltages.

Keywords: distributed generation, asymmetric modes, four-wire networks, electrical network, pulse width modulation.

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

Використання джерел з розосередженою генерацією дозволяє ефективно використовувати наявні відновлювальні джерела енергії, сприяє зменшенню шкідливих викидів при традиційній генерації електричної енергії, покращує якість електричної енергії для споживачів та зменшує перевантаження ліній передачі. У низьковольтних мережах з розподіленою генерацією досить часто є необхідним забезпечення четвертого (нейтрального) провідника засобами джерел енергії та відповідних мережевих інтерфейсів для живлення однофазних та несиметричних трифазних навантажень. При цьому слід очікувати зменшення взаємовпливу фаз навантаження між собою у контексті забезпечення відповідності показникам якості електричної енергії, проте дане питання вимагає відповідного аналізу. Отже, нейтральний провідник необхідний для забезпечення проходження струму несиметричних навантажень, а тому традиційний інверторний інтерфейс таких мереж повинен бути переобладнаний для підключення нейтрального провідника. Загальна схема такої системи показана на рис. 1 [1].

Якщо навантаження, що живиться від джерела розосередженої генерації, є несиметричним, то напруга на нульовій точці інверторного інтерфейсу, що живить нейтральний провідник, може досить

помітно відхилятися від встановленого рівня. Це призведе до несиметрії вихідної напруги, тобто до зниження її якості, наявність в змінних напругах значних постійних складових, а також до протікання струму значної величини у нейтральному провіднику. Отже, задача розробки інверторних інтерфейсів для живлення чотирипровідних мереж змінного струму з забезпеченням відповідності показників якості електричної енергії щодо несиметрії напруг є актуальною і потребує наукового вирішення [2].

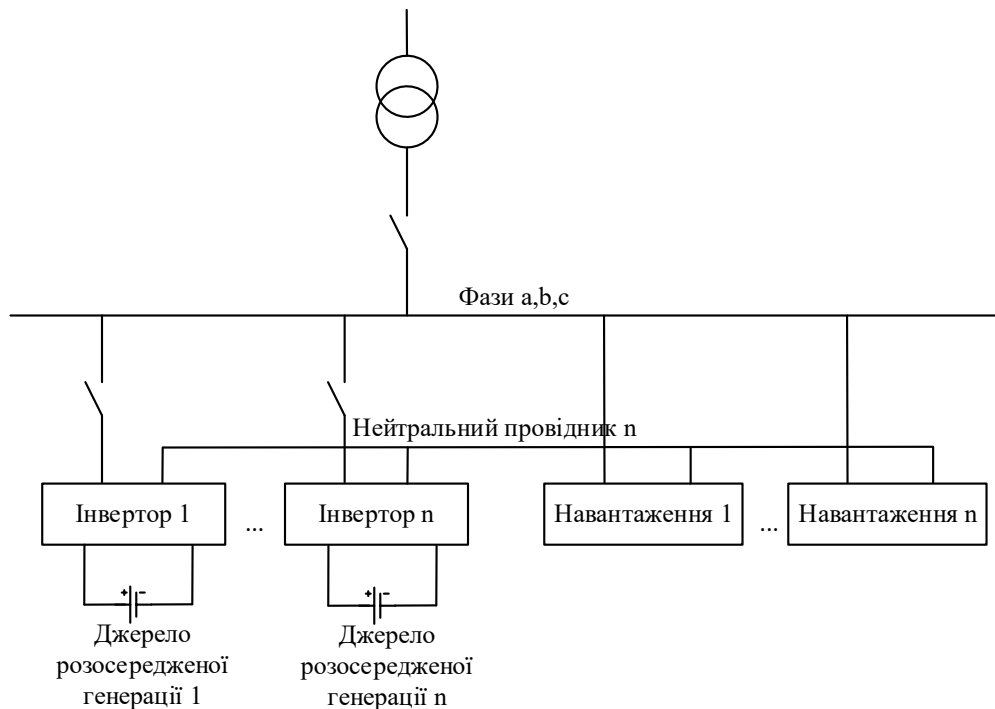


Рис. 1. Електрична мережа з розосередженою генерацією з підключенням нейтрального провідника

### Формулювання цілей статті

Полягає у розробці підходу до побудови системи керування інверторами джерел розосередженої генерації з мінімізацією гармонічних викривлень вихідної напруги.

### Аналіз досліджень та публікацій

У [1], [2] розглянуто методи підвищення ефективності використання схем з розділенням ланцюга постійного струму шляхом використання надлишкових станів просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції. У [3] представлено метод балансування напруг на конденсаторах ланцюга постійного струму. Але у представлених рішеннях керування напругою нульової точки здійснюється на рівні широтно-імпульсного керування ключами інвертора, а вплив на даний показник з боку системи керування вищого рівня відсутній, що спричинить неможливість використання даних систем при паралельному підключенні декількох інверторів з необхідністю розділення величини струму у нейтральному провіднику між ними. Окрім того, така система не може використовуватися у випадку живлення несиметричних навантажень або при роботі з підключенням до мережі централізованого електропостачання.

Аспекти балансування напруги нульової точки є також актуальними для функціонування багаторівневих перетворювачів електричної енергії, що використовуються у електроенергетичних та електромеханічних системах та дозволяють зменшити рівень напруги, що прикладається до окремих силових напівпровідникових ключів та підвищити коефіцієнт загальних гармонічних викривлень у вихідній напрузі [4-10].

### Виклад основного матеріалу

Традиційно мікромережі з чотирипровідними лініями можуть працювати або з підключенням до мережі централізованого електропостачання або в автономному (острівному) режимі. В той же час, слід врахувати той аспект, що не обов'язково усі інвертори у такій мережі повинні мати можливість підключення до чотирипровідної мережі, оскільки частина з них може при цьому працювати у симетричному трифазному режимі. У даній роботі розглянемо варіант, що живлення нейтрального провідника здійснюється від одного інвертора, а в подальшому необхідним є розробка системи керування, що дозволила б розділяти струм у нейтральному провіднику між декількома інверторами, що підключені паралельно [5].

Найпростішим шляхом забезпечення нейтральної точки для підключення нейтрального провідника є використання двох конденсаторів з паралельно підключеними до них балансуєчими резисторами (рис. 2), тобто створення нульової напруги шляхом ділення загальної напруги ланки постійного струму навпіл. Схеми з розділенням напруги в ланці постійного струму широко використовуються у електроприводах з

трирівневими перетворювачами енергії, оскільки в цьому випадку немає необхідності підключати нульову точку напругу до навантаження, а основною метою даного електричного ланцюга є отримання рівних половин загальної напруги в ланцюзі постійного струму. Також дане рішення знаходить своє використання у структурах силових активних фільтрів, оскільки в цьому випадку струм у нейтральному провіднику не містить постійної складової, а інші складові в даному провіднику є порівняно малими. Для таких інверторів є можливим розробити методи широтно-імпульсної модуляції, що придатні для балансування напруг на конденсаторах подільника напруги. Недоліком такого схемного рішення є те, що струм нульового провідника протікає через конденсаторний подільник. Якщо цей струм є значної величини, то необхідні конденсатори значної ємності для зменшення рівня пульсацій напруги на них, а тому напруга на нульовій точці відхиляється від встановленого рівня, що призводить до несиметрії вихідних напруг, яка є особливо помітною при наявності у струмі нейтрального провідника постійної складової [5].

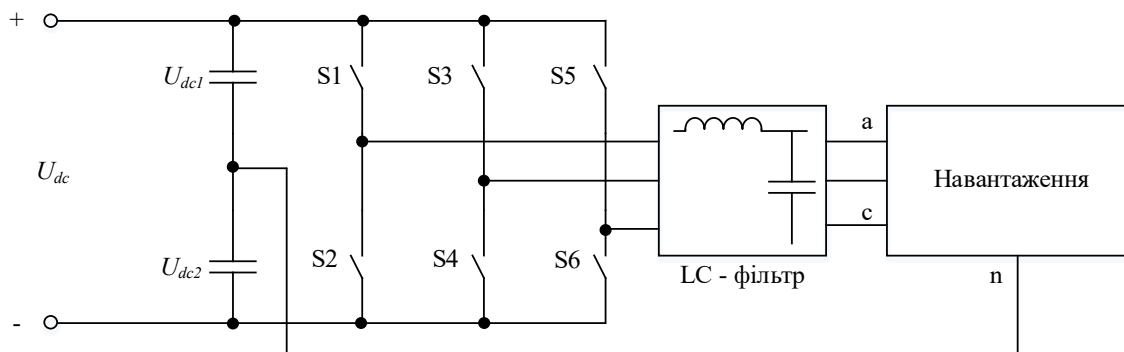


Рис. 2. Схема мережевого інверторного інтерфейсу для підключення нейтрального провідника до джерела розподіленої генерації з використанням розділення напруги ланцюга постійного струму

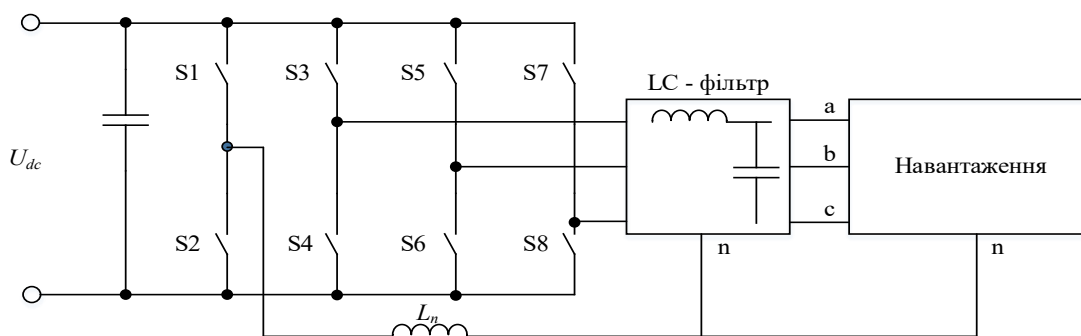


Рис. 3. Схема на базі інвертора з чотирма плечима.

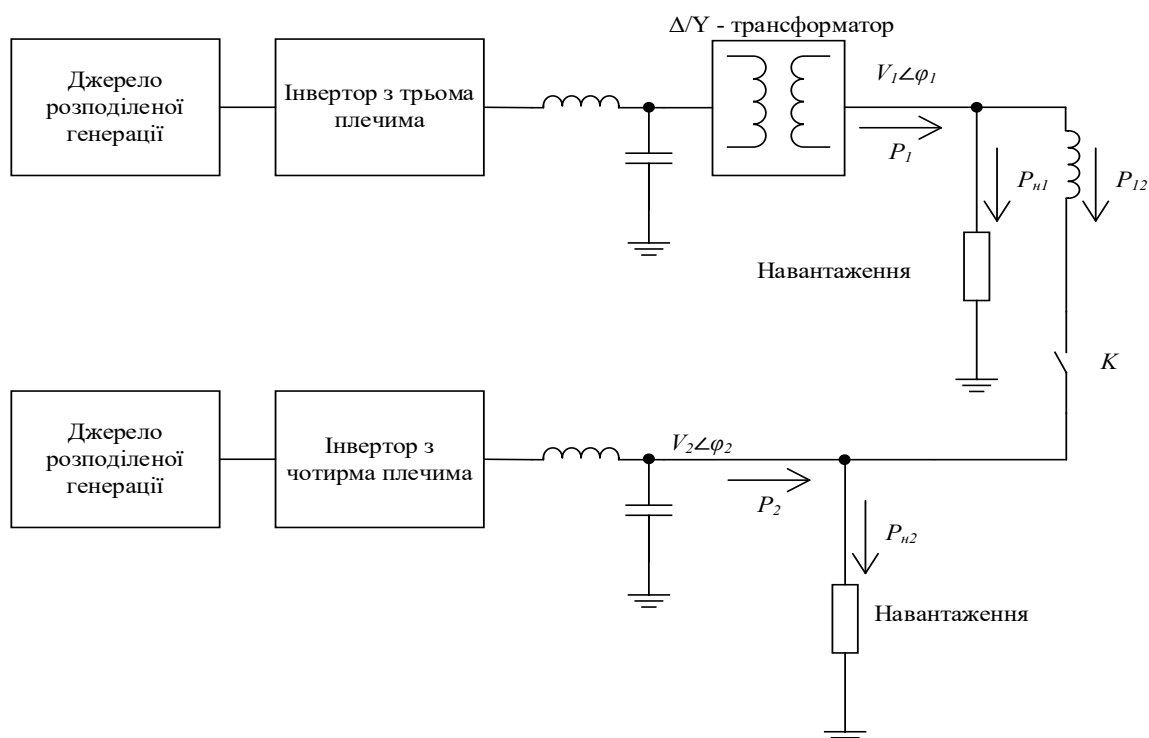


Рис. 4. Структура мікрорежі, що поєднує використання інверторів з трьома та чотирма плечима

Іншим варіантом живлення несиметричних навантажень у мережах з розосередженою генерацією є використання інверторів з чотирма плечима, схема якого показана на рис. 3. Керування таким інвертором може здійснюватися з використанням тривимірної широтно-імпульсної модуляції. Перевагою такої системи є більш ефективне використання напруги в ланцюзі постійного струму, проте керування четвертим плечем інвертора також здійснюється на рівні загальної широтно-імпульсної модуляції вихідної напруги, а тому забезпечення можливості керування рівнем струму у нейтральному провіднику вимагає розробки складної системи керування. Недоліком цієї схеми є те, що формування нульової напруги здійснюється за рахунок широтно-імпульсної модуляції з використанням більш високих рівнів напруг імпульсів, а тому комутація високих напруг з високою частотою може призводити до виникнення проблем із відповідністю стандартам електромагнітної сумісності [6-8].

Оскільки живити усі навантаження мережі було б недоцільно, то запропоновано структуру мікромережі, що поєднує використання інверторів з трьома та чотирма плечима Рис. 4.

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

Запропоновано метод тривимірної просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції для керування інвертором з чотирма плечима, що відрізняються від існуючих можливістю мінімізації складових напруг негативної та нульової послідовності в мережах з розподіленою генерацією з паралельним підключенням інверторів з трьома та чотирма плечима. Для розробки підходів щодо керування інверторами таких систем необхідно отримати аналітичні залежності, що описуватимуть перетік активної та реактивної потужності між інверторами в залежності від параметрів їх сформованих вихідних напруг.

### Література

1. Козакевич І.А. Система енергоефективного керування динамічним компенсатором викривлень напруги / І.А. Козакевич, А.А. Кондратенко // Гірничий вісник. – 2019. – Випуск 105. С. 154-159.
2. Козакевич І.А. Керування потоками потужності гібридних транспортних засобів / І.А. Козакевич, Ю.Г. Осадчук, Р.А. Ільченко // Гірничий вісник. – 2017. – Випуск 102. С. 124-129.
3. Козакевич І.А. Дослідження роботи синхронного двигуна з постійними магнітами в гібридних тягових електроприводах / І.А. Козакевич, І.В. Касаткіна, Л.В. Єрьоменко // Гірничий вісник. – 2018. – Випуск 104. С. 106-110.
4. Козакевич І.А. Система керування вентилями реактивними двигунами / І.А. Козакевич, І.І. Шевченко // Гірничий вісник. – 2017. – Випуск 102. С. 135-138.
5. Сінчук І.О. Превентивна оцінка і основні напрями підвищення енергоефективності підземних залізничних підприємств / І.О. Сінчук, І.А. Козакевич, М.Л. Барановська, Т.М. Берідзе, І.І. Пересунько // Вісник Криворізького національного університету. Збірник наукових праць. – Кривий Ріг, 2020. – Вип. 50. С. 142-147.
6. Jahanbakhshi M. A novel deadbeat controller for single phase PV grid connected inverters / M. Jahanbakhshi, B. Asaei, B. Farhangi // 23rd Iranian Conference on Electrical Engineering. – Tehran, 2015. – Pp. 1613-1617.
7. Kanai N. A Study of Quasi Multi-rate Deadbeat Control for Modular Multi-level Converter using FPGA based Hardware controller / N. Kanai, S. Kurita, T. Ando and T. Yokoyama // IEEE 4th International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC). – Singapore, Singapore, 2019. – Pp. 1-5.
8. Tao Y. Deadbeat Repetitive Control for a grid-connected inverter with LCL Filter / Y. Tao, C. Tan, Q. Chen, L. Zhang, K. Zhou, L. Liu // IEEE 15th International Conference on Control and Automation (ICCA). – Edinburgh, United Kingdom. – 2019. – Pp. 573-577.
9. Ueta H. 1MHz multisampling deadbeat control with disturbance compensation method for three phase PWM inverter / H. Ueta, T. Yokoyama // International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia). – Niigata, 2018. – Pp. 1883-1889.
10. Xing Y. An improved deadbeat plus plug-in repetitive controller for three-phase four-leg inverters / Y. Xing, C. Tan, Q. Chen, L. Zhang, K. Zhou // IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – Beijing, 2017. – Pp. 6325-6329.

### References

1. Kozakevych I.A. Systema enerhoefektyvnogo keruvannya dynamichnym kompensatorom vykryvlen napruhy / I.A. Kozakevych, A.A. Kondratenko // Hirnychiy visnyk. – 2019. – Vypusk 105. S. 154-159.
2. Kozakevych I.A. Keruvannya potokamy potuzhnosti hibrydnykh transportnykh zasobiv / I.A. Kozakevych, Yu.H. Osadchuk, R.A. Ilchenko // Hirnychiy visnyk. – 2017. – Vypusk 102. S. 124-129.
3. Kozakevych I.A. Doslidzhennia roboty synkhronnoho dvyhuna z postiynymy mahnitamy v hibrydnykh tiahovykh elektropryvodakh / I.A. Kozakevych, I.V. Kasatkina, L.V. Yeromenko // Hirnychiy visnyk. – 2018. – Vypusk 104. S. 106-110.
4. Kozakevych I.A. Systema keruvannya ventylnymy reaktivnymy dvyhunamy / I.A. Kozakevych, I.I. Shevchenko // Hirnychiy visnyk. – 2017. – Vypusk 102. S. 135-138.
5. Sinchuk I.O. Preventyvna otsinka i osnovni napriamy pidvyshchennia enerhoefektyvnosti pidzemnykh zalizorudnykh pidpriemstv / I.O. Sinchuk, I.A. Kozakevych, M.L. Baranovska, T.M. Beridze, I.I. Peresunko // Visnyk Kryvorizkoho natsionalnogo universytetu. Zbirnyk naukovykh prats. – Kryvyi Rih, 2020. – Vyp. 50. S. 142-147.
6. Jahanbakhshi M. A novel deadbeat controller for single phase PV grid connected inverters / M. Jahanbakhshi, B. Asaei, B. Farhangi // 23rd Iranian Conference on Electrical Engineering. – Tehran, 2015. – Pp. 1613-1617.

7. Kanai N. A Study of Quasi Multi-rate Deadbeat Control for Modular Multi-level Converter using FPGA based Hardware controller / N. Kanai, S. Kurita, T. Ando and T. Yokoyama // IEEE 4th International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC). – Singapore, Singapore, 2019. – Pp. 1-5.
8. Tao Y. Deadbeat Repetitive Control for a grid-connected inverter with LCL Filter / Y. Tao, C. Tan, Q. Chen, L. Zhang, K. Zhou, L. Liu // IEEE 15th International Conference on Control and Automation (ICCA). – Edinburgh, United Kingdom. – 2019. – Pp. 573-577.
9. Ueta H. 1MHz multisampling deadbeat control with disturbance compensation method for three phase PWM inverter / H. Ueta, T. Yokoyama // International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia). – Niigata, 2018. – Pp. 1883-1889.
10. Xing Y. An improved deadbeat plus plug-in repetitive controller for three-phase four-leg inverters / Y. Xing, C. Tan, Q. Chen, L. Zhang, K. Zhou // IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – Beijing, 2017. – Pp. 6325-6329.

Надійшла/Paper received : 19.08.2022 р.    Надрукована/Printed :23.11.2022 р.



**ФРИШЕВ Сергій**

Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України  
„Ніжинський агротехнічний інститут”, м. Ніжин.  
ORCID ID: [0000-0001-6474-2191](https://orcid.org/0000-0001-6474-2191)  
e-mail: [fryshev@outlook.com](mailto:fryshev@outlook.com)

**ЛУКАЧ Василь**

Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України  
„Ніжинський агротехнічний інститут”, м. Ніжин.  
ORCID ID: [0000-0001-5715-9029](https://orcid.org/0000-0001-5715-9029)  
e-mail: [vslukach@ukr.net](mailto:vslukach@ukr.net)

**ІКАЛЬЧИК Микола**

Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України  
„Ніжинський агротехнічний інститут”, м. Ніжин.  
ORCID ID: [0000-0001-7085-2952](https://orcid.org/0000-0001-7085-2952)  
e-mail: [m.ikalchik@gmail.com](mailto:m.ikalchik@gmail.com)

**ВАСИЛЮК Володимир**

Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України  
„Ніжинський агротехнічний інститут”, м. Ніжин.  
ORCID ID: [0000-0003-3840-5428](https://orcid.org/0000-0003-3840-5428)  
e-mail: [dekan.ae@ukr.net](mailto:dekan.ae@ukr.net)

## УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ТРАНСПОРТУВАННЯ ЗЕРНА ВІД КОМБАЙНІВ

*У роботі наведено обґрунтування вдосконаленого технологічного процесу перевезення зерна від зернових комбайнів (ЗК) напівпричепом самоскидом (НП) з трактором та сідельним причепом.*

*Ключові слова: перевезення зерна, комбайни, напівпричеп самоскид, підкатний сідельний причіп, продуктивність.*

FRYSHEV Sergii, LUKACH Vasyi, IKALCHYK Mykola, VASYLYUK Volodymyr  
Separated Subdivision of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine  
“Nizhin Agrotechnical Institute”, Nizhyn, Ukraine

### IMPROVEMENT OF GRAIN TRANSPORTATION TECHNOLOGY FROM COMBINES

*The article provides a rationale for an improved technological process for transporting grain from grain combines (ЗК) by a semi-trailer dump truck (НП) in an aggregate with a tractor and a saddle trailer. One of the main reserves for increasing the productivity of a combine is to increase the utilization factor of its shift time by using transshipment technology based on interoperation compensators - tractor trailers for reloaders of the PBN-30, PBN-40, PBN-50 brands, etc. and heavy vehicles (AT), in the body which grain is being reloaded outside the field. The lack of technology is significant downtime of vehicles.*

*A comparative analysis of various technological schemes for the operation of the (ЗК) and vehicles showed that the minimum specific duration of harvesting and transport operations is achieved by using a tractor with a tractor to work in the field, subject to the minimum time spent on the formation (uncoupling, hitching) of transport units using a fifth wheel coupling device, which fitted with a trailer. At the same time, vehicles are used as negotiable (НП)s, which makes it possible to organize the continuous operation of tractors in the sections “ЗК - edge of the field” and “edge of the field - grain receiving point”, where possible downtime of the AT is replaced by downtime only of the НП.*

*We have proposed a technical solution containing a temporary redistribution of the mass of grain in the body of the НП by loading it into the front part of the body. At the same time, the rear wheels of the НП are partially unloaded and do not over-compact the soil, and the rolling semi-trailer, equipped with wide-profile low-pressure tires, perceives additional load without significant soil compaction.*

*The theoretical analysis of the rhythm of the processes of grain movement by individual technological links of the harvesting and transport complex made it possible to determine the analytical dependences of the main parameters of these links on the productivity of the grain combine and the volume of its bunker, the nominal load capacity of the НП, the duration of the НП recoupling, the distance of grain transportation, the average technical speed of the tractor and the car. The use of semi-shuttle transporters operating in two stages: in the field and on the road, provides a 1.5-fold increase in the productivity (average output) of the AT, and also eliminates the cost of specialized reloading trailers and double reloading of grain.*

*Key words: Transportation of grain, combines, semi-shuttle movement, semi-trailer dump truck, rolling saddle trailer, productivity.*

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

Аналіз технологічної схеми перевезення зерна від комбайнів з використанням причепів-перевантажувачів (ПП), інша назва – перевантажувальні бункери-накопичувачі – ПБН, ПНБ зі шнековими пристроями для розвантаження, дозволив виявити [1,2] ряд перешкоджаючих досягненню максимального ефекту недоліків, до числа яких можна віднести наступні:

- необхідність своєчасного під'їзду АТ до ПП обумовлює простої АТ (до 30% від часу зміни [3]);
- необхідність виконання додаткової операції (в порівнянні з технологією прямих перевезень) -

перевантаження зерна із одного транспортного засобу (причепа-перевантажувача) в інший (великовантажний АТ). Таке перевантаження зерна із використанням шнекових робочих органів потребує додаткових енерговитрат, витрат часу та не виключає механічне пошкодження зерна.

### Аналіз досліджень та публікацій

Аналіз схем перевезення зерна від комбайнів з використанням мобільних міжопераційних компенсаторів [1,3] показав, що застосування автотракторних причепів та напівпричепів з підкатними причепами (рис. 1) забезпечує мінімальну питому тривалість збирально-транспортних операцій.

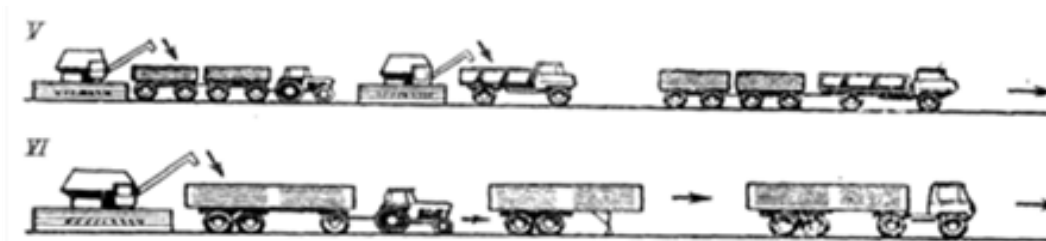


Рис. 1. Схеми перевезення зерна від комбайнів з використанням автотракторних причепів та напівпричепів з підкатними причепами

Виробниче впровадження такої схеми може бути досягнуто за умовою виключення ущільнення ґрунту колесами НП та за рахунок раціональних витрат часу на відчіплення-причеплення НП.

### Формулювання цілей статті

Метою досліджень є зменшення питомого тиску коліс транспортних засобів на ґрунт та часу очікування завантаження автотранспорту шляхом удосконалення технологічного процесу.

### Виклад основного матеріалу

З урахуванням позитивних оціночних показників нами прийнято збирально-транспортний комплекс (ЗТК), що містить групу ЗК та автотракторні поїзди, до складу яких входить трактор, напівпричіп та сідловий причіп ПСП-20 (рис. 2).



Рис. 2. Схема тракторного автопоїзда з ПСП-20

Сідловий причіп ПСП-20, який з'єднує трактор (тягач) та НП поїзда, обладнаний спеціальним зчипним пристроєм (СЗП).

Напівпричепа з тягачами застосовуються послідовно в двох технологічних ланках: для роботи в полі «ЗК – НП – трактор» і для транспортування по дорозі від поля до ХПП – «НП – дорожній тягач (АТ – автомобільний або тракторний)». У першій ланці НП функціонує як міжопераційний компенсатор, який завантажується зерном з бункерів не менш чим від двох комбайнів.

Після заповнення зерном НП перевозиться на край поля, відчіпляється і замінюється на пустий для подальшої роботи в полі, а завантажені НП перевозяться дорожніми тягачами на ХПП, де розвантажуються і повертаються пустими на край поля.

Для зменшення ущільнення ґрунту нами запропоновано технічне рішення, яке містить тимчасовий перерозподіл маси зерна в кузові НП під час його транспортування в полі [4]. З урахуванням того, що кузов НП (рис. 4) має дві узагальнені опори на ґрунт: задню (2-х або 3-х вісню) тележку і передню 2-х вісню – підкатний сідловий причіп ПСП-20, який обладнується широкопрофільними шинами низького тиску, доцільним є завантаження зерна переважно в передню частину кузова НП.

Це створює такий розподіл навантаження під час руху тракторного автопоїзда з ПСП-20 по полю, при якому задні колеса НП будуть частково розвантажені і не ущільнюють суттєво ґрунт, а підкатний сідловий причіп сприймає додаткове навантаження і завдяки широкопрофільним шинам низького тиску, виключає надмірне ущільнення ґрунту.

Як показують попередні розрахунки з урахуванням теорії сипучих матеріалів [5] під час застосування напівпричепа зерновоза НПС 3250 з вантажопідйомністю 25 тонн (висота бортів 2,1 м,



Рис. 3. Автомобільний напівпричіп зерновоз НПС 3250 з підкатним причепом ПСП-20 для роботи з трактором у полі

довжина кузова 6,3 м) завантаження зерна в передню частину кузова дозволяє зменшити навантаження на задні колеса до 5 тонн із завантаженням СПС-20 до 20 тонн.

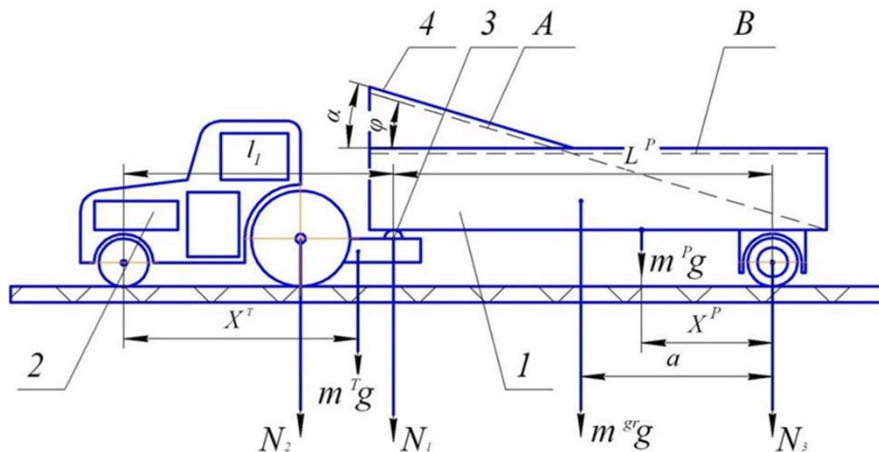


Рис. 4. Схема тимчасового перерозподілу маси зерна в кузові НП під час його транспортування у полі (підкатний причеп умовно не показаний)

Після перевезення на край поля та перечіплення для перевезення по дорозі кузовів НП за допомогою гідроциліндра нахиляється до горизонту для рівномірного розподілу зерна під дією гравітації по днищу кузова. Технічним результатом, який забезпечується наведеною сукупністю ознак є зменшення тиску на ґрунт задніх коліс до допустимого агрономічними значеннями.

Для розрахунку робочих параметрів ЗТК в роботі [1] розглянуто ритмічність роботи першої технологічної ланки: «ЗК – напівпричіп самоскид з трактором» і визначена кількість НП  $n_{П1}$ , які обслуговують групу комбайнів  $m_K$  за формулою:

$$n_{П1} = \text{CEILING} \frac{m_K}{m_{KH}}, \text{ од.} \quad (1)$$

де  $\text{CEILING}$  – функція, яка повертає найближче більше ціле значення;

$m_K$  – загальна кількість комбайнів в групі;

$m_{KH}$  – кількість комбайнів, які обслуговуються одним НП. Вона визначається як [1, 6]:

$$m_{KH} = \text{INT} \left( \omega_K d_B \left( \frac{9,25}{W_{KP}} + \frac{8,33}{W_{ШК}} \right) - 8,33 t_{ВП} - 0,667 \right) \text{ од.}, \quad (2)$$

де  $\text{INT}$  – функція, яка повертає найближче менше ціле значення;

$W_{KP}$  – продуктивність ЗК за 1 годину основного часу його роботи, т/год.;

$W_{ШК}$  – продуктивність вивантажувального шнека ЗК за 1 годину основного часу, т/год.;

$t_{B-П}$  – середня тривалість перечіпки (відчіплення - причеплення) НП;

$\omega_K$  – об'єм бункера комбайна, м<sup>3</sup>;

$d_B$  – об'ємна маса зерна, т/м<sup>3</sup>.

Загальна кількість НП, які потрібні для роботи ЗТК (рухаються, очікують причеплення та знаходяться під навантаженням) дорівнює кількості НП, що працюють у обох ланках: та визначається за формулою [3]:

$$П = n_{П1} + n_{AT} + n_3 \text{ од.}, \quad (3)$$

де  $n_3$  – додаткова кількість НП, яка урахує стохастичність їх руху по дорозі і необхідна для застосування під час випадкової затримки АТ. Ця кількість визначається експериментально під час роботи ЗТК і розміщується на краю поля.

$n_{AT}$  – кількість автотягачів (АТЗ) для перевезення зерна в ХПП з рівняння:

$$n_{AT} = \text{CEILING} \frac{n_{П1} \left( 2t_{B-П} + \frac{2l_{ij}}{v_T} + t_{ВВВ} \right)}{0,08 + 0,12\rho + t_{B-П}} \text{ од.}, \quad (4)$$

$t_{вив}$  — тривалість перебування АТ в пункті розвантаження, яка залежить від рівня механізації і організації робіт, год.;

$l_{ij}$  — відстань перевезення зерна з поля (пункту і) в пункт розвантаження ХПП

$v_T$  — середня технічна швидкість АТ.

$t_{B-П}$  - середня тривалість перечіпки (відчіплення - причеплення) НП;

$\rho$  - кількість бункерів ЗК, які вмістяться в кузов НП.

Для кількісної оцінки перевезення зерна з поля застосуємо показник продуктивності ТЗ за робочий день.

$$W_{PD} = \frac{Q_{PD} \cdot l_{ij}}{n_{DT}} \quad \text{ткм/р.д.}, \quad (5)$$

де  $Q_{PD}$  - обсяг зерна, який збирається і перевозиться збирально-транспортним комплексом за 1 робочий день.

Порівнюємо даний варіант технології збирання та перевезення зерна з найбільш прогресивною за темпами впровадження в Україні перевантажувальною технологією із використанням причепа-перевантажувача у наступному прикладі. Розглянемо застосування технологічних схем збирання урожаю зерна з площі 2100 га зерновими комбайнами Джон Дір 9780 і перевезення зерна на приймальний пункт ( $W_{KP}=15,3\text{т/год.}$ ,  $\omega_K=10\text{м}^3$ ,  $d_B=0,75\text{ т/м}^3$ , урожайність  $U=6\text{ т/га}$ , кількість робочих днів для збирання зерна за агровимогами  $D_P=10$  днів, тривалість зміни  $T_{зм}=8\text{ год.}$ , коефіцієнт змінності  $K_{зм}=1,5$ , відстань перевезення зерна  $l_{ij}=8\text{ км}$ ,  $v_T=40\text{ км/год.}$ , транспортний склад подано в таблиці 1

Розрахунки параметрів для технології із застосуванням НП проведено відповідно методики, яка представлена в даній роботі. Для перевантажувальної технології розрахунки виконано згідно методики, яка міститься в роботі [1]. Результати розрахунків подано в таблиці 1.

З представлених даних видно, що використання НП, які працюють за напівчовниковим рухом у двох ланках: в полі та на дорозі, забезпечує підвищення продуктивності (середнього виробітку) АТЗ в 1,5 рази з 210 до 315 т/р.д. за рахунок зменшення їх простоїв. Це дозволяє відповідно зменшити їх кількісний склад в ЗТК.

Таблиця 1

Порівняльні техніко-експлуатаційні та кількісні показники роботи ЗТК

Технологічні варіанти	Машини ЗТК							Середній виробіток одного АТЗ, т/р.д.
	ЗК Джон Дір 9780	ПП Кінзе 850	НП зерновоз НПС 3250	Трактор Джон Дір 8440	Авто-тягач Iveco Trakker AT260T44	АТЗ КамАЗ 6520 AGRO	Підкатний сідловий причіп ПСП-20	
Перевантажувальна технологічна схема	9	3	-	3	-	6	-	210
Перевезення напівпричепами	9	-	7	3	4	-	3	315

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

2. Тимчасовий перерозподіл маси зерна в кузові НП під час його транспортування в полі трактором і застосування сідлового причепа ПСП-20 з широкопрофільними шинами низького тиску дозволяє знизити ущільнення ґрунту.

3. Використання НП, які працюють за напівчовниковим рухом у двох ланках: в полі та на дорозі, забезпечує підвищення продуктивності (середнього виробітку) АТЗ в 1,5 рази з 210 до 315 т/р.д. за рахунок зменшення їх простоїв, що дозволяє відповідно зменшити їх кількісний склад в ЗТК.

### Література

1. Фришев С. Г., Козупиця С.І. Розробка ефективних технологій транспортування зерна від комбайнів. Монографія. К. 2015. – 224 с.
2. Воркут А.И. Грузовые автомобильные перевозки./А.И. Воркут – К.: Вища школа, 1986. – 447 с.
3. Измайлов А. Ю. Технологии и технические решения по повышению эффективности транспортных систем АПК. /Измайлов А. Ю. — М.: ФГНУ «Рос-информатротех», 2007. – 200 с.
4. Фришев С.Г., Дьомін О.А. Патент на корисну модель № 135168. Спосіб транспортування зерна від комбайнів. Зареєстровано 25.06.2019.
5. Гячев Л.В. Теория сыпучих материалов/ М.: ФГНУ «Рос-информатротех», 1976. – 250 с.

6. Зязев В. А., Капланович М. С., Петров В. И. Перевозки сельскохозяйственных грузов автомобильным транспортом. – М.:Транспорт, 1979. – 253 с.

#### References

1. Frishev S. G., Kozupicya S.I. Rozrobka efektyvnyh tekhnologij transportuvannya zerna vid kombajniv. Monografiya. K. 2015. – 224 s.
2. Vorkut A.I. Gruzovye avtomobil'nye perevozki./A.I. Vorkut – K.: Vishcha shkola, 1986. – 447 s.
3. Izmajlov A. Yu. Tekhnologii i tekhnicheskie resheniya po povysheniyu effektivnosti transportnyh sistem APK. /Izmajlov A. Yu. — M.: FGNU «Ros-informagrotekh», 2007. – 200 s.
4. Frishev S.G., D'omin O.A. Patent na korisnu model' № 135168. Sposib transportuvannya zerna vid kombajniv. Zareestrovano 25.06.2019.
5. Gyachev L.V. Teoriya sypuchih materialov/ M.: FGNU «Ros-informagrotekh», 1976. – 250 s.
6. Zyazev V. A., Kaplanovich M. S., Petrov V. I. Perevozki sel'skohozyajstvennyh gruzov avtomobil'nym transportom. – M.:Transport, 1979. – 253 s.

Надійшла/Paper received : 26.09.2022 р.    Надрукована/Printed :01.11.2022 р.

DOI 10.31891/2307-5732-2022-313-5-243-250  
УДК 632:654.672

**АНТОНЕНКО Артем**

Київський національний університет культури і мистецтв  
ORCID ID: [0000-0001-9397-1209](https://orcid.org/0000-0001-9397-1209)  
e-mail: [artem.v.antonenko@gmail.com](mailto:artem.v.antonenko@gmail.com)

**БРОВЕНКО Тетяна**

Київський національний університет культури і мистецтв  
ORCID ID: [0000-0003-1552-2103](https://orcid.org/0000-0003-1552-2103)

**КРИВОРУЧКО Мирослав**

Державний торговельно-економічний університет  
ORCID ID: [0000-0002-7378-1050](https://orcid.org/0000-0002-7378-1050)

**СТУКАЛЬСЬКА Наталія**

Національний університет харчових технологій  
ORCID ID: [0000-0001-6590-7170](https://orcid.org/0000-0001-6590-7170)

**ТОЛОК Галина**

Національний університет біоресурсів і природокористування України  
ORCID ID: [0000-0002-2971-1645](https://orcid.org/0000-0002-2971-1645)

**ТОНКИХ Олексій**

Київський національний університет культури і мистецтв  
ORCID ID: [0000-0001-7823-4761](https://orcid.org/0000-0001-7823-4761)

## МОДЕЛЮВАННЯ РЕЦЕПТУРНОГО СКЛАДУ ОЗДОРОВЧИХ ПРОДУКТІВ ХАРЧУВАННЯ НА ОСНОВІ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ КОМПОЗИЦІЙ

У статті наведено обґрунтування та розроблення методології моделювання рецептурного складу оздоровчих продуктів харчування на основі функціональних композицій. В основу моделювання покладений принцип харчової комбінаторики, який полягає у обґрунтованому кількісному підборі основної сировини та харчових добавок, що у сукупності забезпечують формування необхідних органолептичних і фізико-хімічних властивостей, заданий рівень поживної (харчової, біологічної) і енергетичної цінності. Моделювання харчових продуктів являє собою процес створення продукту як єдиної цільної системи, що складається з елементів, які окремо не забезпечують заданих властивостей. Концептуальні підходи до моделювання функціональних композицій і продуктів на їх основі, полягають у оптимізації вибору і співвідношень інгредієнтів, за яких можливо отримати композицію, що у найбільшій мірі відповідає за кількісним вмістом і якісним складом показникам поживної цінності і медико-біологічним вимогам. Застосування математичного апарату заснованому на формалізації якісних і кількісних показників складу, поживної цінності окремих інгредієнтів і їх сполучень у складі модельних функціональних композицій дозволяє, шляхом імітаційного моделювання, визначити загальний вміст окремого компоненту. З урахуванням вищерозглянутих факторів результати моделювання, як правило, забезпечують ефективну оптимізацію складу продукту і параметрів окремих операцій технологічного процесу. По завершенні етапу багаторівневого експериментального моделювання функціональні композиції і технології продуктів перевіряються у лабораторних і виробничих умовах, після чого проводиться остаточне їхнє корегування. На заключному етапі здійснюються комплексні дослідження основних показників якості готової продукції, розрахунок економічних показників, відпрацювання технології у виробничих умовах, підготовка, узгодження і затвердження нормативних документів і організація промислового впровадження. Застосування методології проектування модельних функціональних композицій і продуктів харчування дозволяє підвищити ступінь використання сировини і розширити асортименти продукції із заданим складом і властивостями оздоровчого призначення.

Ключові слова: модельні композиції, функціональні композиції, білок, жири, вуглеводи, макро- мікроелементи, вітаміни, енергетична цінність.

ANTONENKO Artem, BROVENKO Tetiana

Kyiv National University of Culture and Arts

KRYVORUCHKO Myroslav

State University of Trade and Economics

STUKALSKA Nataliya

National University of Food Technology

TOLOK Galina

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

TONKYKH Oleksii

Kyiv National University of Culture and Arts

## SIMULATION OF THE RECIPE COMPOSITION OF HEALTHY FOOD PRODUCTS BASED ON FUNCTIONAL COMPOSITIONS

The article provides justification and development of the methodology for modeling the recipe composition of health food products based on functional compositions. The basis of the modeling is the principle of food combinatorics, which consists in the justified quantitative selection of the main raw materials and food additives, which together ensure the formation of the necessary organoleptic and physicochemical properties, the given level of nutritional (food, biological) and energy value. Modeling of food products is the process of creating a product as a single integrated system consisting of elements that do not individually provide the specified properties. Conceptual approaches to the modeling of functional compositions and products based on them consist in optimizing the selection and ratio of

ingredients, by which it is possible to obtain a composition that, in terms of quantitative content and qualitative composition, best meets the indicators of nutritional value and medical and biological requirements. The application of a mathematical apparatus based on the formalization of qualitative and quantitative indicators of the composition, nutritional value of individual ingredients and their combinations in the composition of model functional compositions allows, through simulation modeling, to determine the total content of an individual component. Taking into account the above-mentioned factors, the modeling results, as a rule, provide effective optimization of the product composition and parameters of individual operations of the technological process. Upon completion of the stage of multi-level experimental modeling, the functional compositions and technologies of the products are checked in laboratory and production conditions, after which their final adjustment is made. At the final stage, comprehensive studies of the main indicators of the quality of finished products, calculation of economic indicators, testing of technology in production conditions, preparation, coordination and approval of regulatory documents and organization of industrial implementation are carried out. The application of the design methodology of model functional compositions and food products allows to increase the degree of use of raw materials and expand the assortment of products with a given composition and properties for health purposes.

**Keywords:** model compositions, functional compositions, protein, fats, carbohydrates, macro- microelements, vitamins, energy value.

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

Наукова концепція створення технологій спеціальних харчових продуктів ґрунтується на основних положеннях теорії раціонального харчування, теоретико-практичних засадах технологій оздоровчих продуктів, з оптимізованими поживною і енергетичною цінністю, сенсорними та структурними характеристиками, на основі цілеспрямованого поєднання, шляхом математичного моделювання, функціонально активних інгредієнтів рослинного походження. [1,2]

В основу моделювання покладений принцип харчової комбінаторики, який полягає у обґрунтованому кількісному підборі основної сировини та харчових добавок, що у сукупності забезпечують формування необхідних органолептичних і фізико-хімічних властивостей, заданий рівень поживної (харчової, біологічної) і енергетичної цінності. [3]

Моделювання харчових продуктів являє собою процес створення продукту як єдиної цільної системи, що складається з елементів, які окремо не забезпечують заданих властивостей. Концептуальні підходи до моделювання функціональних композицій і продуктів на їх основі, полягають у оптимізації вибору і співвідношень інгредієнтів, за яких можливо отримати композицію, що у найбільшій мірі відповідає за кількісним вмістом і якісним складом показникам поживної цінності і медико-біологічним вимогам [4]. Застосування математичного апарату заснованому на формалізації якісних і кількісних показників складу, поживної цінності окремих інгредієнтів і їх сполучень у складі модельних функціональних композицій дозволяє, шляхом імітаційного моделювання, визначити загальний вміст окремого компоненту. [5,6]

### **Аналіз досліджень та публікацій**

Наукове обґрунтування та розроблення методології моделювання рецептурного складу оздоровчих продуктів харчування на основі функціональних композицій є актуальним завданням, розв'язання якого дозволить розширити асортимент страв з підвищеною харчовою і біологічною цінністю та одержати продукцію з заданими функціональними властивостями. [7-9]

Значний внесок у вирішення фундаментальних питань моделювання рецептурного складу оздоровчих продуктів харчування як засобу профілактики та ліквідації дефіциту мікронутрієнтів надали дослідження таких вітчизняних та зарубіжних вчених: М.І. Пересічного, Г.О. Сімахіної, О.О. Грінченко, А.Б. Горальчука, А.М. Дорохович, І.Ю. Жигаленко, А.В. Зіолковської, П.О. Карпенка, М.Б. Колесникової, В.Н. Корзуна, М.Ф. Кравченка, Г.М. Лисюк, Л.П. Малюк, Л.М. Мостової, Н.Я. Орлової, П.П. Пивоварова, Н.В. Притульської, Г.Б. Рудавської, М.Р. Ennis, J.C.F. Murrey, G.O. Phillips, W.C. Weling, P.A. Williams та ін. [10-15]

### **Формулювання цілей статті**

Метою роботи є: обґрунтування та розроблення методології моделювання рецептурного складу оздоровчих продуктів харчування на основі функціональних композицій.

Об'єкт дослідження – методологія моделювання рецептурного складу оздоровчих продуктів харчування на основі функціональних композицій.

Предмет дослідження – модельні композиції, функціональні композиції, білок, жири, вуглеводи, макро-мікроелементи, вітаміни, енергетична цінність.

### **Виклад основного матеріалу**

Процес моделювання забезпечується інформаційною базою, що містить експериментально отримані дані про макро- і мікронутрієнтний склад інгредієнтів і складається з наступних етапів:

Етап 1. Напрацювання вихідних даних для моделювання продуктів на основі функціональних композицій.

- Визначення мети: створити технології продуктів з харчовими добавками рослинного походження для оздоровчого харчування (розробити конкурентоспроможний продукт, знизити собівартість, реалізувати наявні сировинні ресурси);



- ознайомлення з існуючими вітчизняними і зарубіжними аналогами і прототипами (наукові і патентні джерела, Інтернет-видання), оцінка технічних можливостей, вибір базової технології;
- визначення обмежувальних критеріїв до складу модельних функціональних композицій і продуктів на їх основі (за окремими видами сировини та інгредієнтів, вмістом білка, жиру, вуглеводів тощо);
- вибір інгредієнтів за ознаками (хімічний склад, функціональні властивості, вартість), здатних при варіюванні їх вмісту у модельній композиції найбільш суттєво впливати на поживну цінність, структурно-механічні властивості харчової системи, органолептичні показники готового продукту, його ціну;
- формування бази даних про загальний хімічний склад компонентів модельної композиції (у т.ч. вміст незамінних амінокислот в масовій частці загального білка; ліпідного складу – вміст насичених (сума), мононенасичених (сума) і поліненасичених жирних кислот у складі жирів можливих рецептурних інгредієнтів; вуглеводного складу – масова частка моно-, ди- і полісахаридів; мінерального і вітамінного складу, енергетичної цінності);
- формулювання і конкретизація медико-біологічних вимог до кількісно-якісного складу модельованого продукту.

Етап 2. Формалізація вимог до складу і властивостей вихідних інгредієнтів і якості продуктів на основі модельних функціональних композицій.

Алгоритм вирішення задачі передбачає розрахунок і оцінку збалансованості загального хімічного складу модельних функціональних композицій і оптимізації білкової, жирової і вуглеводної складових, енергетичної цінності розроблюваного продукту. Комп'ютерне моделювання складається з структурної оптимізації складу, вмісту і співвідношення окремих нутрієнтних складових багатокomпонентних продуктів харчування і дозволяє за вибраними з бази даних компонентами і характеристиками їхнього нутрієнтного складу, визначити композицію, що максимально наближена до заданих еталонних вимог. Методика моделювання продуктів харчування на основі модельних композицій передбачає визначення бажаного вмісту:

- білка у продукті і моделювання його амінокислотного складу, з метою наближення до еталону (в якості еталону визначений "ідеальний" білок, що враховує добову потребу людини у незамінних амінокислотах);
- жиру (еталонне співвідношення між насиченими, моно- і поліненасиченими жирними кислотами);
- вуглеводів (співвідношення простих і складних вуглеводів, в т.ч. вмісту харчових волокон);
- макро- і мікроелементів (якісний склад, співвідношення окремих елементів);
- вітамінів (якісний склад і співвідношення);
- енергетичної цінності і співставлення її з бажаною Q (еталоном).

Математичне моделювання функціональних композицій і продуктів на їх основі зводиться до побудови їх моделі за заданими параметрами адекватності та якості, вибору вихідних компонентів і рецептурної оптимізації за критеріями харчової та біологічної цінності. Для цього складається параметрична модель продукту, яка враховує хімічний склад (білок, жир, волога, вуглеводи і т.д.), масові частки основних компонентів продукту, структурні співвідношення показників біологічної цінності продукту (аміно- та жирнокислотний склад). При цьому враховується специфіка продуктів для оздоровчого харчування.

В якості цільової функції оптимізації багатокomпонентного продукту встановлене мінімальне відхилення від заданої структури відповідної групи показників харчової і біологічної цінності.

1. Критерій оптимізації за показниками хімічного складу, що визначає харчову цінність модельованої функціональної композиції:

$$P(z) = \sum_{i=1}^n \left( z_i^0 - \sum_{j=1}^m b_{ij} x_j \right)^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

де,  $x_j$  – масова частка  $j$ -го компоненту композиції;

$b_{ij}$  – питомий вміст  $i$ -го елементу хімічного складу (білка, жиру і т.д.) в  $j$ -му компоненті;

$z_i^0$  – еталонний вміст  $i$ -го елементу.

2. Критерій мінімального відхилення від заданої структури показників біологічної цінності:

$$P(A) = \sum_{k=1}^n \left( \left( A_k^0 - \frac{\sum_{j=1}^m a_{kj} b_{ij} x_j}{\sum_{j=1}^m b_{ij} x_j} \right)^2 \right) \rightarrow \min \quad (2)$$

де,  $a_{kj}$  – питомий вміст  $k$ -го інгредієнту в  $i$ -му елементі хімічного складу

3. Масова частка  $l$ -ої амінокислоти (не повинна перевищувати заданого порогу  $A_l^{\max}$  в г/100 г білка):

$$\sum_{j=1}^m a_{lj} b_j^a x_j \leq A_l^{\max} \quad (3)$$

де,  $a_{ij}$  – масова частка і-ї амінокислоти в j-му компоненті, г/100 г білка

Рослинні білки характеризуються низьким вмістом лізину, лейцину, треоніну, метіоніну, триптофану та високим – глютамінової кислоти. Біологічну цінність білків визначають методом розрахунку амінокислотного скору: (амінокислотний скор = (г АК в 100 г досліджуваного білка / г АК в 100 г “ідеального” білка) · 100%.

Амінокислотний скор менший за 100% свідчить, що амінокислота є лімітуючою. Найменші значення відповідають головній лімітуючій кислоті. Для покращення амінокислотного складу білків рівень головної лімітуючої амінокислоти підвищують у відповідності до амінокислотної формули потреб і рівнів вмісту другої лімітуючої амінокислоти. Кількість першої і другої лімітуючої амінокислот співвідноситься з кількістю третьої амінокислоти.

4. Масова частка лізину по відношенню до загальної масової частки метіоніну і цистину (у прагненні до одиниці):

$$\sum_{j=1}^m [a_{лиз} - (a_{мет} + a_{цис})] \cdot b_j^a \cdot x_j \leq eps \quad (4)$$

де,  $a_{лиз}$ ,  $a_{мет}$ ,  $a_{цис}$  – масові частки лізину, метіоніну і цистину, г/100 г білка;

$b_j^a$  – масова частка білка j-го компоненту;

eps – мала величина.

відношення вмісту білка до вмісту жиру:

$$\sum_{j=1}^m b_j^a x_j / \sum_{j=1}^m b_j^* x_j = K \quad (5)$$

де,  $b_j^a$ ,  $b_j^*$  – масова частка відповідно білка та жиру в j-му рецептурному компоненті композиції;

$x_j$  – масова частка j-го компоненту;

5. Співвідношення масових часток насичених, мононенасичених і поліненасичених жирних кислот повинно відповідати заданій пропорції  $K_1:K_2:K_3$ :

$$K_2 \sum_{k=1}^7 \sum_{j=1}^m q_{kj} b_j^* x_j = K_1 \sum_{k=8}^{10} \sum_{j=1}^m q_{kj} b_j^* x_j; \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^7 \sum_{j=1}^m q_{kj} b_j^* x_j + \sum_{k=8}^{10} \sum_{j=1}^m q_{kj} b_j^* x_j = K_3 \sum_{k=11}^{13} \sum_{j=1}^m q_{kj} b_j^* x_j, \quad (7)$$

де,  $k=1-7$  – відповідає насиченим жирним кислотам;

$k=8-10$  – мононенасиченим жирним кислотам;

$k=11-13$  – поліненасиченим жирним кислотам;

$b_j^*$  – масова частка жиру j-го компоненту композиції;

$q_{kj}$  – масова частка k-ї жирної кислоти в j-му компоненті, г/100 г жиру;

В середньому кількість ПНЖК повинна забезпечувати біля 4% енергетичної цінності раціону.

6. Критерій мінімального відхилення від заданої структури вітамінного складу, мінеральних речовин:

$$P_i(V) = \sum_{k=1}^n \left( V_k^0 - \frac{\sum_{j=1}^m b_{kj} x_j}{\sum_{j=1}^m x_j} \right)^2 \rightarrow \min \quad i = 1, 2, 3 \quad (8)$$

В якості обмеження використовуються співвідношення, які виходять з структурно-параметричних моделей раціонального харчування:

7. Обмеження за елементним хімічним складом продукту:

$$L_r^{\min} \leq \sum_{j=1}^m t_{rj} x_j \leq L_r^{\max} \quad r = \overline{1, X}, \quad (9)$$

де,  $t_{rj}$  – вміст r-го елемента в j-му компоненті композиції;

$L_r^{\min}$ ,  $L_r^{\max}$  – допустимі обмеження вмісту r-го елемента.

8. Обмеження за рецептурними компонентами:

$$\sum_{j=1}^m x_j = 1; \quad x_j^{\min} \leq x_j \leq x_j^{\max}; \quad j = \overline{1, m}, \quad (10)$$

де,  $x_j^{\min}$ ,  $x_j^{\max}$  – допустимі обмеження вмісту i-ї компоненти у рецептурі продукту.

## 9. Обмеження за вартісними показниками:

$$\sum_{j=1}^m d_j x_j \leq D_p^{\max} \quad (11)$$

де,  $d_j$  – вартість одиниці  $j$ -го компоненту;

$D_p^{\max}$  – максимальна вартість продукту.

Задача оптимізації багатокомпонентного продукту в різних постановках і поєднаннях лінійних і нелінійних критеріїв та обмежень вирішується імітаційним моделюванням з “перебором” усіх можливих комбінацій вихідних компонентів рецептури з наступною перевіркою обмежень і кореляцією з критерієм. Пошук оптимального складу модельованого продукту з  $m$  компонентів починається з вибору масової частки першого компоненту  $x_1$  і перебором значень коефіцієнтів співвідношення  $K_j$ ;  $j = \overline{2, m-1}$ , від деякого початкового значення  $n_j = n_0$  до кінцевого 0,9 з кроком  $h$ , імітуючи всі комбінаторні варіанти рецептури  $m$ -компонентного продукту з визначенням масової частки  $j$ -го компоненту  $x_j$  за формулою:

$$X_j = \frac{(1-K_{j-1})}{K_{j-1}} \cdot X_{j-1} \cdot K_j, \quad j = \overline{2, m-1} \quad (12)$$

Далі, якщо  $x_j$  задовольняє граничним умовам, використовується наступне допустиме співвідношення  $n_j = K_j$  і перехід до циклу наступного співвідношення  $K_j$  для  $j = j + 1$ -го компоненту. При  $X_j < \min_j$  коефіцієнт співвідношення його частки з наступними компонентами збільшується на величину кроку, а у випадку  $X_j > \max_j$  потрібно повернутися до початкового  $j$ -го співвідношення  $n_j = n_0$  і продовженню попереднього циклу по  $K_j$  для  $j = j - 1$ -го компоненту зі стартовим значенням  $n_j = n_j + h$ . Після підбору заданих співвідношень усіх компонентів рецептури так, що масові частки в сумі дають одиницю, перевіряють параметричні і балансові обмеження з накопиченням допустимих варіантів, оцінюваних за функціоналом адекватності у виборі найкращого альтернативного рішення. Загальна оцінка рівня якості продукту визначається за сукупністю значень або відхилень визначальних факторів та їх значимістю і зводиться до адитивних, мультиплікативних і змішаних функціоналів. При цьому всі вимірювальні параметри зводяться до безрозмірної шкали відносних величин:

$$Z_i = \frac{X_i - X_i^0}{\Delta X_i} \quad (13)$$

де,  $X_i$ ,  $X_i^0$  – фактичне і бажане значення параметрів;

$\Delta X_i$  – гранично допустиме відхилення від бажаного.

З урахуванням вагових коефіцієнтів  $b_i$   $i$ -го параметру при  $\sum_{i=1}^n b_i = 1$  вираз функціоналу має такий

$$\text{вигляд: } \Phi(z) = 1 - \sqrt{\sum_{i=1}^n b_i z_i^2} \quad (14)$$

або з урахуванням групи критичних показників  $Z_k$ , відхилення яких за граничні межі однозначно виключає можливість використання продукту,

$$\Phi(z) = \prod_{k=1}^{m_k} (1 - z_k^2) \cdot \left[ 1 - \sqrt{\sum_{i=1}^n b_i z_i^2} \right] \quad (15)$$

При виході з поля допуску будь якого параметру критичної групи  $Z_k$  функціонал перетворюється в 0. При знаходженні критичних показників у нормі, значення критерію змінюється від 1, при повному співпадінні вимірювальних значень  $X_i$  з еталонними (краща якість) до 0, при досягненні межі рівня якості (граничне значення). При від’ємних значеннях функціоналу продукт не відповідає заданому рівню якості. Для визначення вагових коефіцієнтів та градуйованої шкали узагальненого функціоналу доцільно використовувати методику експертних оцінок або повного факторного експерименту. Значення функціоналу якості модельованого продукту градується від 1 до 0 за шкалою бажаності відповідно від найвищого до задовільного рівня якості за рівняннями розділяючих поверхонь, які отримують в результаті повного факторного експерименту: 1.0-0.7 – відмінно; 0.7-0.3 – добре; 0.3-0.1 – задовільно; 0.1-0.0 – погано, незадовільній якості продукту відповідають від’ємні значення функціоналу.

Запропонована багатокритеріальна модель може бути використана в різноманітних постановках для будь якого певного критерію, наприклад для аналізу амінокислотного, жирнокислотного, вуглеводного, макро- і мікроелементного, вітамінного складу багатокомпонентних рецептурних систем. Таким чином, оперуючи вихідними даними, що характеризують склад і властивості інгредієнтів, встановивши граничні умови та необхідні рівні окремих показників і використовуючи систему комп’ютерного моделювання можливо визначити оптимальні модельні функціональні композиції, що відповідають заданим критеріям. Системи комп’ютерного проектування модельних функціональних композицій і продуктів харчування на їх

основі функціонують у середовищі Windows 2000, XP, NT. Інтерфейси написані в Delphi, а основні процедури – в Object Pascal.

Етап 3. Конструювання модельних композицій з заданими структурними характеристиками. Етап комп'ютерного конструювання дозволяє шляхом моделювання отримувати функціональні композиції, які максимально задовольняють формалізовані потреби, рівень вмісту нутрієнтів та сукупну біологічну цінність. Однак визначений на першому етапі склад "оптимальних" композицій не гарантує їх перетворення в процесі технологічної обробки у виробничих умовах в систему з необхідними органолептичними показниками, структурно-механічними властивостями. Це обумовлено тим, що окремі компоненти рецептур мають визначені індивідуальні і часто такі, що є взаємовиключними, функціонально-технологічні властивості (ФТВ). Для ефективної реалізації другого етапу проектування необхідно мати інформацію не тільки про хімічний склад та біологічну цінність окремих компонентів рецептур але й інформацію про фактичні значення ФТВ основної сировини та допоміжних інгредієнтів в багатокомпонентних харчових системах з аналітичними та імперичними залежностями, що характеризують основні закономірності поведінки гетерогенних дисперсних систем при варіюванні фізико-хімічних факторів.

Розгляд теоретичних основ процесів структуроутворення, зокрема, у тістових системах і можливості їхньої адаптації до методології проектування свідчать про високий рівень складності поставленого завдання, що обумовлено:

- різноманітням і багатокомпонентністю основної сировини, її морфологічною неоднорідністю, лабільністю в результаті розвитку біохімічних, мікробіологічних процесів;
- високою мінливістю її властивостей при різних способах технологічної обробки і під впливом фізико-хімічних факторів (рН середовища, температура і т.д.);

Передбачити кінцеві властивості комбінованих харчових систем, виходячи тільки з загального хімічного складу і фізико-хімічних властивостей окремих інгредієнтів рецептури практично неможливо. Навіть уявляючи, що набуття модельною композицією окремих структурних форм (консистенція, зовнішній вигляд, структура й т.п.) обумовлено особливостями протікання колоїдно-хімічних процесів не можна впевнено прогнозувати, що після технологічної обробки інгредієнти композиції перетворяться в стійку дисперсну систему з необхідними властивостями. При моделюванні функціональних композицій необхідно враховувати, що інгредієнти повинні мати певні функціонально-технологічні властивості, які забезпечують одержання стійких харчових дисперсних систем з необхідними структурно-механічними і органолептичними властивостями.

До основних ФТВ відносяться набрякання, розчинність, здатність стабілізувати дисперсні системи (драгелютворююча, водопоглинальна, емульсійна здатність), реологічні властивості. Таким чином, ступінь виразності певних ФТВ конкретних інгредієнтів композицій визначає ступінь їхньої участі у виконанні тих або інших структурних функцій у харчових системах. У свою чергу, рівень прояву конкретних ФТВ різних видів сировини і інгредієнтів залежить як від їхнього складу (білки, поліцукриди, їхні суміші), так і від фізико-хімічних і мікробіологічних факторів. Відносні значення основних функціонально-технологічних властивостей модельних функціональних композицій інтерпретовані у п'ятибальну шкалу. Вивчення й систематизація ФТВ окремих інгредієнтів композицій і продуктів, характер їхніх змін під впливом фізико-хімічних і технологічних способів обробки, розробка теоретичних основ базових процесів структурування в харчових системах, дозволяють сформувати інформаційну базу і підійти до процесу моделювання продуктів харчування, з урахуванням специфіки можливої взаємодії компонентів рецептури.

Комп'ютерне багаторівневе моделювання дозволяє істотно прискорити процес розробки технологій, створити основи системного підходу до вибору модельних функціональних композицій з урахуванням можливого впливу окремих інгредієнтів на формування органолептичних показників, структурно-механічні властивості, вихід тощо.

Після завершення етапу комп'ютерного моделювання "оптимальні" композиції піддаються подальшому порівняльному аналізу з позицій можливості одержання, на базі обраної сукупності інгредієнтів, стійкої структурованої дисперсної системи певного типу з необхідним рівнем структурно-механічних властивостей (для модельних функціональних композицій) і органолептичних показників (для готових виробів). Враховуючи вихідні дані для проектування (тип продукту, базова технологія, технічні засоби) аналізують харчову систему і процеси її одержання, оцінюють ФТВ кожного з інгредієнтів композиції, характер їхніх змін, залежно від фізико-хімічних факторів, визначають ступінь їхньої функціонально-технологічної сумісності, вибирають базові структуроутворювальні параметри, що дозволяють ефективно регулювати ФТВ і процес структурування, що визначає фізичну стійкість і реологічні властивості харчової системи.

На наступному етапі, шляхом багаторівневого експериментального моделювання, перевіряють рівень стійкості систем, виготовлених на основі "оптимальних" композицій і при необхідності здійснюють спрямоване регулювання ФТВ окремих інгредієнтів і модельних систем, а також органолептичних показників продукції, шляхом вибору і застосування певних механічних і фізико-хімічних факторів.

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

Отже, при моделюванні одночасно враховуються особливості біотехнологічного потенціалу використовуваних інгредієнтів модельних композицій, ймовірність і інтенсивність розвитку

мікробіологічних процесів. З урахуванням вищерозглянутих факторів результати моделювання, як правило, забезпечують ефективну оптимізацію складу продукту і параметрів окремих операцій технологічного процесу. По завершенні етапу багаторівневого експериментального моделювання функціональні композиції і технології продуктів перевіряються у лабораторних і виробничих умовах, після чого проводиться остаточне їхнє корегування. На заключному етапі здійснюються комплексні дослідження основних показників якості готової продукції, розрахунок економічних показників, відпрацьовування технології у виробничих умовах, підготовка, узгодження і затвердження нормативних документів і організація промислового впровадження. Застосування методології проектування модельних функціональних композицій і продуктів харчування дозволяє підвищити ступінь використання сировини і розширити асортименти продукції із заданим складом і властивостями оздоровчого призначення.

### Література

1. Мазаракі А.А. Технологія харчових продуктів функціонального призначення. Київ: КНТЕУ. 2012. 1116 с.
2. Львович И.Я. Перспективные тренды развития науки: техника и технологии. Одеса: КУПРИЕНКО СВ. 2016. 197 с.
3. Корзун В. Н., Гаркуша С. Л. Заходи профілактики та лікування метаболічного синдрому у населення. Довкілля та здоров'я. 2016. № 1. С. 9–13
4. Antiushko, D., Bozhko, T., Shapovalova, Nutritional value of a dry soluble gerodietetic product for enteral nutrition. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. № 5. С. 35–42.
5. Черевко О.І. Інноваційні технології харчової продукції функціонального призначення. Харків: ХДУХТ. 2017. 591 с.
6. Yatsenko V.M. Financial-economic and innovative support of entrepreneurship development in the spheres of economy, tourism and hotel-restaurant business. Agenda Publishing House, Coventry, United Kingdom. 2017. 619 с.
7. Гамаюмова В.В. Інноваційні технології в житті сучасної людини. Ч. 3: Серія монографій Одеса. КУПРИЕНКО СВ. 2020. 209 с.
8. Преображенський А.П. Рівень розвитку техніки і технологій в ХХІ столітті. В 2 частинах. Частина 1: Серія монографій. Одеса. КУПРИЕНКО СВ. 2019. 227 с.
9. Сирохман І. В. Товарознавство харчових продуктів функціонального призначення. Київ. 2009. 544 с.
10. Капрельянц Л.В., Іоргачова К.Г. Функціональні продукти. Одеса. 2003. 312 с.
11. Львович И.Я., Некрасов В.А., Преображенський А.П. Перспективні тренди розвитку науки: техніка і технології. Одеса. КУПРИЕНКО СВ. 2016. 197с.
12. Чепурда Г.М. Стратегії сталого розвитку в туризмі та готельно-ресторанному бізнесі: можливості і проблеми запровадження в Україні. Черкаси. ЧДТУ. 2021. 189 с.
13. Wissenschaft für den modernen Menschen: wirtschafts, management, marketing, tourismus, rechts und politikwissenschaften. Monografische Reihe «Europäische Wissenschaft» [ Brovenko T.V., Antonenko A.V. and others] Buch 4., Teil 6. 2021.
14. Brovenko T. Food design as the actual direction of the interdisciplinary researches. Вісник Національної академії керівних кадрів культури і мистецтв: наук. журнал, 2018. №2. С. 91-94.
15. Мазаракі А.А. Збірник рецептур кулінарної продукції і напоїв функціонального призначення. Київ : Київ. нац. торг.-екон. ун-т, 2013. 772 с.

### References

1. Mazaraki A.A. (2012). Tekhnologiya harchovih produktiv funktsional'nogo pryznachennya. Kyiv: KNTEU. 1116 s. [in Ukrainian].
2. L'vovich I.YA. (2016) Perspektivnye trendy razvitiya nauki: tekhnika i tekhnologii. Odesa: KUPRIENKO SV. 197 s. [in Ukrainian].
3. Korzun V. N., Harkusha S. L. (2016). Zakhody profilaktyky ta likuvannya metabolichnoho syndromu u naseleennia. Dovkillia ta zdorovia. №1. 9–13 [in Ukrainian].
4. Antiushko, D., Bozhko, T., Shapovalova, Nutritional value of a dry soluble gerodietetic product for enteral nutrition. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. № 5. С. 35–42. [in Ukrainian].
5. Cherevko O.I. (2017). Innovatsijni tekhnologii harchovoї produktsії funktsional'nogo pryznachennya. Harkiv: HDUHT. 591 s. [in Ukrainian].
6. Yatsenko V.M. (2017). Financial-economic and innovative support of entrepreneurship development in the spheres of economy, tourism and hotel-restaurant business. Agenda Publishing House, Coventry, United Kingdom. 619 s. [in United Kingdom].
7. Gamayunova V.V. (2020) Innovatsionnye tekhnologii v zhizni sovremennogo cheloveka. Odesa: KUPRIENKO SV. 209 s. [in Ukrainian].
8. Preobrazhenskij A.P. (2019) Uroven' razvitiya tekhniki i tekhnologii v HKHI veke. Odesa: KUPRIENKO S.V. 227 s. [in Ukrainian].
9. Syrokhman I. V. Tovarnoznavstvo kharchovykh produktiv funktsional'nogo pryznachennia. Kyiv. 2009. 544 s.
10. Kaprelants L.V., Iorhachova K.H. Funktsionalni produkty. Odesa. 2003. 312 s. [in Ukrainian].
11. Lvovych Y.Ia., Nekrasov V.A., Preobrazhenskij A.P. Perspektivni trendy razvytku nauky: tekhnika i tekhnologii. Odesa. KUPRIENKO SV. 2016. 197 s. [in Ukrainian].
12. Chepurda H.M. Stratehii staloho rozvytku v turyzmi ta hotelno-restorannomu biznesi: mozhlyvosti i problemy zaprovadzhennia v Ukraini. Cherkasy. ChDTU. 2021. 189 s. [in Ukrainian].

- 
13. Wissenschaft für den modernen Menschen: wirtschafts, management, marketing, tourismus, rechts und politikwissenschaften. Monografische Reihe «Europäische Wissenschaft» [ Brovenko T.V., Antonenko A.V. and others] Buch 4., Teil 6. 2021. [in Germany].
14. Brovenko T. (2018). Food design as the actual direction of the interdisciplinary researches. Visnyk Natsionalnoi akademii kerivnykh kadrov kultury i mystetstv: nauk. zhurnal. №2, 91-94. [in Ukrainian].
15. Mazaraki A.A. (2013). Zbirnyk retseptur kulinarnoi produktsii i napoiv funktsionalnoho pryznachennia. Kyiv : Kyiv. nats. torh.-ekon. un-t. 772 s. [in Ukrainian].

Надійшла/Paper received : 03.10.2022 р.    Надрукована/Printed :01.11.2022 р.

**ВАСИЛЬЧЕНКО Ірина**

Херсонський національний технічний університет

ORCID ID: [0000-0003-0546-021X](https://orcid.org/0000-0003-0546-021X)e-mail: [irinagonta165@gmail.com](mailto:irinagonta165@gmail.com)**КУПРІЙ Ярослав**

Херсонський національний технічний університет

ORCID ID: [0000-0003-0695-4780](https://orcid.org/0000-0003-0695-4780)e-mail: [kupriy@gmail.com](mailto:kupriy@gmail.com)**СЕМЕШКО Ольга**

Херсонський національний технічний університет

ORCID ID: [0000-0002-8309-5273](https://orcid.org/0000-0002-8309-5273)e-mail: [solegaya@gmail.com](mailto:solegaya@gmail.com)

## ДОСЛІДЖЕННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОСМЕТИЧНИХ ЕМУЛЬСІЙ ПРЯМОГО ТИПУ, РОЗРОБЛЕНИХ НА ОСНОВІ КОМПОЗИЦІЙ СИЛІКОНІВ

В роботі наведено результати досліджень реологічних властивостей емульсій косметичного призначення, які були розроблені з використанням композицій силіконів, з метою отримання систем із оптимальними тиксотропними та екструзійними властивостями.

Як об'єкти дослідження використані малокомпонентні прямі емульсії на основі мінерального масла та композицій силіконів марки «BRB International BV» (Нідерланди), а саме: індивідуальний силікон полідиметилсилоксан Silicone Oil 350 cSt та сумішевий – амодиметикон BRB 1288. Визначення реологічних властивостей емульсій проводилося на ротаційному віскозиметрі «Rheotest – 2» шляхом встановлення залежності в'язкості емульсій та прикладеної напруги зсуву від швидкості зсуву. На основі отриманих даних було розраховано прикладені показники динамічної в'язкості, коефіцієнти динамічної текучості при різних швидкостях зсуву, а також показник механічної стабільності досліджуваних систем.

У результаті реологічних досліджень отриманих косметичних емульсій на основі композицій силіконів встановлено тип течії та наявність тиксотропних властивостей. Визначено зразок емульсії, що має найбільш виражені пружні властивості та найбільше значення межі плину. Дослідження екструзійних властивостей емульсій шляхом розрахунку коефіцієнти динамічної текучості дозволило визначити зразок емульсії з вмістом силіконів, який має не високий показник динамічного розрідження та може характеризуватись більш важким розподіленням по шкірі та буде легко і вільно рухатись технологічним обладнанням. Знайдено склад емульсії, механічна стабільність якої є високою, що сприятиме збереженню її структури в процесі необоротної деформації. Шляхом реологічних досліджень встановлено склад косметичної емульсії на основі силіконів полідиметилсилоксану Silicone Oil 350 cSt та амодиметикону BRB 1288, який характеризується оптимальними в'язкісними, реологічними та екструзійними властивостями.

Ключові слова: емульсії, косметичні силікони, полідиметилсилоксан, амодиметикон, реологія, екструзійні властивості, механічна стабільність.

VASYLCHENKO Iryna, KUPRIY Yaroslav, SEMESHKO Olga  
Kherson National Technical University

## STUDY OF THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF DIRECT TYPE COSMETIC EMULSIONS DEVELOPED ON THE BASIS OF THE COMPOSITIONS OF SILICONES

The paper presents the results of studies of the rheological properties of cosmetic emulsions developed using compositions of silicones in order to obtain systems with optimal thixotropic and extrusion properties.

Small-component direct emulsions based on the mineral oil and the compositions of the BRB International BV (Netherlands) brand silicones, that are Silicone Oil 350 cSt – individual silicopolydimethylsiloxane and BRB 1288 – mixed amodimethicone, were used as the objects of the study. The rheological properties of emulsions were determined using a rotational viscometer "Rheotest - 2" by establishing the dependence of the viscosity of emulsions and the applied shear stress on the shear rate. Based on the data obtained, the dynamic viscosity indicators, dynamic fluidity coefficients at various shear rates, as well as the mechanical stability index of the studied systems were calculated.

As a result of the rheological studies of the obtained cosmetic emulsions based on the compositions of silicones, the type of their flow and the presence of thixotropic properties were established. The emulsion sample has been determined that has the most pronounced elastic properties and the highest value of the flow limit. The study of the extrusion properties of emulsions by calculating the coefficients of dynamic fluidity made it possible to determine the emulsion sample that has a low dynamic rarefaction and can be characterized by easier distribution over the skin and, at the same time, can easily and freely move through the process equipment. The composition of the emulsion is found, the mechanical stability of which is high, which will contribute to the preservation of its structure in the process of irreversible deformation. The rheological studies have established the composition of the cosmetic emulsion based on the Silicone Oil 350 cSt polydimethylsiloxane and the BRB 1288 amodimethicone, which is characterized by optimal viscosity, rheological and extrusion properties.

Keywords: emulsions, cosmetic silicones, polydimethylsiloxane, amodimethicone, rheology, extrusion properties, mechanical stability.



### **Постановка проблеми у загальному вигляді**

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

На сьогоднішній день застосування емульсійних продуктів є досить широким. Слід зазначити, що виробники косметичних засобів віддають перевагу прямим емульсіям типу «олія у воді», у яких вміст водної фази значно переважає жирову. З огляду на те, що шкіра людини здатна поглинати лише до 10% жирових компонентів, такі емульсійні системи легко розподіляються, поглинаються та не залишають жирного блиску на шкірі.

Сучасні емульсійні продукти косметичного призначення складаються з багатьох компонентів: основних – води, олії, емульгаторів, та допоміжних речовин різного призначення та хімічної будови. З огляду на велику кількість літературних джерел, кремнійорганічні полімери (силікони) є цілком безпечними компонентами косметичних засобів та мають широке застосування у засобах для догляду за тілом та волоссям. Тому дослідження використання силіконів косметичного призначення у емульсійних системах шляхом встановлення їх впливу на властивості емульсій є актуальним.

### **Аналіз досліджень та публікацій**

Зараз використання емульсійних продуктів є досить широким. Слід зазначити, що виробники косметичних засобів віддають перевагу прямим емульсіям типу «олія у воді», у яких вміст водної фази значно переважає жирову. З огляду на те, що шкіра людини здатна поглинати лише до 10% жирових компонентів, такі емульсійні системи легко розподіляються, поглинаються та не залишають жирного блиску на шкірі.

Сучасні емульсійні продукти косметичного призначення складаються з багатьох компонентів: основних – води, олії, емульгаторів, та допоміжних речовин різного призначення та хімічної будови. З огляду на велику кількість літературних джерел, кремнійорганічні полімери (силікони) є цілком безпечними компонентами косметичних засобів та мають широке застосування у засобах для догляду за тілом та волоссям. Тому дослідження використання силіконів косметичного призначення у емульсійних системах шляхом встановлення їх впливу на властивості емульсій є актуальним.

З урахуванням вищевикладеного метою даної роботи є дослідження реологічних властивостей косметичних емульсій прямого типу, отриманих з використанням композицій силіконів.

Створення косметичних кремів на емульсійній основі потребує спільного використання великої кількості компонентів, які забезпечують фізичну, хімічну та мікробіологічну стабільність продукту протягом певного проміжку часу. Це формують речовини, емульгатори, консерванти, антиоксиданти, а також речовини, що покращують споживні властивості косметичного препарату – барвники, ароматизатори.

У роботах [1 – 4] було вивчено можливість застосування індивідуальних (полідиметилсилоксан Silicone Oil 350 cSt, циклопентасилоксан BRB CM 50, фенілтриметикон BRB PTM 20) та сумішевих поліорганосилоксанів (ПЕГ-12 полідиметилсилоксан BRB 526, розчин диметикону в циклопентасилоксані BRB 1834, амодиметикону BRB 1288) при концентраціях від 1 до 10 % на властивості емульсій. При цьому було досліджено органолептичні, фізико-хімічні та реологічні характеристики емульсійних систем, а також визначені сенсорні показники шкіри при їх застосуванні.

Аналіз отриманих результатів [1 – 4] щодо застосування досліджуваних силіконів при їх індивідуальному застосуванні у емульсіях косметичного призначення у концентраціях 1 – 3% вказує на те, що оптимальні пружно-в'язкісні властивості утворених систем забезпечують індивідуальний силікон Silicone Oil 350 cSt та сумішевий розчин диметикону в циклопентасилоксані BRB 1834, а сенсорні показники шкіри – сумішеві силікони амодиметикону BRB 1288, ПЕГ-12 полідиметилсилоксан BRB 526 та розчин диметикону в циклопентасилоксані BRB 1834 при низьких концентраціях 1 – 3%. Це свідчить про перспективність розробки емульсійних систем косметичного призначення із застосуванням композицій вказаних поліорганосилоксанів.

### **Формулювання цілей статті**

Метою роботи є дослідження реологічних властивостей косметичних емульсій прямого типу, отриманих з використанням композицій силіконів.

### **Виклад основного матеріалу**

Для дослідження впливу композиції силіконів на властивості емульсій було використано рецептуру малокомпонентної інертної емульсії з вмістом жирової фази 25% (табл. 1) [5].

Речовини, які відносяться до олійної фази (мінеральна олія, силікони, емульгатор, співемульгатор) розплавляли у термостійкій склянці на водяній бані при температурі 50°C до повного розчинення компонентів. Паралельно у іншій ємності розчиняли у воді гідрофільну речовину консервант Cosgard і також нагрівали на водяній бані до температури 50°C. В ємність з олійною фазою поміщали механічну мішалку якірного типу і в процесі перемішування поступово невеликими порціями додавали гарячу водну фазу. Тривалість емульгування складала 30 с.

У роботі були використані силікони виробництва компанії «BRB International BV» (Нідерланди), а саме: індивідуальний силікон полідиметилсилоксан Silicone Oil 350 cSt та сумішевий – амодиметикон BRB 1288.

Таблиця 1

Рецептури косметичних емульсій

Компонент	Масова частка, %					
	емульсія					
	базова	1	2	3	4	5
Мінеральна олія	25	20				
Полідиметилсилоксан Silicone Oil 350 cSt	–	5,00	1,25	2,5	3,75	0
Амодиметикон BRB 1288	–	0	3,75	2,5	1,25	5,00
Емульгатор Eumulgin Prisma	0,35					
Співемульгатор цетеариловий спирт	4,00					
Консервант Cosgard	0,50					
Вода	70,15					

Полідиметилсилоксан Silicone Oil 350 cSt (INCI: polydimethylsiloxane 350) (рис. 1) – класичний представник лінійних силіконових полімерів без замісників. Представляє собою в'язку рідину без кольору і запаху, не розчинну у воді, розчинну в органічних розчинниках. Температура кипіння 250оС.

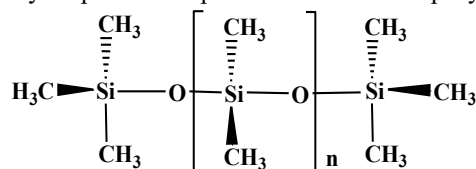


Рис. 1. Хімічна будова полідиметилсилоксану Silicone Oil 350 cSt

BRB 1288 (INCI: Aminoethylaminopropylsiloxane (рис. 2а), Trideceth-12 (рис. 2б), Cetrimonium Chloride (рис. 2в)) представляє собою 35%-ова катіонну емульсію силіконового полімеру аміноетиламінопропілсилоксану. Містить до 5% 2-феноксіетанолу. Біла рідина, розчинна у воді і не розчинна в органічних розчинниках, проявляє властивості ПАР. Наявність аміногрупи забезпечує косметичним композиціям кондиціюючий ефект. Температура кипіння 100оС.

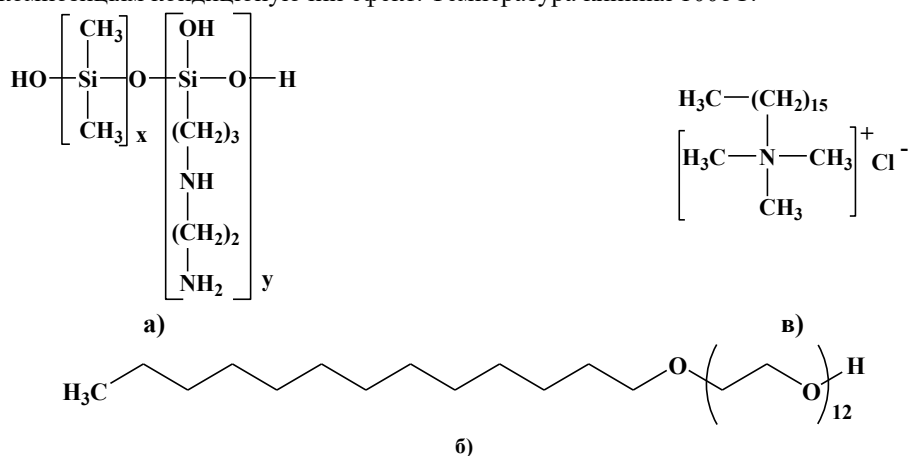


Рис. 2. Хімічна будова складових BRB 1288

Eumulgin Prisma (INCI: Disodium Cetearyl Sulfosuccinate) виробництва BASF – білий або сірувато-білий порошок, який містить 95% активної речовини. Даний емульгатор відрізняється високою стабільністю та розроблений для косметичних засобів сонцезахисного та декоративного спрямування. Забезпечує легку, шовковисту текстуру та високу стабільність отриманих косметичних складів. Вироблений із екологічних продуктів та гарно комбінується з різними інгредієнтами емульсій.

Cosgard – це суміш бензилового спирту і дегідрооцтової кислоти виробництва S.F.I.C. Cosgard представляє собою консервант синтетичного походження з широким спектром дії. Проявляє ефективну антимікробну дію по відношенню до грам-позитивних і грам-негативних бактерій та грибкових мікроорганізмів.

Визначення реологічних властивостей емульсій проводилося на ротаційному віскозиметрі «Rheotest – 2» шляхом встановлення залежності в'язкості емульсій та прикладеної напруги зсуву від швидкості зсуву [6].

Прикладену напругу зсуву визначали за формулою:

$$\tau_r = z \cdot \alpha, \quad (1)$$

де  $\tau_r$  – прикладена напруга зсуву, Па;

$z$  – постійна циліндра, Па/под. шк.;

$\alpha$  – значення кута по шкалі на індикаторному приладі, под. шк.

Динамічну в'язкість визначали за формулою:

$$\eta = \frac{\tau_r}{D_r}, \quad (2)$$

де  $\eta$  – динамічна в'язкість, Па·с;

$D_r$  – швидкість зсуву, с<sup>-1</sup> (табличне значення).

Коефіцієнт динамічної текучості  $K_{d1}$  розраховували за формулою:

$$K_{d1} = \frac{\eta_3 - \eta_9}{\eta_3} \cdot 100, \quad (3)$$

де  $\eta_3$  – в'язкість емульсії при швидкості зсуву 3 с<sup>-1</sup>;

$\eta_9$  – в'язкість емульсії при швидкості зсуву 9 с<sup>-1</sup>.

Коефіцієнт динамічної текучості  $K_{d2}$  розраховували за формулою:

$$K_{d2} = \frac{\eta_{27} - \eta_{81}}{\eta_{27}} \cdot 100, \quad (4)$$

де  $\eta_{27}$  – в'язкість емульсії при швидкості зсуву 27 с<sup>-1</sup>;

$\eta_{81}$  – в'язкість емульсії при швидкості зсуву 81 с<sup>-1</sup>.

Механічну стабільність емульсій розраховували за формулою:

$$MC = \frac{\tau_1}{\tau_2}, \quad (5)$$

де  $\tau_1$  – напруга зсуву до руйнування емульсії, Па;

$\tau_2$  – напруга зсуву після руйнування емульсії при швидкості зсуву 3 с<sup>-1</sup>, Па.

Для засобів догляду за шкірою, які мають емульсійну основу, реологічні властивості є надзвичайно важливою характеристикою. Це пов'язано з тим, що вказана косметична продукція повинна вільно видавлюватись з туб або виливатись із флаконів, легко наноситись та швидко поглинатись шкірою, мати цілеспрямований косметичний вплив на шкіру, легко видалятися з поверхні шкіри при необхідності. Виконання цих вимог забезпечують пружно-в'язкісні параметри косметичних форм зі структурованим дисперсійним середовищем.

Для з'ясування особливостей структуроутворення емульсійних систем застосовуються методи кількісної оцінки таких структурно-механічних властивостей, як пружність, в'язкість, напруга зсуву, функціональна залежність швидкості зсуву від напруги зсуву тощо [7].

Проведені дослідження були зосереджені на трьох реологічних параметрах, які мають величезне значення на практиці виробництва та застосування емульсійних продуктів: напруженість, в'язкість та ступінь тиксотропії.

Напруженість або напруга зсуву є характеристикою системи, нижче якої не можна спостерігати потік в умовах експерименту. Вона також має назву статичної напруженості, на відміну від динамічної, яка визначається навантаженням, необхідним для підтримки потоку [8]. Тиксотропія є одним із найскладніших реологічних явищ в колоїдній хімії, що відображається у науковій літературі. Теоретично вона відображає здатність матеріалу повернутися до свого первісного стану в нескінченному часі після підпорядкування постійним силам зсуву при постійній температурі [9]. Але на практиці тиксотропія вимірюється протягом обмеженого періоду часу.

На рис. 3 представлено залежності динамічної в'язкості досліджуваних емульсій від швидкості зсуву.

Аналіз результатів, представлених на рис. 3, свідчить про те, що для всіх зразків структурна в'язкість поступово зменшується зі збільшенням градієнта швидкості зсуву. Ця залежність характерна для систем з пластичним типом течії і характеризує досліджувані емульсії як структуровані дисперсні системи, що забезпечить їх легкий і рівномірний розподіл на шкірі.

На рис. 4 показано залежність динамічної в'язкості, визначеної при швидкості зсуву 9 с<sup>-1</sup> від співвідношення полідиметилсилоксану Silicone Oil 350 cSt та амодиметикону BRB 1288 у складі косметичних емульсій.

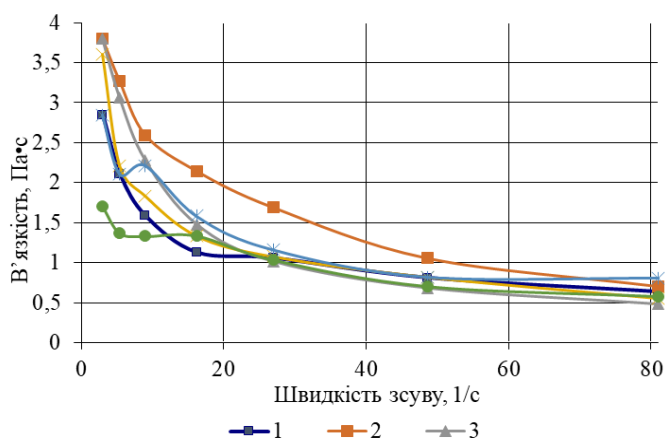


Рис. 3. Залежність в'язкості від швидкості зсуву емульсій

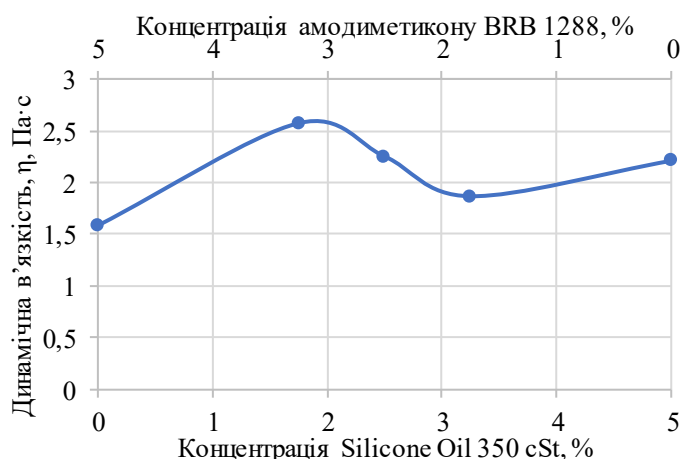


Рис. 4. Вплив співвідношення полідиметилсилоксану Silicone Oil 350 cSt та амодиметикону BRB 1288 на в'язкість емульсій

Аналіз отриманих даних свідчить про те, що досліджувані силікони у композиції проявляють синергічний ефект при співвідношенні концентрацій полідиметилсилоксану Silicone Oil 350 cSt 1,25% та амодиметикону BRB 1288 3,75%, про що свідчить досягнути показник динамічної в'язкості 2,57 Па·с (зразок емульсії 2). При цьому індивідуальне застосування вказаних силіконів при концентрації 5% (зразки 1 та 5) сприяє отриманню показника в'язкості 1,58 та 2,21 Па·с.

Про псевдопластичний тип текучості плинну досліджуваних зразків емульсій свідчать також отримані реограми текучості (рис. 5).

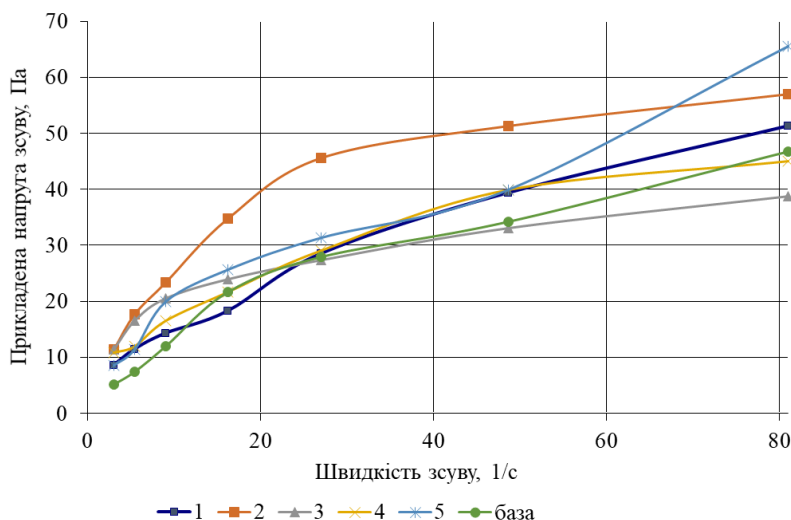


Рис. 5. Залежність напруги зсуву від швидкості зсуву емульсій

Для початку текучості зразків необхідно прикласти деяку рушійну величину, при цьому досліджувані зразки по-різному піддаються руйнуванню, що виражається у величині напруги зсуву. Зразки з більш вираженими пружними властивостями мають більше значення межі плинну, як видно з даних рис. 5,

зразки емульсій 2 та 5 мають вищий показник межі текучості у порівнянні зі зразком 3 та базовою емульсією без додавання силіконів.

Наявність тиксотропних властивостей структурованих систем є гарантією відновлення частково зруйнованої структури у стані спокою. Особливого значення наявність тиксотропії набуває для характеристики поведінки емульсії у процесі промислового виробництва та є гарантією якості.

Про тиксотропію системи свідчать залежності в'язкості або напруги зсуву, які характеризують поведінку системи при зворотному ході, тобто швидкості зсуву від 1312,2 с<sup>-1</sup> до 3 с<sup>-1</sup>, які розташовані нижче кривих при прямому ході. У тому випадку, якщо криві зворотного ходу розташовані вище кривих прямого ходу, це свідчить про реопексивні властивості системи. З метою виявлення здатності досліджуваних систем до відновлення були побудовані залежності в'язкості від швидкості зсуву зразків емульсій у діапазоні швидкостей зсуву 3 с<sup>-1</sup> до 1312,2 с<sup>-1</sup>, при прямому та зворотному напрямі. Отримані результати представлені на рис. 6.

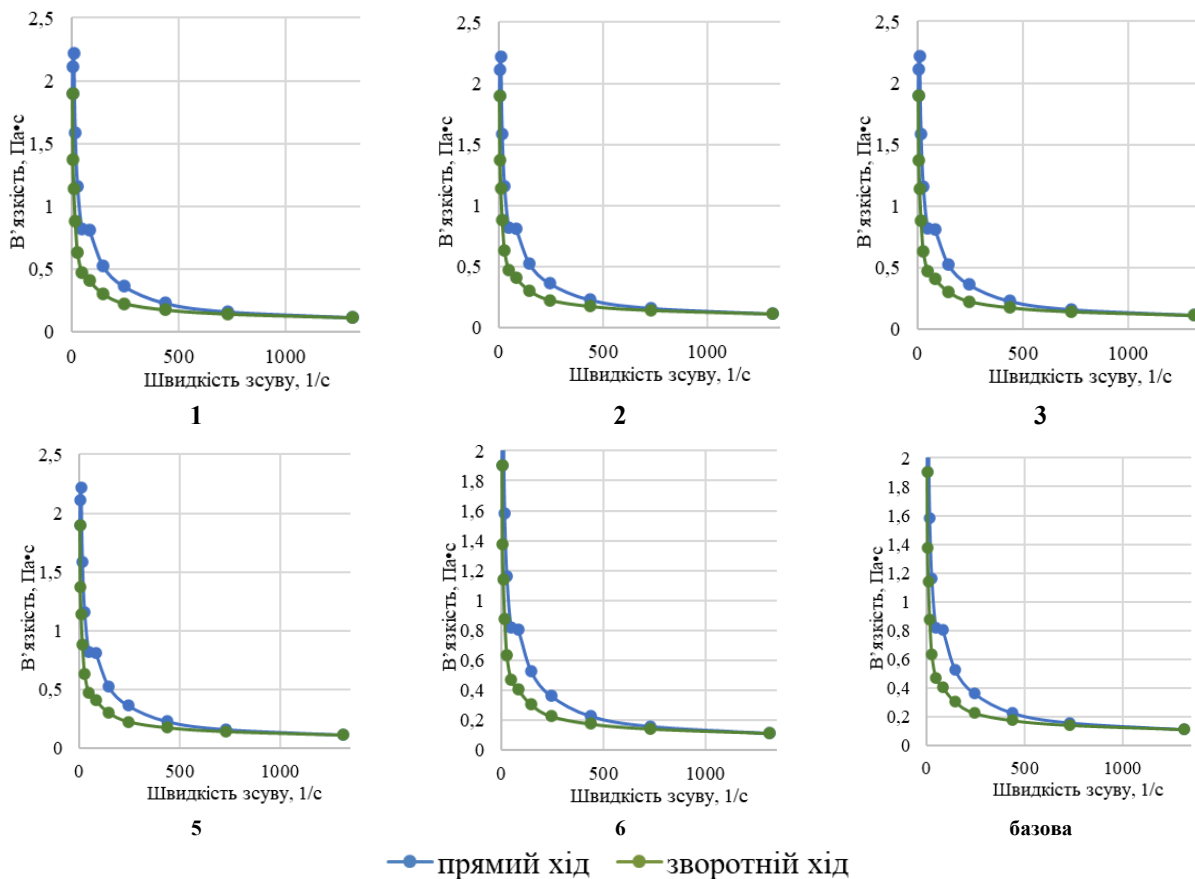


Рис. 6. Залежності в'язкості від швидкості зсуву зразків емульсій при прямому та зворотному напрямі

Отримані дані, що представлені на рис. 6, свідчать про те, що досліджувані емульсії характеризуються тиксотропними властивостями, тобто здатні відновлювати свою структуру після зняття навантаження.

Для дослідження екструзійних властивостей емульсій було розраховано коефіцієнти динамічної текучості. Коефіцієнти динамічної текучості (розрідження) визначали при швидкостях зсуву 3 і 9 с<sup>-1</sup>, що відповідають швидкості руху долоні при розподілі емульсії по поверхні шкіри і в'язкості системи при швидкостях зсуву 27 і 81 с<sup>-1</sup>, що відповідають швидкостям руху технологічного обладнання під час обробки емульсій в процесі їх виготовлення. Отже, показник динамічного розрідження Kd1 буде характеризувати розподілення емульсії по поверхні шкіри, показник динамічного розрідження Kd2 – поведінку емульсії у технологічному процесі її виробництва [10].

Отримані результати щодо здатності емульсій до розподілення наведені на рис. 7.

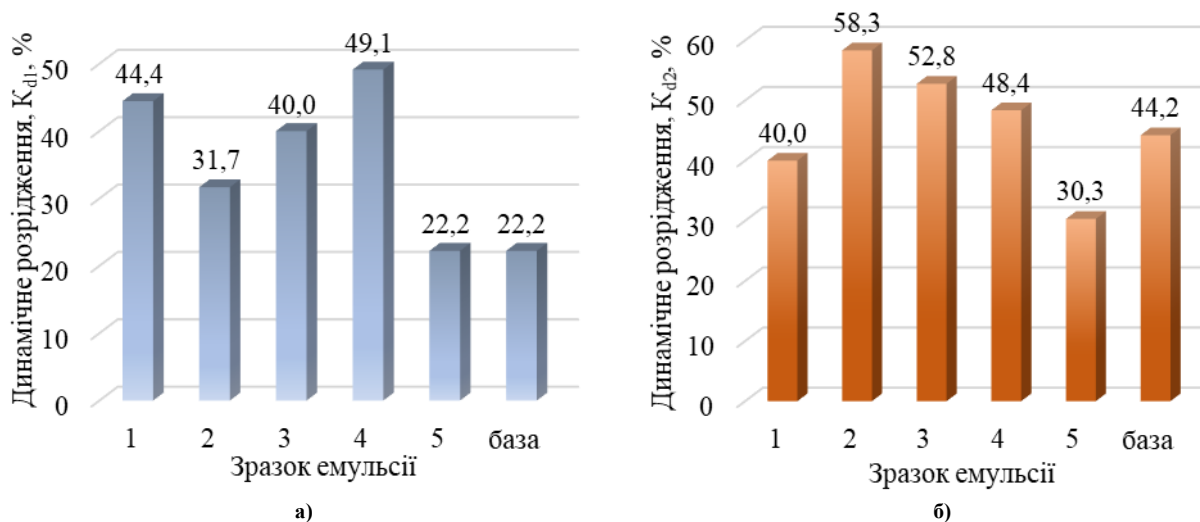


Рис. 77. Залежність динамічного розрідження емульсій:  
а) при швидкостях зсуву 3 і 9  $\text{с}^{-1}$ ; б) при швидкостях зсуву 27 і 81  $\text{с}^{-1}$

Аналіз даних, представлених на рис. 7а, свідчить, що найвищим показником динамічного розрідження, а отже і легким розподіленням по поверхні шкіри характеризуються зразки емульсій 4, 1 та 3, а зразки 5, 3 та базова емульсія мають нижчі показники динамічного розрідження та можуть характеризуватись більш важким розподіленням.

Результати, наведені на рис. 7б, показують, що найвищими значеннями показників динамічного розрідження характеризуються емульсії 2, 3 та 4, що дозволяє прогнозувати легкий та вільний рух технологічним обладнанням. Зразки емульсій 5, 1 та базова емульсія без додавання силіконів мають нижчі показники розрідження.

Загалом слід відмітити, що значення показника  $K_{d2}$  є вищими, ніж  $K_{d1}$ , що можна пояснити більшим руйнуванням структури при високих швидкостях зсуву.

Механічна стабільність емульсії характеризує ступінь руйнування її структури в процесі необоротної деформації. Оптимальним значенням механічної стабільності є 1. Результати дослідження механічної стабільності досліджуваних зразків емульсій наведені на табл. 2.

Таблиця 2.

#### Механічна стабільність емульсій

Показник	Зразок емульсії					
	1	2	3	4	5	база
Механічна стабільність	1,00	1,00	1,11	1,06	0,83	0,90

Отримані дані свідчать про те, що низькою механічною стабільністю відрізняється зразок емульсії 5 та базова емульсія. Для зразків емульсій 1, 2, 3 та 4 характерним є висока механічна стабільність, що вказує на їх можливість витримувати певні механічні впливи, наприклад, у процесі гомогенізації при приготуванні, та дозволяє прогнозувати стабільність емульсій в процесі зберігання.

Таким чином, вивчення реологічних властивостей досліджуваних зразків емульсій показало, що додавання силіконів сприяє підвищенню динамічної в'язкості та пружних властивостей а також зберігає тиксотропні властивості систем. Крім того, силікони у складі емульсій сприяють легшому розподіленню створених емульсій по поверхні шкіри та легкому та вільному руху технологічним обладнанням. Отримані емульсії характеризуються стабільною механічною міцністю.

Слід зазначити, що серед перерахованих реологічних властивостей є обернені, наприклад, в'язкість та динамічне розрідження (розподілення), оскільки з підвищенням в'язкості емульсій буде ускладнюватись їх розподілення на поверхні шкіри та рух технологічним обладнанням. Тому вибір оптимального складу емульсії з точки зору реології є компромісним рішенням.

Аналіз здійснених досліджень реологічних характеристик дозволяє стверджувати, що оптимальними пружно-в'язкісними властивостями володіє зразок емульсії 3, що має у своєму складі 2,5% полідиметилсилоксану Silicone Oil 350 cSt та 2,5% амодиметикону BRB 1288..

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

У результаті реологічних досліджень отриманих косметичних емульсій на основі композицій силіконів встановлено, що вони є системами з пластичним типом течії та характеризуються тиксотропними

властивостями, тобто здатні відновлювати свою структуру після зняття навантаження. Найбільш виражені пружні властивості та найбільше значення межі плину має зразок емульсії з вмістом полідиметилсилоксану Silicone Oil 350 cSt 1,25% та амодиметикону BRB 1288 3,75%.

Дослідження екструзійних властивостей емульсій шляхом розрахунку коефіцієнти динамічної текучості показало, що зразок емульсії з вмістом полідиметилсилоксану Silicone Oil 350 cSt 1,25% та амодиметикону BRB 1288 3,75% має не високий показник динамічного розрідження та може характеризуватись більш важким розподіленням по шкірі. Також встановлено, що косметична емульсія з вмістом полідиметилсилоксану Silicone Oil 350 cSt 1,25% та амодиметикону BRB 1288 3,75% характеризується невисоким динамічним розрідженням та буде легко та вільно рухатись технологічним обладнанням. Крім цього знайдено, що механічна стабільність емульсії вмістом полідиметилсилоксану Silicone Oil 350 cSt 1,25% та амодиметикону BRB 1288 3,75% є високою, а отже структура даної емульсії не руйнується в процесі необоротної деформації.

Таким чином, шляхом реологічних досліджень встановлено, що косметична емульсія, яка містить 1,25% полідиметилсилоксану Silicone Oil 350 cSt та 3,75% амодиметикону BRB 1288, характеризується оптимальними в'язкісними, реологічними та екструзійними властивостями.

У подальших дослідженнях необхідно визначити фізико-хімічні та органолептичні властивості косметичних емульсій прямого типу, розроблених на основі композицій силіконів.

### Література

1. Гаргаун Р.В. Дослідження впливу силіконів на властивості косметичних емульсій прямого типу / Р.В. Гаргаун, З.М. Попова, О.М. Куник, Д.Г. Сарібекова // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2019. – №2. – С. 94 – 98.
2. Гаргаун Р.В. Дослідження впливу кремнійорганічних полімерів на реологію косметичних емульсій прямого типу / Р.В. Гаргаун, О.М. Куник, Д.Г. Сарібекова, М.О. Саніна // матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної заочної конф. молодих учених і студентів «Науково-практичні розробки молодих учених в хімічній, харчовій та парфумерно-косметичній галузях промисловості», м. Херсон, 12 листопада 2020 р. – С. 89 – 90.
3. Гаргаун Р.В. Дослідження впливу силіконів на реологічні властивості косметичних емульсій / Р.В. Гаргаун, Д.С. Ляховський, О.М. Куник, Д.Г. Сарібекова // матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конф. «Актуальні проблеми хімії та хімічної технології», м. Київ, 21 – 22 листопада 2018 р. – С. 123 – 125.
4. Гаргаун Р.В. Дослідження впливу силіконів на органолептичні властивості косметичних емульсій / Р.В. Гаргаун, Д.С. Ляховський, О.М. Куник, Д.Г. Сарібекова // матеріали VI Міжнародної науково-практичної конф. «Хімія, біо- і нанотехнології, екологія та економіка в харчовій і косметичній промисловості», м. Харків, 1 – 2 листопада 2018 р. – С. 33 – 35.
5. Пат. на корисну модель № 144145 України. МПК (2006.01), A61K 8/06, A61K 8/18. Косметична емульсія, збагачена біологічно активними добавками / Р.В. Гаргаун, О.М. Куник, Д.Г. Сарібекова; заявник і патентовласник Херсонський національний технічний університет. – № u202000613; заяв. 03.02.2020; опубл. 10.09.2020; бюл. № 17/2020. – 4 с.
6. Реотест-2.1. Цилиндрический и конусно-пластиночный ротационный вискозиметр. Инструкция по эксплуатации [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.twirpx.com/file/1543541>. (дата звернення 03.10.2021).
7. Аркуша А.А. Исследование структурно-механических свойств мазей с целью определения оптимума консистенции: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. фармацев. наук: 15.00.01 / Аркуша А.А. – Харьков, 1982. – 23 с.
8. Hibbott H.W. Handbook of cosmetic science: an introduction to principles and applications / H.W. Hibbott. – New York: Oxford, 2016. – 566 p.
9. Самуйлова Л.Н. Косметическая химия в 2 ч. Часть 1. Ингридиенты. / Л.Н. Самуйлова, Т.М. Пучкова. – М: Школа косметических химиков, 2005. – 336 с.
10. Зуйкіна С.С. Теоретичне обґрунтування та розробка комбінованих лікарських препаратів для лікування мастопатії на основі лікарської рослинної сировини: дис. ... доктора фарм. наук: 15.00.01 / Зуйкіна Світлана Сергіївна. – Харків, 2021. – 492 с.

### References

1. Harhaun R.V. Doslidzhennya vplyvu sylikoniv na vlastyvoli kosmetychnykh emul'siy pryamoho typu / R.V. Harhaun, Z.M. Popova, O.M. Kynyk, D.H. Saribeykova // Herald of Khmelnytskyi National University. Seriya: Tekhnichni nauky. – 2019. – №2. – S. 94 – 98.
2. Harhaun R.V. Doslidzhennya vplyvu kremniyorganichnykh polimeriv na reolohiyu kosmetychnykh emul'siy pryamoho typu / R.V. Harhaun, O.M. Kynyk, D.H. Saribeykova, M.O. Sanina // materialy VII Vseukrayins'koyi naukovo-praktychnoyi zaochnoyi konf. molodykh uchenykh i studentiv «Naukovo-praktychni rozrobky molodykh uchenykh v khimichniy, kharchoviy ta parfumerno-kosmetychniy haluzyakh promyslovosti», m. Kherson, 12 lystopada 2020 r. – S. 89 – 90.
3. Harhaun R.V. Doslidzhennya vplyvu sylikoniv na reolohichni vlastyvoli kosmetychnykh emul'siy / R.V. Harhaun, D.S. Lyakhovskyy, O.M. Kynyk, D.H. Saribeykova // materialy III Vseukrayins'koyi naukovo-praktychnoyi konf. «Aktual'ni problemy khimiyi ta khimichnoyi tekhnolohiyi», m. Kyiv, 21 – 22 lystopada 2018 r. – S. 123 – 125.



4. Harhaun R.V. Doslidzhennya vplyvu sylikoniv na orhanoleptychni vlastyvoli kosmetychnykh emul'siy / R.V. Harhaun, D.S. Lyakhovs'kyi, O.M. Kunyk, D.H. Saribeykova // materialy VI Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konf. «Khimiya, bio- i nanotekhnolohiyi, ekolohiya ta ekonomika v kharchoviy i kosmetychniy promyslovosti», m. Kharkiv, 1 – 2 lystopada 2018 r. – S. 33 – 35.
5. Pat. na korysnu model' № 144145 Ukrainy. MPK (2006.01), A61K 8/06, A61K 8/18. Kosmetychna emul'siya, zbahachena biolohichno aktyvnymy dobavkamy / R.V. Harhaun, O.M. Kunyk, D.H. Saribeykova; zayavnyk i patentovlasnyk Khersons'kyi natsional'nyy tekhnichnyy universytet. – № u202000613; zayav. 03.02.2020; opubl. 10.09.2020; byul. № 17/2020. – 4 s.
6. Reotest-2.1. Tsylyndrychesky y konusno-plastynochnyy rotatsyonnyy vyskozometr. Ynstruktsyya po ekspluatatsiyi [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: <http://www.twirpx.com/file/1543541>. (data zvernennya 03.10.2021).
7. Arkusha A.A. Yssledovanye strukturno-mekhanicheskikh svoystv mazey s tsel'yu opredeleniya optimuma konsystentsyy: avtoref. dys. na soyskanye nauch. stepeny kand. farmats. nauk: 15.00.01 / Arkusha A.A. – Khar'kov, 1982. – 23 s.
8. Hibbott H.W. Handbook of cosmetic science: an introduction to principles and applications / H.W. Hibbott. – New York: Oxford, 2016. – 566 r.
9. Samuylova L.N. Kosmetycheskaya khimiya v 2 ch. Chast' 1. Ynhrydyenty. / L.N. Samuylova, T.M. Puchkova. – M: Shkola kosmetycheskykh khymikov, 2005. – 336 s.
10. Zuykina S.S. Teoretychne obgruntuvannya ta rozrobka kombinovanykh likars'kykh preparativ dlya likuvannya mastopatiyi na osnovi likars'koyi roslynnoyi syrovyny: dys. ... doktora farm. nauk: 15.00.01 / Zuykina Svitlana Serhiyivna. – Kharkiv, 2021. – 492 s.

Надійшла/Paper received : 07.10.2022 р.    Надрукована/Printed : 01.11.2022 р.

МАЄВСЬКИЙ Ярослав

Хмельницький національний університет

ORCID ID: 0000-0002-5732-7093

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

ПРАВОРСЬКА Наталія

Хмельницький національний університет

ORCID ID: 0000-0001-6001-3311

e-mail: [margana2000007@gmail.com](mailto:margana2000007@gmail.com)

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЗАЦІЇ МАСШТАБУВАННЯ МІКРОСЕРВІСІВ У СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ КОНТЕЙНЕРИЗОВАНИМИ ЗАСТОСУНКАМИ KUBERNETES

Автоматичне масштабування контейнерів в системі Kubernetes відіграє важливу роль у опрацюванні вхідних запитів користувачів веб-застосунків. В цій статті проаналізовано етапи масштабування контейнерів, їхня ініціалізація і подальший запуск програмного забезпечення. Для досягнення низької затримки запитів користувача у випадку динамічного навантаження проводився аналіз процесу автоматичного масштабування контейнерів та факторів, які впливатимуть на процес масштабування. Маючи повне розуміння процесів та механізмів, за правилами яких відбувається масштабування, стало можливим розробка методу та стратегії для прибирання перепон, що сповільнюють сам процес автомасштабування і при цьому збереження необхідних властивостей від існуючого масштабування. Пришвидшення масштабування контейнерів, яке напряду буде впливати на швидкість веб-сервісів стає можливим саме через позбавлення затримки в автоматичному масштабуванні контейнерів.

З отриманих результатів дослідження сформовано метод оптимізації автоматичного масштабування контейнеризованих застосунків за рахунок позбавлення затримки під час холодного старту. Така затримка проявляється у випадку автомасштабування мікросервіса, де Kubernetes, як очікується, горизонтально масштабує контейнери шляхом створення додаткових реплік до необхідної кількості, щоб опрацювати необхідний трафік ззовні. Затримка, спричинена автомасштабувальником, впливає на час опрацювання запитів користувача веб-сервісу.

Ключові слова: мікросервіси, контейнери, автомасштабувальник, автоматичне масштабування контейнерів, Kubernetes, затримка, холодний старт.

MAYEVSKIY Yaroslav, PRAVORSKA Natalya

Khmelnytskyi national university

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF AUTOMATION THE SCALING OF MICROSERVICES IN THE KUBERNETES CONTAINERIZED APPLICATION MANAGEMENT SYSTEM

Automatic container scaling in Kubernetes plays an important role in handling incoming requests from web application users. This article analyzes the stages of container scaling, their initialization and subsequent software launch. In order to achieve low latency of user requests in the case of dynamic load, the analysis of the process of automatic scaling of containers and the factors that will affect the scaling process was carried out. Having a full understanding of the processes and mechanisms by which scaling takes place, it became possible to develop a method and strategy for cleaning obstacles that slow down the autoscaling process itself and at the same time preserve the necessary properties of the existing scaling. Acceleration of scaling of containers, which will directly affect the speed of web services, becomes possible precisely because of the elimination of the delay in automatic scaling of containers.

The work considered scaling optimization using not only container pre-creation networks, but also the use of container images, which enable the sharing of linked libraries in memory and the extension of Kubernetes' declarative configuration management approach for parallel creation of multiple container instances.

Based on the obtained research results, a method for optimizing the automatic scaling of containerized applications by eliminating the delay during a cold start has been developed. This latency manifests itself in the case of microservice autoscaling, where Kubernetes is expected to scale containers horizontally by creating additional replicas to the required number to handle the required traffic from the outside. The delay caused by the autoscaler affects the processing time of the user's web service requests.

Keywords: microservices, containers, autoscaler, autoscaling of containers, Kubernetes, latency, cold start.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

У контексті Kubernetes холодний старт – це затримка у процесі масштабування контейнеризованих застосунків, яка спричинена ініціалізацією контейнера з необхідним сервісом. Така затримка проявляється у випадку автомасштабування мікросервіса, де Kubernetes, як очікується, горизонтально масштабує контейнеризовану програму шляхом створення додаткових реплік потрібного контейнера до необхідної кількості, щоб опрацювати необхідний розмір трафіка ззовні.

Затримка автоматичного масштабування визначається багатьма факторами на різних етапах. В Kubernetes процес масштабування складається з кількох взаємопов'язаних фаз. Починається процес з того, що платформа визначає пік трафіку а також наступне планування набіру контейнерів аж до ініціалізації контейнера і виконання коду програмного забезпечення, після чого ми можемо констатувати успішну відповідь на запит

Щоб досягти низької затримки запитів користувача у випадку динамічного навантаження потрібно проаналізувати процес автоматичного масштабування контейнерів і визначити ключові фактори, які впливають на цей процес. Під час проведення дослідження детально вивчається проблема холодного запуску і аналізується процес масштабування. Тільки з повним розумінням процесів і механізмів масштабування є змога запропонувати метод або стратегії для усунення проблем, які сповільнюють процес автоматичного масштабування і в той же момент залишивши всі потрібні властивості від існуючого масштабування.

Позбавлення затримки в автоматичному масштабуванні контейнерів дозволяє пришвидшити масштабування контейнерів, що на пряму впливає на швидкодію веб-сервісів.

### Аналіз останніх джерел

Дослідження засноване на офіційній документації платформи Kubernetes, яке детально описує етапи масштабування контейнеризованих застосунків а також описує в деталях горизонтальний і вертикальний автомасштабувальники. Для порівняння звичайних горизонтальних і вертикальних масштабувальників з вбудованим фреймворком від Kubernetes було проаналізована офіційна документація KNative. Також в роботі авторами було розглянуто оптимізацію масштабування за рахунок використання нейронних мереж для попереднього створення контейнерів, використання образів контейнерів, які дозволяють спільно використовувати зв'язані бібліотеки в пам'яті і розширення декларативного підходу керування конфігурацією Kubernetes для паралельного створення кількох екземплярів контейнера. Ця проблема має різні варіанти і в різних контекстах і умовах. Наприклад, у безсерверній парадигмі проблема холодного запуску чітко визначається як час, витрачений на підготовку середовища виконання коду під час першого виклику функції. Порівняно з мікросервісами, безсерверна архітектура є більш модульним архітектурним стилем і має поставлені задачі щодо економії ресурсів, коли немає активного трафіку користувачів.

### Виклад основного матеріалу

Холодний запуск у автоматичному масштабуванні контейнеризованих застосунків – це подія, яка описує момент значного збільшення навантаження на веб-застосунок, але в протипагу програмному забезпеченні не достатньо ресурсів для опрацювання цих запитів. Тому, платформа керування контейнеризованими застосунками реагує на цю подію і розпочинає процес запуску додаткових контейнерів, які будуть опрацьовувати новий трафік. На цей процес витрачається багато часу, і якщо інші контейнери не звільняють свої ресурси – користувач буде очікувати час запуску додаткових контейнерів. Як результат – запити користувача довго опрацьовуються, або користувач взагалі не отримує відповіді на свої запити.

Процес холодного старту зображений на рисунку 1.

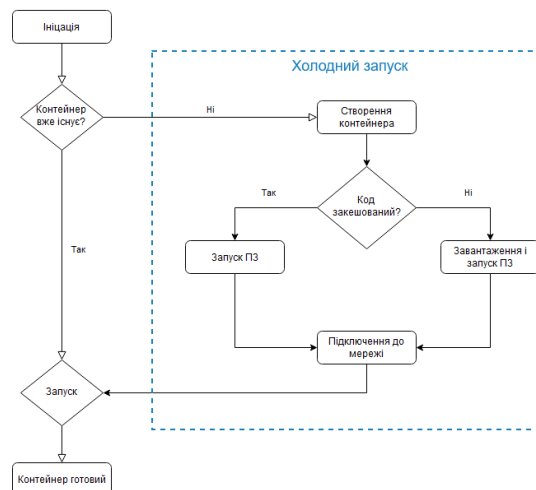


Рис. 1. Централізована система управління

Зазвичай, цей процес починається з того, що платформа перевіряє наявність середовища для запуску програмного забезпечення. Якщо таке існує – виклик буде опрацьований існуючими екземплярами – такий процес називається теплим стартом. В іншому випадку розпочинається процес холодного старту, де немає підготовлених контейнерів для обробки запита. Відповідно починається процес запуску контейнера, для подальшої роботи потребують код програмного забезпечення, який може бути закешований локально або завантажений. Після чого відбувається підключення мережі.

Загалом, для проходження усіх етапів холодного запуску може знадобитися кілька секунд – в залежності від програмного забезпечення або конфігурації контейнерів. Створений контейнер використовується багаторазово для обслуговування майбутніх запитів.

Підводячи підсумок, можна сказати, що типовий холодний запуск передбачає три етапи створення: створення контейнера, завантаження коду програмного забезпечення та розгортання мережі. Створення контейнера та розгортання мережі сприяють секундній затримці холодного запуску, тоді як час завантаження функціонального коду залежить від способів кешування коду.

### Контейнери запуску програмного забезпечення

Для початку, проводиться порівняння трьох доступних середовищ для запуску контейнерів, а саме: Docker (v19.03.15), containerd (v1.4.4), CRI-O (v1.20.3). Вони відрізняються реалізацією Kubernetes Container Runtime Interface (CRI).

Для Docker потрібен окремий процес dockershim, щоб підтримувати разом Docker і kubelet, а containerd містить ту саму функціональність dockershim, що й плагін CRI, у своєму коді. CRI-O реалізує CRI за дизайном і може безпосередньо взаємодіяти з kubelet без додаткових витрат. Щоб порівняти їх продуктивність, вимірюється час запуску контейнера під час виконання різних контейнерів. Час запуску контейнера — це тривалість від того моменту, як kubelet отримав контейнеру щойно створений контейнер, призначений йому.

На рисунку 2 показана діаграма, на якій CRI-O має найкращу продуктивність з точки зору затримки.

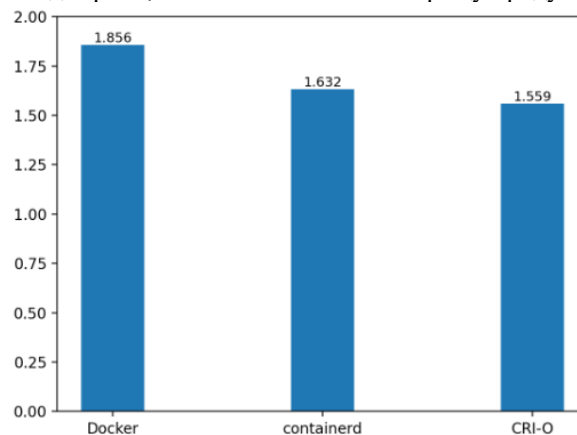


Рис. 2. Діаграма затраченого часу на запуск контейнера в різних умовах

### Налаштування мережі

Плагіни мережевого інтерфейсу контейнера (CNI) використовуються в Kubernetes для підтримки роботи в кластерній мережі. CNI плагіни відповідають за підключення мережі до контейнера під час його ініціалізації. Такі плагіни відрізняються за собою механізмами реалізації, протоколами і мережевою моделлю. Порівняємо 5 поширених рішень, а саме: Cilium, Flannel, Calico, Weave Net, Kube-router. Діаграма затраченого часу в секундах на запуск контейнера з різними плагінами CNI представлена на рисунку 3.

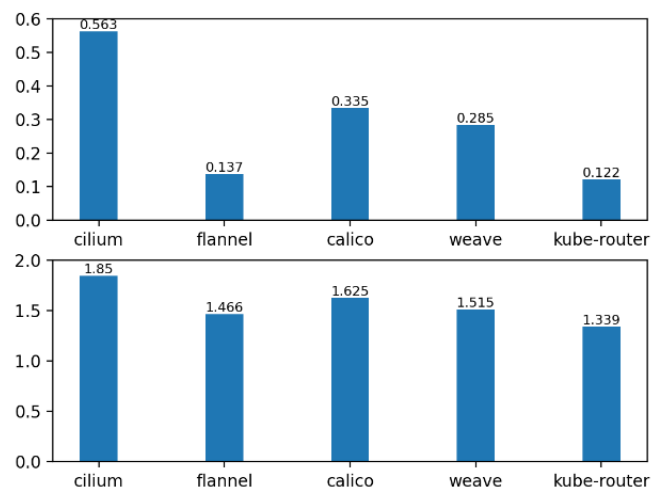


Рис. 3. Діаграма затраченого часу в секундах на запуск контейнера з різними плагінами CNI

Згідно з діаграмою, Flannel і kube-router витрачають найменше часу, тоді як Cilium відносно повільніший за інших. Однак, загальна різниця між плагінами не значна. У результаті можна зробити висновок, що різні CNI плагіни можуть збільшити швидкодію і зменшити час запуску контейнера. Але варто розуміти, що різні плагіни мають інші параметри як час на запуск, значною мірою вони відрізняються в пропускну здатності вводу-виводу запитів, а не часу на запуск.

### Розмір кластера

Розмір кластера є однією з гіпотетичною проблем у швидкодії запуску контейнерів. Але, планувальник Kubernetes має механізм, який аналізує дані найменшого за розміром вузла в контейнері. Однак, незалежно від розміру кластера, планування модуля працює на шкалі часу в мілісекунди; таким чином, вплив розміру кластера на продуктивність масштабування модуля має бути незначним. На рисунку 4 представлена діаграма, яка відображує затрачений час на запуск контейнера з різними за розміром кластерами.

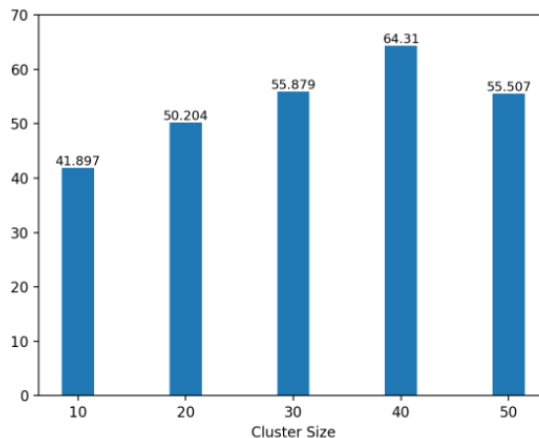


Рис. 4. Діаграма затраченого часу в мікросекундах на запуск контейнера з різними розмірами кластера

### Мова програмування

Важливим фактором у запуску контейнерів є програмне забезпечення, а саме мова якою воно написане. Таким чином, ми порівнюємо час на запуск мінімального програмного забезпечення в умовах платформи Kubernetes з контейнером Docker. Для прикладу, було реалізоване мінімальне програмне забезпечення на шістьох різних мовах, яке виводить в консоль інформацію, що воно запустилось. Вибрані мови: Go 1.16, Java 11.00, C# 3.1, JavaScript 14.17, PHP 7.3, Python 3.9. Результати запусків наведені на рисунку 5.

Результат дослідження показав, що мова програмування теж впливає на час запуску контейнерів.

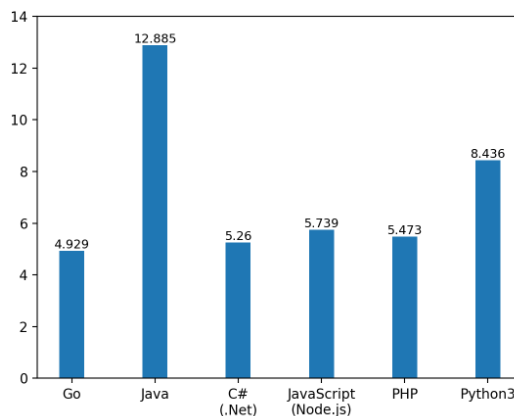


Рис. 5. Діаграма використаного часу для запуску мінімального ПЗ

З діаграми добре видно, що більший час було затрачено для запуску програмного забезпечення написаного мовою Java, а лідером швидкості з запуску ПЗ, стало написане мовою Go.

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

Проведені в дослідженні експерименти надали деяку корисну інформацію, яка стане в пригоді при розробці методів, направлених на покращення автоматичного масштабування контейнерів. У проведеному дослідженні було проведено аналіз та порівняння різних факторів, що впливають на ефективність масштабування контейнеризованих застосунків в системі керування контейнеризованими застосунками. Було проаналізовано вплив інструментів контейнеризації на час запуску сервісів, в результаті чого, отримані дані, які вказують, що CRI-O є найшвидшим інструментом контейнеризації. Також детально проаналізовано вплив плагінів мережевого інтерфейсу контейнера, і доведено, що Flannel і kube-router витрачають найменше часу, тоді як Cillium, який використовується з коробки – відносно повільніший за інших. Однак, загальна різниця між плагінами не значна. Також корисною інформацією є те, що розмір кластера не має впливу на час запуску контейнера, а мови програмування значно впливають на час запуску програмного забезпечення в контейнерах. Всі отримані дані будуть використані в наступній розробці як самого методу,

так і стратегії для прибирання перепон, що сповільнюють сам процес автомасштабування і при цьому збереження необхідних властивостей від існуючого масштабування.

#### Література:

1. D. Mao, Z. Hao, F. Wang, and H. Li, State-of-the-practice Autoscalers: A case study in Shandong Province, China, *Sustainability*, vol. 10, no. 2, p. 3149, 2018.
2. B. Bershad, R. P. Draves, and A. Forin. Using microbenchmarks to evaluate system performance. In [1992] *Proceedings Third Workshop on Workstation Operating Systems*, pages 148–153. IEEE, 1992
3. J. Dieltjens, E. Heydari Beni, E. Truyen, B. Lagaisse – Reducing cold start during elastic scaling, KU Leuven, Belgium, 2019.
4. Kubernetes Documentation – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kubernetes.io/docs/home/>

Надійшла/Paper received : 27.09.2022 р.    Надрукована/Printed : 01.11.2022 р.

**ПАШКЕВИЧ Олег**ЗВО Університет Короля Данила  
<https://orcid.org/0000-0001-7254-3512>  
e-mail: oleh.pashkevych@ukd.edu.ua**ВАЩИЩАК Сергій**ЗВО Університет Короля Данила  
<https://orcid.org/0000-0002-1753-1540>  
e-mail: serhii.vaschysyak@ukd.edu.ua**БОЙЧУК Андрій**ЗВО Університет Короля Данила  
<https://orcid.org/0000-0003-3357-8274>  
e-mail: andrii.m.boichuk@ukd.edu.ua**СТИСЛО Тарас**ЗВО Університет Короля Данила  
<https://orcid.org/0000-0002-2377-7985>  
e-mail: taras.styslo@ukd.edu.ua**ДЕМЧИНА Микола**ЗВО Університет Короля Данила  
e-mail: mykola.demchyna@ukd.edu.ua

## ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЦІН НА РИНКУ НЕРУХОМОСТІ

В роботі наведено результати використання машинного навчання для прогнозування змін цін на ринку нерухомості. Проаналізовано економічні моделі та чинники, що впливають на формування ціни. Ці дані використано як основу для побудови моделі машинного навчання. Особлива увага зосереджена на виборі базових даних для побудови такої моделі. Проаналізовано різні типи регресійних моделей, які можуть бути реалізовані у відповідних програмних середовищах. В кінцевому результаті створена статистична модель для прогнозування ціни на житло за допомогою лінійної регресії. Вона використана для визначення тенденцій змін цін на ринку нерухомості в середньостроковому і довгостроковому періодах. Детально розглянуто всі бібліотеки які використовуються в розробці статистичної моделі, проаналізовано їх переваги та недоліки. Розглянуто та реалізовано наступні кроки створення моделі: імпорт бібліотек та модулів, розроблено зчитування даних з датасету, аналіз даних, очистка та середня статистична оцінка. Як результат, лінійну регресію використано для аналізу масиву даних, отриманих з відкритого ресурсу – сайту продажу та оренди нерухомості Zillow. Об'єкти нерухомості. Описані на цьому ресурсі, стосуються міста Сіетл. Використано кластеризацію за основними параметрами об'єктів нерухомості, зокрема площею, розміщенням, віком. Щоб оцінити співвідношення різноманітних характеристик об'єкта нерухомості проведено 3D-моделювання з використанням конструктора Axes3D. На основі аналізу виконана візуалізація даних з використанням різних бібліотек. Аналізовані дані відображено на карті за допомогою Folium. Реалізовано кластеризацію даних та тестування на реальних даних, що показало доволі непогані результати прогнозу ціни. Отриманий результат моделювання перевірено на реальних об'єктах нерухомості та встановлено, що точність роботи такої моделі становить 76%. Такий високий результат вказує на правильність її побудови та раціональність використання програмних рішень для її втілення. Вона в майбутньому може бути використана для аналізу подібних масивів даних в цій галузі.

Ключові слова: машинне навчання, регресійні моделі, ціна нерухомості, економічні моделі, кластеризація даних

PASHKEVYCH Oleh, VAHSCHYSHCHAK Serhii,  
BOICHUK Adrii, STYSLO Taras, DEMCHYNA Mykola  
HEI King Danylo University

## APPLICATION OF MACHINE LEARNING MODELS FOR PREDICTING PRICES ON THE REAL ESTATE MARKET

The work shows the results of using machine learning to forecast price changes in the real estate market. Economic models and factors affecting price formation are analyzed. This data was used as a basis for building a machine learning model. Special attention is focused on the selection of basic data for building such a model. Various types of regression models, which can be implemented in appropriate software environments, have been analyzed. As a result, a statistical model was created for predicting housing prices using linear regression. It is used to determine trends in price changes on the real estate market in the medium and long term. All libraries used in the development of statistical models are examined in detail, their advantages and disadvantages are analyzed. The following steps of model creation were considered and implemented: import of libraries and modules, developed data reading from the dataset, data analysis, cleaning and average statistical evaluation. As a result, linear regression was used to analyze an array of data obtained from an open resource - the real estate sales and rental site Zillow. The real estate objects described on this resource relate to the city of Seattle. Clustering was used according to the main parameters of real estate objects, in particular, area, location, age. In order to evaluate the ratio of various characteristics of the real estate object, 3D modeling was carried out using the Axes3D designer. Based on the analysis, data visualization was performed using various libraries. The analyzed data is displayed on a map using Folium. Data clustering and testing on real data were implemented, which showed quite good price forecast results. The obtained modeling result was checked on real estate objects and it was established that the accuracy of the model is 76%. Such a high result indicates the correctness of its construction and the rationality of using software solutions for its implementation. In the future, it can be used to analyze similar data sets in this field.

Keywords: machine learning, regression models, real estate price, economic models, data clustering.



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

Машинне навчання та основи штучного інтелекту використовують в багатьох сучасних сферах науки, технологій, бізнесу – всюди, де є можливість опрацьовувати масиви даних, які взаємодіють між собою за сталими алгоритмами. Найважливішою частиною процесу машинного навчання є правильна інтерпретація даних і використання їх у задачі яку потрібно вирішити.

Останнім часом для всіх є актуальними проблеми купівлі чи оренди житла, тому виникає проблема аналізу формування цін. Динаміка зміни цін на ринку нерухомості в умовах кризи, спричиненої військовими діями, кардинально відрізняється від динаміки зміни вартості в умовах економічного зростання, або економічної стабільності. Відомо, що основою ціноутворення на будь-якому ринку, у ринку нерухомості, є співвідношення мікроекономічних чинників – попиту і пропозиції, які є похідною від макроекономічних показників розвитку країни, регіону, міста. Всі ці параметри можна аналізувати в рамках певних моделей, що визначаються вхідними умовами, зокрема, регресійними. Регресійні моделі використовуються для передбачення цільових змінних в безперервній шкалі, що робить їх привабливими для вирішення багатьох питань в науці і для додатків в інформаційній галузі, такими як розуміння зв'язків між змінними, оцінювання тенденцій або створення прогнозів. Одним із прикладів може бути прогнозування за допомогою моделей продажів квартир компаніями в майбутні місяці.

### **Аналіз останніх джерел**

В моделюванні динаміки ринку використовуються положення методології розрахунку ціни на об'єкт житлової нерухомості. В межах одного міста ціни на всі типи нерухомості зростають, зменшуються, або є у межах певного стабільного рівня. Причому подібні зміни відбуваються приблизно пропорційно. На це впливають локальні та глобальні чинники. Локальні призводять до того, що ціни на нерухомість відрізняються між собою. Ці чинники більше впливають на вартість, коли загальний рівень цін залишається приблизно постійним, але майже зникають на тлі сильного зростання чи зниження цін. Глобальні чинники пов'язані з макроекономічними параметрами, якими є рівень розвитку економіки та бізнесу в країні, регіоні, місті. Загальний рівень цін є відображенням впливу зміни макроекономічних чинників у часі і не залежить від локальних чинників. Тому загальний рівень цін є тільки функцією часу, що особливо актуально в умовах фінансово-економічної кризи [1].

Для прогнозування цін на ринку нерухомості застосовуються різноманітні підходи та моделі машинного навчання [2 - 6]. Але достовірність цих моделей залежить від впливу факторів, значна частина з яких спрощується, або не враховується через різноманітність завдань досліджень. Через, поки що, це немає єдиного концептуального підходу до прогнозування цін на житлові об'єкти в межах певного району чи міста.

### **Формулювання цілей статті**

Метою роботи є: розроблення концептуальної моделі прогнозування ціни об'єкта на ринку житлової нерухомості в межах одного міста для систематизації загальних положень щодо прогнозування та моделювання політики ціноутворення.

### **Виклад основного матеріалу**

Аналіз даних у моделі здійснено за допомогою Pandas, Numpy, Sklearn з використанням візуалізації Matplotlib, PyLab, Folium та інших допоміжних бібліотек, кластеризацію даних - за допомогою методу KMeans. Опрацювання даних і програмний код реалізовано на мові Python 3 з використанням інструменту Jupyter notebook [7].

Для реалізації моделі спочатку було створено фігуру-каркас за допомогою %matplotlib.inline та задано необхідні параметри розмірів фігури. Через певну закритість статистики українського ринку нерухомості модель було побудовано згідно даних відкритого сайту Kaggle. Далі було зчитано дані (рис. 1), які взято з файлу kc\_house\_data.csv сайту Kaggle. Цей набір даних містить ціни продажу будинку для округу Кінг у Сіетлі. Сюди входять будинки, продані в період з травня 2017 року по травень 2018 року. Результати виведення даних наведено на рис. 2. Після цього дані були систематизовані і впорядковані. За допомогою методу describe() отримано основні статистичні оцінки даних (рис.3) по кожній числовій ознаці (типи int64 і float64): число непропущених значень, середнє, стандартне відхилення, діапазон, медіана і т.д. За допомогою методу corr() проведено кореляційний аналіз даних. Оскільки обчислений коефіцієнт кореляції більший за критичне його значення ( $0,6 > 0,3809$ ), то з вірогідністю 0,95 можна стверджувати про статистично достовірну залежність між даними. Тому для нашої моделі ми застосували лінійну регресію [8], де взаємозв'язок між даними моделюється за допомогою лінійних функцій, а невідомі параметри моделі оцінюються за вхідними даними. Модель запускається з набором навчальних даних і продукує результат, який потім порівнюється з ціллю для кожного вхідного вектора в тренувальному наборі. На підставі результату порівняння та відповідно до обраного алгоритму навчання, параметри моделі коригуються. Далі, підібрана модель використовується при прогнозуванні відповідей для спостережень у другому наборі даних - даних для затвердження. Цей набір даних забезпечує об'єктивну оцінку моделі, яка відповідає навчальному набору при налаштуванні гіперпараметрів моделі.

```
In [2]: %matplotlib inline
rcParams['figure.figsize'] = 5, 4
sb.set_style('whitegrid')

In [3]: houses = pd.read_csv("kc_house_data.csv")
houses.head()
```

Рис.1. Зчитування даних з файлу

	id	date	price	bedrooms	bathrooms	sqft_living	sqft_lot	floors	waterfront	view	...	grade	sqft_above	sqft_basement	yr_built
0	7129300520	20141013T000000	221900.0	3	1.00	1180	5650	1.0	0	0	...	7	1180	0	...
1	6414100192	20141209T000000	538000.0	3	2.25	2570	7242	2.0	0	0	...	7	2170	400	...
2	5631500400	20150225T000000	180000.0	2	1.00	770	10000	1.0	0	0	...	6	770	0	...
3	2487200875	20141209T000000	604000.0	4	3.00	1960	5000	1.0	0	0	...	7	1050	910	...
4	1954400510	20150218T000000	510000.0	3	2.00	1680	8080	1.0	0	0	...	8	1680	0	...

5 rows × 21 columns

id ідентифікатор date дата коли був проданий будинок price ціна(цільовий показник) bedrooms кількість спалень bathrooms кількість ван sqft\_living житлова площа sqft\_lot площа лоту floors кількість поверхів waterfront будинок з видом на набережну view перегляд condition наскільки хороші умови в цілому grade загальна оцінка sqft\_above квадратні метри крім підвалу sqft\_basement квадратний метр підвалу yr\_built рік побудови yr\_renovated рік реставрації zipcode код індекс lat координати широт long координати довготи sqft\_living15 додаткова площа забудови sqft\_lot15 додаткова площа лоту

Рис.2. Результат виведення даних

houses.describe().T															
	count	mean	std	min	25%	50%	75%	max							
id	21613.0	4.580302e+09	2.876566e+09	1.000102e+06	2.123049e+09	3.904930e+09	7.308900e+09	9.900000e+09							
price	21613.0	5.400881e+05	3.671272e+05	7.500000e+04	3.219500e+05	4.500000e+05	6.450000e+05	7.700000e+06							
bedrooms	21613.0	3.370842e+00	9.300618e-01	0.000000e+00	3.000000e+00	3.000000e+00	4.000000e+00	3.300000e+01							
bathrooms	21613.0	2.114757e+00	7.701632e-01	0.000000e+00	1.750000e+00	2.250000e+00	2.500000e+00	8.000000e+00							
sqft_living	21613.0	2.079900e+03	9.184409e+02	2.900000e+02	1.427000e+03	1.910000e+03	2.550000e+03	1.354000e+04							
sqft_lot	21613.0	1.510697e+04	4.142051e+04	5.200000e+02	5.040000e+03	7.618000e+03	1.068800e+04	1.651359e+06							
floors	21613.0	1.494309e+00	5.399889e-01	1.000000e+00	1.000000e+00	1.500000e+00	2.000000e+00	3.500000e+00							
waterfront	21613.0	7.541757e-03	8.651720e-02	0.000000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	1.000000e+00							
view	21613.0	2.343034e-01	7.663176e-01	0.000000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	0.000000e+00	4.000000e+00							
condition	21613.0	3.409430e+00	6.507430e-01	1.000000e+00	3.000000e+00	3.000000e+00	4.000000e+00	5.000000e+00							
grade	21613.0	7.656873e+00	1.175459e+00	1.000000e+00	7.000000e+00	7.000000e+00	8.000000e+00	1.300000e+01							
sqft_above	21613.0	1.788391e+03	8.280910e+02	2.900000e+02	1.190000e+03	1.560000e+03	2.210000e+03	9.410000e+03							

Рис. 3. Виведення основних статистичних характеристик моделі

Набори даних для затвердження були використані для регуляризації шляхом ранньої зупинки: навчання переривалося, коли помилка на наборі даних для затвердження збільшувалась, оскільки це є ознакою перенавчання на навчальному наборі даних. Ця процедура ускладнювалась тим, що помилка набору даних для затвердження могла коливатися під час тренування, утворюючи декілька локальних мінімумів. Таке ускладнення призвело до появи багатьох ad-hoc правил для визначення того, що перенавчання справді почалось (рис. 4).

```
In [17]: train_data, test_data = train_test_split(houses, train_size =0.8, random_state = 3)
reg = linear_model.LinearRegression()
x_train = np.array(train_data['sqft_living']).reshape(-1,1)
y_train = np.array(train_data['price']).reshape(-1, 1)
reg.fit(x_train, y_train)
#evaluate simple model
x_test = np.array(test_data['sqft_living']).reshape(-1, 1)
y_test = np.array(test_data['price']).reshape(-1, 1)
pred = reg.predict(x_test)
print('Simple Model')

print('R-squared (training) ', round(reg.score(x_train, y_train), 3))
print('R-squared (testing) ', round(reg.score(x_test, y_test), 3))
print('Intercept: ', reg.intercept_)
print('Coefficient:', reg.coef_)

Simple Model
R-squared (training)  0.492
R-squared (testing)  0.496
Intercept:  [-47235.8113029]
Coefficient:  [[282.2468152]]

In [18]: _, ax = plt.subplots(figsize=(10, 12))
plt.scatter(x_test, y_test, color='darkgreen', label = 'data')
plt.plot(x_test, reg.predict(x_test), color='red', label= ' Predicted Regression line')
plt.xlabel('Living Space (sqft)')
plt.ylabel('price')
plt.legend()
plt.gca().spines['right'].set_visible(False)
plt.gca().spines['right'].set_visible(False)
```

Рис.4. Код створення моделі

За допомогою метода `fit()` модель навчається, викликається метод `predict()` - результат прогнозування з використанням лінійної регресії (рис.5).



Рис. 5. Результат прогнозування з використанням лінійної регресії

Але, як видно з рис. 5, результат прогнозування вийшов доволі грубим, бо розподіл даних є далеким від лінійного закону, тому було вирішено удосконалити модель з використанням додаткових ознак що є в даних. Ці ознаки, наприклад розміщення об'єктів на карті, координати широта та довготи, житлова площа, поштовий індекс мали допомогти підвищити якісь результату моделювання (рис.6 та 7). На останньому етапі для забезпечення об'єктивної оцінки кінцевої моделі, яка відповідає навчальному набору даних використовувався тестовий набір даних. Результат на наборі для перевірки та тестових даних набагато піднявся до кращої оцінки (рис.8).

```
n [25]: #split in X,y
y=houses.loc[:, "price"].apply(lambda x: log(x))

X=houses.loc[:, ["sqft_living", "grade", "floors", "lat", "long", "bathrooms", "bedrooms", "yr_built", "yr_renovated", "view"]]
X["sqft_living"] = X["sqft_living"].apply(lambda x: log(x))
X["lat"] = X["lat"].apply(lambda x: abs(47.63-x))
X["long"] = X["long"].apply(lambda x: log(abs(x)))
X["yr_built"] = X["yr_built"].apply(lambda x: log(abs(x-1955)+1))
X["yr_renovated"] = X["yr_renovated"].apply(lambda x: log(x+1))
X["sqft_lot"] = X["sqft_lot"].apply(lambda x: log(x))

X["lat*long"] = X["lat"] * X["long"]
X["sqft_living*sqft_lot"] = X["sqft_living"] * X["sqft_lot"]

# split in train, test
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.40, random_state=123)
#split in validation, test
X_val, X_test, y_val, y_test = train_test_split(X_test, y_test, test_size=0.5, random_state=123)
```

Рис.6. Код вдосконалення моделі

```
In [26]: # Validation Set
regr = linear_model.LinearRegression()
regr.fit(X_train, y_train)
y_pred = regr.predict(X_val)

print("Validation Set")
print("Root Mean Square Error: %6.f" % sqrt(mean_squared_error(np.exp(y_val.values), np.exp(y_pred))))
print('R2 score: %6.f' % r2_score(np.exp(y_val.values), np.exp(y_pred)))

Validation Set
Root Mean Square Error: 142748
R2 score: 0.841722

In [27]: #Test set
y_pred = regr.predict(X_test)
print("Test Set")
print("Root Mean Square Error (squared): %2.f" % sqrt(mean_squared_error(np.exp(y_test.values), np.exp(y_pred))))
print('R2 score: %2.f' % r2_score(np.exp(y_test.values), np.exp(y_pred)))

Test Set
Root Mean Square Error (squared): 154262
R2 score: 0.83
```

Рис.7. Результати моделювання з навчальними і тестовими даними

```
In [28]: # Predicting real life data (Training)
#split in X,y
y=houses.loc[:, "price"].apply(lambda x: log(x))

X=houses.loc[:, ["sqft_living", "sqft_lot", "yr_built", "bedrooms", "bathrooms", "lat", "long", "waterfront"]]
X["sqft_living"] = X["sqft_living"].apply(lambda x: log(x))
X["sqft_lot"] = X["sqft_lot"].apply(lambda x: log(x))
X["lat"] = X["lat"].apply(lambda x: abs(47.63-x))
X["long"] = X["long"].apply(lambda x: abs(x))
X["yr_built"] = X["yr_built"].apply(lambda x: log(x))

X["lat*long"] = X["lat"] * X["long"]
X["sqft_living*sqft_lot"] = X["sqft_living"] * X["sqft_lot"]

# split in train, test
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.30, random_state=123)

regr_test = linear_model.LinearRegression()
regr_test.fit(X_train, y_train)
y_pred = regr_test.predict(X_test)
p = r2_score(np.exp(y_test.values), np.exp(y_pred))
print(p)
print("Root Mean Square Error: %2.f" % sqrt(mean_squared_error(np.exp(y_test.values), np.exp(y_pred))))
print('R2 score: %.6f' % p)

0.7622146910961412
Root Mean Square Error: 179697
```

Рис.8. Результати моделювання набору для перевірки з тестовими даними

Результат, показаний на навчальних даних (підмножині всього набору даних) виявився навіть кращим, за попередній. Але важливо відзначити, що результат на тестових даних є гіршим. В нашому випадку відмінність між вірністю на навчальних і на тестових даних невелика. Але якщо модель складна, то цілком можливо на навчальних даних отримати стовідсоткову вірність, а на тестових – не більшу, ніж при випадковому вгадуванні.

Суттєве покращення ситуації дає застосування методу перехресної перевірки. Одна з його форм називається перехресною перевіркою з виключенням по одному. В нашій моделі вибирається який-небудь приклад з навчальних даних, навчається модель на всіх даних, крім цього прикладу, а потім перевіряється, чи правильно модель класифікує цей приклад. Такий процес повторюється для всіх елементів набору даних. У цьому циклі тестується послідовність моделей на всіх прикладах, а по його завершенні друкується середній результат. При використанні перехресної перевірки зацикленість не виникає, тому що кожна модель тестується на прикладі, який вона не бачила при навчанні. Отже, прогнозуючи таким чином оцінку можна вважати надійним показником загальної моделі на нові дані.

Основна проблема перехресної перевірки з вилученням по одному полягає в тому, що доводиться навчати по суті нову модель для кожного прикладу, і з ростом набору даних суттєво зростає складність процесу моделювання. Зменшити складність виключення по одному дозволяє  $k$ -прохідна перехресна перевірка, де  $k$  - невелике ціле число. В нашому випадку дані точкової прохідної перевірки розбиваються на 5 груп. Потім навчаються  $k$  моделей, при цьому кожен раз виділяється з навчального набору одна група. Добутий код резервується відразу 20% даних, а не одним елементом. Всі навчені моделі тестуються на даних, що входять у виключену групу, а результати усереднюються. Після виконання тренування нашої моделі можна поглянути на значення кожного параметра. Наприклад,  $P_0$ , так званий зсув або перетин, можна переглянути за допомогою атрибута `intercept()`.

Основною перевагою лінійної регресії є її інтерпретованість (рис.9) в значній мірі тому, що модельні коефіцієнти є хорошими показниками.

```
actual_values = y_test
predictions = y_pred
sb.scatterplot(actual_values, predictions)
```

<matplotlib.axes.\_subplots.AxesSubplot at 0x7fa25e70d9e8>

Рис. 9. Код для відображення результатів моделювання

На рис. 10 наведено найкращий результат прогнозування з використанням удосконаленої моделі.



Рис. 10. Результат прогнозування з використанням удосконаленої моделі

Для покращення візуалізації залежності даних ще раз застосовуємо лінійну регресію (рис. 11, 12).



```

In [30]: y_train_pred = regr_test.predict(X_train)
         y_test_pred = regr_test.predict(X_test)

In [31]: # Plot residuals
         plt.scatter(y_train_pred, y_train_pred - y_train, c = "blue", marker = "s", label = "Training data")
         plt.scatter(y_test_pred, y_test_pred - y_test, c = "lightgreen", marker = "s", label = "Validation data")
         plt.title("Linear regression")
         plt.xlabel("Predicted values")
         plt.ylabel("Residuals")
         plt.legend(loc = "upper left")
         plt.hlines(y = 0, xmin = 11.5, xmax = 15.5, color = "red")
         plt.show()

```

Рис. 11. Код програми для повторного застосування лінійної регресії

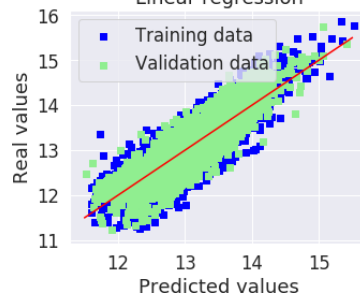


Рис. 12. Графік лінійної регресії для навчальних та тренувальних даних

Після цього здійснено сортування отриманих даних до максимальних, мінімальних, середніх значень для кожного атрибута (параметра) (рис.13 та 14).

```

In [33]: index=["min", "max", "mean", "coef"]
         columns=list(X_test)
         test = pd.DataFrame(index=index, columns=columns)
         test.loc["min"]=list(X_test.min())
         test.loc["max"]=list(X_test.max())
         test.loc["mean"]=list(X_test.mean())
         test.loc["coef"]=regr_test.coef_

```

Рис.13. Код програми для виводу середньої статистики

```

In [34]: test

```

	sqft_living	sqft_lot	yr_built	bedrooms	bathrooms	lat	long	waterfront	lat*long	sqft_living*sqft_lot
min	6.04025	6.39693	7.54961	0	0	0.0001	121.676	0	0.0121911	44.3775
max	9.19928	13.9681	7.60837	10	7.75	0.4524	122.515	1	55.1978	113.265
mean	7.55232	8.99356	7.58617	3.37276	2.11636	0.122584	122.215	0.0089451	14.9804	68.0463
coef	0.636933	0.00800451	-0.348176	-0.0477763	0.0823561	682.224	1.05851	0.728813	-5.60684	0.00903068

Рис.14. Вивід результату статистичного аналізу

Для того, щоб оцінити співвідношення різноманітних характеристик об'єкта нерухомості (наприклад, житлової площі, житлового лоту і спальень з ваннами) проведено 3D-модельовання з використанням конструктора Axes3D (рис. 15, 16).

```

In [20]: fig = plt.figure(figsize=(19,12.5))
         ax=Axes3D(fig)
         ax.scatter(houses['sqft_living'], houses['sqft_lot'], houses['bathrooms'], c="darkgreen", alpha=.5)
         ax.set(xlabel='\n sqft Living', ylabel='\n sqft Lot', zlabel='\n Bathrooms / Bedrooms')
         ax.set(ylim=[0, 250000])

Out[20]: [(0, 250000)]

```

Рис.15. Код програми побудови 3D графіка

Сегментація 3D-моделі – непросте завдання. Навіть якщо сегментація задана попередньо (рис.16), складно з точністю визначити місця стикування, симетрію і паралелізм в деталях зображення. Тому було створено 3D-графік, щоб визначити співвідношення між видом, загальною оцінкою та роком побудови об'єкта нерухомості (рис.17, 18). З графіка видно, що нові будинки мають кращі оцінки, але все одно виявити точні дані візуальним спостереженням досить важко.

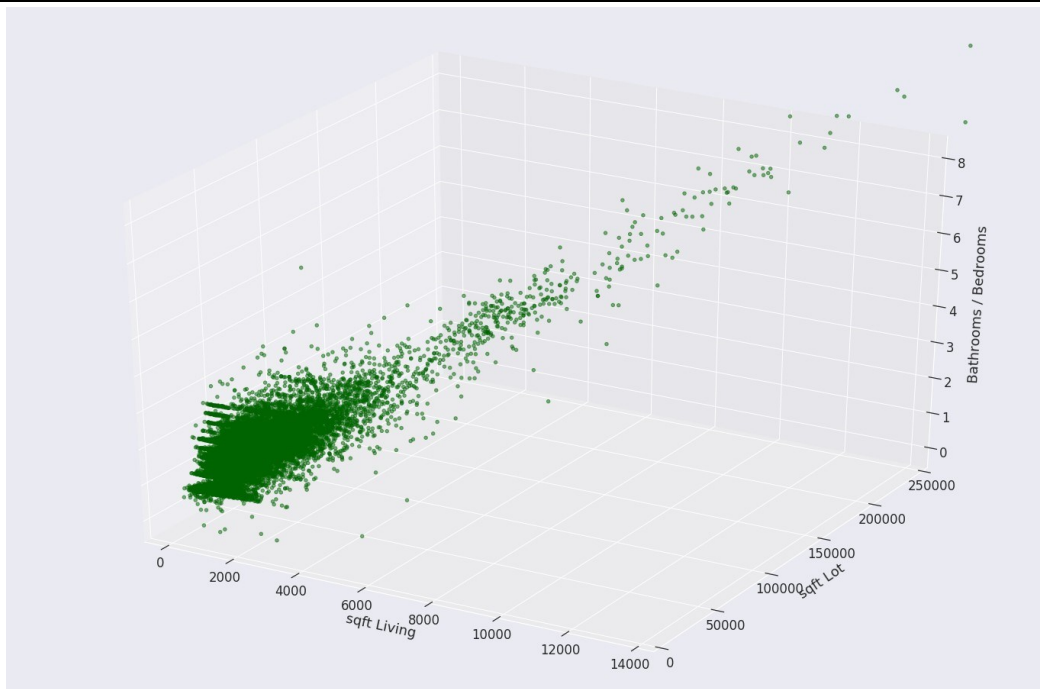


Рис.16. 3D графік співвідношення характеристик об'єкта нерухомості

```
In [22]: fig=plt.figure(figsize=(9.5,6.25))
ax=Axes3D(fig)
ax.scatter(train_data['view'],train_data['grade'],train_data['yr_built'],c="darkgreen",alpha=.5)
ax.set(xlabel='\nView',ylabel='\nGrade',zlabel='\nYear Built');
```

Рис.17. Код програми побудови 3D графіка

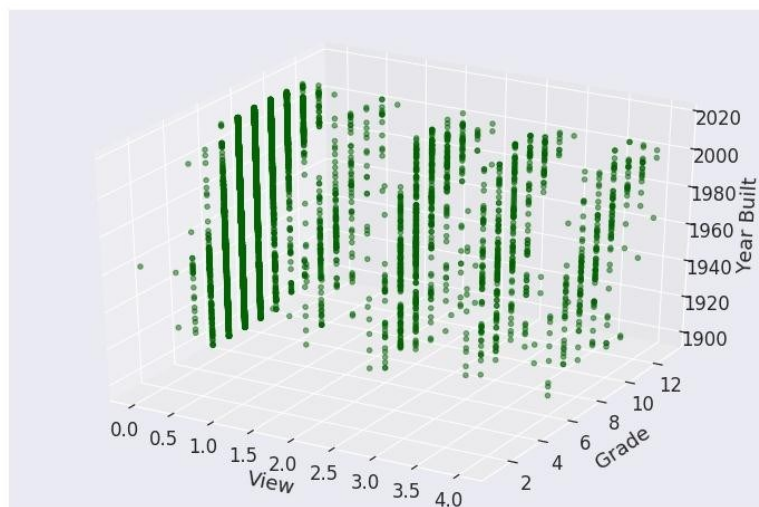


Рис.18. 3D візуалізація взаємозв'язків характеристик об'єкта нерухомості

Для зменшення наслідків незначних помилок спостереження застосовано метод зв'язування даних (data binning). В нашій моделі використовуються `yr_built` та `yr_renovated`. До даних додано вік та епоху ремонту будинків, коли вони продавались. Також розділено ці стовпці на інтервали, і можна це спостерігати на наведених нижче гістограмах (рис.19). Після цього створено веб-карту з використанням бібліотеки для візуалізації географічних даних та інформації Folium, яка містить координати та місцезоположення (рис.20).

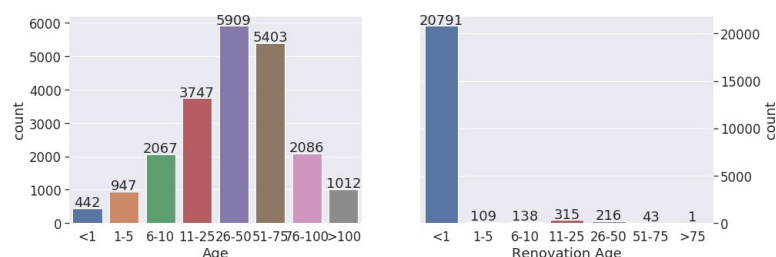


Рис.19. Візуалізація зв'язування даних

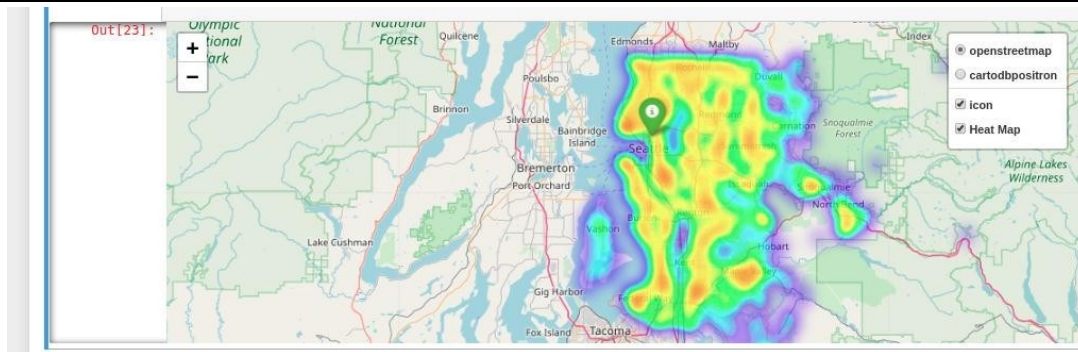


Рис.20. Зображення на карті

Останнім етапом проектування моделі було проведення кластеризації даних для знаходження груп схожих об'єктів у вибірці за допомогою методу k-середніх. Місто Сіетл має 7 районів. Тому партії об'єктів нерухомості поділяються на сім кластерів за координатами. Кластери розділяються за місцем розташування і поділяються за ціною та відстанню від центру. Також Сіетл має 127 мікрорайонів. Отже, координати розділяються на 127 кластерів, тому що кластеризація по мікрорайонах може дати вищу точність у прогнозуванні ціни, ніж кластеризація по районах (рис. 21).

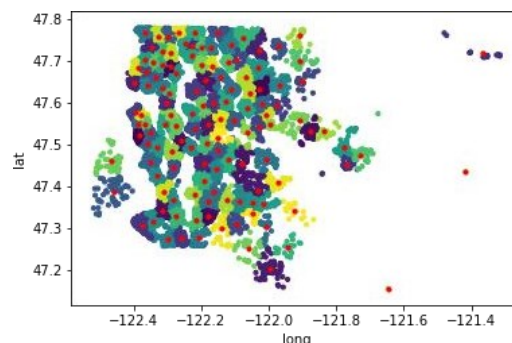


Рис.21. Кластеризація по мікрорайонах

Модель було протестовано на десяти об'єктах Zillow – сайту, що дозволяє отримати детальну інформацію про об'єкт нерухомості, оренду та викупи, які не можна знайти в MLS. Результати тестування дали 76% збіжності, що свідчить про адекватність моделі прогнозування.

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

На основі аналізу даних була розроблена концептуальна модель прогнозування ціни об'єкта на ринку житлової нерухомості, яка складається з п'яти основних блоків, а саме: вхідні дані, оцінка впливу факторів, блок моделювання, синтез моделей та, безпосередньо, прогнозування ціни. Побудова концептуальної моделі дозволяє систематизувати загальні положення щодо прогнозування та моделювання політики ціноутворення та дає змогу не тільки спрогнозувати середній показник рівня ціни для наступного періоду, але й вводити в майбутньому в модель принципово нові корегуючі коефіцієнти для підвищення достовірності прогнозування.

#### Література

1. Прогнозування цін на нерухомість в умовах фінансово-економічної кризи. Сейл Прайс Компані. [Електронний ресурс] : [веб-сайт]. – Режим доступу : [http://www.saleprice.com.ua/ua/publications/real\\_estate\\_price\\_forecasting.html](http://www.saleprice.com.ua/ua/publications/real_estate_price_forecasting.html) (дата звернення: 03.10.2022р.).
2. Мірошниченко І.В., Крашеніннікова О.В. Прогнозування ціни на нерухомість з використанням алгоритмів машинного навчання. Ефективна економіка. 2022. № 1. – URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=9890> (дата звернення: 05.11.2022). DOI: 10.32702/2307-2105-2022.1.81
3. Григорків В. С., Ярошенко О. І., Філіпчук Н. В. Нейронні мережі та їх використання для прогнозування тенденцій ринку нерухомості. / В. С. Григорків, О. І. Ярошенко, Н. В. Філіпчук // Науковий вісник НЛТУ України. – 2012. Вип. 22.5. – С. 324-330.
4. Шаповалова В.О. Прогнозування цін на нерухомість з урахуванням тенденцій ділових циклів / В.О. Шаповалова // Економіка та держава, 2015. – № 9/2015. – С. 37–41.
5. Калиніченко Ю.В., Добровольська В.В., Абрамчк А.Р. Моделювання тенденцій ринку нерухомості. / Ю.В. Калиніченко, В.В. Добровольська, А.Р. Абрамчк // Економічний аналіз: зб. наук. праць Тернопільського національного економічного університету, 2016. Том 23. № 1. – С. 28-36.



6. Хлевна Ю.Л., Бюра Ю.С. Інформаційне забезпечення прогнозування цін на нерухомість методами машинного навчання. / Ю.Л. Хлевна, Ю.С. Бюра // *Sciences of Europe*, 2021. - № 71. - Р. 54-62.
7. Элбон К. Машинное обучение с использованием Python. Сборник рецептов. / К. Элбон. – Петербург: СПб. БХВ, 2019. – 890 с.
8. Лінійна регресія [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/> – Назва з екрану. Sandro Skansi, *Introduction to Deep Learning*. – Springer. – 2018.

#### References

1. Prohnozuvannia tsin na nerukhomist v umovakh finansovo-ekonomichnoi kryzy. Seil Prais Kompani. [Elektronnyi resurs] : [veb-sait]. – Rezhym dostupu : [http://www.saleprice.com.ua/ua/publications/real\\_estate\\_price\\_forecasting.html](http://www.saleprice.com.ua/ua/publications/real_estate_price_forecasting.html) (data zvernennia: 03.10.2022r.).
2. Miroshnychenko I.V., Krashennikova O.V. Prohnozuvannia tsiny na nerukhomist z vykorystanniam alhorytmiv mashynnoho navchannia. *Efektivna ekonomika*. 2022. № 1. – URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=9890> (data zvernennia: 05.11.2022). DOI: 10.32702/2307-2105-2022.1.81.
3. Hryhorkiv V. S., Yaroshenko O. I., Filipchuk N. V. Neironni merezhi ta yikh vykorystannia dlia prohnozuvannia tendentsii rynku nerukhomosti. / V. S. Hryhorkiv, O. I. Yaroshenko, N. V. Filipchuk // *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*. – 2012. Vyp. 22.5. – S. 324-330.
4. Shapovalova V.O. Prohnozuvannia tsin na nerukhomist z urakhuvanniam tendentsii dilovykh tsyktiv / V.O. Shapovalova // *Ekonomika ta derzhava*, 2015. – № 9/2015. – S. 37–41.
5. Kalynichenko Yu.V., Dobrovolska V.V., Abramchik A.R. Modeliuvannia tendentsii rynku nerukhomosti. / Yu.V. Kalynichenko, V.V. Dobrovolska, A.R. Abramchik // *Ekonomichnyi analiz: zb. nauk. prats Ternopilskoho natsionalnoho ekonomichnoho universytetu*, 2016. Tom 23. № 1. – S. 28-36.
6. Khlevna Yu.L., Bura Yu.S. Informatsiine zabezpechennia prohnozuvannia tsin na nerukhomist metodamy mashynnoho navchannia. / Yu.L. Khlevna, Yu.S. Bura // *Sciences of Europe*, 2021. - № 71. - R. 54-62.
7. Elbon K. Mashynnoe obuchenye s yspolzovanyem Python. Sbornik retseptov. / K. Elbon. – Peterburh: SPb. BKhV, 2019. – 890 s.
8. Liniina rehresia [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://uk.wikipedia.org/> – Nazva z ekranu. Sandro Skansi, *Introduction to Deep Learning*. – Springer. – 2018.

Надійшла/Paper received : 17.09.2022 р.    Надрукована/Printed : 01.11.2022 р.

**ГОРЯЩЕНКО СЕРГІЙ**

Хмельницький національний університет

ORCID ID: 0000-0001-6623-2523

e-mail: [horiaschenko@khmnu.edu.ua](mailto:horiaschenko@khmnu.edu.ua)**ГОЛІНКА ЄВГЕНІЯ**

Хмельницький національний університет

ORCID ID: 0000-0003-0860-7926

e-mail: [ievgeniia.golinka@gmail.com](mailto:ievgeniia.golinka@gmail.com)**ДРАПАК ГЕОРГІЙ**

Хмельницький національний університет

ORCID ID: 0000-0002-4908-0887

e-mail: [g\\_drapak@i.ua](mailto:g_drapak@i.ua)**ГОРЯЩЕНКО КОСТЯНТИН**

Хмельницький національний університет

ORCID ID: 0000-0002-7034-8702

e-mail: [kostyakst@ukr.net](mailto:kostyakst@ukr.net)**ПОЛІЩУК ОЛЕГ**

Хмельницький національний університет

ORCID ID: 0000-0002-9764-8561

e-mail: [opolishchuk71@gmail.com](mailto:opolishchuk71@gmail.com)

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ПОПЕРЕДНЬОГО СКЛЕЮВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ ПОЛІМЕРНИМИ МАТЕРІАЛАМИ**

*В роботі наведено результати досліджень попереднього склеювання деталей легкої промисловості, а саме деталей зі шкіри та штучної шкіри у пакет. Запропоновано зонну нанесення полімерного клеючого матеріалу, та визначеного значення міцності для різних типів пакетів. Отримані дані показують, що для забезпечення необхідної міцності попередньо склеєних деталей цілком можливо використання запропонованого зонного нанесення полімерного клеючого матеріалу. Значення міцності достатньо для подальшого транспортування деталей легкої промисловості на подальшу технологічну позицію без зміщення. Це може бути використано для систем автоматизованого складання заготовок верху взуття, зшивання, маніпулювання тощо.*

*Ключові слова: полімер, склеювання, адгезія, легка промисловість.*

HORIASHCHENKO Serhiy, HOLINKA Ievgeniia,  
DRAPAK Georhiy, HORIASHCHENKO Kostyantun, POLISHCHUK Oleg  
Khmelnitskyi National University

## **RESEARCH OF TRANSVERSE GLUING OF LIGHT INDUSTRY PARTS WITH POLIMERIC MATERIALS**

*The paper presents the results of research on the preliminary gluing of parts of light industry, namely parts made of leather and artificial leather into a package. Zonal application of polymer adhesive material and a defined strength value for different types of packages are proposed. The relative displacement of the parts will lead to a violation of the integrity of the package and the destruction of the adhesive bond between them. That is, any relative displacement of the parts must lead to the destruction of their previously set position and is considered unacceptable. Therefore, determining the strength of the adhesive fixation of parts, which keeps them in a given position and determines the main task of the research. The substance used as an adhesive must ensure the fixation of the details of the shoe upper in a short period of time. This time is necessary only for the formation and stitching of a package of parts and depends on the parameters of the technological process and the performance of the equipment. In our case, when a pair of shoe upper blanks must be formed in one minute.*

*To accurately determine the strength of the adhesive interaction between two parts, it is proposed to use the method of shifting (tearing) the adhesive joint. It was taken into account that natural and artificial leather have front and back sides that differ from each other. Namely, the dorsal side has larger capillary radii and greater porosity than the front side. Polymer material for gluing - Desmocol - was also chosen for research. The obtained values made it possible to form a general characteristic of the strength of adhesive joints for this type of polymer material used as glue. The obtained data show that it is quite possible to use the proposed zonal application of polymer adhesive material to ensure the non-slip strength of pre-glued parts. The strength value is sufficient for the further transportation of parts of the light industry to the next technological position without displacement. This can be used for systems of automated assembly of shoe upper blanks, stitching, manipulation, etc.*

*Key words: polymer, gluing, adhesion, light industry.*

### **Постановка проблеми у загальному вигляді**

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

Автоматизоване склеювання може супроводжуватись відносним зміщенням деталей при формуванні пакету та його скріпленні. Аналітичні дослідження дозволяють виконати кількісну оцінку величини сили адгезивної фіксації деталей у пакеті. Відносне зміщення деталей призведе до порушення цілісності пакету і руйнування адгезійного зв'язку між ними. Тобто будь-яке відносне зміщення деталей має призвести до руйнування попередньо заданого їм положення і вважається неприпустимим. Тому визначення сили адгезивної фіксації деталей, що утримує їх у заданому положенні і визначає основну задачу досліджень.

### Аналіз досліджень та публікацій

Для виконання адгезивного методу фіксації деталей слід розглянути процес нанесення шару речовини.

В багатьох роботах [1, 2, 3, 4] розглядаються методи попередньої фіксації стопки деталей за допомогою клею та визначенню міцності. Речовина наноситься перед накладанням деталей, що сприяє створенню додаткових сил зчеплення між ними, і обумовлює виникнення сили фіксації. Сила фіксації деталей - це сила адгезивної взаємодії речовини та деталі, що залежить від значення сили міжмолекулярного зчеплення рідини [1]. Крім того, сила фіксації призводить до протидії силам деформації деталей, які можуть загинати їх краї. Вказані деформації можуть з'являтися через релаксаційні явища, які мають місце після виготовлення деталей.

Як свідчать дослідження [2, 3, 4] нанесення на деталь шару речовини супроводжуються протіканням нищезгаданих явищ:

1. Змочування поверхні деталі вершу взуття;
2. капілярне проникнення речовини у структуру пористого матеріалу деталей вершу взуття;

Речовина, яка використовується у якості адгезиву, повинна забезпечити фіксацію деталей вершу взуття на короткому проміжку часу. Цей час необхідний лише для утворення та зшивання пакету деталей і залежить від параметрів технологічного процесу та продуктивності обладнання. У нашому випадку, коли пара заготовок вершу взуття повинна утворитися за одну хвилину, весь технологічний час складається з часу виконання окремих операцій процесу: їх спряження деталей, пресування, транспортування та зшивання. Тому процес капілярного проникнення повинен відбутися менш ніж за хвилину [5].

Фіксація матеріалу на границі речовина - матеріал відбувається завдяки силам, які можливо розглянути на основі електрорелаксаційної теорії [3, 6]. Згідно з цією теорією, сили зчеплення виникають при взаємодії атомів рідини та твердого тіла і будуть залежати від площі контакту поверхонь та ступеня їх змочування. Запропонований підхід, дозволяє розглянути процес змочування як гідродинамічне розтікання рідини по поверхні твердого тіла, а краплину рідини - як квазістаціонарну форму.

Технічні вимоги до взуттєвих клейв визначаються залежно від тих навантажень, які відчувають ті чи інші клейові з'єднання в конструкції взуття при її експлуатації.

Однак існують загальні вимоги до взуттєвих клейв, що стосуються їх технологічності і стабільності при зберіганні. Клей повинен мати певну в'язкість, що забезпечує його легкий розподіл по склеювальній поверхні: занадто висока в'язкість перешкоджає розтіканню клею по склеюваній поверхні, низька в'язкість сприяє стіканню його з поверхні, не забезпечуючи створення клейової плівки необхідної товщини.

Оптимальна в'язкість взуттєвих клейв знаходиться в межах 0,2 - 0,7 Па - а важливою технологічною характеристикою взуттєвих клейв є "відкритий" час, тобто час, протягом якого клейова плівка зберігає клейкість. Найбільше відкритий час мають клеї на основі каучуків - 20 - 30 хв. Для клейв - розплавів "відкрите" час варіюється в інтервалі 5-10 с.

Взуттєві клеї повинні бути швидкосклеювані і швидковисихаючими. Швидкість схоплювання взуттєвих клейв залежить від їх хімічного складу і знаходиться в межах від декількох секунд ( для клейв - розплавів ) до десятків хвилин ( для клейв на органічних розчинниках ). Швидкість схоплювання клею визначається по зростанню міцності склеювання в часі.

Стабільність клейової композиції характеризуються тривалістю збереження її технологічних властивостей в первод зберігання і використання.

Клей повинен зберігати робочу в'язкість, нерозшаровуватися на окремі фази, що не структуруються до нанесення його на поверхні, що склеюються. Латексний клей не повинен коагулювати в процесі зберігання. Клеї тваринного або рослинного походження не повинні загнівати.

Основним показником якості клею вважається міцність склеювання зразків матеріалів вершу і низу взуття при розшаровуванні. Визначаються міцність склеювання через 1 хв. після пресування, що характеризує швидкість схоплювання клею.

Для приклеювання підошов використовують поліхлоропренові і поліуретанові клеї, деякі види комбінованих клейв. Для клейового з'єднання застосовують поліхлоропренові клеї у вигляді розчинів в органічних розчинниках і у вигляді латексів, а також клеї-розплави. Міцність склеювання при зсуві нормується при виконанні операції клейового з'єднання, оскільки клейове з'єднання в цьому випадку має протистояти напруженням зсуву, що виникають відразу ж після закінчення процесу формування і розвиваються в процесі експлуатації взуття. Нормативний показник становить 1,2 - 5 - 1,6 МПа.

Міцність склеювання на допоміжних операціях може бути порівняно невисокою - 0,8 - 1,0 кН/м. На таких операціях використовують переважно клеї на основі бутадієн - стирольних латексів, полівінілацетатні дисперсії, клеї з натурального каучуку і в незначній кількості мездрові клеї та клеї з харчової сировини - декстриново - борошняні та казеїнові.

### Виклад основного матеріалу

З метою визначення параметра оптимізації та вибору схеми планування експерименту був проведений аналіз апріорної інформації [5, 13]. Аналіз дозволив встановити фактори від яких залежать кількісні та якісні показники які впливають на якість клейового з'єднання. На основі цього аналізу зроблені висновки, що при утворенні пакету деталей, на значення міцності клейового з'єднання впливають:

- фізичні властивості матеріалу;
- фізичні властивості рідини;
- площа контакту матеріалів;
- кількість рідини, що наноситься.

В свою чергу деякі з цих факторів є похідними геометричних та технологічних параметрів пристрою для складання деталей, що дозволить проводити дослідження оперуючи останніми. Виходячи з цього, розділимо змінні параметри експериментальної установки на групи згідно їх зв'язків з вищевизначеними факторами.

Незалежними параметрами є властивості рідини та матеріалів деталей. Площа контакту залежить від кількості рідини, що наноситься на поверхню деталей, і контактує з деталями. Температура залежить від середовища в якому експлуатується взуття. Після проведених пошукових експериментів виявлено значення необхідної кількості рідини для певної площі контакту. Значення кількості рідини, що наноситься, при дослідженнях вибрано:  $(0,1..0,2) \cdot 10^{-7} \text{ м}^3$  - для лицьової сторони таких матеріалів, як натуральна та штучна шкіра. Отже для системи "деталь-рідина-деталь" при проведенні експериментальних досліджень ефективність підвищення точності вимірювання міцності клейового з'єднання визначалась наступними показниками: часом пресування; кількістю рідини, що наноситься.

Якість клейового з'єднання в експериментальній установці визначалась за допомогою системи вимірювань і запису [5, 6]. Кількість рідини наносилась в відповідності до визначених раніше її об'ємів. Час пресування обумовлений продуктивністю пристрою для автоматизованого розривання. Він не повинен перевищувати 2 хв. і тому діапазон значень часу пресування склав від 30с до 2 хв. Отже було вибрано час - 1 хв.

Для проведення експерименту вибрані зразки, що представлені у таблиці 1. Розміри зразків взяті згідно з ГОСТ 14759-69. Характеристики полімерних матеріалів представлені у таблиці 2 [8, 10].

Таблиця 1

## Характеристики матеріалів верху взуття

Матеріал	Красівий кут змочення, $\cos \theta$	Середній радіус капілярів, м	Пористість матеріалу, %
Синтетична шкіра СК-2 ГОСТ 16119-70	0,2756	$9,55 \cdot 10^{-7}$	80
Шкіра яловичина ГОСТ 939-75	0,61	$1,05 \cdot 10^{-7}$	35

Таблиця 2

## Характеристика полімерних клеїв

Назва клею	Температура застигання, °C	Час досягнення максимальної міцності, хв
Наірит	15-20	7-10
Десмокол	20	2880
88 універсальний	20	1200

Для точного визначення сили адгезивної взаємодії між двома деталями, запропоновано використати метод зсуву (розриву) клейового з'єднання [8]. Такій підхід, на наш погляд, цілком виправданий, тому що на деталі буде діяти сила, яка направлена вздовж їх поверхні, так як це може призвести до зміни положення деталі у просторі, і, як наслідок, виникне похибка базування. Це дозволяє визначити значення сил зчеплення деталей, що дає змогу порівняти їх з силами, які будуть діяти на ці деталі при подальшій її експлуатації [7].

Було враховано те, що натуральна та штучна шкіри мають лицьову та бахтармянну сторони, які відрізняються між собою. А саме, бахтармяна сторона має більші радіуси капілярів та більшу пористість ніж лицьова. Також обираємо для подальших досліджень полімерний матеріал для склеювання – Десмокол.

Для попередньої клейової фіксації деталей використаємо схему нанесення клею згідно рис.1, де 1 – верхня деталь, 2 – нижня базова деталь, 3 – місця нанесення полімерних скріплюючих матеріалів. Для зразків, розміри яких відповідають вимогам для визначення зусилля скріплення на розривних машинах вибрано зони нанесення полімерного адгезиву по 4-м точкам.

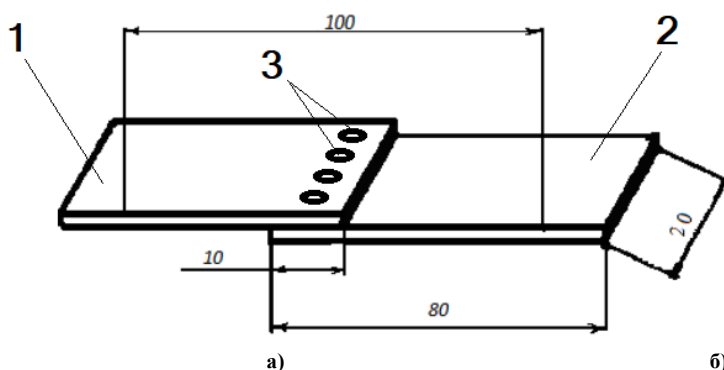


Рис. 1. Схема попередньої фіксації двох зразків деталей (а) та їх закріплення на розривній машині (б).

Прийняті наступні змінні фактори: температура в клейовому з'єднанні –  $P$ ; час до розриву –  $t$ ; - площа клейового шва (4 ділянки з діаметрами до 5 мм) складала до 80 мм<sup>2</sup>.

Результати деяких експериментальних даних залежності міцності від часу до розриву показані на рис.2. Значення величини сили розриву дозволило визначити міцність клейового шва та відповідно стійкість його до зовнішнього навантаження зсува. Отримані графічні залежності міцності склеювання, що показані на рис. 2. Характеризують перехідний процес, що відбувається у попередньо склеєних деталей легкої промисловості.

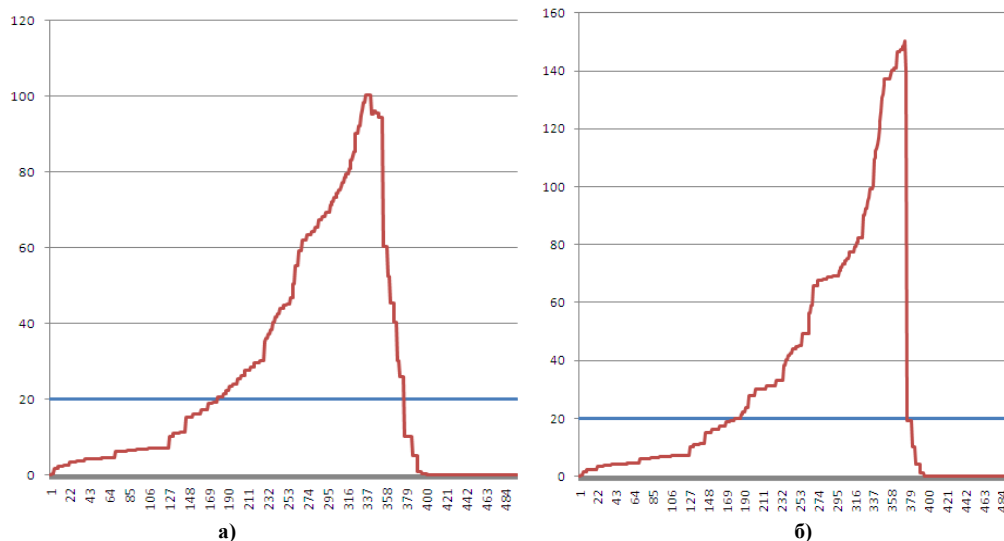


Рис. 2. Графік залежності міцності склеювання пакету деталей з натуральної шкіри (а) та пакету деталей зі штучної шкіри (б)

Після проведення експерименту були отримані рівняння регресії для декількох пакетів деталей легкої промисловості, а саме для пакету штучна-натуральна шкіра:

$$F_1(P, t) := 7 + 4,65 \cdot P - 2,0 \cdot t + 3,12 \cdot P \cdot t, \quad (1)$$

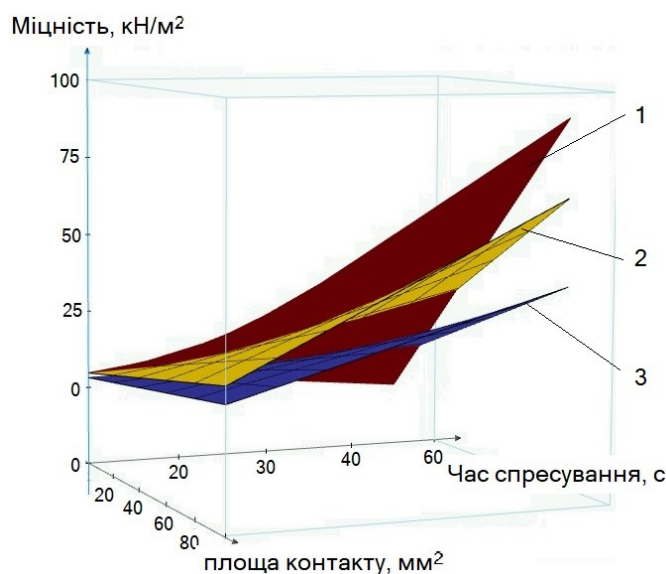
для пакета натуральна - натуральна шкіра:

$$F_1(P, t) := 10 + 5,7 \cdot P - 8,2 \cdot t + 5,12 \cdot P \cdot t, \quad (2)$$

для пакета штучна - штучна шкіра:

$$F_1(P, t) := 13 + 11,6 \cdot P - 14,8 \cdot t + 8,3 \cdot P \cdot t. \quad (3)$$

Отриманні значення дозволили сформувати загальну характеристику міцності клеєвих з'єднань для даного типу полімерного матеріалу, що використовувався у якості клею. Отриманий результат показано на рис.3.



1 – пакет деталей шкіра-шкіра, 2- пакет деталей шкіра- штучна шкіра, 3 – пакет деталей штучна шкіра, штучна шкіра.

Рис. 3. Залежність міцності від площі контакту з полімерним матеріалом та часу пресування

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

З отриманих даних можемо зробити висновок, що для забезпечення необхідної міцності попередньо склеєних деталей цілком можливо використання зонного нанесення полегшеного клеючого матеріалу. Цього достатньо для подальшого транспортування деталей легкої промисловості на подальшу технологічну позицію без зміщення. Це може бути використано для систем атоматизованого складання заготовок верху взуття, зшивання, маніпулювання тощо.

Крім того зонне нанесення полімерів забезпечує подальшу більшу гнчкість вже сформованого пакету деталей при формуванні просторової заготовки.

### Література

1. Pashkevich K. Study of Properties of Overcoating Fabrics during Design of Women's Clothes in Different Forms / K. Pashkevich, M. Kolosnichenko, O. Yezhova, O. Kolosnichenko // *Tekstilec* 61 (4), p. 224-234. DOI: 10.14502/Tekstilec2018.61.2..
2. Гавенко С. Ф. Кінетика пошкодження і руйнування клейових з'єднань при експлуатації / С. Ф. Гавенко // *Поліграф. і вид. справа*. 2012. № 3. С. 91–96
3. Suzanne Wilson-Higgins. Trends in book manufacturing on-demand. The Impact of Print-On-Demand on Academic Books. 2018. pp. 119–132
4. Палюх О. О. Експериментальне визначення міцності склеєних зразків паперу і картону для виготовлення книжково-журнальних обкладинок і палітурок різних конструкцій / О. О. Палюх // *Технологія і техніка друкарства*. 2017. № 4(58). С. 11–24. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(58\).2017.132540](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(58).2017.132540).
5. Єжова, О. В. Технологія оброблення швейних виробів: Навчальний посібник / О. В. Єжова, О. В. Гур'янова. – К.: Центр учбової літератури, 2017. – 256 с.
6. Баженов, С.Л. Полімерні композиційні матеріали: міцність і технологія / С.Л. Баженов, А.А. Берлін, А.А. Кульків, В.Г. Ошмянні. - Долгопрудний: Видавничий Дім «Інтелект». - 2010. - 352 с.
7. Тараскін, Н.Ю. Особливості методики дослідження властивостей полімерних композиційних матеріалів методом динамомеханічного аналізу / Н.Ю. Тараскін, Є.К. Філіна, Г.В. Малишева // *Усі матеріали. Енциклопедичний довідник*. - 2014. - №7. - С. 9-13.
8. Темніків, В.Н., Застосування полімерних матеріалів при технічному обслуговуванні та ремонті машин: монографія / В.М. Темніків, В.І. Башкирцев, Ю.В. Башкирцев. - М.: ФГБОУ «РІАМА». - 2011. - 229 с.
9. Camillo, J. Riveting: Self-Piercing Rivets vs. Spot Welding / J.Camillo// *Assembly Magazine*. - 2010. - December 23.
10. Матеріали та вироби текстильні і шкіряні побутового призначення. Основні гігієнічні вимоги: ДСТУ 4239-2003 – [Чинний від 01-10-2004]. – К.: Держспоживстандарт України, 2004. – 24 с
11. Horiashchenko S. Research Spray and Device for Polymer Coatings on Fabric/ *Mechanika* 2015 Proceedings Of The 20th International Scientific Conference, Kaunas - 2015, p.101-104
12. Simulation and Research of the Nozzle with an Ultrasonic Resonator for Spraying Polymeric Materials / S. Horiashchenko, I. Golinka, A. Bubulis, V. Jurenas // *Mechanika*. – 2018. – Vol. 24, No 1. – P. 61-64.
13. Musiał, J.; Horiashchenko, S.; Polasik, R.; Musiał, J.; Kałaczyński, T.; Matuszewski, M.; Śrutek, M. Abrasion Wear Resistance of Polymer Constructional Materials for Rapid Prototyping and Tool-Making Industry. *Polymers* 2020, 12, 873.

### References

1. Pashkevich K. Study of Properties of Overcoating Fabrics during Design of Women's Clothes in Different Forms / K. Pashkevich, M. Kolosnichenko, O. Yezhova, O. Kolosnichenko // *Tekstilec* 61 (4), p. 224-234. DOI: 10.14502/Tekstilec2018.61.2..
2. Havenko S. F. Kinetika poskodzhennya i ruynuvannya klejovyx z'yednan' pry ekspluatatsiyi / S. F. Havenko // *Polihraf. i vyd. справа*. 2012. № 3. S. 91–96
3. Suzanne Wilson-Higgins. Trends in book manufacturing on-demand. The Impact of Print-On-Demand on Academic Books. 2018. pp. 119–132
4. Palyux O. O. Eksperymental'ne vyznachennya micnosti skleyenix zrazkiv paperu i kartonu dlya vyhotovlennya knyzhkovozhurnal'nyx obkladynok i paliturok riznykh konstrukcij / O. O. Palyux // *Technolohiya i texnika drukarstva*. 2017. № 4(58). S. 11–24. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(58\).2017.132540](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(58).2017.132540).
5. Yezhova, O. V. Technolohiya obroblyennya shveyjnyx vyrobiv: Navchal'nyj posibnyk / O. V. Yezhova, O. V. Hur'yanova. – K.: Centr uchbovoyi literatury, 2017. – 256 s.
6. Bazhenov, S.L. Polimerni kompozycijni materialy: micnist' i tehnolohiya / S.L. Bazhenov, A.A. Berlin, A.A. Kul'kiv, V.H. Oshmyany. - Dolhoprudnyj: Vydavnychyj Dim «Intelekt». - 2010. - 352 s.
7. Taraskin, N.Yu. Osoblyvosti metodyky doslidzhennya vlastyvostej polimernyx kompozycijnyx materialiv metodom dinamomexanicheskoho analizu / N.Yu. Taraskin, Ye.K. Filina, H.V. Malysheva // *Usi materialy. Encyklopedychnyj dovidnyk*. - 2014. - №7. - S. 9-13.
8. Temnykiv, V.N., Zastosuvannya polimernyx materialiv pry texnichnomu obsluhovuvanni ta remonti mashyn: monohrafiya / V.M. Temnykiv, V.I. Bashkyrcev, Yu.V. Bashkyrcev. - M.: FHBOU «RIAMA». - 2011. - 229 s.
9. Camillo, J. Riveting: Self-Piercing Rivets vs. Spot Welding / J.Camillo// *Assembly Magazine*. - 2010. - December 23.
10. Materialy ta vyroby tekstyl'ni i shkiryani pobutovoho pryznachennya. Osnovni hihiyenichni vymohy: DSTU 4239-2003 – [Chynnyj vid 01-10-2004]. – K.: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2004. – 24 s
11. Horiashchenko S. Research Spray and Device for Polymer Coatings on Fabric/ *Mechanika* 2015 Proceedings Of The 20th International Scientific Conference, Kaunas - 2015, p.101-104
12. Simulation and Research of the Nozzle with an Ultrasonic Resonator for Spraying Polymeric Materials / S. Horiashchenko, I. Golinka, A. Bubulis, V. Jurenas // *Mechanika*. – 2018. – Vol. 24, No 1. – P. 61-64.
13. Musiał, J.; Horiashchenko, S.; Polasik, R.; Musiał, J.; Kałaczyński, T.; Matuszewski, M.; Śrutek, M. Abrasion Wear Resistance of Polymer Constructional Materials for Rapid Prototyping and Tool-Making Industry. *Polymers* 2020, 12, 873.

Надійшла/Paper received : 14.09.2022 p. Надрукована/Printed : 01.11.2022 p.



ЛІП'ЯНИНА-ГОНЧАРЕНКО Христина

Західноукраїнський національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-2441-6292>e-mail: [xrustya.com@gmail.com](mailto:xrustya.com@gmail.com)

КОМАР Мирослав

Західноукраїнський національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-6541-0359>e-mail: [mko@wunu.edu.ua](mailto:mko@wunu.edu.ua)

САЧЕНКО Анатолій

Західноукраїнський національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-0907-3682>e-mail: [as@wunu.edu.ua](mailto:as@wunu.edu.ua)

ЛЕНДЮК Тарас

Західноукраїнський національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-9484-8333>e-mail: [tl@wunu.edu.ua](mailto:tl@wunu.edu.ua)

## МЕТОД ФОРМУВАННЯ КОНТЕКСТУ РЕКЛАМИ ТА ЦІЛЬОВОЇ АУДИТОРІЇ НА ОСНОВІ НАВЧАННЯ АСОЦІАТИВНИХ ПРАВИЛ

Сьогодні важливими механізмами вивчення є контент та механізми його творення, проблеми впливу на цільову аудиторію, яка сама прагне формувати комунікаційні процеси. Інтернет-контент займає позиції потужної комунікаційної технології, яка продовжує стрімко розвиватися та набирати впливовості. Формування великої кількості рекламних оголошень, особливо текстів, обходиться надзвичайно дорого. Тому варто продумати, як можна генерувати ці тексти автоматично. У зв'язку з цим можна вважати, що розробка методу формування контексту реклами та цільової аудиторії на основі навчання асоціативних правил є актуальною та дає можливість підвищити результативність рекламних оголошень, а відповідно і зменшення затрат на інтернет-рекламу закладів вищої освіти. У якості вхідних даних використано опитування студентів спеціальності «Комп'ютерні науки», стосовно вступу. В опитуванні прийняли участь 152 студентів, дали відповідь на 10 питань. З результатів, методу формування контексту реклами та цільової аудиторії на основі навчання асоціативних правил, результативність оголошення в соціальних мережах, збільшилась що найменше на 23%, а ціна зменшилась на 90%.

Ключові слова: аналіз даних, рекламний вміст, вивчення асоціативних правил, алгоритм апіорі, Фейсбук.

LIPIANINA-HONCHARENKO Khrystyna, KOMAR Myroslav,

SACHENKO Anatoliy, LENDIUK Taras

West Ukrainian National University

## METHOD OF FORMING THE CONTEXT OF ADVERTISING AND TARGET AUDIENCE BASED ON ASSOCIATIVE RULES LEARNING

Nowadays, important mechanisms of study are content and techniques of its creation, the problem of influencing the target audience, which itself seeks to shape communication processes. Internet content occupies a position of powerful communication technology, which continues to grow rapidly and gain influence. Creating a large number of advertisements, especially texts, is extremely expensive. Therefore, it is worth considering how generate these texts automatically. In this regard, it is possible to assume that the development of a method of forming the context of advertising and target audience based on learning associative rules is relevant and can increase the effectiveness of advertising, and thus reduce the cost of online advertising of higher education institutions. The input data used a survey of students majoring in Computer Science, regarding admission. The 152 students took part in the survey and answered 10 questions. The experimental results confirmed, the proposed method enabled to increase the effectiveness of advertising on social networks at least in 23%, and reduce the price in 90%.

Keywords: data analysis, advertising content, associative rules learning, apriori algorithm, Facebook

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

Значення реклами має вирішальне значення для компанії, оскільки лише це може зробити людей обізнаними про продукт компанії і, роблячи це, може створити хорошу можливість його продажу клієнтам [2]. Ручна робота великої кількості рекламних оголошень, особливо текстів, обходиться надзвичайно дорого. Тому варто продумати, як можна генерувати ці тексти автоматично.

У зв'язку з цим можна вважати, що розробка методу формування контексту реклами та цільової аудиторії на основі навчання асоціативних правил є актуальною та дає можливість підвищити результативність рекламних оголошень, а відповідно і зменшення затрат на інтернет-рекламу закладів вищої освіти.

Цій тематичі присвячена дана робота, яка розподілена наступним чином. В розділі 2 розглянуто аналіз пов'язаних робіт, розділ 3 представляє метод формування контексту реклами та цільової аудиторії на основі навчання асоціативних правил. Розділ 4 представляє реалізацію методу. Розділ 5 представляє висновки до дослідження.



### Аналіз досліджень та публікацій

З огляду на складність сучасної екосистеми цифрової реклами, є багато досліджень, що описують вплив рекламного вмісту в соціальних мережах на залучення клієнтів [19], використовуючи дані з Facebook в: медицині [20], психології [21], соціології [22], політиці [23] та ін.

У роботі [13] запропоновано модель, яка здатна використовувати свою стратегію націлювання відповідно до отриманих відгуків. Ця модель використовує алгоритм Thompson Sampling, застосований до простору функцій користувачів. Запропоновано [1] набір моделей регресійного, кластерного аналізу та аналізу правил асоціацій для пошуку закономірностей поведінки користувачів щодо маркетингових кампаній з урахуванням характеристик користувачів та фінансово значущих показників.

Метою [12] статті є вивчення аналізу даних соціальних медіа за допомогою інструментів машинного навчання; цей новий підхід до розробки маркетингової стратегії в соціальних мережах використовує середовище Waikato для аналізу знань (WEKA). У [5] статті реалізували рівень аспекту аналізу настроїв, на основі алгоритмів машинного навчання класифікації SVM і NB.

У [17] дослідженні проаналізовано різноманітні потреби клієнтів, зосередившись на інтернет-рекламі на основі методів класифікації, сегментування та кластеризації. У роботі [16] проаналізовано модель підбору оптимальної кількості реклами на різних інтернет-ресурсах, щоб максимально досягти бажаного охоплення цільової аудиторії. Також, розглянуто метод багатокритерії оптимізації з визначенням отриманої об'єктивної функції, що дозволяє одночасно розглядати різні аспекти проблем вибору засобів масової інформації та оптимального бюджетування та бюджетного розподілу. Запропонований підхід [2] витягує знання, які можуть підтримувати декілька рішень, починаючи від маркетингових кампаній для кожного сегмента клієнтів, переробки макета магазину до рекомендацій щодо продуктів. У цій [15] роботі в основному досліджується розвиток рекламного художнього дизайну на основі інформаційних технологій.

У дослідженні [4] пропонується застосувати навчання правил асоціацій для пошуку впливових блогерів у часі за допомогою алгоритму Apriori. Запропоновано [9] вдосконалений алгоритм Apriori, щоб виявити взаємозв'язки між ТЕСР і тридцятьма п'ятьма факторами, які охоплюють чотири категорії характеристик домогосподарства, включаючи характеристики житла, соціально-демографічні, побутові прилади та опалення, а також ставлення до енергії. У роботі [10] запропоновано нову ефективну систему рекомендацій на основі алгоритму Apriori для вимог користувачів.

У статті [18] запропоновано генерування рекламних текстів на основі ключових слів, які враховують інформацію про продукт. У цьому [3] дослідженні розробляємо веб-систему рекомендацій щодо вибору нерухомості за допомогою методу фільтрації на основі вмісту. Система рекомендацій надає інформацію про властивості на основі поведінки користувача шляхом пошуку рекламного вмісту, який раніше шукав користувач. Дана робота [11] представляє інтелектуальну систему управління рекламою в соціальних мережах, на основі методів аналізу даних, щоб автоматично створювати оголошення.

Згадані вище роботи здебільшого аналізують дії користувачів на інтернет-рекламу. Також є ряд робіт, що представляють дослідження методів навчання асоціативних правил. Ще є роботи, що використовують різні підходи для формування контенту та цільової аудиторії інтернет-реклами (аналоги).

У зв'язку із цим, метою даної статті є розробка методу формування контексту реклами та цільової аудиторії на основі навчання асоціативних правил.

На відміну від аналогів [3, 11, 18] розроблений методу формування контексту реклами та цільової аудиторії на основі навчання асоціативних правил, дозволить сформувати правила між відповідями респондентів для формування рекламного контенту та визначення цільової групи.

Новизною роботи є формування найвигіднішого (в економічному аспекті) тексту реклами ЗВО та відповідної цільової групи, що дозволить збільшити результативність рекламної кампанії на основі навчання асоціативних правил.

### Виклад основного матеріалу

Для зменшення часових витрат на формування рекламного контенту для цільової аудиторії авторами розроблено метод формування контексту реклами та цільової аудиторії на основі навчання асоціативних правил. Запропонований метод ілюструється схематично (Рис. 1) та представлений наступними кроками:

Крок 1. Проводимо опитування студентів (Блок 1). Важливим є визначення гендерних особливостей респондентів, адже це дасть можливість визначити в подальшому цільову аудиторію. Перетворення у csv формат (Блок 2).

Крок 2. Розрахунок підтримки для кожного окремого елемента (Блок 3). Підтримка – це просто кількість транзакцій, під час яких відбувається певний продукт (або комбінація продуктів).

Крок 3. Перетворення даних в список (Блок 4).

Крок 4. Запуск (Блок 5) навчання асоціативних правил на основі методу Apriori [6].

Крок 4.1. Пошук опори для частих наборів елементів (Блок 5.1). Пошук пар елементів, які найчастіше з'являються в парі. Алгоритм Apriori ігнорує всі пари, які містять будь-який з елементів, які рідко з'являються (Блок 5.2).

Крок 4.2. Формування правил (Блок 5.3). Найбільші часті набори елементів, перетворюються в правила асоціації, у форматі: Елемент X => Елемент Y.

Крок 4.3. Обчислення впевненості (Блок 5.4). Впевненість говорить про відсоток випадків, у яких це правило діє.

Крок 4.3. Обчислення ліфта (Блок 5.5). Підняття правила — це показник ефективності, який вказує на міцність зв'язку між продуктами в правилі. Підняття правила визначається наступною формулою:

$$lift = \frac{P(X \cap Y)}{P(X) \times P(Y)}$$

де, P – ймовірність частоти поєднання елементів у сформованому правилі.

Крок 5. Вивід результатів-правил (Блок 6).

Крок 6. Формування контексту реклами та цільової аудиторії (Блок 7), для закладів вищої освіти на основі отриманих правил.

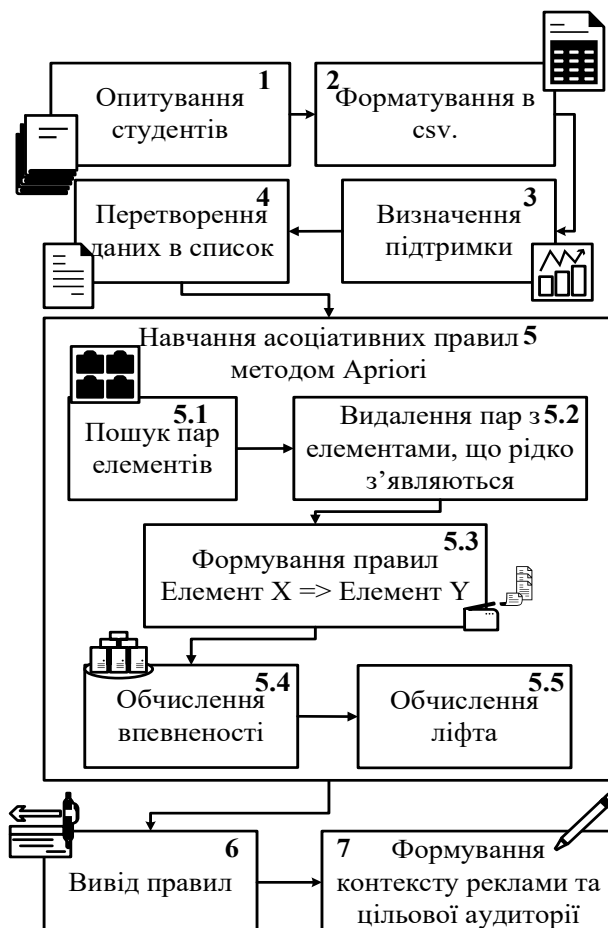


Рис. 1. Алгоритмічна структура формування контексту реклами та цільової аудиторії на основі навчання асоціативних правил

Для проведення методу формування контексту реклами та цільової аудиторії на основі навчання асоціативних правил обрано мову Python.

У якості вхідних даних використано опитування студентів спеціальності «Комп'ютерні науки», стосовно вступу. В опитуванні прийняли участь 152 студентів, дали відповідь на 10 питань. Всі відзиви студентів сформовані у формат .csv.

Перш ніж запуснути аналіз правил асоціації, спочатку визначимо розподіл частоти елементів (рис.2). З діаграми видно, що найбільше респондентів чоловічої статі, також найбільше відповідей дано, про те, що інформацію самостійно знайшли в соціальних мережах спеціальності «Комп'ютерні науки».

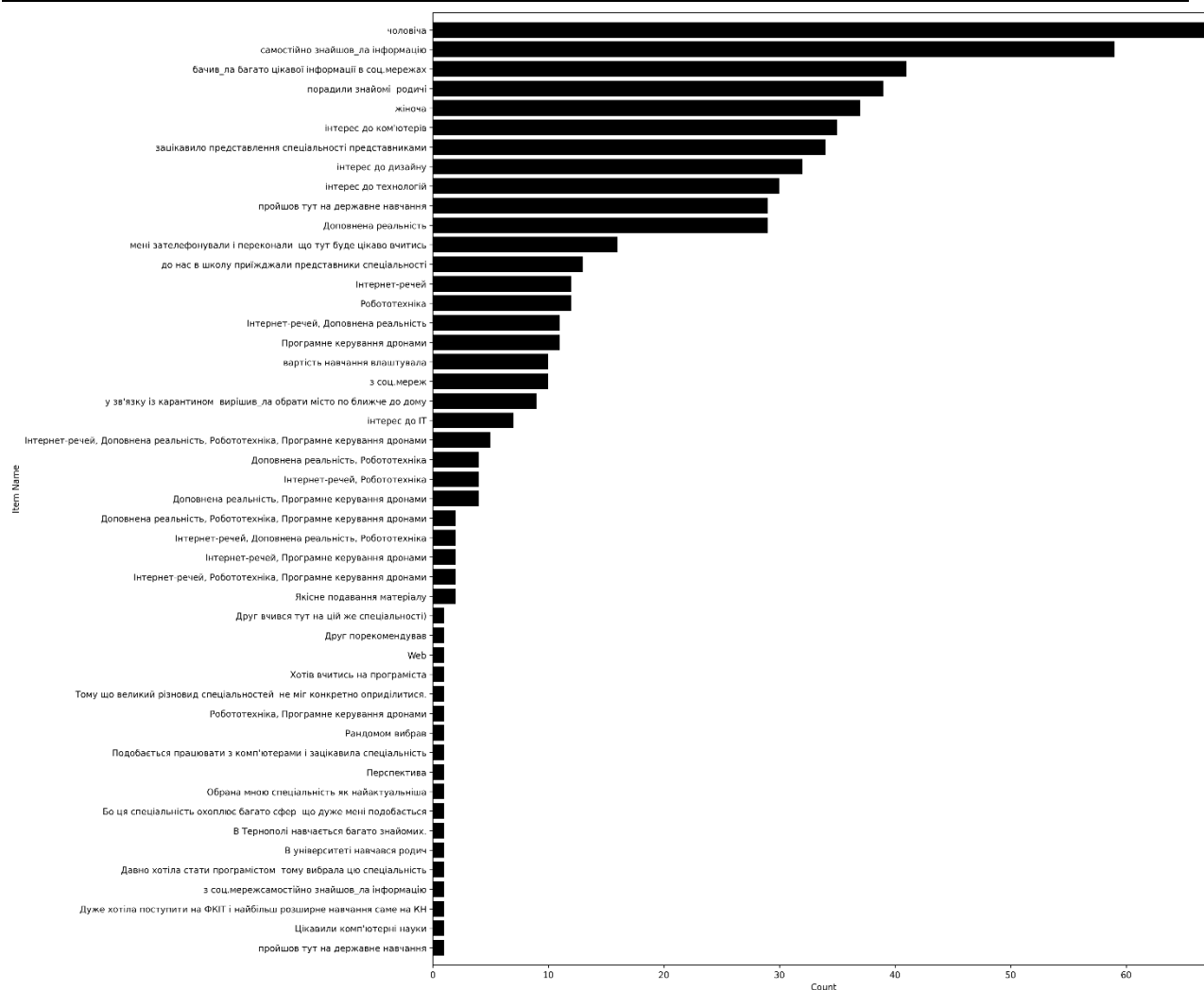


Рис. 2. Частота відповідей

Крім того, важливо зазначити, що навіть найбільш часта відповідь більше ніж 11% – чоловіча (таблиця 1). Далі це використаємо цю інформацію як орієнтир при встановленні мінімального порогу підтримки.

Таблиця 1

## Найбільш часті відповіді

index	Item	Count	Percentage
13	Доповнена реальність	29	0.04931972789115646
40	пройшов тут на державне навчання	29	0.04931972789115646
47	інтерес до технологій	30	0.05102040816326531
45	інтерес до дизайну	32	0.05442176870748299
37	зацікавило представлення спеціальності представниками	34	0.05782312925170068
46	інтерес до комп'ютерів	35	0.05952380952380952
34	жіноча	37	0.06292517006802721
39	порадили знайомі родичі	39	0.0663265306122449
31	бачив(ла) багато цікавої інформації в соц.мережах	41	0.06972789115646258
41	самостійно знайшов(ла) інформацію	59	0.10034013605442177
43	чоловіча	67	0.11394557823129252

Після перетворення датасету у потрібний список виведемо результати, а саме правила, які в подальшому, дадуть можливість сформулювати контекст реклами та цільові групи.

Отже, після запуску алгоритму згенеровано:

- Підрахунок наборів предметів довжиною 1:
  - Знайдено 48 кандидатів на набори довжиною 1;
  - Знайдено 15 великих наборів предметів довжиною 1.
- Підрахунок наборів предметів довжиною 2:

- Знайдено 105 кандидатів на набори довжиною 2;
- Знайдено 32 великі набори предметів довжиною 2.

На основі експериментально визначених параметрів алгоритму проведено фільтрацію згенерованих правил.

Параметри:

$\min\_support=0.11$  – визначено, як відсоток найбільш частих відповідей;

$\min\_confidence=0.65$  – ця ймовірність визначення правил є достатньою та при експериментальних дослідженнях показала доволі хороші результати для цієї вибірки.

Правила:

- {чоловіча, інтерес до дизайну} -> {Доповнена реальність} (conf: 0.737, supp: 0.135, lift: 1.965, conv: 2.375);
- {порадили знайомі родичі, пройшов тут на державне навчання} -> {чоловіча} (conf: 1.000, supp: 0.115, lift: 1.552, conv: 355769230.769);
- {бачив\_ла багато цікавої інформації в соц.мережах, порадили знайомі родичі} -> {чоловіча} (conf: 0.857, supp: 0.115, lift: 1.330, conv: 2.490);
- {бачив\_ла багато цікавої інформації в соц.мережах, інтерес до технологій} -> {самостійно знайшов\_ла інформацію} (conf: 0.706, supp: 0.115, lift: 1.244, conv: 1.471);
- {самостійно знайшов\_ла інформацію, інтерес до комп'ютерів} -> {чоловіча} (conf: 0.800, supp: 0.154, lift: 1.242, conv: 1.779);
- {інтерес до технологій} -> {самостійно знайшов\_ла інформацію} (conf: 0.700, supp: 0.202, lift: 1.234, conv: 1.442);
- {пройшов тут на державне навчання} -> {чоловіча} (conf: 0.793, supp: 0.221, lift: 1.231, conv: 1.720);
- {порадили знайомі родичі, інтерес до дизайну} -> {чоловіча} (conf: 0.778, supp: 0.135, lift: 1.207, conv: 1.601);
- {інтерес до комп'ютерів} -> {чоловіча} (conf: 0.771, supp: 0.260, lift: 1.197, conv: 1.556);
- {Доповнена реальність} -> {чоловіча} (conf: 0.690, supp: 0.192, lift: 1.071, conv: 1.146);
- {бачив\_ла багато цікавої інформації в соц.мережах} -> {чоловіча} (conf: 0.659, supp: 0.260, lift: 1.022, conv: 1.042).

З отриманих правил практично у всіх згадується стать респондента (чоловіча), що говорить про основну цільову аудиторію для спеціальності «Комп'ютерні науки». Правила в котрих більше, як два елемента відповіді, дають можливість створити контент для реклами. Сформуємо кілька прикладів контенту (таблиця 2).

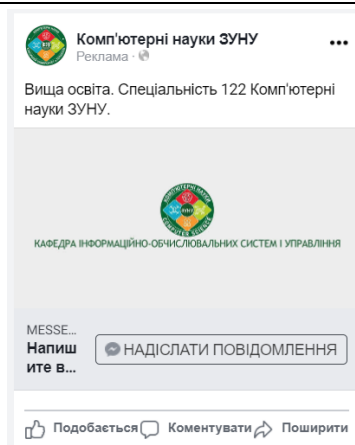
Таблиця 2

#### Формування контенту реклами відносно згенерованих правил

№ варіанту	Правило	Контент
1	{чоловіча, інтерес до дизайну} -> {Доповнена реальність}	Цікавить Дизайн, Спробуй Себе в Доповненій Реальності
2	{порадили знайомі родичі, пройшов тут на державне навчання} -> {чоловіча}	Нас Рекомендують, Коли Державне Навчання Важливо
3	{бачив(ла) багато цікавої інформації в соц.мережах, порадили знайомі родичі} -> {чоловіча}	Нас Рекомендують, Після Перегляду Наших Соціальний Мереж
4	{бачив(ла) багато цікавої інформації в соц.мережах, інтерес до технологій} -> {чоловіча}	Цікавлять Технології, Зайди на Наші Сторінки Соціальних Мереж, там Багато Цікавої Інформації
5	{самостійно знайшов(ла) інформацію, інтерес до комп'ютерів} -> {чоловіча}	Цікавить Робота з Комп'ютерами, Зайди на Наші Сторінки

Для порівняння ефективності сформованого рекламного контенту на основі навчання асоціативних правил проведено порівняльний експеримент в Facebook на бізнес сторінці «Комп'ютерні науки ЗУНУ». Перший варіант (Варіант 0) реклами (рис.3), розроблений на основі правил виділених в попередніх наукових дослідженнях, а саме:

- найбільшу взаємодію з відео рекламою Facebook «Комп'ютерні науки ТНЕУ» мали особи чоловічої статі у віковій категорії 18-25, 35-55 [7];
- найбільшу взаємодію з бізнес сторінкою Facebook «Комп'ютерні науки ТНЕУ» мали клієнти чоловічої статі та жіночої статі у віковій категорії 40-55 [8].



Варіант 0

Рис. 3. Попередня версія реклами «Комп'ютерні науки» Західноукраїнського національного університету в Facebook

На рисунку 4 представимо рекламу сформовано на основі навчання асоціативних правил проведено порівняльний експеримент в Facebook на бізнес сторінці «Комп'ютерні науки ЗУНУ». Контент використано з таблиці 2 та цільова аудиторія чоловіча стать для усіх вікових категорій.

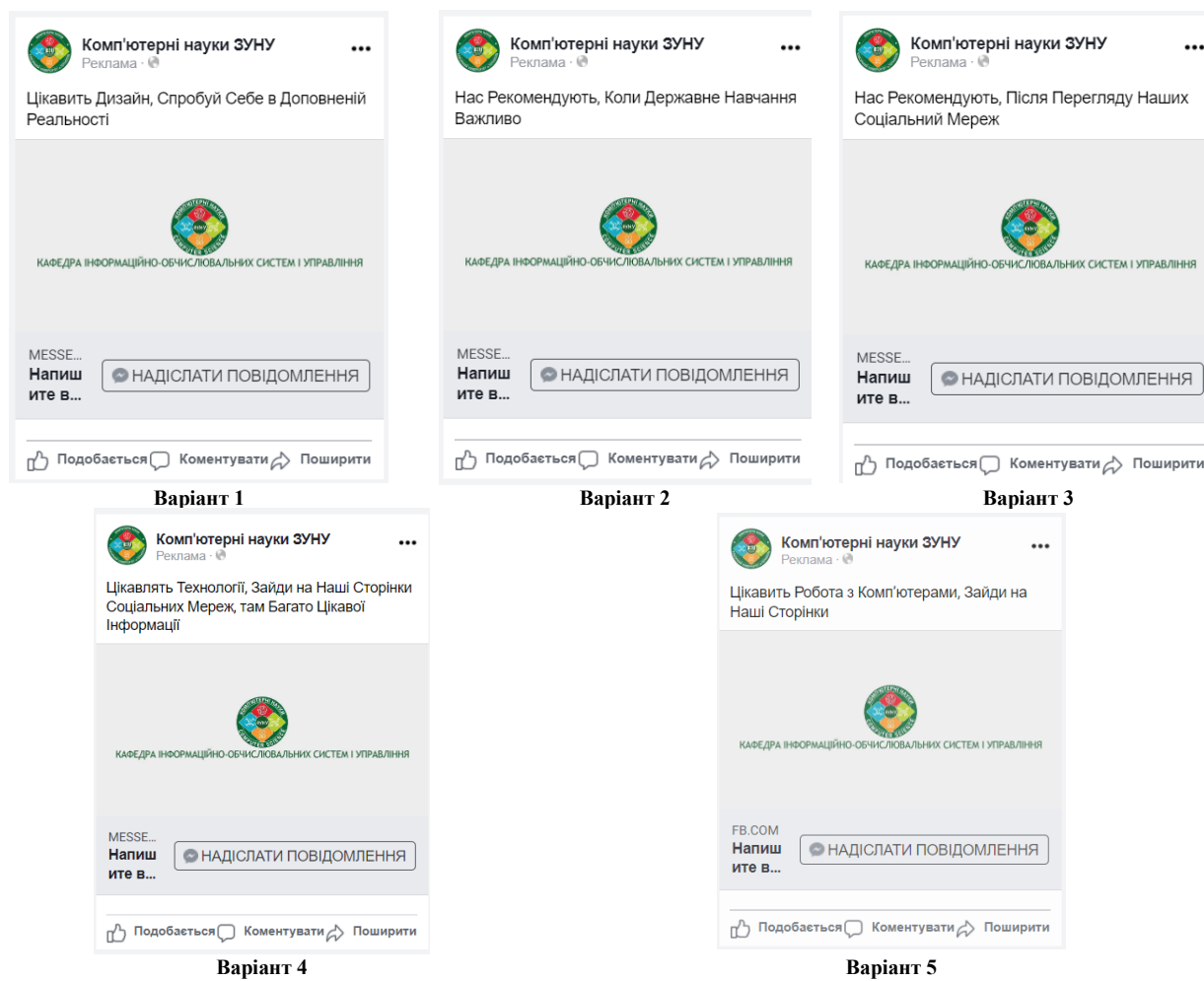


Рис. 4. Нові варіанти реклами «Комп'ютерні науки» Західноукраїнського національного університету в Facebook

В таблиці 3 представлено порівняння ефективності сформованого рекламного контенту на основі навчання асоціативних правил, в період з 4 травня 2021 р. по 31 травня 2021 р. зі всіма варіантами контенту, включаючи і старий.

Таблиця 3

Порівняння ефективності сформованого рекламного контенту								
Варіант реклами	Результати		Охоплення		Покази		Ціна за результат	
	Показник	Зміни	Показник	Зміни	Показник	Зміни	Показник	Зміни
Варіант 0	120	100%	4498	100%	5395	100%	0,23	100%
Варіант 1	147	123%	6561	146%	8776	163%	0,08	37%
Варіант 2	197	164%	6364	141%	6560	122%	0,06	25%
Варіант 3	240	200%	8561	190%	8192	152%	0,02	10%
Варіант 4	160	133%	5442	121%	6671	124%	0,12	53%
Варіант 5	196	163%	7024	156%	8867	164%	0,03	14%

З таблиці 3 видно, що всі варіанти нової реклами дали покращені результати. Показник результату показує, скільки разів з рекламою контактували клієнти. Найкраще себе показала реклама за варіантом 3 (рис. 5), адже він показав себе на 100% краще ніж варіант 0. Варіант 3 себе найкраще показав за всіма показниками. А саме за охопленням на 90% краще варіанту 0 та на 52% за кількістю показів. Також це дозволило зменшити ціну за результат на 90% у варіанті 3.

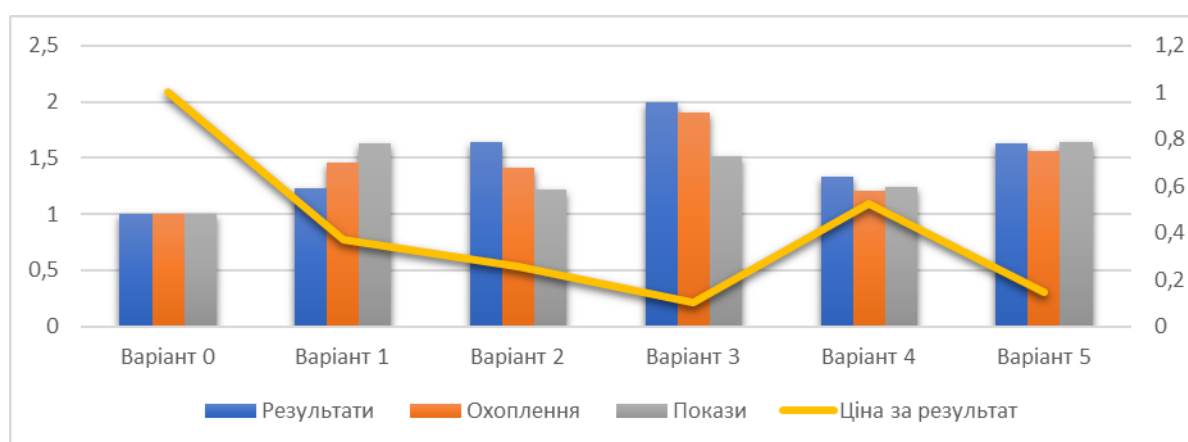


Рис. 5. Порівняння ефективності сформованого рекламного контенту

Отже, метод формування рекламного контенту закладів вищої освіти на основі навчання асоціативних правил, дозволяє збільшити результативність оголошення в соціальних мережах, що найменше на 23%, а ціну зменшити на до 90%. Автора вважають, що збільшенні кількості опитувань студентів дозволить збільшити якість навчання асоціативних правил, відповідно отримати кращі ключові слова для формування контенту, а значить збільшити результативність реклами та зменшити витрати на неї.

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

Розроблений метод формування контексту реклами та цільової аудиторії на основі навчання асоціативних правил дає можливість підвищити результативність рекламних оголошень, а відповідно і зменшення затрат на інтернет-рекламу закладів вищої освіти. Також, розроблений метод дозволить сформувати правила між відповідями респондентів для формування рекламного контенту та визначення цільової групи.

Для реалізації розробленого методу використано опитування студентів спеціальності «Комп'ютерні науки», стосовно вступу. В опитуванні прийняли участь 152 студентів, дали відповідь на 10 питань.

З результатів результативність оголошення в соціальних мережах, збільшилась що найменше на 23%, а ціна зменшилась на 90%. Автори вважають, що збільшенні кількості опитувань студентів дозволить збільшити якість навчання асоціативних правил, відповідно отримати кращі ключові слова для формування контенту, а значить збільшити результативність реклами та зменшити витрати на неї.

В подальшому автори планують розробити на основі цього та попередніх досліджень [7, 8], інформаційну систему, що дасть можливість автоматично формувати контент рекламного повідомлення та вибір цільової аудиторії на основі методів машинного навчання.

#### Література

1. Monastyrskaya M. M. Improving customer relationship management based on intelligent analysis of user behavior patterns / M. M. Monastyrskaya, V. I. Soloviev // Proceedings of the 2020 13th International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD), 2020. – P. 1-4. <https://doi.org/10.1109/MLSD49919.2020.9247718>.

2. Griva A. Retail business analytics: Customer visit segmentation using market basket data / A. Griva, C. Bardaki, K. Pramataris, Katerina, D. Papakriakopoulos // *Expert Systems with Applications*. – 2018. – Vol. 100. – P. 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.01.029>.
3. Badriyah T. Recommendation system for property search using content based filtering method / T. Badriyah, S. Azvy, W. Yuwono, I. Syarif // *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Information and Communications Technology (ICOIAC)*, 2018. – P. 25–29. <https://doi.org/10.1109/ICOIAC.2018.8350801>.
4. Shazad B. Finding temporal influential users in social media using association rule learning / B. Shazad, H. U. Khan, M. Farooq, A. Mahmood, I. Mehmood, S. Rho, Y. Nam // *Intelligent Automation and Soft Computing*. – 2020. – Vol. 26. – P. 87–98. <https://doi.org/10.31209/2019.100000130>.
5. Vanaja S. Aspect-level sentiment analysis on e-commerce data / S. Vanaja, M. Belwal // *Proceedings of the 2018 International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*, 2018. – P. 1275-1279. <https://doi.org/10.1109/ICIRCA.2018.8597286>.
6. Agrawal R. Fast algorithms for mining association rules / R. Agrawal, R. Srikant // *Proceedings of the 20th International Conference on Very Large Data Bases VLDB*, September 1994. – Vol. 1215. – P. 487-499.
7. Lipyana H. Targeting model of HEI video marketing based on classification tree / H. Lipyana, S. Sachenko, T. Lendyuk, A. Sachenko // *Proceedings of the 16th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer. Volume II: Workshops, ICTERI 2020, Kharkiv, Ukraine, 6-10 October 2020. – CEUR Workshop Proceedings*. – Vol. 2732. – P. 487-498. <http://ceur-ws.org/Vol-2732/20200487.pdf>.
8. Lipyana H. Decision tree based targeting model of customer interaction with business page / H. Lipyana, A. Sachenko, T. Lendyuk, S. Nadvynychny, S. Grodskyi // *Proceedings of the third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020)*, April 27 – May 1, 2020. – CEUR Workshop Proceedings. – Vol. 2608. – P. 1001–1012. <http://ceur-ws.org/Vol-2608/paper75.pdf>.
9. Wang F. Association rule mining based quantitative analysis approach of household characteristics impacts on residential electricity consumption patterns / F. Wang, K. Li, N. Duić, Z. Mi, B.-M. Hodge, M. Shafiekhah, J. P. S. Catalão // *Energy Conversion and Management*. – 2018. – Vol. 171. – P. 839–854. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.017>.
10. AlZu'bi S. A novel recommender system based on apriori algorithm for requirements engineering / S. AlZu'bi, B. Hawashin, M. EIBes and M. Al-Ayyoub // *Proceedings of the 2018 Fifth International Conference on Social Networks Analysis, Management and Security (SNAMS)*, 2018. – P. 323-327. <https://doi.org/10.1109/SNAMS.2018.8554909>.
11. Aguilar J. An adaptive intelligent management system of advertising for social networks: A case study of Facebook / J. Aguilar, G. Garcia // *IEEE Transactions on Computational Social Systems*. – 2018. – Vol. 5. – P. 20-32. <https://doi.org/10.1109/TCSS.2017.2759188>.
12. Arasu B. S. A machine learning-based approach to enhancing social media marketing / B. S. Arasu, B. J. B. Seelan, N. Thamaraiselvan // *Computers & Electrical Engineering*. – 2020. – Vol. 86. – Article no. 106723. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106723>.
13. Popov A. Adaptive look-alike targeting in social networks advertising / A. Popov, D. Iakovleva // *Procedia Computer Science*. – 2018. – Vol. 136. – P. 255-264. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.08.264>.
14. Shah N. Research trends on the usage of machine learning and artificial intelligence in advertising / N. Shah, S. Engineer, N. Bhagat, et al. // *Augment Hum Res.* – 2020. – Vol. 5. – Article no. 19. <https://doi.org/10.1007/s41133-020-00038-8>.
15. Liu Z. Development of advertising art design based on information technology / Z. Liu // in: J. Jansen B., Liang H., Ye J. (eds) *International Conference on Cognitive based Information Processing and Applications (CIPA 2021)*, volume 85 of *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, Springer, Singapore, 2021. – P. 3-10. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-5854-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-16-5854-9_1).
16. Barabash O. Information technology of targeting: optimization of decision making process in a competitive environment / O. Barabash, G. Shevchenko, N. Dakhno, O. Neshcheret, A. Musienko // *International Journal of Intelligent Systems and Applications*. – 2017. – Vol. 9. – P. 1-9. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2017.12.01>.
17. Saito R. Analysis of fashion market trend using advertising data of shopping information site / R. Saito, K. Otake, T. Namatame // in: Meiselwitz G. (eds) *Social Computing and Social Media. Participation, User Experience, Consumer Experience, and Applications of Social Computing. HCII 2020*, volume 12195 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, Cham, 2020. – P. 389-400. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-49576-3\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-030-49576-3_28).
18. Wakimoto K. Keyword-based text generation for internet advertisement / K. Wakimoto, S. Kawamoto, P. Zhang // *Proceedings of the 34th Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence*, 2020. – P. 1-4.
19. Lee D. Advertising content and consumer engagement on social media: Evidence from Facebook / D. Lee, K. Hosanagar, H. S. Nair // *Management Science*. – 2018. – Vol. 64. – P. 5105-5131. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2017.2902>.
20. Jamison A. M. Vaccine-related advertising in the Facebook Ad Archive / A. M. Jamison, D. A. Broniatowski, M. Dredze, Z. Wood-Doughty, D. A. Khan, S. C. Quinn // *Vaccine*. – 2019. – Vol. 38. – P. 512-520. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2019.10.066>.



21. Youn S. Understanding ad avoidance on Facebook: Antecedents and outcomes of psychological reactance / S. Youn, S. Kim // *Computers in Human Behavior*. – 2019. – Vol. 98. – P. 232-244. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2019.04.025>.
22. White C. L. Social media ethics in the data economy: Issues of social responsibility for using Facebook for public relations / C. L. White, B. Boatwright // *Public Relations Review*. – 2020. – Vol. 46. – Article no. 101980. <https://doi.org/10.1016/j.pubrev.2020.101980>.
23. Gitomer A. Geographic impressions in Facebook political ads / A. Gitomer, P. V. Oleinikov, L. M. Baum, et al., // *Appl Netw Sci*. – 2021. – Vol. 6. – Article no. 18. <https://doi.org/10.1007/s41109-020-00350-7>.

#### References

1. Monastyrskaya M. M. Improving customer relationship management based on intelligent analysis of user behavior patterns / M. M. Monastyrskaya, V. I. Soloviev // *Proceedings of the 2020 13th International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD)*, 2020. – P. 1-4. <https://doi.org/10.1109/MLSD49919.2020.9247718>.
2. Griva A. Retail business analytics: Customer visit segmentation using market basket data / A. Griva, C. Bardaki, K. Pramataris, Katerina, D. Papakyriakopoulos // *Expert Systems with Applications*. – 2018. – Vol. 100. – P. 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.01.029>.
3. Badriyah T. Recommendation system for property search using content based filtering method / T. Badriyah, S. Azvy, W. Yuwono, I. Syarif // *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Information and Communications Technology (ICOIAC)*, 2018. – P. 25-29. <https://doi.org/10.1109/ICOIAC.2018.8350801>.
4. Shazad B. Finding temporal influential users in social media using association rule learning / B. Shazad, H. U. Khan, M. Farooq, A. Mahmood, I. Mehmood, S. Rho, Y. Nam // *Intelligent Automation and Soft Computing*. – 2020. – Vol. 26. – P. 87-98. <https://doi.org/10.31209/2019.100000130>.
5. Vanaja S. Aspect-level sentiment analysis on e-commerce data / S. Vanaja, M. Belwal // *Proceedings of the 2018 International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*, 2018. – P. 1275-1279. <https://doi.org/10.1109/ICIRCA.2018.8597286>.
6. Agrawal R. Fast algorithms for mining association rules / R. Agrawal, R. Srikant // *Proceedings of the 20th International Conference on Very Large Data Bases VLDB*, September 1994. – Vol. 1215. – P. 487-499.
7. Lipyana H. Targeting model of HEI video marketing based on classification tree / H. Lipyana, S. Sachenko, T. Lendyuk, A. Sachenko // *Proceedings of the 16th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer. Volume II: Workshops, ICTERI 2020, Kharkiv, Ukraine, 6-10 October 2020. – CEUR Workshop Proceedings*. – Vol. 2732. – P. 487-498. <http://ceur-ws.org/Vol-2732/20200487.pdf>.
8. Lipyana H. Decision tree based targeting model of customer interaction with business page / H. Lipyana, A. Sachenko, T. Lendyuk, S. Nadvynychy, S. Grodskiy // *Proceedings of the third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020)*, April 27 – May 1, 2020. – CEUR Workshop Proceedings. – Vol. 2608. – P. 1001-1012. <http://ceur-ws.org/Vol-2608/paper75.pdf>.
9. Wang F. Association rule mining based quantitative analysis approach of household characteristics impacts on residential electricity consumption patterns / F. Wang, K. Li, N. Duić, Z. Mi, B.-M. Hodge, M. Shafie-khah, J. P. S. Catalão // *Energy Conversion and Management*. – 2018. – Vol. 171. – P. 839-854. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.017>.
10. AlZu'bi S. A novel recommender system based on apriori algorithm for requirements engineering / S. AlZu'bi, B. Hawashin, M. ElBes and M. Al-Ayyoub // *Proceedings of the 2018 Fifth International Conference on Social Networks Analysis, Management and Security (SNAMS)*, 2018. – P. 323-327. <https://doi.org/10.1109/SNAMS.2018.8554909>.
11. Aguilar J. An adaptive intelligent management system of advertising for social networks: A case study of Facebook / J. Aguilar, G. Garcia // *IEEE Transactions on Computational Social Systems*. – 2018. – Vol. 5. – P. 20-32. <https://doi.org/10.1109/TCSS.2017.2759188>.
12. Arasu B. S. A machine learning-based approach to enhancing social media marketing / B. S. Arasu, B. J. B. Seelan, N. Thamaraiselvan // *Computers & Electrical Engineering*. – 2020. – Vol. 86. – Article no. 106723. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106723>.
13. Popov A. Adaptive look-alike targeting in social networks advertising / A. Popov, D. Iakovleva // *Procedia Computer Science*. – 2018. – Vol. 136. – P. 255-264. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.08.264>.
14. Shah N. Research trends on the usage of machine learning and artificial intelligence in advertising / N. Shah, S. Engineer, N. Bhagat, et al. // *Augment Hum Res*. – 2020. – Vol. 5. – Article no. 19. <https://doi.org/10.1007/s41133-020-00038-8>.
15. Liu Z. Development of advertising art design based on information technology / Z. Liu // in: J. Jansen B., Liang H., Ye J. (eds) *International Conference on Cognitive based Information Processing and Applications (CIPA 2021)*, volume 85 of *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, Springer, Singapore, 2021. – P. 3-10. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-5854-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-16-5854-9_1).
16. Barabash O. Information technology of targeting: optimization of decision making process in a competitive environment / O. Barabash, G. Shevchenko, N. Dakhno, O. Neshcheret, A. Musienko // *International Journal of Intelligent Systems and Applications*. – 2017. – Vol. 9. – P. 1-9. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2017.12.01>.
17. Saito R. Analysis of fashion market trend using advertising data of shopping information site / R. Saito, K. Otake, T. Namatame // in: Meiselwitz G. (eds) *Social Computing and Social Media. Participation, User Experience, Consumer Experience, and Applications of Social Computing*. HCII 2020, volume 12195 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, Cham, 2020. – P. 389-400. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-49576-3\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-030-49576-3_28).
18. Wakimoto K. Keyword-based text generation for internet advertisement / K. Wakimoto, S. Kawamoto, P. Zhang // *Proceedings of the 34th Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence*, 2020. – P. 1-4.
19. Lee D. Advertising content and consumer engagement on social media: Evidence from Facebook / D. Lee, K. Hosanagar, H. S. Nair // *Management Science*. – 2018. – Vol. 64. – P. 5105-5131. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2017.2902>.
20. Jamison A. M. Vaccine-related advertising in the Facebook Ad Archive / A. M. Jamison, D. A. Broniatowski, M. Dredze, Z. Wood-Doughty, D. A. Khan, S. C. Quinn // *Vaccine*. – 2019. – Vol. 38. – P. 512-520. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2019.10.066>.
21. Youn S. Understanding ad avoidance on Facebook: Antecedents and outcomes of psychological reactance / S. Youn, S. Kim // *Computers in Human Behavior*. – 2019. – Vol. 98. – P. 232-244. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2019.04.025>.
22. White C. L. Social media ethics in the data economy: Issues of social responsibility for using Facebook for public relations / C. L. White, B. Boatwright // *Public Relations Review*. – 2020. – Vol. 46. – Article no. 101980. <https://doi.org/10.1016/j.pubrev.2020.101980>.
23. Gitomer A. Geographic impressions in Facebook political ads / A. Gitomer, P. V. Oleinikov, L. M. Baum, et al., // *Appl Netw Sci*. – 2021. – Vol. 6. – Article no. 18. <https://doi.org/10.1007/s41109-020-00350-7>.

Надійшла/Paper received : 01.09.2022 р.    Надрукована/Printed : 01.11.2022 р.

МЄШКОВ Юрій

Херсонський національний технічний університет  
<https://orcid.org/0000-0002-2506-7020>  
[mieshkov.yuri@gmail.com](mailto:mieshkov.yuri@gmail.com)

ВОЙТОВИЧ Ольга

Херсонський національний технічний університет  
<https://orcid.org/0000-0003-0510-4362>  
[olgavoytovich@ukr.net](mailto:olgavoytovich@ukr.net)

## ПОРІВНЯННЯ МЕХАНІЧНИХ І ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПІДІЙМАЧІВ «LAUNCH» ТА «PEAK»

У статті проведено порівняння механічних і технічних характеристик підіймачів автомобілів, що використовуються на всіх автосервісах. За останні 20 років двостійкові підіймачі зайняли свою нішу і здобули популярність, вони обігнали чотиристійкові підіймачі більш ніж утричі хоча б тому, що вони менше коштують. Двостійкові підіймачі спочатку використовувалися для перевірки та обслуговування мастила, шини і т. д., але в даний час широко використовується для основних видів діяльності (хоча чотиристійкові підіймачі, як і раніше, необхідні для повного технічного огляду).

Тим не менш, велика кількість експертів не припиняють повідомляти про ризик падіння транспортних засобів із двостійкових підіймачів. Відомі випадки за останні п'ять років, коли під час падіння з підіймача постраждав не лише автомобіль, а й робітники отримали серйозні травми, також були летальні випадки. Тому думка перевірочного відділу полягає в тому, що будь-яке падіння транспортного засобу з висоти несе високий ризик та смертельні травми.

Виробники підйомного обладнання середнього та преміального класу почали впроваджувати у свої лінійки бюджетні моделі. Вони йдуть шляхом конструктивного спрощення моделей, скорочують виробничі витрати, використовують дешевші метали, забирають електронні системи, що дозволяє знизити вартість обладнання. Ринок підіймачів майже не демонструє змін щодо асортименту. Він сегментується за типом підіймачів – двостійкові, плунжерні, ножичні, підкатні канавні, чотиристійкові, багатопостові плунжерні.

При розгляді ринку підйомного обладнання не можна залишити без уваги китайських автовиробників, які займають солідну частку в загальній структурі цієї товарної групи. «Ринок китайського обладнання зараз чітко розділився на два класи – один представлений дешевою та низькоякісною продукцією, а інший є сегментом обладнання гідної якості. Між двома сегментами є чітка різниця, зрозуміла професіоналу. Вибираючи китайські підіймачі, клієнти розуміють, що якщо за обладнання просять мало грошей, воно довго не прослужить. Такого низькоякісного обладнання на ринку багато, і ця продукція загалом дискредитує весь сегмент з Китаю.

Ключові слова: технічні характеристики; підіймачі автомобілів; технічний огляд; сегменти ринку.

MIESHKOV Yuri, VOYTOVICH Olga  
Kherson National Technical University

## CORRECT MECHANIC AND TECHNICAL CHARACTERISTICS OF «LAUNCH» AND «PEAK»

The article compares the mechanical and technical characteristics of car lifts used at all car service centers. Over the last 20 years, two-post lifts have taken their place and gained popularity, they have overtaken four-post lifts by more than three times, if only because they cost less. Two-post jacks were originally used to check and service oil, tires, etc., but are now widely used for major activities (although four-post jacks are still required for a full MOT).

Nevertheless, many experts do not stop reporting the risk of falling vehicles from two-post lifts. There have been known cases over the past five years, when not only the car was damaged during the fall from the lift, but also the workers were seriously injured, and there were also fatal cases. Therefore, the opinion of the inspection department is that any fall of the vehicle from a height carries a high risk and fatal injuries.

Manufacturers of medium and premium lifting equipment began to introduce budget models into their lines. They follow the path of structural simplification of models, reduce production costs, use cheaper metals, remove electronic systems, which allows to reduce the cost of equipment. The lift market shows almost no changes in terms of assortment. It is segmented according to the type of lifters - two-post, plunger, scissor, roll-up ditch, four-post, multi-post plunger.

When considering the market of lifting equipment, one cannot ignore the Chinese car manufacturers, which occupy a solid share in the overall structure of this product group. "The Chinese equipment market is now clearly divided into two classes – one is represented by cheap and low-quality products, and the other is a segment of equipment of decent quality. There is a clear difference between the two segments that is clear to a professional. When choosing Chinese lifts, customers understand that if they ask for little money for the equipment, it will not last long. There is a lot of such low-quality equipment on the market, and this product generally discredits the entire segment from China.

Keywords: technical characteristics; car lifts; technical inspection; market segments.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

У світі існує чимало виробників підіймачів, в виробничих гамах кожного з них безліч моделей різних типів. Кожна модель може мати великий вибір різних конфігурацій.

Для отримання доступу до важливих вузлів автомобіля потрібно його підняти. З цим завданням справляється такий вид обладнання, як підіймач для СТО. З його допомогою здійснюється підняття транспортного засобу на висоту, комфортну для виконання діагностичного огляду та ремонту. Враховуючи

вагу машини, до підйомного обладнання висуваються особливі вимоги щодо безпеки та функціональності.

Якісний автомобільний підйомач підвищує швидкість обслуговування транспортних засобів, продуктивність роботи автосервісу, що створює сприятливе враження клієнтів про рівень обслуговування. Від вибору обладнання для СТО безпосередньо залежить продуктивність та репутація станції техобслуговування.

Автомобільні підйомачі «Launch» відрізняються між собою характеристиками, проте всі вони відповідають найвищим стандартам якості. Обладнання від «Launch» просте в управлінні і виробляється за найсучаснішими технологіями. Всі деталі виготовлені з надійних матеріалів. Це особливо важливо, адже автопідйомач – обладнання, яке постійно працює з величезним навантаженням, і воно вимагає до себе особливої уваги.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Першою роботою, присвяченою системі технічних обслуговувань, є «Правила по обслуговуванню за тракторами і їх польовому ремонту», опубліковані в 1932 році. Правила були складені на основі дослідно-статистичних середніх термінів служби деталей і заводських інструкцій з експлуатації вітчизняних та імпортованих тракторів. Система технічних доглядів складалася з восьми ступенів і передбачала примусову заміну деталей. У створення наукових основ побудови системи технічного обслуговування і ремонту великий внесок зробили Г.В. Веденяпін, Б.С. Свіршевський, А.І. Селіванов, М.П. Сергєєв, І.Є. Ульянов, С.С. Черепанов, В.І. Виноградов, А.П. Соломкіна, С.А. Іофіна, Ю.К. Киртбая, Н.С. Пасічників і багато інших вчених. Питанням удосконалення системи на основі методів діагностування присвячені основні праці Н.С. Івановського, В.М. Міхліна, А.В. Ніколаєнка, Б.В. Павлова, Б.А. Улітовського, Н.П. Терських, В.М. Лівшиці. З появою складної техніки проблема забезпечення необхідного рівня її експлуатаційної надійності стала однією з найважливіших. Актуальність її багаторазово зросла при переході виробництв до комплексної механізації виробничих процесів. Академік А.І. Берг зазначав, що «із усіх питань технічного прогресу найважливішим питанням тепер стає проблема надійності». При розробці «Правил техобслуговування» тракторів і самохідних шасі у 1964 р. були використані результати наукових досліджень ГОСНИТИ, машиновипробувальних станцій і базових пунктів. Однак цих досліджень було виконано мало, а застосовувані методи визначення періодичності техобслуговування нічим не відрізнялися від попередніх. Перша спроба науково обґрунтувати раціональний метод побудови систем ТО була зроблена Г.В. Веденяпіним у 1955 р. До теперішнього часу ця робота залишається найважливішою у сфері ТО машин. Класифікація систем ТО вперше була розроблена А.М. Плаксіним. Як головна ознака, покладена в основу класифікації, була прийнята ознака обов'язковості застосування операцій певної якісної спрямованості. Тому всі операції ТО розділено на дві групи: 1) операції заміни вузлів і деталей; 2) операції, не пов'язані із заміною вузлів (очищення, змащування, перевірка стану і регулювання механізмів, кріпильні роботи). Системи ТО були розділені на три класи: 1) системи з обов'язковою періодичною заміною вузлів; 2) системи з обов'язковим періодичним проведенням операцій другої групи; 3) системи з обов'язковим періодичним застосуванням обох груп операцій (змішані). На думку автора, найбільш прогресивними є системи другого класу. На основі існування «технологічної та експлуатаційної неоднорідності» автор доходить висновку, що ймовірність одночасного досягнення граничних величин однотипними вузлами всіх машин практично дорівнює нулю. Тому як основний метод обробки даних запропонований теоретико-ймовірнісний метод. [4] Побудову системи ТО пропонувалося здійснювати за граничною умовою і за максимально допустимим відхиленням оціночних коефіцієнтів щодо так званих стрижневих операцій. В основу ж визначення періодичності виконання операцій лягли такі міркування: «Дуже важливо на підставі дослідних розподілів термінів роботи вузлів встановити такі терміни проведення операцій техобслуговування, які давали б достатню ймовірність повної експлуатаційної надійності вузлів (Рен).

Роботи з технічного обслуговування і ремонту автомобіля чи окремих його вузлів потребують застосування технологічного обладнання різноманітного призначення. Від оснащення постів зони обслуговування і ремонтних дільниць залежать якість виконання технічного обслуговування і ремонту автомобілів, продуктивність та умови праці ремонтно-обслуговуючих працівників. Сучасні підходи в питаннях охорони та полегшення роботи працівників вимагають підвищення рівня механізації та автоматизації виробництва, а зростаючі вимоги до рівня якості автомобілів – застосування нових видів обладнання, що реалізують прогресивні підходи в технологіях обслуговування та ремонту. Останнім часом, за умов зростання кількості марок і моделей автомобілів, що обслуговуються на підприємствах автосервісу, потреба в спеціалізованих і технологічному обладнанні зростає все більше. Потреби сфери послуг автосервісу формують на ринку широкий спектр пропозицій технологічного обладнання. Причому, деякі групи обладнання (наприклад піднімально-оглядове) можуть бути задіяні майже в усіх виробничих підрозділах, в той час як спеціалізоване і спеціальне обладнання мають більш вузьке призначення і стосуються облаштування конкретних дільниць та постів за видами обслуговуючих і ремонтних робіт.

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

Незважаючи на значну кількість досліджень на багатьох підйомачах, що встановлюються на СТО виникають питання про ризик падіння автотранспортного засобу з двостійкового підйомача, де фіксатор лапи не встановлений або несправний (вимоги до підйомачів з 1983р.). Враховуючи закон від 1 січня 2007 р.,

у якому забороняється використовувати підіймачі без системи блокування. У співпраці з Safety Assessment Federation (SAFed) та Independent National Inspection and Testing Association (INITA), члени яких встановили, що майже всі підіймачі без систем АМСФ (автоматичні механічні системи фіксації) були переобладнані або зняті з експлуатації.

Низька якість виробництва та/або матеріалів, що використовуються, призводить до пошкодження робочих органів підіймачів і тому дослідження технічних і механічних характеристик підіймачів потребує подальших досліджень.

### Формулювання цілей статті

Метою статті є порівняння механічних і технічних характеристик підіймачів «Launch» та «Peak» для виявлення надійного використання на станціях технічного обслуговування при ремонті і обслуговування автомобільного транспорту.

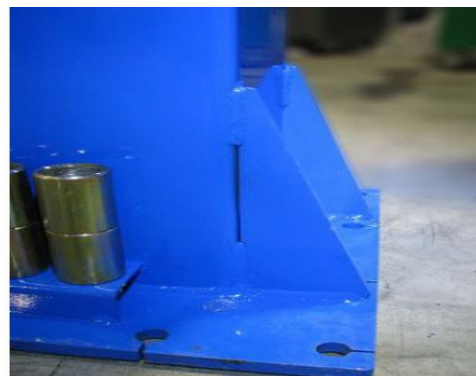
### Виклад основного матеріалу.

Стійкість та надійність автомобільних підіймачів залежить від їхньої масивності та надійності сполучних вузлів. Найоперативніший спосіб порівняти два підіймачі за кількістю матеріалу, витраченого на його виготовлення - це зважити їх. Враховуючи, що у даного обладнання висота однакова стає ясно, що більш важкий підіймач виконаний з конструкції з більш товстими стінками.

Від якості зварних з'єднань залежить цілісність та спільна робота всіх частин підіймача.



Як видно на фото, всі зварні шви двостійкового підіймача для LAUNCH безперервні і виконані роботом в автоматичному режимі. У підіймача PEAK зварні шви виконані ручним дуговим зварюванням, місцями шви переривчасті (точкове зварювання).



Основною та несучою частиною підіймача являється колона. Саме вона сприймає навантаження від автомобіля та передає на основу. Відповідно від потужності її профілю, надійності сполучних вузлів, стійкості та кріплення до підлоги (основи) залежить, чи зможе Ви підняти автотранспорт і утримувати його в рівновазі на висоті.

Двостійковий гідравлічний підіймач LAUNCH

- ✓ габарити колони 285x180мм;
- ✓ розмір плити основи колони 520x380мм;
- ✓ товщина плити основи колони 16мм;
- ✓ Підіймач PEAK
- ✓ габарити колони 205x240мм;
- ✓ розмір плити основи колони 450x430мм;
- ✓ товщина плити основи колони 14мм;

Ребра жорсткості колони LAUNCH, товщиною 10мм, працюють у поздовжньому та поперечному напрямках, забезпечуючи додаткову стійкість, за рахунок розташування під кутом 45° до кутів колони. Ребра жорсткості колони підіймача PEAK, товщиною 8мм, розташовані з торця підіймача і захищають колону від зсуву лише в поздовжньому напрямку.



Кріплення колони здійснюється анкерними болтами, які йдуть в комплекті з підйомниками. Відповідно до СНиП 2.09.03-85 відстань між болтами повинна перевищувати 8 діаметрів болта, якщо це правило не дотримується, необхідно застосовувати подовжений на 100мм анкерний болт. Колони підйомника LAUNCH має 5 точок кріплення анкерів, які повністю відповідають нормам кріплення колон болтами. А колони підйомачів синього кольору кріпляться у 8 точках, відстань між якими не відповідає українським нормам. І доводиться докуповувати більш довгі анкери, для яких необхідно виконувати основу у вигляді кубів більшої висоти або потовщення в підлогах. А це додаткові витрати на матеріал та роботи. У комплекті підйомачів йдуть анкери: LAUNCH - довжиною 160мм, Ø 18мм; синій - довжиною 140мм, Ø 19мм.

Гідравлічний насос підйомача LAUNCH виконаний повністю за італійською ліцензією, оснащений багатопаровим армованим шлангом діаметром 15мм і підходить для підвищеного тиску. Підйомачі PEAK мають стандартний китайський гідравлічний насос зі звичайним шлангом діаметром 14мм.

Жолоб тросів синхронізації призначений для прокладання тросів синхронізації і забезпечує збереження гідравлічних магістралей від передавлювання колесами автомобіля, що обслуговується. У підйомниках LAUNCH застосовується рифлена поверхня кожуха, що сприяє кращому зчепленню колеса і поверхні, не ковзає. У підйомачі PEAK – рівна поверхня кожуха, що ковзає. При переїзді автомобілем необхідний суттєвий розгін для подолання перешкоди. Тільки у підйомниках LAUNCH кожух йде спільно з жолобом, який призначений для оберігання тросів та шланг від попадання сміття, пилу... У підйомачі PEAK захисний жолоб відсутній. Троси та шланги переміщуються по підлозі та нічим не захищені від сміття.



Лапи - це частина підйомача, яка утримує автомобіль і передає його навантаження на колони. Від їхньої довжини залежить з машинами яких габаритів ви зможете працювати. Так у підйомача LAUNCH передні та задні лапи асиметричні. Передня лапа: мінімальний виліт – 600мм, максимальний виліт – 1100мм (3 секції). Задня лапа: 900мм – 1400мм (2 секції). Також передбачено додаткову опору довжиною 650мм, для роботи з малими колісними базами (автомобілі типу Smart). У підйомача PEAK передні лапи з вильотом становить мінімум 700мм, а максимальний виліт 1150мм.



Задні лапи: мінімальний виліт – 800мм, максимальний виліт – 1250мм. Опорний п'ятак підйомача LAUNCH має товщину 28мм і повністю прогумовану поверхню, яка виключає контакт металу та автомобіля. Механізм розблокування розльоту інноваційний лап і доступ до нього прихований забезпечуючи надійний захист від пошкоджень.





Висоту підхвату автомобіля від підлоги можна регулювати від 100 до 170мм за допомогою викручування подвійного різьбового телескопа на опорному п'ятаку

Опорний п'ятак підіймачів PEAK має товщину 25мм і оснащений тільки гумовою накладкою, що уможливорює контакт металу лапи та автомобіля. Механізм розблокування розльоту лап стандартний з відкритим доступом до механізму розблокування, що може призвести до потрапляння частин одягу робітника, сміття та швидкого виходу з ладу. Висоту підхоплення автомобіля від підлоги можна встановити на 140, 160 або 200мм, переставляючи підставки з опорним п'ятаком. Висота спрацьовування першого стопа у LAUNCH 420мм, а у підіймачів PEAK – 950мм.

Каретка являється частиною підіймача, які переміщують лапи з вантажем на певну висоту. Дуже важлива синхронність їхньої роботи і звичайно ж надійність. Каретка підіймачів LAUNCH інноваційної конструкції з розмірами 185x115мм, довжина 410мм. Товщина стін каретки 6мм. Завдяки великій площі гумової накладки на каретці забезпечується максимальний захист авто дверей. Каретка підіймачів PEAK зварена, з двох квадратних профілів, розмірами 125x100мм, довжина 415мм. Товщина стін каретки 5мм. Захист дверей автомобіля мінімальний через невеликі розміри гумової накладки.

У підіймачів LAUNCH в циліндрах використовуються високоякісні європейські манжети. Габаритні розміри роликів для троса: діаметр 115мм; ширина 20мм; глибина ринви 11мм. Ролик сконструйований так, що можливість вискакування троса повністю виключена. Металевий трос діаметром 9мм. Габаритні параметри ланцюга ширина 27мм, товщина 18мм. Підіймачі PEAK використовують стандартні китайські манжети. Габаритні розміри роликів для троса: діаметр 75мм; ширина 15мм; глибина ринви 7,5мм. Стандартна конструкція ролика, при якій вискакування троса ймовірне. Металевий трос діаметром 8мм. Габаритні параметри ланцюга ширина 23мм, товщина 17мм.

У підіймачів LAUNCH трос до пластини кріпиться металевим листом завтовшки 20 мм, а ролик закріплений на цільнолитій деталі. У підіймачів PEAK трос до пластини кріпиться металевим листом завтовшки 5 мм, а ролик закріплений на гнучому листі привареному до циліндра.



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

В результаті проведеного аналізу можна відзначити, що перевірені часом та роботою автомобільні підіймачі LAUNCH кращі за підіймачі китайського виробництва. Основа підіймача LAUNCH має габаритні розміри на 15 % більше китайського аналога, що дозволяє зменшити навантаження на анкерні болти в 5 разів. Отже, при підйомі автомобіля навантаження на анкерні болти зростає, що може призвести до небезпечних наслідків.

Ролики для тросів у витягів LAUNCH мають захист від випадкового зльоту троса, китайські аналоги такого не мають. Це дуже важливий чинник для безпечної роботи персоналу. Зістрибування троса зі свого робочого ролика призводить до падіння автомобіля з підіймача.

Діаметр тросів на підіймачах LAUNCH становить 10мм, на китайських аналогах до 8,5мм (на 15% менше!). Це суттєво впливає на вантажопідйомність підіймача! Трос товщиною 8,5мм застосовується на підіймачах вантажопідйомністю до 3000кг.

Каретка на підіймача LAUNCH розбірна, що дозволяє виконувати роботи з обслуговування та заміни фторопластових пластин. На китайських аналогах каретка не є розбірною. Конструкція кареток на підіймачах LAUNCH витримує набагато більші навантаження, ніж у аналогічних підіймачах. При використанні конструктиву LAUNCH автомобіль при підйомі дуже жорстко розміщений на підіймачі. При використанні китайського конструктиву автомобіль дуже сильно хитається і існує дуже велика ймовірність падіння авто. А це не лише пошкодження автомобіля, а й можливість травмувати механіка, який займався ремонтом автомобіля.

---

Всі вищеназвані порівняння показують, що підіймачі LAUNCH прослужать на автосервісі набагато довше, ніж аналоги.

### Література

1. Зінко Р.В. Моделювання роботи різномірних машин на основі подібності графів їх конструкцій // XV Міжнародна науково-технічна конференція: *Вібрації в техніці та технологіях*, 20-21 жовтня 2016 р. Полтава: ПДАА, 2016. С. 156-159.

### References

1. Zinko R.V. Modeling of robotic machines based on the similarity of graphs of their designs // XV International Scientific and Technical Conference: *Vibrations in Engineering and Technologies*, June 20-21, 2016. Poltava: PDAA, 2016. С. 156-159.

Надійшла/Paper received : 12.09.2022 р.    Надрукована/Printed : 01.11.2022 р.



**ДЖУЛІЙ Володимир**

Хмельницький національний університет

ORCID <http://orcid.org/0000-0003-1878-4301>

e-mail: dg2303@ukr.net

**ПЕТЛЯК Наталія**

Хмельницький національний університет

ORCID <http://orcid.org/0000-0001-5971-4428>

e-mail: npetlyak@khmnu.edu.ua

**ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ Юрій**

Хмельницький національний університет

ORCID <http://orcid.org/0000-0002-4005-5669>

e-mail: getman-58@ukr.net,

**ПАХАР Олександр**

Хмельницький національний університет

e-mail: dg2303@ukr.net

## МОДЕЛЬ ПОТОКУ ТЕКСТОВИХ ПОВІДОМЛЕНЬ ТЕМАТИЧНИХ ІНТЕРНЕТ-РЕСУРСІВ СИСТЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ

Розглянута актуальна задача побудови моделі потоку текстових повідомлень тематичних інтернет-ресурсів системи прогнозування інформаційної безпеки та інформаційної моделі бази даних форуму тематичного інтернет-ресурсу, відрізняється від відомих, універсальністю, дозволяє аналізувати та досліджувати потік даних інтернет-форумів, реалізованих на базі популярних програмних платформ для розробки дискусійних інформаційних тематичних ресурсів. Представлена модель потоку текстових повідомлень тематичних інтернет форумів, відрізняється від відомих, можливістю проводити статистичний аналіз та семантичну фільтрацію повідомлень, враховуючи належність до автора, рейтингу автора, форуму, часу створення, кількості повідомлень, темі форуму, дозволяє здійснювати аналіз та дослідження текстових повідомлень тематичних інтернет-ресурсів.

Ключові слова: моделі, алгоритми, модель потоку повідомлень, тематичні форуми, джерела повідомлень.

DZHULIY Volodymyr, PETLIYAK Natalia,  
KHMELNYTSKYI Yuri, PAKHAR Oleksandr  
Khmelnytsky National University

## TEXT MESSAGE FLOW MODEL OF THEMATIC INTERNET RESOURCES INFORMATION SECURITY FORECASTING SYSTEMS

The tasks of analysis and classification of detection of existing mechanisms for the implementation of attacks and threats to information security, which can lead to unauthorized access to confidential information, disruption of the functioning of information systems, are relevant and prioritized at the current stage. The importance of the problems is connected with the following main factors: growth of variety and quantity of means of computer technology and spheres of human activity; a high level of trust in information and search systems for data processing and management; the growth of the number of users of the information space of interaction; accumulation of large volumes of various types of information, intensive exchange of data flow in the network between users, using a wide range of access mechanisms to confidential resources, information processes; industrial espionage and competitive struggle in the sphere of information services of society; insufficient number at the present stage of highly qualified specialists in the field of information security, market relations in the field of software development, maintenance, distribution, production of computing equipment for the implementation of information security.

The presented model of the flow of text messages of thematic Internet resources of the information security forecasting system and the information model of the forum database of the thematic Internet resource, which differs from the known ones in its universality, allows to analyze and study the data flow of Internet forums implemented on the basis of popular software platforms for the development of discussion information thematic resources. The model of the flow of text messages of thematic Internet forums allows statistical analysis and semantic filtering of messages, taking into account authorship, author rating, forum, time of creation, number of messages, forum topic, allows analysis and research of text messages of thematic Internet resources.

Solving the set tasks will allow: to improve the quality of decisions made in the process of identifying and counteracting malicious information; sort information objects of influence for the operator by priority; set the input data settings of the system of detection and countermeasures against the spread of malicious information in networks.

Keywords: models, algorithms, message flow model, thematic forums, message sources.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

На сучасному етапі, на більшість сфер діяльності суспільства зростає вплив глобальних інформаційних технологій. Відзначаються високі темпи розвитку світових єдиних телекомунікаційного та інформаційного просторів, сформувалися в суспільстві нові соціальні групи, виявляється значний вплив на сформований історично спосіб життя людей. На тлі стрімкого розвитку інформаційних технологій відзначається, зростання активності різноманітності комп'ютерних атак, здійснюваних і запланованих із застосуванням сучасних новітніх технологій [1].

Актуальними та пріоритетними на сучасному етапі є задачі класифікації та аналізу виявлення існуючих механізмів реалізації атак та загроз інформаційної безпеки, які можуть призвести до отримання несанкціонованого доступу до конфіденційної інформації, порушення функціонування інформаційних систем. В результаті, постає задача визначення заходів протидії атакам та загрозам, усунення вразливостей, оцінки заданої можливої шкоди, розробка нормативно-правової бази, механізмів захисту та критеріїв безпеки [2 - 4].

Важливість проблем пов'язана з наступними основними факторами: зростанням різноманітності та кількості засобів комп'ютерної техніки та сфер людської діяльності їх застосування; високим рівнем довіри до інформаційно-пошукових систем обробки та управління даними; зростанням числа користувачів інформаційного простору взаємодії; накопиченням великих об'ємів різнотипної інформації, інтенсивним обміном потоком даних в мережі між користувачами, з використанням широкого спектра механізмів доступу до конфіденційних ресурсів, інформаційних процесів; промисловим шпигунством та конкурентною боротьбою у сфері інформаційних послуг суспільства; недостатньою кількістю, на сучасному етапі, фахівців високої кваліфікації в області інформаційної безпеки, ринковими відношеннями в області розробки програмного забезпечення, обслуговування, розповсюдження, виробництва обчислювальної комп'ютерної техніки для реалізації інформаційної безпеки [5,6].

### Постановка задачі

На сучасному етапі, проблеми інформаційної безпеки розвитку суспільства у більшості сфер їх діяльності виходять на передній план. Це пов'язано зі значним зростанням кількості реалізованих проєктів інформатизації. Більшість проєктів інформатизації спрямовані на побудову єдиного телекомунікаційного та інформаційного простору з метою оптимізації процесів обробки різнотипної інформації великих об'ємів, забезпечення оперативного доступу до інформації, надійного зберігання даних для користувачів інформаційного обміну. На даному етапі виникає потреба у проведенні захисту комп'ютерних систем та інформаційних ресурсів від блокування, несанкціонованого доступу до даних, знищення, та інших злочинних, небажаних дій, кількість яких постійно зростає, збитки в інформаційній сфері від злочинів в мережі Інтернет щорічно оцінюються в мільярди доларів [7 - 9].

Темпи розвитку інформаційних та комп'ютерних технологій значно випереджають процес створення програмно-апаратного забезпечення в області інформаційної безпеки. Пріоритетними, в даній ситуації, є задачі проведення аналізу, класифікації, виявлення діючих механізмів та засобів проведення атак і загроз інформаційній безпеці системи, які можуть призвести до отримання несанкціонованого доступу до конфіденційних даних, порушення функціонування інформаційної системи, визначення заходів протидії атакам та загрозам, оцінка заданої шкоди, розробка нормативно-правової бази, механізмів захисту та критеріїв інформаційної безпеки системи протидії.

На сьогодні не існує єдиного підходу до вирішення проблеми захищеності інформаційних систем, стосовно предметних областей, розробниками програмного захисту інформації пропонуються відповідні компоненти на вирішення конкретних задач, забезпечення надійного захисту інформаційних ресурсів потребує реалізації відповідних організаційних та технічних заходів в комплексі, що супроводжуються розробкою відповідної документації [1,2]. Проведене дослідження вказує на необхідність вирішення наступних задач для забезпечення інформаційної безпеки: формування основ для опису процесів виникнення та реалізації загроз інформаційної безпеки системи в умовах невизначеності та непередбачуваності їх прояву; розробка відповідних засобів забезпечення захисту конфіденційної інформації на основі проведеного дослідження та класифікації вразливостей та загроз; визначення загальних підходів до створення інформаційно-аналітичних систем забезпечення захисту конфіденційних даних, механізмів управління захистом на різних рівнях діяльності суспільства [2 - 4].

Вирішення поставлених задач дозволить: підвищити якість прийнятих рішень у процесі виявлення та протидії шкідливій інформації; сортувати інформаційні об'єкти впливу для оператора по пріоритету; задати вхідні дані налаштування системи виявлення та протидії поширенню шкідливої інформації в мережах.

### Основна частина

При створенні форумів інтернет-ресурсів найбільшою популярністю користуються наступні програмні платформи: Vanilla, Invision Power Board, vBulletin, PunBB, Simple Machines Forum, XenForo. При реалізації програмних платформ, використовуються бази даних структури, яких значно різняться. Записи даних дозволяють для текстових повідомлень визначати їхню приналежність до конкретного інтернет - форуму, автора, рейтингу автора, часу створення, а також кількості повідомлень відповідної теми форуму. Враховуючи наведену інформацію, запропоновано модель інтернет-форума (рис. 1).

Модель тематичного інтернет-ресурсу відрізняється від існуючих, універсальністю, що надає можливість проводити аналіз та досліджувати повідомлення інтернет-форумів, реалізованих на базі найбільш популярних програмних платформ для створення дискусійних тематичних інформаційних форумів. Застосування на практиці моделі інтернет-форуму, при прогнозуванні вразливостей та загроз інформаційної безпеки, надасть можливість проводити аналіз більшості існуючих тематичних інтернет-форумів, незалежно від задіяної програмної платформи, використовуваної для реалізації форуму [1,2,7].

Текстові повідомлення інтернет мережі є окремо структурою, що складається з пов'язаних між собою елементів (рис. 2). Потік даних в інтернет- мережі є множина текстових повідомлень тематичних інтернет-форумів, створюваних учасниками форуму. Враховуючи те, що моделювання мережевого потоку повідомлень тематичних інтернет-форумів здійснюється з метою наступного прогнозування вразливостей та загроз інформаційної безпеки, при побудові моделі тематичного інтернет- форуму, необхідно передбачити можливість здійснення семантичного та статистичного аналізу текстових повідомлень, враховуючи належність даних до конкретного форуму, кількості повідомлень теми форуму, автора, часу створення, рейтингу автора.

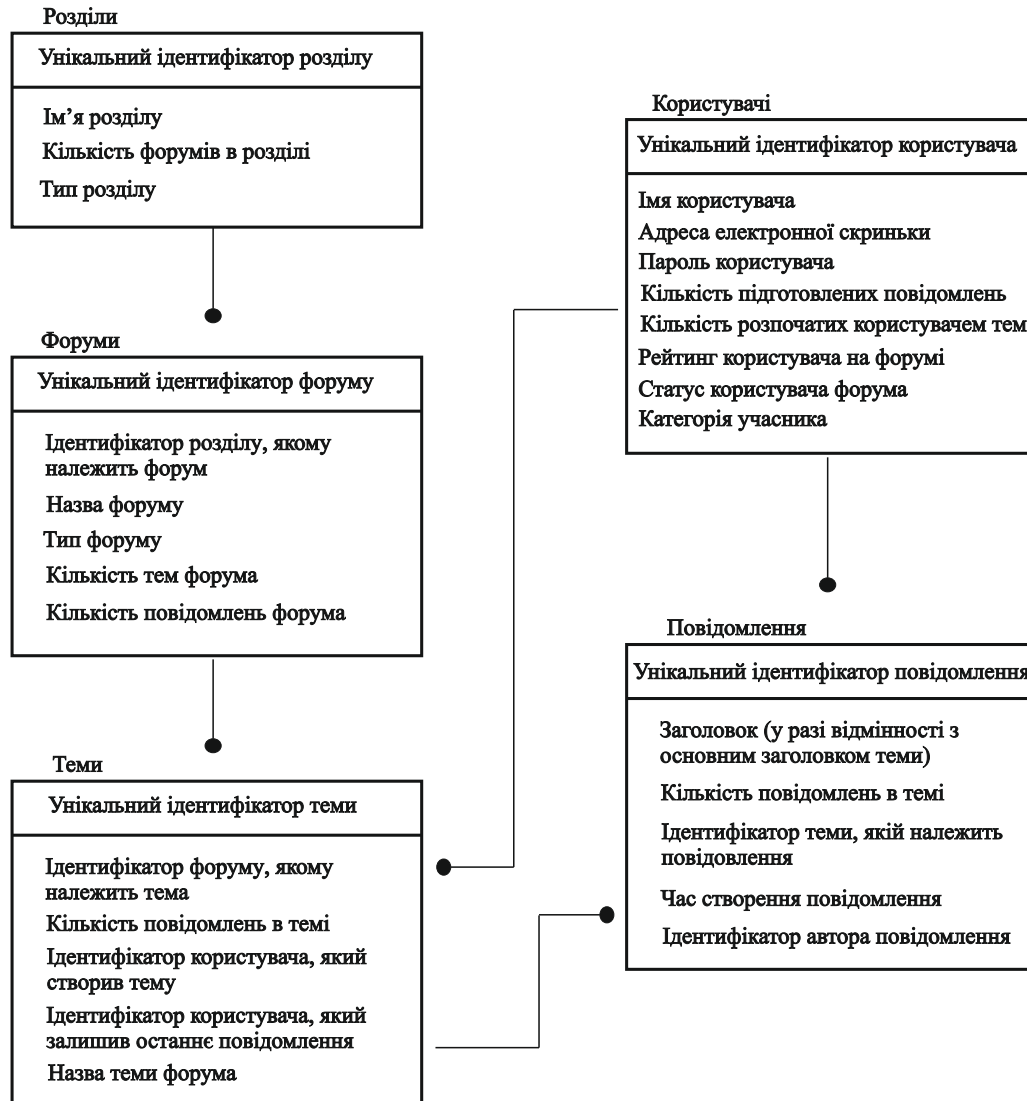


Рис. 1. Логічна модель бази даних тематичних інтернет-ресурсів

Онтологія є найбільш ефективним інструментом для опису конкретної предметної області. Суть онтологічного підходу полягає у представленні предметної області у вигляді організованої множини понять, враховуючи існуючі зв'язки між ними та їх властивості [3, 10]. Модель потоку текстових повідомлень, у загальному вигляді, яка має відношення до предметної області, заданої онтологією, представляється трійкою (1):

$$S_{\tau} = (M, O, T), \quad (1)$$

де  $S_{\tau}$  – потік текстових повідомлень інтернет мережі у поточний час  $\tau$ ;  $M$  - множина інтернет повідомлень у потоці даних;  $O$  - онтологія даної предметної області;  $T = \{1, \dots, \tau\}$  - множина часових інтервалів, в які велися спостереження за інтернет потоком повідомлень (годин, днів, місяців).

$$O = (E, R, F), \quad (2)$$

де  $E$  - множина термінів заданої предметної області;  $R$  - множина взаємозв'язків між термінами даної предметної області;  $F$  - множина заданих на відношеннях та термінах онтології функцій

аксіоматизації (інтерпретації). Кожне текстове повідомлення  $d \in M$  може бути представлене наступним чином:

$$d \in (s, t, F_d, A), \quad (3)$$

де  $S$  - текст інтернет повідомлення,  $t = \{1, \dots, \tau\}$  - момент часу створення текстового повідомлення;  $F_d = \{w_1, \dots, w_k\}$  - вектор, що представляє текстове повідомлення заданої предметної області, заданою відповідною онтологією  $O$ ,  $k$  - кількість в онтології термінів, координати  $w_i (i=1, \dots, k)$  - ваги термінів у текстовому повідомленні,  $A$  - рейтинг автора текстового повідомлення.

При розрахунку ваги термінів використовується модель TF-IDF (Term frequency – Inverse document frequency) [10], відповідно до якої вага терміна текстового повідомлення прямо пропорційна частоті входження терміна в інтернет повідомлення і обернено пропорційна кількості текстових повідомлень, у яких зустрічається термін (4):

$$w_i = F_i \cdot \log \left( \frac{D}{DF_i} \right), \quad (4)$$

де  $w_i$  - вага  $i$  - терміна у текстовому повідомленні;  $F_i$  - частота  $i$  - терміна у інтернет повідомленні;  $D$  - загальна кількість текстових повідомлень;  $DF_i$  - кількість текстових повідомлень, у яких зустрічається  $i$  - термін.



Рис. 2. Структура повідомлення тематичного інтернет-форуму

Розглянута модель не враховує того, що текстові повідомлення тематичних форумів можуть мати різний розмір, у зв'язку з чим, вага терміна і відповідно частота будуть зменшуватися зі зростанням розміру текстових повідомлень. Враховуючи дану ситуацію необхідно проводити нормування ваг термінів у інтернет повідомленні, діленням їх на довжину вектора-повідомлення (еклідову норму) (5):

$$w_i^* = \frac{w_i}{d} = \frac{w_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^k w_i^2}}, \quad (5)$$

При використанні онтологічних методів для опису та обробки предметної області, необхідно представити її у вигляді організованої структури сукупності термінів (понять), враховуючи існуючі властивості та зв'язки між ними. У задачах, що передбачають подальшу обробку, предметної області, розроблених онтологій, найчастіше застосовується для їх представлення формат OWL (Ontology Web Language) - мова опису онтологій для семантичного павутиння. У термінознавстві та лексикографії застосовуються алгоритми, що ґрунтуються на статистичних та лінгвістичних методах, для видалення термінів [10].

При використанні статистичних методів основним критерієм є ступінь термінологічності, визначається у відповідності до числових закономірностей, характерними для термінів і нетермінів. При використанні лінгвістичних методів терміни відбираються за лінгвістичними ознаками та певними граматичними лексичними шаблонами [6,10].

При використанні онтологічного підходу знання про відповідні предметні області (онтологія) зберігаються у вигляді (6):

$$O = (E, R, F), \quad (6)$$

де  $E$  - множина термінів заданої предметної області;  $R$  - множина взаємозв'язків між термінами даної предметної області (7):

$$R \subset \{R_{inc}, R_{add}, R_{term}, R_{lem}, R_{NC}\}, \quad (7)$$

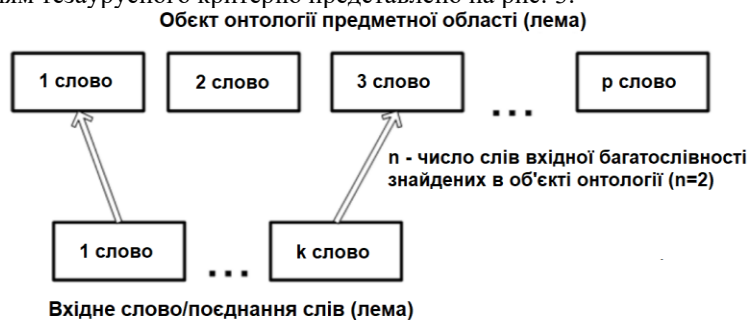
де  $R_{inc}$  – множина вбудованих відношень між об'єктами («є Підкласом»);  $R_{add}$  – множина вбудованих відношень між об'єктами, дозволяють розширювати набір відповідних об'єктів предметної області, для якої проводиться аналіз, шляхом об'єднання лем області, пов'язаних між собою об'єктів («має Відношення», «є Частиною»);  $R_{term}$  – відношення «є Терміном», визначається експертним шляхом і носить допоміжний характер, приймає логічний тип значення (в залежності від того, наскільки об'єкт характерний для предметної області). Прикладне застосування  $R_{term}$  знаходить при вирішенні задач видалення, з використанням тезаурусного критерію термінологічності термінів;  $R_{lem}$  – відношення «має Лемму», дана властивість приймає значення рядкового типу, яке виходить в результаті лемування, приведенні найменування об'єкта до початкової форми;  $R_{NC}$  – множина відношень між тематичними об'єктами, описують особливості взаємодії між собою об'єктів даної предметної області (властивості «є Елементом», «є Типом вірусів»);  $F$  – множина заданих на термінах та відношеннях онтології предметної області функцій аксіоматизації (інтерпретації).

Задача фільтрації текстових повідомлень, які не належать до предметної області, для якої проводиться аналіз, може бути вирішена із використанням семантичної метрики «термін/не термін». Для використання семантичної метрики необхідно попередньо розробити відповідну онтологію предметної області у форматі OWL. Далі для кожного тематичного повідомлення, що надходять в інтернет мережі, розраховується значення ступеня близькості термінів включених до онтології, в результаті виділяються тематичні повідомлення, що виключно відносяться до даної предметної області [7 – 9].

Значення коефіцієнта ступеня близькості текстового повідомлення до всіх термінів предметної області, який розраховується при використанні семантичної метрики «термін/ не термін», приймає значення в діапазоні від 0 до 1 (текстове повідомлення відноситься до певного терміну, чим ближче значення коефіцієнта  $k_{Ont}$  до 1). Для вирішення задач відбору текстових повідомлень, до даної предметної області, заданої у вигляді онтології, використовуються два критерії: вкладених зв'язків та тезаурусний критерій. Застосування тезаурусного підходу до вирішення задачі фільтрації текстових повідомлень полягає в пошуку лем, що містяться в тематичних повідомленнях, надходять в інтернет мережі, серед термінів онтології даної предметної області. Використання тезаурусного підходу для відповідного класу онтології предметної області визначає властивість «має Лемму», шляхом приведення до початкової форми (лемування) найменування об'єкта області, що аналізується.

Для розрахунку коефіцієнта ступеня близькості тематичних повідомлень до термінів даної предметної області відповідно до тезаурусного критерію, необхідно виконати послідовність дій: провести оцінку коефіцієнта ступеня близькості текстового повідомлення до кожного об'єкта онтології, для якої проводиться аналіз; визначити опорний об'єкт заданої онтології, який найбільш близько асоціюється з тематичним повідомленням, що надходить в інтернет мережі.

Розрахунок коефіцієнта ступеня близькості текстового повідомлення термінам заданої предметної області з використанням тезаурусного критерію представлено на рис. 3.



**Рис. 3. Визначення опорного об'єкта онтології**

Коефіцієнт ступеня близькості опорного об'єкта онтології до тематичного повідомлення, що надходить в інтернет мережі розраховується наступним чином (8):

$$k_t = \max \left( \frac{n_i}{p_i} \right)_{i=1}^m, \quad (8)$$

де  $m$  – загальна кількість об'єктів заданої онтології;  $n_i$  – кількість слів у лемі тематичного повідомлення, присутніх у лемі  $i$ -го об'єкта заданої онтології предметної області;  $p_i$  – кількість слів у лемі  $i$ -го об'єкта онтології предметної області.

У випадку коли значення коефіцієнта  $k_t$  отримано однакове для декількох об'єктів онтології заданої

предметної області, опорним приймається об'єкт онтології, для якого значення  $n_i$  набуває максимальної величини. Якщо, при цьому, існує декілька об'єктів онтології, для яких значення  $n_i$  і  $k_t$  однакові, то в даній ситуації всі об'єкти вважаються опорними і для кожного об'єкта проводиться аналіз по онтологічному критерію.

Відповідно до тезаурусного критерію коефіцієнт ступеня близькості тематичного повідомлення термінам даної предметної області розраховується за наступним чином (9):

$$k_{Ont} = \frac{k_t}{c+1}, \quad (9)$$

де  $k_t$  - коефіцієнт ступеня близькості, розрахований на першому етапі проведення аналізу (обчислюється за (8));  $c$  - число відношень між об'єктами, які пов'язують опорний об'єкт онтології предметної області з об'єктами, що мають значення властивості «є Терміном». Якщо опорний об'єкт онтології предметної області є терміном, то  $c=0$ . Тезаурусний критерій схематично представлений на рис. 4.

Застосування метрики "термін / не термін" для коефіцієнта оцінки ступеня близькості тематичних повідомлень до термінів заданої предметної області передбачається рух графом, при цьому об'єкти класів онтології предметної області є вузлами графа. Якщо у опорного об'єкта онтології предметної області властивість «є Терміном» хибно, і він при цьому не пов'язаний з іншими об'єктами, або у всіх пов'язаних з ним об'єктів онтології значення властивості «є

Терміном» хибно, то в даному випадку проводиться пошук інших опорних об'єктів онтології і знову ж таки проводиться оцінка. При цьому тематичне повідомлення не відноситься до предметної області ( $k_{Ont} = 0$ ), коли опорні об'єкти онтології відсутні або для всіх опорних об'єктів предметної області характерна розглянута ситуація.

Критерій вкладених зв'язків онтології ґрунтується на тому, що крім оцінки коефіцієнта ступеня термінологічності кожного текстового повідомлення, метрика «термін/не термін» дозволяє проводити фільтрацію тематичних повідомлень шляхом зіставлення лема повідомлення та поєднаннями лем об'єктів онтології предметної області, пов'язаних відношеннями.



Рис. 4. Схема тезаурусного критерію

Таким чином, тематичне повідомлення вважається таким, що відноситься до заданої предметної області, якщо його лема співпадає з об'єднанням лем об'єктів даної онтології, пов'язаних між собою, при цьому односпрямованими відношеннями.

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

Запропонована інформаційна модель бази даних форуму тематичного інтернет-ресурсу, відрізняється від відомих, універсальністю, дозволяє аналізувати та досліджувати потік даних інтернет-форумів, реалізованих на базі популярних програмних платформ для розробки дискусійних інформаційних тематичних ресурсів.

Запропонована модель потоку текстових повідомлень тематичних інтернет форумів, які відносяться до заданої предметної області, даної онтології, відрізняється від відомих, можливістю проводити статистичний аналіз та семантичну фільтрацію повідомлень, враховуючи належність до автора, рейтингу автора, форуму, часу створення, кількості повідомлень, темі форуму, дозволяє здійснювати аналіз та дослідження текстових повідомлень тематичних інтернет-ресурсів. Особливість запропонованого підходу пов'язана з тим, що об'єкти онтології необхідно представляти переважно однослів'ями, що мають, в даному



випадку максимальну кількість відношень із іншими об'єктами онтології. Для практичного використання методу визначальними є відношення, що дозволяють формувати природним чином словосполучення.

### Література

1. Ленков, С.В. Модель безпеки поширення забороненої інформації в інформаційно-телекомунікаційних мережах / С.В. Ленков, В.М. Джулій, В.С. Орленко, О.В. Селюков, А.В. Атаманюк // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.: ВІКНУ, 2020. – Вип. №68. – С. 53-64.
2. Джулій В.М. Інформаційно-ознакова модель джерела шкідливої інформації в соціальних мережах/ В.М. Джулій І.В. Муляр О.О Зацепіна В. М. Пічура – Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах № 3 (2022)- 73 – 78
3. Ленков, С.В. Методы и средства защиты информации. В 2-х томах /С.В. Ленков, Д.А. Перегудов, В.А. Хорошко –К: Арий, 2008.–464с
4. Остапов С. Е. Технології захисту інформації: навчальний посібник / С.Е. Остапов, С.П. Євсєєв, О.Г. Король–Харків : Вид-во ХНЕУ, 2016. – 476 с.
5. Ленков, С.В. Аналіз існуючих методів та алгоритмів виявлення атак в бездротових мережах передачі даних / С.В. Ленков, В.М. Джулій, Н.М. Берназ, С.О. Божук // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.: ВІКНУ, 2017. – Вип. № 56. – С.124-132
6. Довгий, С.О. Сучасні телекомунікації: мережі, технології, економіка, управління, регулювання / С.О. Довгий, О.Я. Савченко, П.П. Воробієнко – К.: Український Видатничий Центр, 2012. – 520 с.
7. Джулій, В.М. Модель оцінки ймовірно-часових характеристик інформаційної взаємодії в мережі інтернет речей / В.М. Джулій, І.В. Муляр, О.В. Селюков, Б.М. Кізіун // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.: ВІКНУ, 2019. – Вип. № 63. – С.96-106
8. Джулій, В.М., Кльоц Ю.П., Муляр І.В., Жилевич М.Л., Джулій А.В. Контроль додатків інтернет-трафіка комп'ютерних мереж методами машинного навчання. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2021. № 5. С. 22-26.
9. Джулій, В.М. Метод класифікації додатків трафіка комп'ютерних мереж на основі машинного навчання в умовах невизначеності / В.М. Джулій, О.В. Мірошніченко, Л.В. Солодєєва // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.: ВІКНУ, 2022. – Вип. №74. – С. 73-82.
10. Лавров, Є. А. Математичні методи дослідження операцій: підручник / Є. А. Лавров, Л. П. Перхун, В. В. Шендрік – Суми : Сумський державний університет, 2017. – 212 с.

### References

1. Lenkov, S.V. (2020), Model bezpeky poshyrennia zaboronenoї informatsii v informatsiino-telekomunikatsiinykh merezhakh / S.V. Lenkov, V.M. Dzhulii, V.S. ORLENKO, O.V. Sieliukov, A.V. Atamaniuk // Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoho instytutu Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka. – K.: VIKNU. – №68. – pp. 53-64.
2. Dzhulii V.M. Informatsiino-oznakova model dzhherela shkidlyvoi informatsii v sotsialnykh merezhakh/ V.M. Dzhulii I.V. Muliar O.O Zatssepina V. M. Pichura – Vymi-riuvanna ta obchysliuvanna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh № 3 (2022)- 73 – 78
3. Lenkov, S.V. (2008), Metodyy sredstva zashchity ynformatsyy. V 2-kh tomakh / S.V. Lenkov, D.A. Perehudov, V.A. Khoroshko – K: Aryi–464s.
4. Ostapov, S. E. (2016) Tekhnolohii zakhystu informatsii: navchalnyi posibnyk / S.E. Ostapov, S.P. Yevseiev, O.H. Korol–Kharkiv : Vyd-vo KhNEU. – 476 s.
5. Lenkov, S.V. (2017), Anallz isnyuyuchih metodiv ta algoritmv viyavlennya atak v bezdrotovih merezhah peredachI danih / S.V. Lenkov, V.M. Dzhulii, N.M. Bernaz, S.O. Bozhuk // Zbirnyk naukovih prats Viiskovoho Instytutu Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka. – K.: VIKNU. – Vip. No 56. – p.124-132
6. Dovhyi, S.O. (2012), Suchasni telekomunikatsii: merezhi, tekhnolohii, ekonomika, upravlinnia, rehuliuвання /S.O. Dovhyi, O.I. Savchenko, P.P. Vorobiienko – K.: Ukrainskyi Vydatnychi Tsentr. – 520p.
7. Dzhulii, V.M. (2019), Model otsinky ymovimisno-chasovykh kharakterystyk informatsiinoї vzaiemodii v merezhi internet rechei / V.M. Dzhulii, I.V. Muliar, O.V. Sieliukov, B.M. Kiziun // Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoho instytutu Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka. – K.: VIKNU. – Vyp. № 63. – p.96-106
8. Dzhulii V.M., Klots Yu.P., Muliar I.V., Zhylevych M.L., Dzhulii A.V. (2021), Kontrol dodatkov internet-trafika kompiuternykh merezh metodamy mashynnoho navchannia. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – №5. – pp. 22–26.
9. Dzhulii, V.M. (2022), Metod klasyfikatsii dodatkov trafika kompiuternykh merezh na osnovi mashynnoho navchannia v umovakh nevyznachenosti / V.M. Dzhulii, O.V. Miroshnichenko, L.V. Solodieva // Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoho instytutu Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka. – K.: VIKNU. – Vyp. №74. – pp. 73-82.
10. Lavrov, Ye. A. (2017.), Matematychni metody doslidzhennia operatsii : pidruchnyk / Ye. A. Lavrov, L. P. Perkhun, V. V. Shendryk – Sumy : Sumskyi derzhavnyi universytet, – 212 p.

Надійшла/Paper received : 13.09.2022 p. Надрукована/Printed :01.11.2022 p.



ГОРОШКО Андрій

Хмельницький національний університет  
<https://orcid.org/0000-0002-1386-2326>

КОВТУН Ігор

Хмельницький національний університет  
<https://orcid.org/0000-0002-1430-6479>

ЗЕМБИЦЬКА Марина

Хмельницький національний університет  
<https://orcid.org/0000-0002-6671-9937>  
e-mail: [iftomm@ukr.net](mailto:iftomm@ukr.net)

## ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВІБРАЦІЙНОГО АНАЛІЗУ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ БОРТОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

*Електронна апаратура літальних апаратів під час експлуатації піддається вібраціям з частотою 20-2000 Гц та віброприскоренням до 20g. Майже половина усіх відмов бортової апаратури спричинено негативним впливом вібрації. Для ефективного віброзахисту апаратури при її проектуванні здійснюють вібраційний аналіз, визнаючи резонансні режими. У роботі подано результати вібраційного аналізу відомими аналітичними методами, чисельними та експериментальними методами. Показано, що на точність визначення власних частот і форм коливань плати істотно впливають інерційні і пружно-демпфувальні характеристики компонентів плати, кріплень до корпусу і їх місце розташування. З метою підвищення точності вібраційного аналізу необхідно проводити попередній аналіз пружних і демпфувальних параметрів кріплення плати до корпусу та самого корпусу.*

*Ключові слова:* друкована плата, пластина, вібрація, власні частоти, моделювання

GOROSHKO Andrii., KOVTUN Igor, ZEMBYTSKA Maryna  
Khmelnitskyi National University

## IMPROVING THE ACCURACY OF THE VIBRATION ANALYSIS OF ON-BOARD ELECTRONICS PRINTED BOARDS

*Electronic equipment of aircraft during operation is exposed to vibrations with a frequency of 20-2000 Hz and a vibration acceleration of up to 20g. Almost half of all failures of on-board equipment are caused by the negative impact of vibration. For effective vibration protection of the equipment during its design, a vibration analysis is carried out, recognizing resonance modes. The difficulty of modeling vibration processes in printed circuit boards lies in the deviation of calculated values of critical frequencies and values obtained experimentally with the help of shakers. The main reasons for this in the known analytical methods are the impossibility of fully accurate consideration of the concentrated masses and elastic-damping characteristics of individual electronic components of the board, its fasteners and device cases, which, in turn, leads to the appearance of coupled oscillations. The paper presents the results of vibration analysis by well-known analytical methods, numerical and experimental methods. It is shown that the accuracy of determining the natural frequencies and forms of board oscillations is significantly influenced by the geometric, inertial, and elastic-damping characteristics of the board components. The effectiveness of numerical modeling methods is demonstrated. When arranging massive components at the stage of designing the board, it is necessary to take into account that the natural frequency of the board depends on the position of its center of gravity and increases sharply when approaching the edge of the board. Boards with a small number of components have a lower critical frequency than their corresponding empty boards due to the increase in mass. Instead, boards densely filled with components have a higher natural frequency than empty boards due to increased stiffness. In order to increase the accuracy of the vibration analysis, it is necessary to conduct a preliminary analysis of the elastic and damping parameters of attaching the board to the case and the case itself.*

*Keywords:* printed circuit board, plate, vibration, natural frequencies, modeling

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

Одним з вагомих дестабілізуючих факторів, що призводять до відмов електронної апаратури, яка встановлюється на літальних апаратах, є зовнішній вібраційний вплив. Такі вироби електронної техніки (ВЕТ) під час експлуатації піддаються вібраціям з частотою 20-2000 Гц з віброприскоренням до 20g. ВЕТ сприймає вібраційні та ударні навантаження через монтажні плати, днища шасі, стінки корпусів та інші конструктивні елементи, що в свою чергу передають ці навантаження на змонтовані на них блоки, мікросхеми та інші компоненти. Варто зазначити, що режими функціонування бортових ВЕТ в реальних умовах експлуатації значно відрізняються від випробувальних режимів, що є причиною половини відмов, викликаних вібраційними впливами [1].

Якщо плати та інші несівні елементи зазнають резонансних коливань, то динамічні навантаження багаторазово зростають і можуть призвести до поломок або відмови ВЕТ через відхилення параметрів розташованих на них блоків та елементів за межі допусків згідно технічними умовами. Тому при проектуванні ВЕТ особлива увага має бути приділена знаходженню власних частот коливань розрахунковими та експериментальними методами, а отже, і можливих резонансів, щоб уникати роботи апаратури на цих режимах [1]. Для вібраційного аналізу ВЕТ використовують розрахункові та експериментальні методи, а також різноманітні методи моделювання, зокрема на базі методу скінченних елементів.

### Аналіз досліджень та публікацій

Питанням віброзахисту, вібростійкості та підвищенню точності вібраційного контролю ВЕТ останнім часом приділяється значна увага [2-11]. Зазвичай при розрахунках друкованих плат, стінок корпусів та інших плоских прямокутних конструкцій РЕА їх моделюють у вигляді еквівалентних їм однорідних прямокутних пластин, теорія коливань яких є досить складною, об'ємною, сповненою спрощень і припущень і не є завершеною [3]. Для складних конструкцій ВЕТ кращі результати показує чисельне [4] та імітаційне моделювання коливань друкованих плат. Зокрема автори роботи [8] дослідили динамічні характеристики друкованої плати, визначивши та перевіряючи нормальні режими та функції амплітудно-частотної характеристики за допомогою вібраційних випробувань друкованої плати. Розроблена модель з перевіреною адекватністю використана для прогнозування вібраційної реакції на вхідну випадкову вібрацію. Показано, що для підвищення точності прогнозування реакції на випадкову вібрацію необхідно враховувати зміни проектних параметрів друкованої плати.

Автори у [9] чисельно моделювали друковану плату та визначали найбільш обмежені ділянки для декількох її конфігурацій. Цей результат може бути корисним у процесі збирання з використанням конфігурації з найменшими обмеженнями. У роботі [10] проаналізовано проблеми вібрації друковані плати, стінки корпусу та електронних компонентів. Експериментально підтверджена значна різниця в амплітудах коливань, що передаються всередину і зовні плати. Автори використовували елементи теорії згину пластин для основних плат, стінок корпусів та інших плоских прямокутних конструкцій, розглядаючи плати як еквівалентні однорідні пластини для оцінювання їх власних частот та форм вільних перехресних коливань і, отже, ідентифікації можливих резонансів з метою уникнення їх під час роботи.

У [11] представлені результати чисельного моделювання і експериментальних досліджень друкованих плат. Доведено, що моделювання плати без врахування компонентів не дає бажаної точності визначення критичних частот, тому стандарт вібраційних випробувань має містити визначення вібраційних характеристик усієї збірки друкованої плати. Автори роботи [12] змоделювали і експериментально дослідили вібраційні властивості багатошарової крупногабаритної друкованої плати методами імітаційного моделювання в середовищі *Creo Elements/Pro 5.0 Environment*, порівняли отримані дані з результатами випробувань друкованих плат на вібростенді.

Широкий огляд сучасних засобів віброзахисту і зниження віброактивності друкованих плат поданий у роботі [13], зокрема розглянуті сучасні підходи до оцінювання надійності друкованих плат з використанням *Physics of Failure (PoF)*. Проте суттєвим недоліком скінченноелементних деталізованих моделей друкованих плат є їх вузька спеціалізація. На жаль, через великий діапазон вхідних даних (типи компонентів, товщини друкованих плат та навантаження) ці моделі не володіють бажаною універсальністю. Аналітичні методи не мають таких недоліків і мають набагато ширшу застосовність.

### Постановка проблеми

Результати різних авторів свідчать про достатню складність моделювання вібраційних процесів у друкованих платах, що проявляється у відхиленні розрахованих значень критичних частот і значень, отриманих експериментально за допомогою вібростендів. Головними причинами цього у відомих аналітичних методах є неможливість повного точного врахування зосереджених мас та пружно-демпфувальних характеристик окремих електронних компонентів плати, її кріплення та корпусів пристроїв, що, у свою чергу, призводить до появи зв'язаних коливань.

Метою цієї роботи є аналіз критичних частот склотекстолітових (FR-4) друкованих плат аналітичними і експериментальними методами, методом імітаційного моделювання та порівняння їх результатів.

### Виклад основного матеріалу

#### Застосування теорії коливань прямокутних пластин

У теорії коливань прямокутних пластин пластиною називають геометричний об'єкт з товщиною  $H$  не менше, ніж в п'ять разів меншою за довжину і ширину (рис. 1). Нехай осі  $X$  та  $Y$  прямокутної системи координат лежать у серединній площині пластини, а вісь  $Z$  є перпендикулярною цій площині.

Під дією поперечного рівномірного інерційного навантаження пластина згинається і серединна площина перетворюється на серединну пружну поверхню, яка ділить пластину на розтягнуту і стислу зони, подібно до того, як у балках на нейтральні волокна і нейтральну вісь перерізу. Як і у балок, прогин пластини  $Z \ll H$ , серединна поверхня є нейтральною, а нормальні до неї деформації залишаються нормальними до неї і за умов деформації пластини. Картина деформацій пластини схожа на картину деформацій балки, але пластина деформується у двох площинах –  $XZ$  та  $YZ$  одночасно. Точки серединної площини з точністю до малих другого порядку отримують лише вертикальні переміщення – прогини  $Z$ , а точки, віддалені по вертикалі переміщуються ще й горизонтально в площині  $XY$ .

Отже, отримавши рівняння серединної поверхні  $Z = Z(X, Y)$  можна знайти положення усіх точок пластини, за законом Гука – усі напруження і застосовувати теорію міцності. Це рівняння має вигляд [14]:

$$\frac{\partial^4 z}{\partial^4 x} + 2 \frac{\partial^4 z}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 z}{\partial y^4} + \frac{\gamma H}{gD} \frac{\partial^2 z}{dt^2} = \frac{P}{D}, \quad (1)$$

або ввівши оператор Лапласа  $\Delta = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2$  і бігармонічний оператор  $\Delta\Delta = \partial^4 / \partial x^2 + 2\partial^4 / \partial x^2 \partial y^2 + \partial^4 / \partial y^4$  отримують основне рівняння деформацій пластини у вигляді:

$$\Delta\Delta z + \frac{\gamma H}{gD} \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \frac{P}{D}, \quad (2)$$

де  $z$  – прогин;  $q$  – інтенсивність розподіленого по поверхні навантаження;  $\gamma$  – об’ємна вага матеріалу пластини, кг/см<sup>3</sup>;  $g$  – прискорення сили тяжіння;  $H$  – товщина пластини;  $D = EH^3 / [12(1-\mu^2)]$ , – циліндрична жорсткість;  $E$  – модуль пружності матеріалу пластини;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона;  $t$  – час.

Частинним видом (2) є рівняння власних коливань пластини, навантаженої силою інерції

$$m \cdot a = \frac{\gamma H}{g} \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = -m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2}, \text{ де } a - \text{прискорення, а } m = \frac{\gamma}{g} H - \text{погонна маса:}$$

$$m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + D \left( \frac{\partial^4 z}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 z}{\partial y^4} \right) = 0. \quad (3)$$

Коли усі краї пластини є вільно опертими, розв’язок (3) має вигляд  $Z(x, y, t) = W(x, y)e^{j\omega_0 t}$ . Амплітудна функція  $W(x, y)$  описує власну форму коливань пластини і визначається:

$$W(x, y) = A_{if} \sin(i\pi x / a) \cdot \sin(f\pi y / b), \quad (4)$$

де  $a, b$  – довжина і ширина пластини;  $i, f$  – кількість напівхвиль синусоїди в напрямі осей  $X$  і  $Y$ . Залежність (4) проілюстрована на рис. 2 – довільна пряма, паралельна осі  $X$ , перетворюється в синусоїду, яка містить в інтервалі  $(0, a)$   $i$  напівхвиль (рис. 2,  $i = 2$ ), а пряма, паралельна осі  $Y$  –  $f$  напівхвиль (рис. 7.2,  $f = 3$ ).

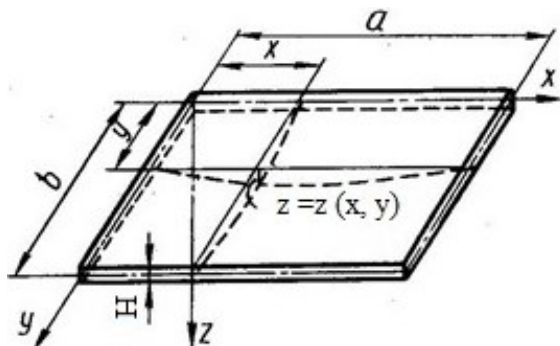


Рис. 1. Пластина

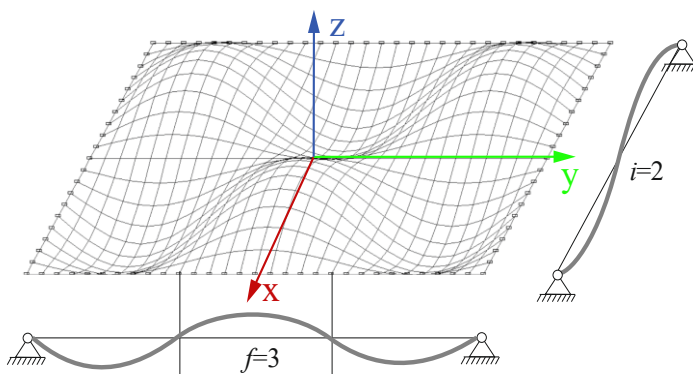


Рис. 2. Розрахункова схема пластини і можливі форми її коливань

Граничними умовами для (4) є нульові прогини і згинальні моменти на краях (опорах) пластини:  $z=0$  і  $\partial^2 z / \partial x^2 + \mu \partial^2 z / \partial y^2 = 0$  при  $x=0$  і  $x=a$   $z=0$  і  $\partial^2 z / \partial y^2 + \mu \partial^2 z / \partial x^2 = 0$  при  $y=0$  і  $y=b$ , звідки власна частота

$$\omega_0 = \pi^2 \left[ (i/a)^2 + (f/b)^2 \right] \cdot \sqrt{D / \rho H}, \quad (5)$$

де  $\rho$  – густина матеріалу пластини.

Розглянутий метод визначення власної частоти коливань може застосовуватись і коли плата вільно опирається на двох протилежних краях, що відповідає найпоширенішому способу закріплення плат у  $T$ -подібних напрямних (у етажеркових конструкціях), при наближеному розв’язанні диференціальних рівнянь. У випадках, коли умови закріплення не задовольняють таким вимогам, застосовують наближені методи Релея, Релея-Рітца, Бубнова-Галеркіна та ін. [1].

### Результати натурних експериментів

На практиці власні частоти коливань плат часто не збігаються з величинами, знайденими розрахунковим шляхом через низку причин: присутність навісного монтажу на платах і нерівномірного його розподілу по площі; присутність струмопровідних доріжок, що призводить до зміни характеристик жорсткості плати; неможливість врахування зусиль затягування при закріпленні плат у до корпусу блока тощо. Окрім того, через зв'язність коливань, при резонансах одні елементи втягують у коливання інші, що викликає зміну і маси, і жорсткості.



Рис. 3. Вібростенд ВЕД-200

Отже, знайдені розрахунковими методами значення власних частот коливань матимуть наближене значення, а більш точні їх значення можна отримати лише експериментально. Наприклад, з використанням (5) були проведені розрахунки першої частоти коливань плати, виготовленої з склотекстоліта FR-4, що містить рівномірно розташовані по її поверхні мікромодулі 4У21. Параметри плати і навісного монтажу:  $H = 1,22$  мм;  $a=b=200$  мм; поправковий коефіцієнт, що враховує масу елементів  $Q_s/Q_n = 1$ . Для розглянутої плати визначена аналітично частота коливань склала 65 Гц. За результатами експериментальних випробувань плати на вібростенді ВЕД-200 (рис. 3) встановлено, що частота її першої форми коливань дорівнює 130 Гц. Така значна розбіжність вказує на необхідність пошуку точніших методів вібраційного аналізу.

### Результати імітаційного моделювання

Найчастіше застосовувані дослідниками методи моделювання, що базуються на методі скінченних елементів, не враховують жорсткісні і демпфувальні характеристики компонентів та їх розташування, моделюючи друковану плату як пластину. У цій роботі автори здійснювали імітаційне моделювання у середовищі *Matlab* засобами *Simscape Multibody*, в основі якого лежать чисельні методи. Друкована плата моделювалась як гнучка пластина, на якій розміщуються електронні компоненти. Середовище 3D-моделювання *Simscape Multibody* дає можливість змодельовувати друковану плату як багатотільну механічну систему з врахуванням типу закріплення плати, обмеження відповідних шарнірів, інерційних та пружно-демпфувальних властивостей усіх елементів системи.

Для моделювання був вибраний найпоширеніший на сьогодні матеріал для виготовлення друкованих плат - армований скловолокном епоксидний ламінат FR-4. Це композиційний матеріал на основі тканинного скловолокна, зв'язаного речовиною на основі епоксидної смоли з вогнетривкою властивістю. У таблиці 1 подані основні механічні характеристики FR-4, які були взяті для моделі. Матеріал має різні властивості у перпендикулярних напрямках: LW – по вздовжньому, за напрямом основних ниток і CW – поперечному.

Таблиця 1

Густина	Модуль Юнга (LW)	Модуль Юнга (CW)	Коефіцієнт Пуассона (LW)	Коефіцієнт Пуассона (CW)	Коефіцієнт затухання
$\rho=1850$ кг/м <sup>3</sup>	E=24 ГПа	E=21 ГПа	$\mu=0,136$	$\mu=0,118$	0,017

Дослідженню підлягала друкована плата з наступними характеристиками:  $H = 1,22$  мм;  $a=b=200$  мм. Маса пустої плати – 115 г., маса плати з компонентами – 142 г. Для отримання частотних характеристик моделі здійснювалась її симуляція у діапазоні частот збудження першої, найбільш небезпечної форми коливань з амплітудою 1 мм. Вимушені коливання передавались на стінки корпусу, які вважались абсолютно жорсткими, через ідеальні шарнірні опори. На рис. 4 представлені частотні характеристики коливань центра плати (максимальні прогини) при різних варіантах розміщення компонентів на платі: зміщення центра ваги відсутнє  $l=0$ , зміщення дорівнює  $l=0,024a$  і  $l=0,048a$ , де  $a$  – сторона плати.

Отримані результати свідчать, що власна частота плати істотно залежить від положення її центра ваги і різко збільшується при наближенні до краю плати. Цей факт необхідно враховувати при компоновці на етапі проектування плати.

Реальні друковані плати з компонентами є більш жорсткими, ніж пусті за рахунок впливу жорсткості окремих компонентів та їх паяних з'єднань. Самі компоненти як правило характеризуються більшою жорсткістю, ніж матеріал FR-4. У роботі [15] встановлено, що під компонентом відбувається локальне збільшення жорсткості у 2 рази. Це викликає підвищення жорсткості всієї плати і, відповідно, підвищення значення власної частоти у порівнянні з значенням, отриманим для пустої плати. Виконане авторами моделювання друкованої плати з жорстко закріпленими компонентами (рис. 5) показало, що плати

з незначною кількістю компонентів мають нижчу критичну частоту, ніж відповідні їм пусті плати, за рахунок збільшення маси. Натомість щільно наповнені компонентами плати мають вищу власну частоту, ніж пусті, за рахунок впливу збільшення їх жорсткості. Отримані результати добре узгоджуються з результатами інших авторів, зокрема [16]. Для прикладу на рис. 6 представлені порівняльні частотні характеристики пустої плати і такої плати з такою ж масою з компонентами.

Ще однією особливістю вібраційного аналізу друкованих плат є те, що критичні частоти необхідно шукати лише виходячи з реальних граничних умов. В більшості випадків умови закріплення моделей плати: жорстке, шарнірне, вільно опертий край або вільний край відображають реальні кріплення плати лише з деякими припущеннями, оскільки останні не є абсолютно жорсткими. Пружно-демпфувальні властивості кріплень, через які вимушені коливання передаються на плату, суттєво впливають на значення критичних частот коливань і на результат вібраційного аналізу в цілому.

Для підтвердження цього були проведені наступні дослідження. Для плати розмірами  $200 \times 100 \times 1,55$  мм, шарнірно опертої по периметру, аналітично був розраховане значення першої критичної частоти:  $f=176$  Гц. Такий спосіб закріплення плати відповідає гвинтовому з'єднанню плати до корпусу. Прогин і згинальні моменти по краям плати дорівнюють нулю і плата може здійснювати лише обертовий рух. У припущенні, що плата може рухатись поступально за рахунок кінцевої жорсткості гвинтових з'єднань і податливості вздовж осі  $X$ , у модель додатково додано ще одну ступінь вільності. Рух забезпечується пружним призматичним шарніром з великим коефіцієнтом жорсткості. Дослідженню підлягали частотні характеристики моделі як відгук на вібрацію абсолютно жорсткого корпусу амплітудою 1 мм. На рис. 7 представлені одержані частотні характеристики для коефіцієнтів жорсткості 50...1000 Н/мм, які демонструють залежність відгуку плати на вібрацію корпусу від кінцевої жорсткості кріплень. Критичні частоти плати знижуються з зростанням податливості кріплень, що підтверджує отримані нами раніше експериментальні результати про вплив сили затягування гвинтів кріплення плат до електронного блоку і блоку до вібростенду [3, 10]. Насправді ситуація ще складніша – вібрації передаються через неідеально жорсткі стінки корпусу з критичними частотами у діапазоні 2-4 кГц, що призводить до появи перехрестних коливань [1].

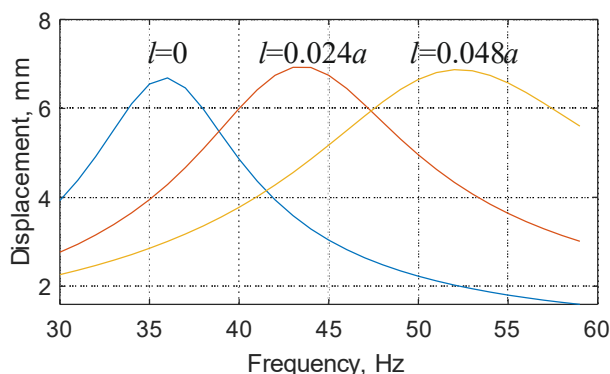


Рис. 4. Частотні характеристики плати для різної величини зміщення  $l$  центра ваги

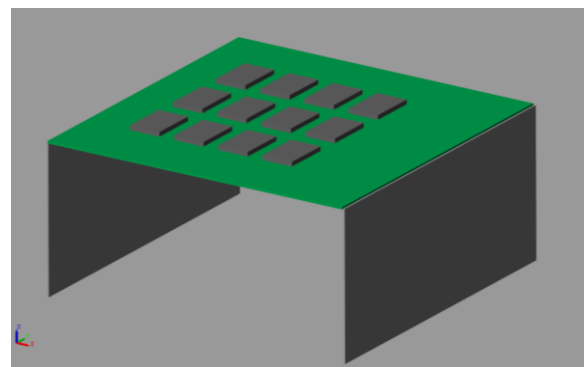


Рис. 5. S-модель друкованої плати з компонентами

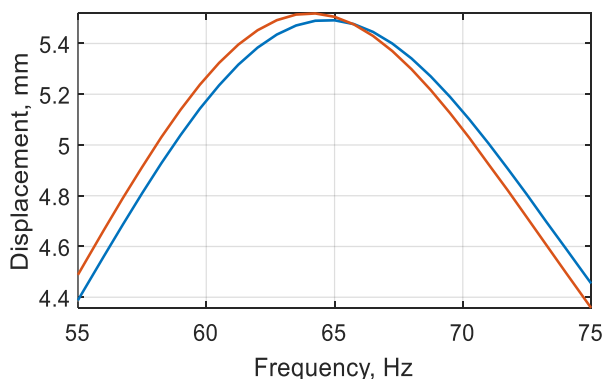


Рис. 6. Частотні характеристики пустої плати та плати з компонентами

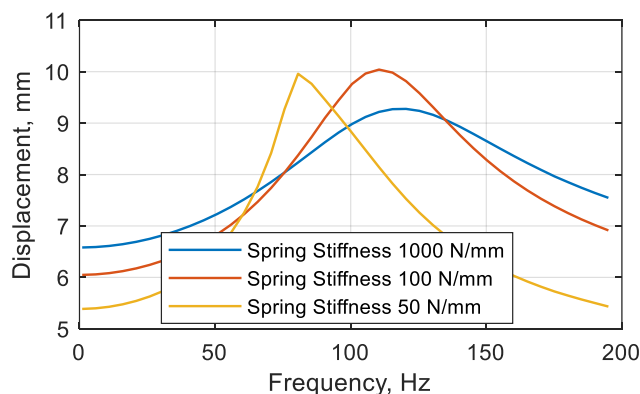


Рис. 7. Частотні характеристики плати з врахуванням податливості кріплення

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

Аналітичні методи вібраційного аналізу і відповідні розрахункові математичні моделі друкованих плат з дискретно розташованими елементами не завжди дають можливість адекватно описати динамічний стан об'єктів дослідження і з достатньою точністю визначити їх власні частоти коливань. Це спричинено зв'язністю коливань елементів при монтажі їх на друкованій платі та впливу пружно-демпфувальних властивостей кріплень, через які вимушені коливання передаються на плату. Тому одержувані аналітично



значення власних частот коливань слід враховувати як оціночні. Для більш точного визначення значень коливань систем плата–компонент та плата–корпус слід використовувати складніші розрахункові моделі, що базуються на чисельним методах, або експериментальні методи досліджень.

На етапі проектування при компоновці плати, особливо з масивними компонентами, необхідно враховувати, що власна частота плати залежить від положення її центра ваги і різко збільшується при наближенні до краю плати. При цьому плати з незначною кількістю компонентів мають нижчу критичну частоту, ніж відповідні їм пусті плати за рахунок збільшення маси. Натомість щільно наповнені компонентами плати мають вищу власну частоту, ніж пусті за рахунок збільшення їх жорсткості. Результати досліджень свідчать, що з метою підвищення точності вібраційного аналізу необхідно проводити попередній аналіз пружних і демпфувальних параметрів кріплення плати до корпусу та самого корпусу.

#### References

1. Royzman, V.P. (2015). Mechanics in electronics [in Russian]. In 3 Volumes. Vol 2. Dynamic Strength : monograph. Khmelnytskyi : KHMNU, 313 p.
2. Pavlenko, V. (2021). Features of assembly of printed circuit boards. Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production, (44), 44-48.
3. Kovtun, I.I., Royzman, V.P. (2019). Deformations of electronic equipment structures under operating loads [in Ukrainian]. Khmelnytskyi : KHMNU, 230 p.
4. Uday, H. Kalyani, Mark Wylie. (2020, June). Modal finite element analysis of PCBs and the role of material anisotropy. Vibroengineering Procedia. VOL. 32. 75-80
5. Gharaibeh, M. A., & Pitarresi, J. M. (2019). Random vibration fatigue life analysis of electronic packages by analytical solutions and Taguchi method. Microelectronics Reliability, 102, 113475.
6. Ghaderi, D., Pourmahdavi, M., Samavatian, V., Mir, O., & Samavatian, M. (2019). Combination of thermal cycling and vibration loading effects on the fatigue life of solder joints in a power module. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 233(9), 1753-1763.
7. Kavitha, M., Mahmoud, Z. H., Kishore, K. H., Petrov, A. M., Lekomtsev, A., Iliushin, P., ... & Salmani, M. (2021). Application of Steinberg model for vibration lifetime evaluation of SN-AG-CU-based solder joints in power semiconductors. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 11(3), 444-450.
8. Somashekar, V. N., Hari Krishnan, S., Ahmed, P. A., & Kamesh, D. (2016). Vibration response prediction of the printed circuit boards using experimentally validated finite element model. Procedia Engineering, 144, 576-583
9. Arabi, F., Gracia, A., Delétage, J. Y., & Frémont, H. (2018, April). Vibration test and simulation of printed circuit board. In 2018 19th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE) (pp. 1-7). IEEE
10. Kovtun, I., Boiko, J., Petrashchuk, S., & Kałaczyński, T. (2018). Theory and practice of vibration analysis in electronic packages. In MATEC Web of Conferences (Vol. 182). EDP Sciences.
11. Jalink, J., Roucou, R., Zaai, J. J. M., Lesventes, J., & Rongen, R. T. H. (2017, May). Effect of PCB and Package Type on Board Level Vibration using Vibrational Spectrum Analysis. In 2017 IEEE 67th Electronic Components and Technology Conference (ECTC) (pp. 470-475). IEEE
12. Al-Araji, Z. H., Swaikat, N. A., Muratov, A., & Turetsky, A. V. (2019, April). Modeling and experimental research of vibration n properties of a multi-layer printed circuit board. In 2019 4th Scientific International Conference Najaf (SICN) (pp. 43-47). IEEE
13. Amy, R. A., Aglietti, G. S., & Richardson, G. (2009). Reliability analysis of electronic equipment subjected to shock and vibration—A review. Shock and Vibration, 16(1), 45-59.
14. Pisarenko G.S., Agarev V.A. Strength of materials [in Russian]. Kiev: Technika; 1967.
15. Dash, P. K., & Thraza, M. M. (2018). Modelling and simulation of effect of component stiffness on dynamic behaviour of printed circuit board. Inter. Jour. Mechanical and Production Eng. Res. & Develop., 8(2), 307-314.
16. Bachoo, R., Balliram, S., & Bridge, J. (2020, June). Experimental and Numerical Vibration Analysis of Printed Circuit Boards. In Book of Abstracts (p. 101).

Надійшла/Paper received : 17.09.2022 р. Надрукована/Printed : 01.11.2022 р.

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)**

Підп. до друку 01.11.2022 р. Ум.друк.арк. 37,88 Обл.-вид.арк. 36,04  
Формат 30х42/4, 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