

ISSN 2307-5732

DOI 10.31891/2307-5732

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

6.2022

---

# ВІСНИК

**Хмельницького  
національного  
університету**

*Том 2*

**Технічні науки**

---

**Technical sciences**

SCIENTIFIC JOURNAL

HERALD OF KHMELNYTSKYI NATIONAL UNIVERSITY

2022, Issue 6, Volume 315, Part 2

**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, № 6, Том 2 (315)**

---

**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:

Google Scholar	<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>
Index Copernicus	<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>
Polish Scholarly Bibliography	<a href="https://pbn.nauka.gov.pl/journals/46221">https://pbn.nauka.gov.pl/journals/46221</a>
CrossRef	<a href="http://doi.org/10.31891/2307-5732">http://doi.org/10.31891/2307-5732</a>

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

**Ч л е н и р е д к о л е г і ї**

*Технічні науки*

Березненко С.М., д.т.н., Бойко Ю.М., д.т.н., Говорущенко Т.О., д.т.н., Гордєєв А.І., д.т.н., Горященко С. Л., к.т.н., Грабко В.В., д.т.н., Диха О.В., д.т.н., Защепкіна Н.М., д.т.н., Рубаненко О. О., д.с.н., Захаркевич О.В., д.т.н., Злотенко Б.М., д.т.н., Зубков А.М., д.т.н., Каплун П.В., д.т.н., Карташов В.М., д.т.н., Кичак В.М., д.т.н., Любош Хес, д.т.н., (Чехія), Мазур М.П., д.т.н., Мандзюк І.А., д.т.н., Мартинюк В.В., д.т.н., Мельничук П.П., д.т.н., Місяць В.П., д.т.н., Мясіщев О.А., д.т.н., Нелін Є.А., д.т.н., Павлов С.В., д.т.н., Параска О.А., д.т.н., Рогатинський Р.М., д.т.н., Горошко А.В., д.т.н., Сарібекова Ю.Г., д.т.н., Семенко А.І., д.т.н., Славінська А.Л., д.т.н., Харжевський В.О., д.т.н., Шинкарук О.М., д.т.н., Шклярський В.І., д.т.н., Щербань Ю.Ю., д.т.н., Бубулєс Альгімантас, доктор наук (Литва), Елсаєд Ахмед Ельнашар, доктор наук (Єгипет), 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)

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

**Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету,  
протокол № 6 від 29.12.2022 р.**

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

	(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.  
Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації  
Серія КВ № 24922-14862ПР від 12 липня 2021 року

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

## ЗМІСТ

<b>ПЕЧЕНИК М., БУР'ЯН С., ЗЕМЛЯНУХІНА Г., ГОДЗ А.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ СТРІЧКОВО-КАНАТНОГО КОНВЕЄРА З ВЕКТОРНО-КЕРОВАНИМИ АСИНХРОННИМИ ЕЛЕКТРОДВИГУНАМИ .....	7
<b>АНТОНЕНКО А., ТОЛОК Г., СУХОМЛИН Д., ТЕРНОВСЬКИЙ Д., ТИШКОВСЬКА А., МИХАЙЛІЧЕНКО І.</b> ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЖАРИЛЬНОГО ТА ХЛБОПЕЧНОГО ОБЛАДНАННЯ В ГОТЕЛЬНО-РЕСТОРАННОМУ БІЗНЕСІ .....	15
<b>БОЙКО С., ХЕБДА А., СТУЩАНСЬКИЙ Ю., ГОЛОВАНОВ С., РИЖИК М.</b> ПІДХІД ДО ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЮ СИЛОВОЮ УСТАНОВКОЮ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ .....	20
<b>БОНДАРЄВА А., МОКРОУСОВА О.</b> ЗАСТОСУВАННЯ ГІБРИДНИХ ПІГМЕНТІВ У ФОРМУВАННІ ПОЛІМЕРНО-МІНЕРАЛЬНОГО ПОКРИТТЯ ДЛЯ ОЗДОБЛЕННЯ ШКІР .....	25
<b>ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ М., ВАРГАТЮК Г., БОЛДИРЕВА О.</b> ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ МНОЖИННОГО ДОСТУПУ .....	32
<b>ГОРДЄЄВ А., СТАРИЙ А., УРБАНИК Є., ГОРДЄЄВ О.</b> ПРОЄКТУВАННЯ МОДУЛЯ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ ДЛЯ ОЧИСТКИ ЗАБРУДНЕНЬ ТА ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЙОГО ЕЛЕМЕНТІВ .....	40
<b>ГУЛА І., ПОЛКАРОВСЬКИХ О.</b> МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МОДУЛЯЦІЇ СИГНАЛІВ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ .....	47
<b>ДАНИЛКОВИЧ А., НАУМЕНКО Б.</b> ВИКОРИСТАННЯ НАТУРАЛЬНИХ ШКІР У ВЗУТТЄВОМУ ВИРОБНИЦТВІ .....	55
<b>ГОМЕНЮК С., КОЗУБ В.</b> ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПАРАЛЕЛЬНИХ ОБЧИСЛЕНЬ В ПАКЕТІ ПРИКЛАДНИХ ПРОГРАМ «МІРЕЛА+» .....	60
<b>ОСАДЧУК О., ОСАДЧУК Я., ДУМЕНКО Д.</b> СТАБІЛІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ТРАНЗИСТОРНИХ АНАЛОГІВ ІНДУКТИВНОСТІ .....	65
<b>КОТИШ А., САВЕЛЕНКО І., ПЕТРОВА К.</b> НАДЛИШКОВІ ТЕХНІЧНІ ВТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ .....	69
<b>МІЩЕНКО В., КОВАЛЬОВ С.</b> ЕЛЕКТРООСАДЖЕННЯ ТА ВЛАСИВОСТІ ЗАЛІЗНИХ ПОКРИТТІВ ОДЕРЖАНИХ У МАГНІТНОМУ ПОЛІ НИЗЬКОЇ ІНДУКЦІЇ .....	74
<b>ОДЕГОВ М., БУКАТА Л., БАЛЄЄВ І.</b> ВСТАНОВЛЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ПОШИРЮВАННЯ СПЕКТРІВ ОПТИЧНИХ ІМПУЛЬСІВ МЕТОДАМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ .....	80
<b>ПОТАПОВА Н., ВОЛОНТИР Л.</b> МЕТОД МОДЕЛЮВАННЯ В УПРАВЛІННІ ЗАПАСАМИ ІЄРАРХІЧНИХ ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМ ..	87
<b>СТАЦЕНКО Д., СТАЦЕНКО В., РОМАНИК Є., ОСИПЕНКО В.</b> ВИКОРИСТАННЯ ПРОТОКОЛУ 1-WIRE У КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ «РОЗУМНОГО БУДИНКУ» .....	94

---

<b>СТЕЦЮК В., ГОРЯЩЕНКО К.</b> АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ БАГАТОЧАСТОТНИХ П'ЄЗОРЕЗОНАНСНИХ АВТОКОЛИВАЛЬНИХ СИСТЕМ .....	100
<b>ФІЛОНЕНКО С., ЛАРІН В., СТАХОВА А.</b> ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ КОРЕЛЯЦІЙНИМ МЕТОДОМ .....	104
<b>ЯЦЕНКО Д., ПОПОВ В., ЗАМУЛКО А., ЯРМОЛЮК О., АДАНІКОВ О.</b> ЗАСТОСУВАННЯ ІНДИКАТИВНОГО ЯКІСНОГО ПОКАЗНИКА ПРИ ДИНАМІЧНОМУ КЕРУВАННІ ТОПОЛОГІЄЮ РОЗПОДІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ З ЛОКАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ З МЕТОЮ МІНІМІЗАЦІЇ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ .....	109
<b>ОСТАПЕНКО Н., РУБАНКА А., ОЛІЙНИК Г., ЛУЦКЕР Т., ВАРВОЛІК В.</b> СИСТЕМАТИЗАЦІЯ КОНСТРУКТИВНО-КОМПОЗИЦІЙНИХ РІШЕНЬ У ОФОРМЛЕННІ ГОРЛОВИНИ ВІЙСЬКОВОГО ОДЯГУ .....	118
<b>ТИМОЩУК О.</b> АНАЛІЗ І ОЦІНКА ТОЧНОСТІ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ЩІЛЬНОСТІ КАНАЛІВ ТА ПИТОМОЇ ПЛОЩІ ПОВЕРХНІ КОНТАКТУ БЕЗЗМАЩУВАЛЬНИХ ПОРШНЕВИХ УЩІЛЬНЕНЬ .....	125
<b>БАГАЦЬКИЙ В., ОБЕРТЮХ М., ЗАХАРЧЕНКО С.</b> ВИСОКОПРОДУКТИВНІ АЦП КОМБІНОВАНОГО ВРІВНОВАЖЕННЯ .....	132
<b>КВАШУК Д., ЯЩУК О.</b> АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ОБЕРТАЛЬНОГО МОМЕНТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕПРЯМИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ .....	138
<b>ЯКИМЧУК М., ДУБОВИЙ В.</b> ІНФОРМАЦІЙНИЙ АСПЕКТ КООРДИНАЦІЇ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ .....	147

## CONTENT

<b>PECHENIK MYKOLAY, BURIAN SERGEY, ZEMLIANUKHINA HANNA, HODZ ARTEM</b> INVESTIGATION OF THE OPERATION MODES OF THE BELT-ROPE CONVEYOR ELECTROMECHANICAL SYSTEM WITH VECTOR-CONTROLLED INDUCTION ELECTRIC MOTORS .....	7
<b>ANTONENKO ARTEM, TOLOK GALINA, SUKHOMLYN DMYTRO, TERNOVSKIY DANIL, TYSHKOVSKA ANNA, MYKHAYLICHENKO IRYNA</b> FEATURES OF THE USE OF ROASTING AND BAKERY EQUIPMENT IN THE HOTEL AND RESTAURANT BUSINESS .....	15
<b>BOIKO SERGEY, HEBDA ALONA, STUSHCHANSKY YURI, I, GOLOVANOV SERHIY, RUZHUK MYHAILO</b> APPROACH TO THE IMPROVEMENT OF THE CONTROL SYSTEM OF THE ELECTRIC POWER PLANT OF THE AIRCRAFT .....	20
<b>BONDARYEVA ANNA, MOKROUSOVA OLENA</b> THE APPLICATION OF HYBRID PIGMENTS IN THE FORMATION OF A POLYMER-MINERAL COATING FOR LEATHER FINISHING .....	25
<b>VASYLKYVSKYI MYKOLA, VARGATYUK GANNA, BOLDYREVA OLHA</b> INTELLIGENT OPTIMIZATION OF MULTIPLE ACCESS INFOCOMMUNICATION NETWORKS .....	32
<b>HORDIEIEV ANATOLYI, ASTARIY ANDRIY, URBANIUK EVGENIY, HORDIEIEV ALEXEI</b> DESIGN OF A VIBRATING MACHINE MODULE FOR POLLUTION CLEANING AND A GENERAL METHOD FOR CALCULATING ITS ELEMENTS .....	40
<b>HULA IHOR, POLIKAROVSKYKH OLEKSIY</b> METHOD OF DETERMINING PARAMETERS OF MODULATION OF UAV SIGNALS USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS .....	47
<b>ANATOLII DANYLKOVOYCH, BOHDAN NAUMENKO</b> ВИКОРИСТАННЯ НАТУРАЛЬНИХ ШКІР У ВЗУТТЄВОМУ ВИРОБНИЦТВІ .....	55
<b>HOMENIUK SERHII, KOZUB VLADYSLAV</b> FEATURES OF THE USE OF PARALLEL CALCULATIONS IN THE PACKAGE OF APPLICATION PROGRAMS «MIRELA+» .....	60
<b>OSADCHUK OLEXANDER, OSADCHUK JAROSLAV, DUMENKO DENYS</b> STABILIZATION OF TRANSISTOR ANALOGUES OF INDUCTANCE PARAMETERS .....	65
<b>KOTYSH ANDRII, SAVELENKO IVAN, PETROVA KATERYNA</b> THE EXCESSIVE TECHNICAL LOSSES OF ELECTRICITY IN ELECTRICAL SYSTEMS OF POWER CONSUMPTION .....	69
<b>MISHCHENKO VLADYSLAVA, KOVALYOV STANISLAV</b> ELECTRODEPOSITION AND PROPERTIES OF IRON DEPOSITS OBTAINED IN A MAGNETIC FIELD OF WEAK INDUCTION .....	74
<b>ODEGOV NIKOLAY, BUKATA L., BALEEV I.</b> ESTABLISHING THE REGULARITIES OF SPECTRUM BROADENING IN OPTICAL PULSES BY METHODS OF SINGLE INTELECTU .....	80
<b>POTAPOVA NADIYA, VOLONTYR LUDMILA</b> MODELING METHOD IN STOCK MANAGEMENT HIERARCHICAL LOGISTICS SYSTEMS .....	87
<b>STATSENKO DMYTRO, STATSENKO VOLODYMYR, ROMANIUK YEVHENIIA, OSYPENKO VOLODYMYR</b> USE OF THE 1-WIRE PROTOCOL IN SMART HOME COMPUTER SYSTEMS .....	94

---

<b>STETSIUK VIKTOR, HORIASCHENKO KOSTYANTYN</b> ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS OF MULTI-FREQUENCY PIONEERING AUTOMOTIVE SYSTEMS .....	100
<b>FILONENKO SERGII, LARIN VITALIY, STAKHOVA ANZHELIKA</b> DETERMINATION OF MEASUREMENT ERROR OF ELECTRICAL ENERGY QUALITY INDICATORS BY THE CORRELATION METHOD .....	104
<b>DMYTRO YATSENKO, VLADIMIR POPOV, ANATOLII ZAMULKO, OLENA YARMOLIUK, OLEKSANDR ADANIKOV</b> APPLICATION OF INDICATIVE QUALITY INDICATOR IN DYNAMIC MANAGEMENT OF THE TOPOLOGY OF A DISTRIBUTION NETWORK WITH LOCAL ENERGY SOURCES WITH THE PURPOSE OF MINIMIZING ENERGY LOSSES .....	109
<b>OSTAPENKO NATALIIA, RUBANKA ALLA, OLINYK HALYNA, LUTSKER TETAYNA, VARVOLIK VICTORIIA</b> SYSTEMATIZATION OF CONSTRUCTIVE-COMPOSITION SOLUTIONS IN THE DESIGN OF THE NECK OF MILITARY CLOTHING .....	118
<b>TYMOSHCHUK OLEKSANDR</b> ANALYSIS AND EVALUATION OF THE ACCURACY OF METHODS FOR CALCULATING THE DENSITY OF CHANNELS AND THE COMBINED AREA OF THE CONTACT SURFACE OF LUBRICATION-FREE PISTON SEALS .....	125
<b>BAHATSKYI VALENTINE, OBERTYUKH MAXIM, ZAKHARCHENKO SERHII</b> HIGHLY-PRODUCTIVE ADC WITH COMBINED BALANCING .....	132
<b>KVASHUK DMYTRO, YASHCHUK OLESIA</b> ALGORITHM FOR DETERMINING THE TORQUE OF ELECTRIC MOTORS USING INDIRECT MEASUREMENT METHODS .....	138
<b>YUKHIMCHUK MARIIA, DUBOVOI VOLODYMYR</b> INFORMATION ASPECT OF COORDINATION OF PRODUCTION PROCESSES .....	147

Микола ПЕЧЕНИК

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»  
<https://orcid.org/0000-0002-4527-1125>

Сергій БУР'ЯН

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»  
<https://orcid.org/0000-0002-4947-0201>

Ганна ЗЕМЛЯНУХІНА

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»  
<https://orcid.org/0000-0002-9653-8416>

Артем ГОДЗ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

## ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ СТРІЧКОВО-КАНАТНОГО КОНВЕЄРА З ВЕКТОРНО-КЕРОВАНИМИ АСИНХРОННИМИ ЕЛЕКТРОДВИГУНАМИ

*Системи безперервного транспорту є найбільш перспективним видом переміщення сипких та штучних матеріалів, мають високу продуктивність, техніко-економічні показники і широко використовуються в світовій практиці як магістральні конвеєри для вугільної та гірничорудної промисловості. Особливе місце у безперервному транспорті займають стрічково-канатні конвеєри, що здатні забезпечити транспорт вантажу на відстань більше 30 км в одному ставі. Як правило, ці магістральні конвеєри не передбачають регулювання параметрів руху, пуск здійснюється при використанні систем плавного пуску. Водночас, такі системи мають високі вимоги до параметрів динамічних режимів роботи, точності відпрацювання заданої програми руху та рівня енергетичної ефективності.*

*У роботі запропоновано сучасну систему електроприводу з використанням векторно-керованих асинхронних електродвигунів. Наведено структуру електромеханічної системи. З використанням відомих методів побудована математична модель електромеханічної системи. У рамках пакету прикладних програм «MATLAB» Simulink отримано модель дослідження динамічних режимів роботи конвеєра. На конкретному прикладі проведено дослідження динамічних та статичних режимів роботи конвеєра при варіаціях статичного навантаження та швидкості переміщення тягового елемента. Дослідження точності відпрацювання заданого закону руху показали, що максимальна динамічна похибка за швидкістю та струмом відпрацьовується за час до 0,06 с. Максимальний рівень її амплітуди не перевищує 0,33% від значення сталої швидкості руху, що не викликає коливальних процесів в конвеєрі і забезпечує стійку роботу електромеханічної системи.*

*Проведено дослідження енергетичних характеристик електромеханічної системи. Втрати активної потужності не перевищують 12,5% від споживаного у всьому діапазоні варіації статичного навантаження та швидкості тягового елемента. Сформульовано рекомендації щодо використання у стрічково-канатних конвеєрах електромеханічних систем з векторно-керованими асинхронними електродвигунами.*

*Ключові слова: безперервне транспортування; векторне керування; стрічково-канатний конвеєр; точність відпрацювання; втрати потужності.*

Mykolay PECHENIK, Sergey BURIAN, Hanna ZEMLIANUKHINA, Artem HODZ  
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

### INVESTIGATION OF THE OPERATION MODES OF THE BELT-ROPE CONVEYOR ELECTROMECHANICAL SYSTEM WITH VECTOR-CONTROLLED INDUCTION ELECTRIC MOTORS

*Continuous transport systems are the most promising type of movement of loose and artificial materials, have high productivity, technical and economic indicators and are widely used in world practice as main conveyors for the coal and mining industry. A special place in continuous transport is occupied by belt-rope conveyors, which are capable of transporting cargo over a distance of more than 30 km in one stop. As a rule, these main conveyors do not provide for the adjustment of movement parameters, the start is carried out using soft start systems. At the same time, such systems have high requirements for the parameters of dynamic modes of operation, the accuracy of working out the given movement program and the level of energy efficiency.*

*The paper proposes a modern electric drive system using vector-controlled induction electric motors. The structure of the electromechanical system is given. A mathematical model of the electromechanical system was built using known methods. As part of the "MATLAB" Simulink application program package, a model for the investigation of dynamic modes of conveyor operation was obtained. On a specific example, a research of dynamic and static modes of conveyor operation with static load and the speed of movement variations of the traction element was carried out. Studies of the accuracy of working out the given law of motion showed that the maximum dynamic error in terms of speed and current is worked out in a time of up to 0.06 s. The maximum level of its amplitude does not exceed 0.33% of the constant speed of movement, which does not cause oscillatory processes in the conveyor and ensures stable operation of the electromechanical system.*

*Investigation of the electromechanical system energy characteristics was conducted. Losses of active power do not exceed 12.5% of the consumed in the entire range of variation of the static load and speed of the traction element. Recommendations for the use of electromechanical systems with vector-controlled induction electric motors in belt-rope conveyors have been formulated.*

*Keywords: continuous transportation; vector control; belt-rope conveyor; accuracy of work; power losses.*

### Постановка проблеми

Одним з найбільш перспективних видів безперервного транспорту, призначеного для переміщення сипких та штучних матеріалів, є конвеєрні системи, в яких в якості тягового елемента використовуються як гнучка стрічка (стрічкові конвеєри), так і канати (канатно-стрічкові конвеєри). Дані системи мають високу продуктивність, швидкість (до 6 м/с), і широко використовуються у вугільній і гірничорудній промисловості на розрізах і в шахтах.

Стрічкові конвеєри, при використанні гумотросових стрічок, мають довжину тягового елемента в одному ставі, яка не перевищує 5 км, що викликано граничними значеннями його властивостей міцності. При транспортуванні вантажів на великі відстані, необхідно використовувати транспортну лінію, що складається з декількох конвеєрів, а це призводить до суттєвого зростання капітальних та експлуатаційних витрат. Стрічково-канатні конвеєри в одному ставі дозволяють забезпечити транспорт вантажів на відстань до 30 і більше кілометрів, при цьому питомі витрати енергії на 20-40% менші, ніж у стрічкових [1].

Досвід експлуатації стрічково-канатних конвеєрів як вітчизняний, так і зарубіжний (Австралія, США, Канада та ін.) показує, що стрічково-канатні конвеєри є досить перспективними і при переміщенні сипких вантажів на великі відстані мають істотну перевагу в порівнянні з іншими видами транспорту [2]. Але при експлуатації цих систем виникають питання стосовно вдосконалення електромеханічних систем та їх електроприводів.

### Аналіз останніх джерел

Магістральні конвеєри мають досить високу продуктивність до 3-5 т/год, при цьому потужність приводної станції може досягати до 5000 кВт.

В цих умовах досить гостро ставляться вимоги до електроприводу щодо забезпечення високого рівня енергетичної ефективності. В даний час в магістральних конвеєрах у статичних режимах роботи швидкість руху тягового елемента не регулюється, тому при коливаннях навантаження, зростають втрати енергії, знижується рівень коефіцієнту корисної дії (ККД). Іншою, не менш важливою проблемою, є забезпечення стабільності швидкості конвеєра у всьому діапазоні зміни збурень в електромеханічній системі та виключення можливих коливань в пружно-в'язкому тяговому органі.[3, 4].

Одним з перспективних напрямів вирішення поставлених завдань є використання сучасних електроприводів, у тому числі, і при використанні векторно-керованих асинхронних електродвигунів [5, 6]. Дослідження характеру розподілу втрат енергії в електромеханічних системах магістральних стрічкових конвеєрів [4, 7] показує, що використання регульованого електропривода дозволяє збільшити їх ККД до 10%. Дослідження магістральних стрічково-канатних конвеєрів в основному стосуються підвищенню їх ефективності за рахунок вдосконалення елементів механічної системи. Дослідження електромеханічних систем при використанні векторно-керованих асинхронних електродвигунів показують їх високий рівень керованості та енергетичних показників [8].

Однак для формування рекомендацій щодо використання електромеханічних систем з векторним управлінням для стрічково-канатних конвеєрів необхідно виконати дослідження їх статичних та динамічних характеристик у всьому діапазоні зміни навантаження та швидкості руху тягового елемента.

Метою роботи є: виконати дослідження характеру розподілу втрат активної потужності та рівня відпрацювання максимальної динамічної похибки за швидкістю в електромеханічній системі стрічково-канатного конвеєра з векторним управлінням при варіаціях його статичного навантаження та швидкості руху.

### Виклад основного матеріалу

Дослідження проведено з використанням електромеханічної системи, функціональна схема якої наведена на рис. 1.

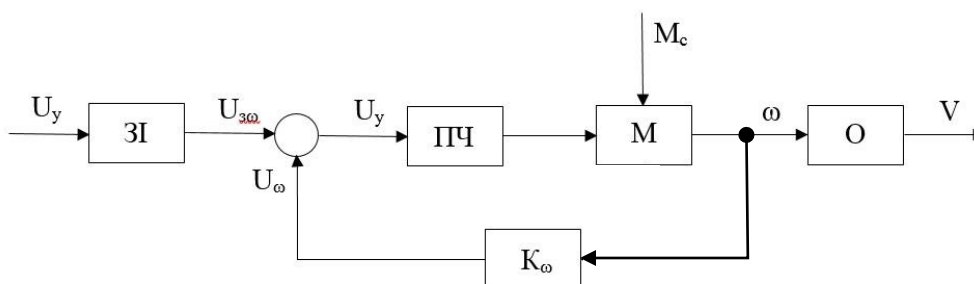


Рис. 1. Функціональна схема

У схемі наведено такі позначення:  $U_y$  – сигнал керування;  $U_{3\omega}$  – напруга завдання швидкості;  $U_{уп}$  – сигнал на вході перетворювача частоти ПЧ; М – асинхронний електродвигун;  $\omega$  – кутова швидкість; О – об'єкт (механізм); V – лінійна швидкість;  $K_{\omega}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю.



У відповідності з функціональною схемою системи керування отримані математичні моделі для окремих елементів.

Виконано синтез регулятора швидкості, отримано його передатну функцію у вигляді:

$$W_{PC}(p) = \frac{W_{PAZC}(p)}{W_{OPC}(p)} = \frac{T_M T_c p^2 + T_M p + 1}{T_U p} \quad (1)$$

де  $T_M = \frac{J_\Sigma}{\beta}$ ;  $T_c = \frac{1}{\omega_0 \cdot s_k}$ ;  $T_U = a_c \cdot k_\omega \cdot k_i \cdot k_d \cdot T_M$  – стали часу;  $a_c$  – коефіцієнт демпфування;  $k_\omega = \frac{U}{1.3 \cdot \omega_n}$ ;  $k_d = \frac{2\pi}{p}$ ;  $k_i$  – пропорційні складові регулятора.

Після відповідних перетворень отримано передатну функцію регулятора швидкості у вигляді ПІД-регулятора:

$$W_{PC} = \frac{T_M}{T_U} + \frac{1}{T_U p} + \frac{T_M T_c}{T_U} p \quad (2)$$

При побудові загальної математичної моделі електромеханічної системи конвеєру використано алгоритм прямого векторного керування [5].

Для дослідження статичних та динамічних режимів роботи конвеєра в межах пакету прикладних програм «MATLAB» Simulink розроблено модель з урахуванням векторно-керованого асинхронного електродвигуна [5].

Дослідження проведено на прикладі стрічково-контактного конвеєра з такими характеристиками: довжина конвеєра – 800 м; ширина стрічки – 1,2 м; продуктивність – 600 т/год; номінальна потужність приводної станції – 250 кВт; номінальна частота обертання – 1500 об/хв; номінальна лінійна швидкість – 1,5 м/с.

Дослідження проведено при фіксованих значеннях навантаження тягового елемента:  $M_{ст} = M_{ст.н.} = 1608.44$  Нм;  $M_{ст} = 0,9 M_{ст.н.} = 1447,6$  Нм;  $M_{ст} = 0,7 M_{ст.н.} = 1125.91$  Нм;  $M_{ст} = 0,4 M_{ст.н.} = 643.37$  Нм. та лінійної швидкості тягового елемента:  $V_{л.} = V_{л.н.} = 1,5$  м/с;  $V_{л.} = 0,6 V_{л.н.} = 0,9$  м/с;  $V_{л.} = 0,3 V_{л.н.} = 0,45$  м/с. (відповідні значення кутової швидкості:  $\omega_n = 155,43$  рад/с;  $\omega_n = 0,6 \omega_n = 93,26$  рад/с;  $\omega_n = 0,3 \omega_n = 46,63$  рад/с).

$M_{ст}$ ,  $M_{ст.н.}$  – поточний та номінальний статичні моменти;  $V_{л.}$  та  $V_{л.н.}$  – поточна та номінальна лінійна швидкість.

Результати досліджень наведено на рис. 2 - рис. 8 та табл. 1 - табл. 2.

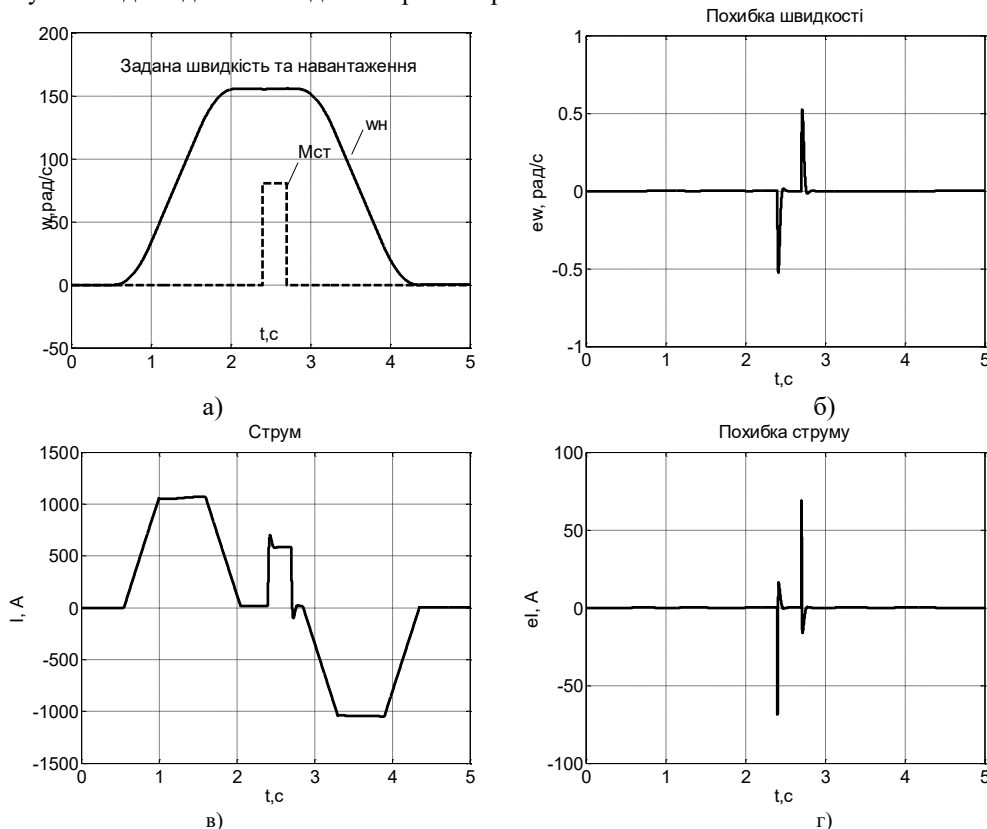


Рис. 2. Перехідні процеси при  $\Omega = \Omega_n$ ;  $M_{ст} = M_{ст.н.}$ : а) – траєкторія швидкості та момент навантаження, б) – похибка відпрацювання швидкості, в) – перехідний процес по струму, г) – похибка відпрацювання струму

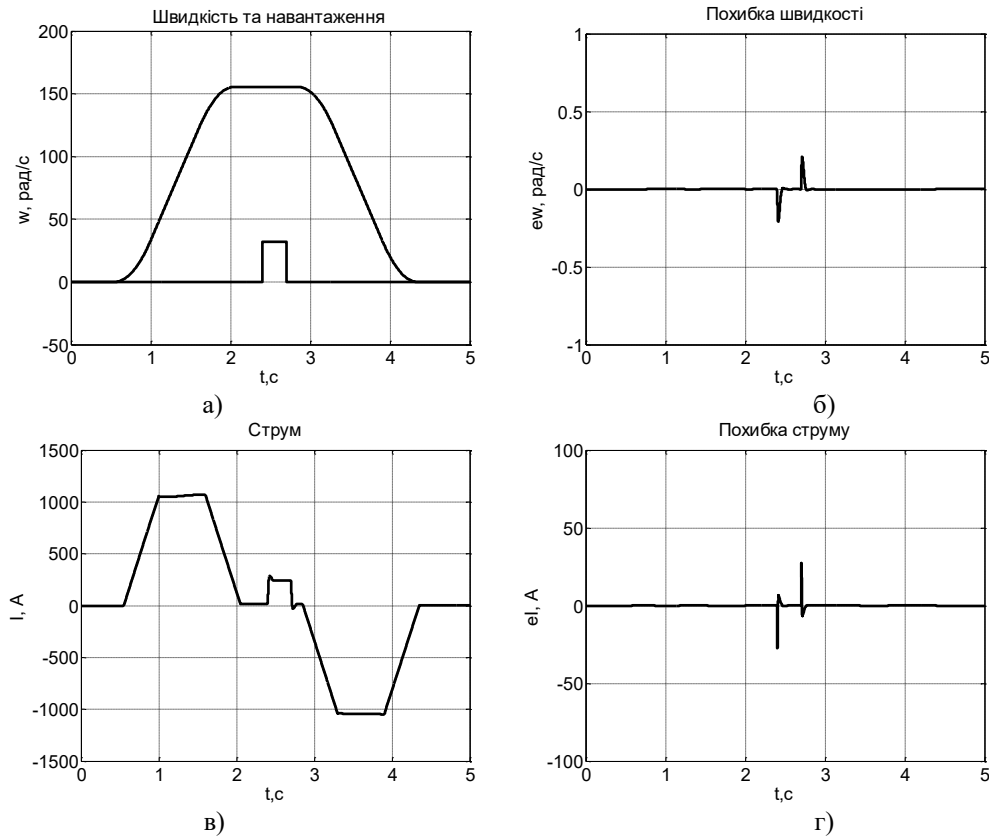


Рис. 3. Перехідні процеси при  $\Omega = \Omega_n$ ;  $M_{ст.н.} = 0,4M_{ст.н.}$ : а) – траєкторія швидкості та момент навантаження, б) – похибка відпрацювання швидкості, в) – перехідний процес по струму, г) – похибка відпрацювання струму

На рисунках 2, 3 наведено результати дослідження характеру відпрацювання максимальної динамічної похибки за швидкістю тягового елемента конвеєра при варіаціях статичного навантаження  $M_{ст.н.} = 0,4M_{ст.н.}$  до  $M_{ст.н.} = M_{ст.н.}$ .

Аналіз результатів показує, що при  $\omega = \omega_n$  максимальна похибка коливається в межах 0,02 рад/с при  $M_{ст.н.} = M_{ст.н.}$  до 0,21 рад/с при  $M_{ст.н.} = 0,4M_{ст.н.}$ , що відповідає 0,33% і 0,14% від встановленої швидкості.

Результати розподілу максимальних похибок струму електродвигуна при тих же варіаціях статичного моменту і швидкості (рис. 2) показують, що максимальне значення при  $\omega = \omega_n$  коливаються від 68,9 при  $M_{ст.н.} = M_{ст.н.}$  до 27,6 при  $M_{ст.н.} = 0,4M_{ст.н.}$ , що відповідає від 11,8% до 22,4% від значення струму.

Аналогічні дослідження проведені для швидкостей переміщення тягових канатів:  $\omega = 0,6\omega_n$ ;  $\omega = 0,3\omega_n$  при  $M_{ст.н.} = 0,4M_{ст.н.}$  та  $\omega = \omega_n$  для  $M_{ст.н.} = M_{ст.н.}$ ;  $M_{ст.н.} = 0,9M_{ст.н.}$ ;  $M_{ст.н.} = 0,7M_{ст.н.}$ ;  $M_{ст.н.} = 0,4M_{ст.н.}$ . Результати приведені на рис. 4, 5 та в табл. 1.

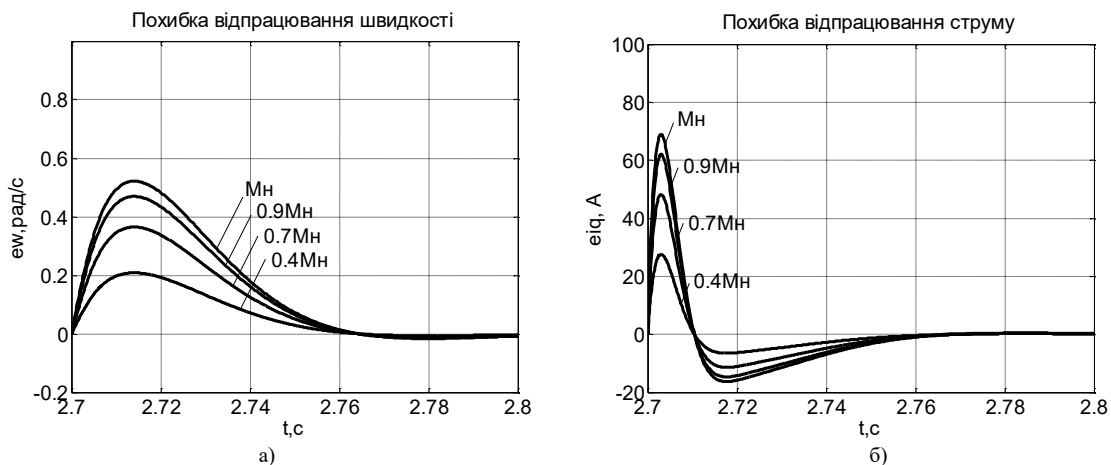


Рис. 4. Похибки відпрацювання швидкості (а) та струму (б) при варіації навантаження від  $0,4M_{ст.н.}$  до  $M_{ст.н.}$

Значення похибок при зміні заданих параметрів

$\omega$	$M$	$\tilde{\omega}$	$\tilde{i}$	$\tilde{\omega}, \%$	$\tilde{i}, \%$
$\omega_H$	$M_H$	0.52	68.9	0,33	11,82
$0.6 \cdot \omega_H$	$M_H$	0.52	68.9	0,56	11,91
$0.3 \cdot \omega_H$	$M_H$	0.52	68.9	1,12	12,06
$\omega_H$	$0.9 \cdot M_H$	0.47	62	0,3	11,76
$0.6 \cdot \omega_H$	$0.9 \cdot M_H$	0.47	62	0,5	11,89
$0.3 \cdot \omega_H$	$0.9 \cdot M_H$	0.47	62	1,01	12,04
$\omega_H$	$0.7 \cdot M_H$	0.365	48.25	0,23	11,68
$0.6 \cdot \omega_H$	$0.7 \cdot M_H$	0.365	48.25	0,39	11,83
$0.3 \cdot \omega_H$	$0.7 \cdot M_H$	0.365	48.25	0,78	12,01
$\omega_H$	$0.4 \cdot M_H$	0.21	27.57	0,14	11,39
$0.6 \cdot \omega_H$	$0.4 \cdot M_H$	0.21	27.57	0,23	11,6
$0.3 \cdot \omega_H$	$0.4 \cdot M_H$	0.21	27.57	0,45	11,9

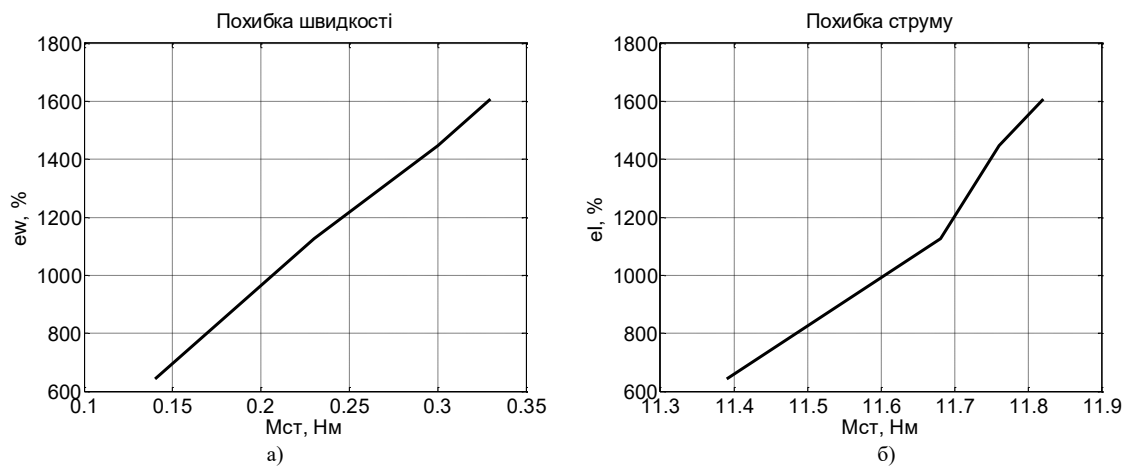


Рис. 5. Похибки відпрацювання швидкості (а) та струму (б) у відсотках зміні навантаження

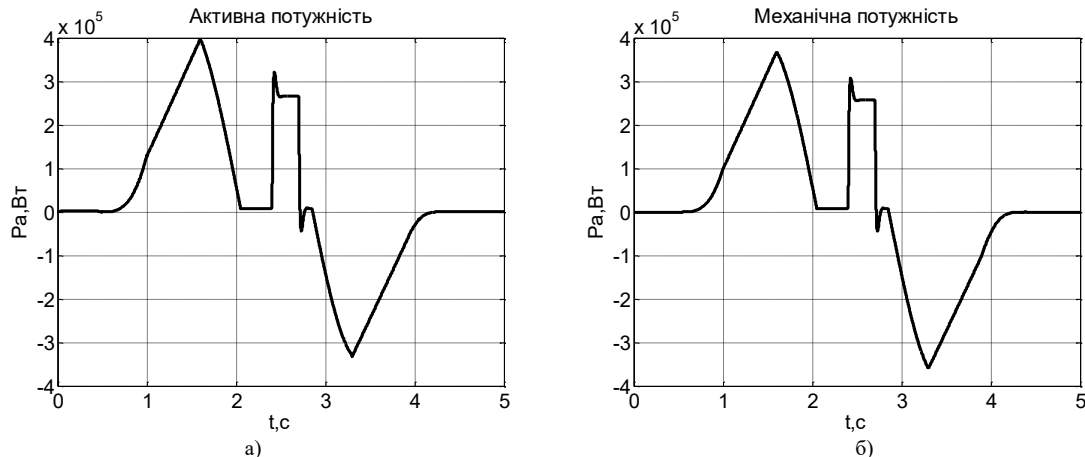
Результати показують, що при зміні швидкості руху в межах постійного навантаження, абсолютна величина максимальної динамічної похибки по швидкості залишається постійною. Відносна її величина коливається в середньому від 0,14% при  $\omega = \omega_H$  і  $M_{ст.} = 0,4 M_{ст.н.}$  до 1,12% при  $\omega = 0,3\omega_H$  і  $M_{ст.} = M_{ст.н.}$

Величина максимальної похибки за струмом за тих самих умов змінюється від 11,39% до 12,06%.

Час відпрацювання максимальної динамічної помилки за швидкістю та струмом знаходиться в межах 0,06 с.

Отримані результати дозволяють відзначити чітке відпрацювання максимальних помилок струму і швидкості в електромеханічній системі і не призводять до коливань в пружному тяговому органі конвеєра.

Результати досліджень енергетичних показників електромеханічної системи конвеєра наведено на рис. 6 - 8 та табл. 2.



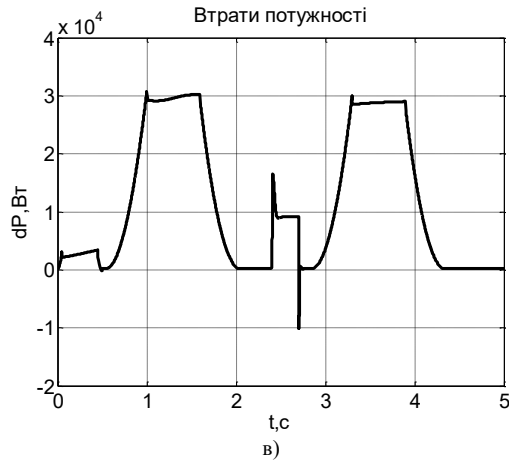


Рис. 6. Енергетичні показники при  $M_{ct}=M_{ct.n.}$ : а) – активна потужність  $P_a$ , б) – механічна потужність  $P_m$ , в) – втрати потужності  $\Delta P$

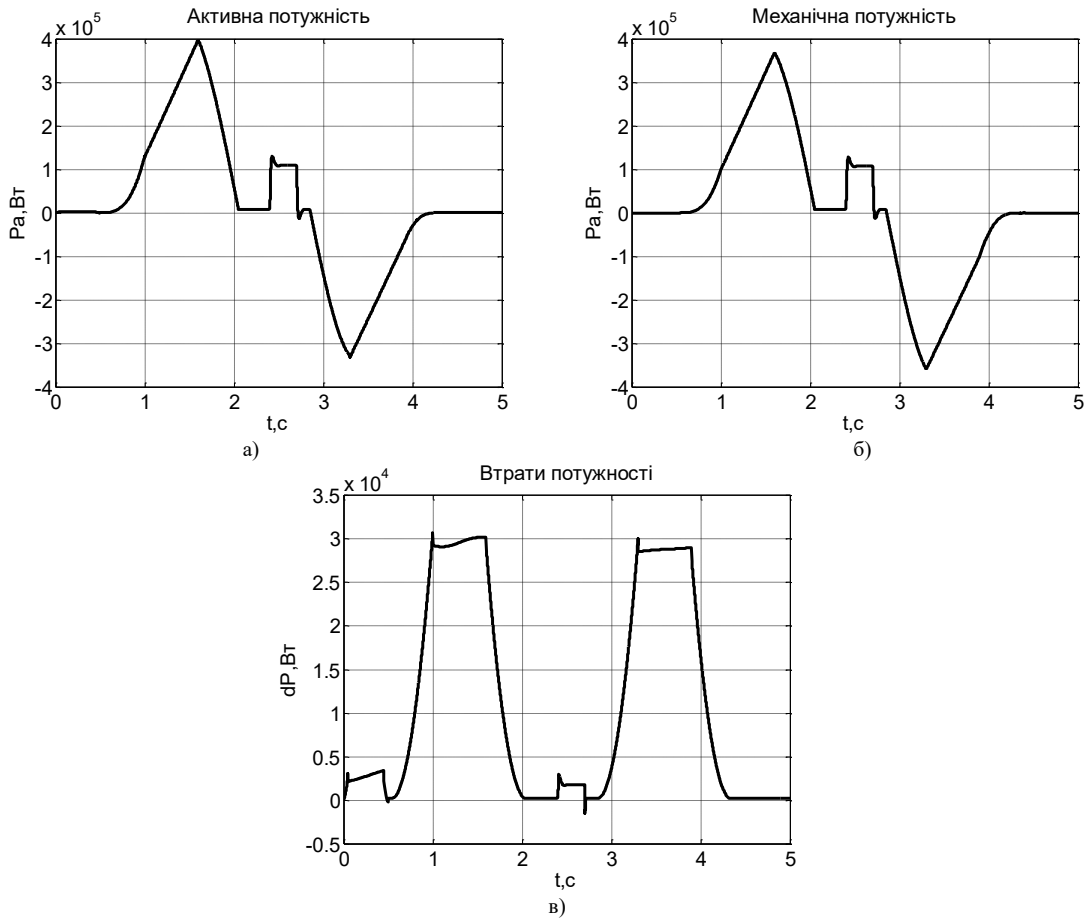


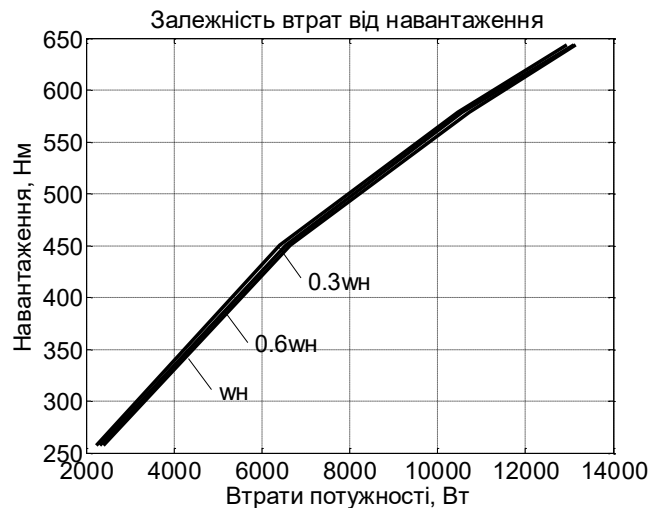
Рис. 7. Енергетичні показники при  $M_{ct}=0,4M_{ct.n.}$ : а) – активна потужність  $P_a$ , б) – механічна потужність  $P_m$ , в) – втрати потужності  $\Delta P$

Таблиця 2.

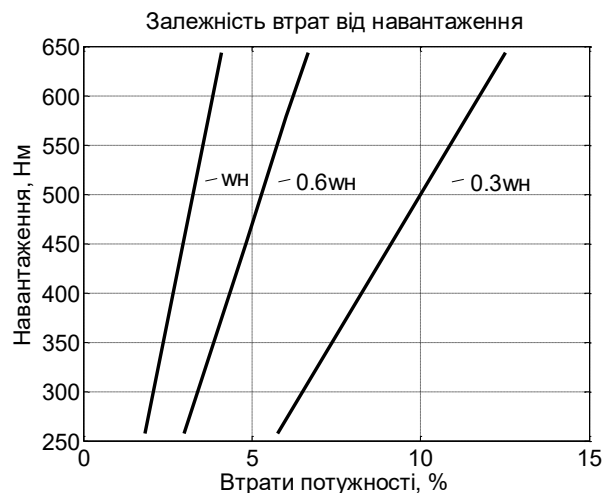
**Розподіл втрат потужності  $\Delta P_a$**

$\omega$	$M$	$P_a, \text{Вт}$	$P_m, \text{Вт}$	$\Delta P, \text{Вт}$	$\Delta P, \%$
1	2	3	4	5	6
$\omega_H$	$M_H$	321 240	308 100	13140	4,09
$0.6 \cdot \omega_H$	$M_H$	196 000	182 900	13100	6,68
$0.3 \cdot \omega_H$	$M_H$	103 400	90 450	12950	12,52
$\omega_H$	$0.9 \cdot M_H$	288 800	278 080	10720	3,71
$0.6 \cdot \omega_H$	$0.9 \cdot M_H$	175 500	164 940	10560	6,02
$0.3 \cdot \omega_H$	$0.9 \cdot M_H$	92 000	81 530	10470	11,38

1	2	3	4	5	6
$\omega_H$	$0.7 \cdot M_H$	224 640	218 000	6640	2,96
$0.6 \cdot \omega_H$	$0.7 \cdot M_H$	135 500	128 950	6550	4,83
$0.3 \cdot \omega_H$	$0.7 \cdot M_H$	70 060	64 650	6410	9,15
$\omega_H$	$0.4 \cdot M_H$	130 150	127 750	2400	1,84
$0.6 \cdot \omega_H$	$0.4 \cdot M_H$	77 200	74 890	2310	2,99
$0.3 \cdot \omega_H$	$0.4 \cdot M_H$	38 970	36 730	2240	5,75



а)



б)

Рис. 8. а) – втрати потужності  $\Delta P$  в абсолютних величинах, б) – втрати потужності  $\Delta P\%$  при зміні навантаження та швидкості

У всьому діапазоні варіацій навантаження (від  $0,4M_{ст.}$  до  $M_{ст.н}$ ) та швидкості (від  $0,3\omega_H$  до  $\omega_H$ ) втрати активної потужності коливаються від 1,84% при  $\omega = \omega_H$   $M_{ст.} = 0,4M_{ст.н}$  до 12,52% при  $\omega = 0,3\omega_H$  і  $M_{ст.} = M_{ст.н}$ .

У межах постійного моменту навантаження у разі зниження швидкості має місце тенденція до збільшення втрат активної потужності. Загалом рівень втрат активної потужності відповідає вимогам рівня енергетичної ефективності, що пред'являються до систем безперервного транспорту.

#### Висновки

За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Застосування векторно-керованих асинхронних електродвигунів в електромеханічних системах стрічково-канатних конвеєрів забезпечує ефективний процес стабілізації швидкості тягового елемента, що унеможливує виникнення коливальних процесів у тяговому канаті. При цьому, максимальна динамічна помилка за швидкістю та струмом не перевищує відповідно  $\tilde{\omega} = 1,1\%$  та  $\tilde{i} = 12,06\%$ . Час відпрацювання помилок не перевищує 0,06 с.

2. Аналіз характеру розподілу енергетичних характеристик у всьому діапазоні можливого за технологічними умовами режимів роботи транспортної системи показав, що втрати активної потужності  $\Delta P_a$

коливаються в межах від 1,84%, при номінальних параметрах роботи конвеєра до 12,52%, при зниженій швидкості руху тягового каната.

3. Використання електромеханічних систем стрічково-канатних конвеєрів з векторно – керованими асинхронними електродвигунами повною мірою відповідають вимогам технологічного процесу та режимів експлуатації транспортних систем безперервної дії та може бути рекомендовано до використання при модернізації діючих та проектуванні нових магістральних стрічково-канатних конвеєрів.

### Література

1. Giezlotka, "Historia goznictwa", Wydwnictwo Noucowe Slask. Katowice, pp. 210, 2009
2. V.R. Bezhok, V.I. Dvornikov and I.G. Manets, "Mine elevation: Scientific-industrial publication", LLC "South-East Ltd." Donetsk T, vol. 624, 2007.
3. Печеник М.В., Бур'ян С.О., Наумчук Л.М. Дослідження втрати енергії в електромеханічних системах багатодвигунних стрічкових конвеєрів. Технічна електродинаміка. 2016. №3. С. 82-84.
4. М.В.Печеник, С.О.Бур'ян, Л.М.Наумчук, А.О.Грицай. Дослідження впливу оптимального регулятора напруги на рівень коливань у стрічці конвеєра. International scientific and technical conference, Ktelenchuk, НАУ, - №1/2016 – 298с.
5. Peresada, S. M., Kovbasa, S. N. Generalized algorithm of direct vector control of induction motor. eknichna elektrodynamika, 2002. №4. Pp. 17-22.
6. Pechenik, Mykola, et al. "Analysis of the Given Law Accuracy of a Mine Skip Lifting Unit Movement Using a Vector-Controlled Electric Drive System." 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP). IEEE, 2020.
7. Pang, Yusong, and Gabriel Lodewijks. "Determining stress cycles for belt conveyor speed control in transient operations." 2016 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI). IEEE, 2016.
8. Pechinik, M., Pushkar, M., Burian, S., & Kazmina, L. "Investigation of energy characteristics of the electromechanical system in multi-motor conveyors under variation of traction load level on the belt." 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). IEEE, 2019.

### References

1. Giezlotka, "Historia goznictwa", Wydwnictwo Noucowe Slask. Katowice, pp. 210, 2009
2. V.R. Bezhok, V.I. Dvornikov and I.G. Manets, "Mine elevation: Scientific-industrial publication", LLC "South-East Ltd." Donetsk T, vol. 624, 2007.
3. Pechenik M.V., Burian S.O., Naumchuk L. M. Research of energy modes of operation of a multi-engine belt conveyor. Tekhnichna Elektrodynamika. 2016. №3. P. 82-84. (Ukr)
4. M.V. Pechenik, S.O. Burian, L.M. Naumchuk, A.O. Hrytsai. Study of the influence of the optimal voltage regulator on the level of oscillations in the conveyor belt. International scientific and technical conference, Ktelenchuk, NAU, - No. 1/2016 – 298 p.
5. Peresada, S. M., Kovbasa, S. N. Generalized algorithm of direct vector control of induction motor. eknichna elektrodynamika, 2002. №4. Pp. 17-22.
6. Pechenik, Mykola, et al. "Analysis of the Given Law Accuracy of a Mine Skip Lifting Unit Movement Using a Vector-Controlled Electric Drive System." 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP). IEEE, 2020.
7. Pang, Yusong, and Gabriel Lodewijks. "Determining stress cycles for belt conveyor speed control in transient operations." 2016 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI). IEEE, 2016.
8. Pechinik, M., Pushkar, M., Burian, S., & Kazmina, L. "Investigation of energy characteristics of the electromechanical system in multi-motor conveyors under variation of traction load level on the belt." 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). IEEE, 2019.

**Artem ANTONENKO**

Kyiv National University of Culture and Arts

<https://orcid.org/0000-0001-9397-1209>e-mail: [artem.v.antonenko@gmail.com](mailto:artem.v.antonenko@gmail.com)**Galina TOLOK**

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

<https://orcid.org/0000-0002-2971-1645>**Dmytro SUKHOMLYN**

Kyiv National University of Culture and Arts

<https://orcid.org/0000-0002-2669-2573>**Daniil TERNOVSKIY**

Kyiv National University of Culture and Arts

<https://orcid.org/0000-0002-8087-1492>**Anna TYSHKOVSKA**

Kyiv National University of Culture and Arts

<https://orcid.org/0000-0002-8811-877X>**Iryna MYKHAYLICHENKO**

Kyiv University of Culture

## FEATURES OF THE USE OF ROASTING AND BAKERY EQUIPMENT IN THE HOTEL AND RESTAURANT BUSINESS

*The article describes the features of the interaction of thermal energy with food raw materials and food products and conducts an analytical review of the use of heat treatment for various technological processes in the food industry and hotel and restaurant business. The paper examines the peculiarities of the interaction of thermal energy with food raw materials and food products and provides an overview of the use of heat treatment for various technological processes in the food industry and hotel and restaurant business. Despite the number of scientific publications dedicated to the topic of technological equipment, in particular thermal heating, in Ukraine this is an insufficiently illuminated topic that requires research, taking into account the current conditions in the national economy. To create more rational technological processes, a combination of thermal heating with other energy carriers is used: steam, hot air, infrared heating, heated fat, vacuum, ultrasound. Heat treatment of food products in the cooking mode is divided into two stages: heating to a set temperature and maintaining this temperature until complete culinary readiness. The stepwise thermal heating method is also used, which ensures a high heating rate and avoids uneven heating of individual areas of the processed products. In this way, the possibility of temperature redistribution is ensured through the thermal conductivity of the material during its thermostating. One of the features of heat treatment is the possibility of rapid and relatively uniform heating of the product over the entire volume, which by its nature depends not so much on the thermophysical characteristics of the heated object as on the presence of moisture in it and the nature of its distribution by volume. The ability of dielectric heating is effectively used in the food industry when defrosting products. Defrosting in the microwave field allows you to speed up the process tenfold and to a large extent preserve the quality of food products. Good results are given by combined methods of defrosting microwave heating with ultrasound, as well as with the method of blowing the product with cold air. The use of microwave heating with other physical methods and energy carriers makes it possible to intensify technological processes, reduce the cost of finished products, as well as increase the nutritional and biological value of raw materials, semi-finished products and finished products.*

*Keywords: technological equipment, thermal equipment, thermal energy, thermal processes, microwave heating.*

**Артем АНТОНЕНКО**

Київський національний університет культури і мистецтв

**Галина ТОЛОК**

Національний університет біоресурсів і природокористування України

**Дмитро СУХОМЛИН, Даниїл ТЕРНОВСЬКИЙ, Анна ТИШКОВСЬКА**

Київський національний університет культури і мистецтв

**Ірина МИХАЙЛІЧЕНКО**

Київський університет культури

## ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЖАРИЛЬНОГО ТА ХЛІБОПЕЧНОГО ОБЛАДНАННЯ В ГОТЕЛЬНО-РЕСТОРАННОМУ БІЗНЕСІ

*У статті описано особливості взаємодії теплової енергії з продовольчою сировиною та харчовими продуктами та проведено аналітичний огляд використання теплової обробки для різних технологічних процесів у харчовій промисловості та готельно-ресторанному бізнесі. У роботі досліджено особливості взаємодії теплової енергії з продовольчою сировиною та харчовими продуктами та подано огляд використання термічної обробки для різних технологічних процесів у харчовій промисловості та готельно-ресторанному бізнесі. Незважаючи на велику кількість наукових публікацій, присвячених темі технологічного обладнання, зокрема теплового, в Україні це недостатньо висвітлена тема, яка потребує дослідження з урахуванням сучасних умов розвитку народного господарства. Для створення більш раціональних технологічних процесів використовується поєднання теплового нагріву з іншими енергоносіями: паром, гарячим повітрям, інфрачервоним нагріванням, нагріванням жиру, вакуумом, ультразвуком. Теплова обробка харчових продуктів у режимі варіння поділяється на два етапи:*

нагрівання до заданої температури і підтримання цієї температури до повної кулінарної готовності. Застосовують також ступінчастий спосіб термічного нагріву, що забезпечує високу швидкість нагріву і дозволяє уникнути нерівномірного нагріву окремих ділянок оброблюваних виробів. Таким чином забезпечується можливість перерозподілу температури через теплопровідність матеріалу під час його термостатування. Однією з особливостей термічної обробки є можливість швидкого і відносно рівномірного нагрівання продукту по всьому об'єму, що за своєю природою залежить не стільки від теплофізичних характеристик об'єкта, що нагрівається, скільки від наявності в ньому волози і характер його розподілу за об'ємом. Здатність діелектричного нагріву ефективно використовується в харчовій промисловості при розморожуванні продуктів. Розморожування в мікрохвильовій печі дозволяє прискорити процес в десятки разів і значною мірою зберегти якість харчових продуктів. Хороші результати дають комбіновані способи розморожування мікрохвильовим нагріванням ультразвуком, а також методом обдування продукту холодним повітрям. Використання мікрохвильового нагріву з іншими фізичними методами та енергоносіями дає змогу інтенсифікувати технологічні процеси, знизити собівартість готової продукції, а також підвищити харчову та біологічну цінність сировини, напівфабрикатів і готової продукції.

*Ключові слова:* технологічне обладнання, теплове обладнання, тепла енергія, теплові процеси, мікрохвильове нагрівання

### Formulation of the problem

Currently, in the food industry and the hotel and restaurant industry, special attention is paid to physical methods of influencing raw materials, semi-finished products and finished products, which are capable of intensifying heat exchange processes, ensuring microbiological safety, as well as improving and increasing the nutritional value of food raw materials. A physical method capable of achieving these goals is heating in an electromagnetic field. The paper examines the peculiarities of the interaction of baking equipment with food raw materials and food products and provides an overview of the application of heat treatment for various technological processes in the food industry and hotel and restaurant business. Despite the number of scientific publications dedicated to the topic of technological equipment, in particular thermal heating, in Ukraine this is an insufficiently illuminated topic that requires research, taking into account the current conditions in the national economy.

### Analysis of recent sources

A significant contribution to solving the fundamental issues of creating technologies and equipment for food products with complex raw materials as a means of preventing and eliminating micronutrient deficiencies was provided by the research of the following domestic and foreign scientists: O.O. Grinchenko, A.B. Horalchuk, A.M. Dorokhovych, I.Yu. Zhigalenko, A.V. Ziolkovskaya, P.O. Karpenka, M.B. Kolesnykova, V.N. Korzuna, M.V. Kravchenko, H.M. Lysyuk, L.P. Malyuk, L.M. Mostovoi, N.Ya. Orlova, M.I. Peresichny, P.P. Pivovarova, N.V. Prytulska, G.B. Rudavska, M.R. Ennis, J.C.F. Murray, G.O. Phillips, W.C. Weling, P.A. Williams and others [1-14].

The purpose of the article is to study the peculiarities of the interaction of thermal energy with food raw materials and food products and to conduct an analytical review of the use of heat treatment for various technological processes in the food industry and the hotel and restaurant business.

The object of research is the peculiarities of the interaction of thermal energy with food raw materials and dishes.

The subject of research is technological equipment, thermal energy, thermal processes, quality and safety.

### Presenting main material

The heating of bodies, in particular food products, in an electromagnetic field differs from their heating due to heat conduction or convection in that the elements of the medium that separates the generators of electromagnetic oscillations and the objects of heating, as a rule, do not participate in the transfer of heat. Therefore, in such systems (generator – medium – heating object) the heat flow is not continuous and the energy is transferred in the form of electromagnetic waves. Heat arises in the objects of heating themselves due to its interaction with the electromagnetic field. Electromagnetic waves of the appropriate frequency  $\nu$  and length can be used in the production of food products to implement three main methods of heating bodies; infrared (IR), dielectric (DE) and induction (ID). It is worth noting that with IR and DE heating, food products are directly heated, while with IR heating, only some ferromagnetic part of the device is heated [1,2,4].

Modern classification: frying pans, fryers, frying pans, roasting and baking cabinets, grills, baking conveyor frying pans, continuous-acting devices intended for frying and baking. A special group of processes includes frying and baking in the field of microwave currents and IR radiation.

Frying pans Today, electric frying pans with only direct heating are widely used in restaurant enterprises - these are, for example, frying pans "CECM-0.2" and "CECM-0.5". In addition, there are SKE-0.3 frying pans in operation; CE-1 and CE-2, as well as "CE-0.45" and "CE-0.22" frying pans, are intended for work with functional capacities. Electric sectional-modulated frying pan "CECM-0.2" has a rectangular steel bowl, veneered with steel sheets covered with white enamel, installed on two pedestals. The bowl has a drain for draining fat. It is closed from above by a hinged cover, which is fixed by two tension springs placed inside the cabinets. A layer of asbestos and foil is laid between the cast-iron bowl and the cladding, which serves as thermal insulation. To automatically maintain the set temperature of the frying pan, a temperature regulator TR-4K is mounted on the back of its bowl. In the right cabinet there is a mechanism for overturning the bowl, which allows you to rotate it by 180° C. The capacity of the bowl is 36 dm<sup>3</sup> (l). Heating time to 350°C 45 min. Electric frying pan with indirect heating "SKE-0.3" differs from 35 "CECM-0.2" and "CECM-0.5" in the method of heat transfer to the loading bowl. Thermal energy is transferred to the surface of the bowl through an intermediate heat carrier - mineral oil. The oil is heated using 6 shades. In the "SGSM-0.5" sectionally modulated gas frying pan, the working bowl is heated due to the combustion chamber located directly below it. Gas frying pan "SKG-0.3" with indirect heating differs from a frying pan with direct heating in that its working bowl is heated with the help of an intermediate heat carrier - mineral oil.



Deep fryers. Electric sectional-modulated fryer "FESM-20" consists of a rectangular frying bath. The heating of fat is carried out by heaters immersed directly in it. Frying takes place in a stainless steel mesh basket immersed in a frying bath with hot oil. The fat heating temperature is regulated automatically using the TR-200 thermoregulator. On the front upper part there are signal lamps and a packet switch. The green lamp shows the inclusion of shadows, and the yellow one - reaching the set temperature of the fat. Productivity - 12 kg/h. The amount of oil to be poured is 20 liters. The time for heating the oil to 180°C is 20 minutes. Continuous fryer "CHE-40" is designed for frying potatoes and fish. The fat in the frying bath is heated by heat exchangers, and the temperature is maintained automatically with the help of the "EKT-2" electric contact thermometer. Culinary products are fed by a conveyor from the loading hopper into the bath, where they are evenly fried, smoothly moving with the help of a rotating auger through a layer of hot fat [5-7].

Roasters Rotary electric frying pan "ZHVE-700" is intended for baking rectangular semi-finished pancakes. In it, a hollow cast-iron frying drum, as well as a tank and a dough tray and a cutting mechanism, are fixed to the top of the table on a bracket. Heating of the frying surface of the drum is carried out due to radiant energy released by quartz electronic heaters installed inside the drum, and its temperature is maintained automatically using a thermoelectric thermometer. The tray is used to form the dough strip and feed it to the frying drum. A scraper knife is located below the drum, which separates the finished test tape. The pancake tape is cut on the pancake with the help of control mechanisms and a knife and placed on the pallet. Productivity – 720 pieces/hour. The dimensions of the pancake are 280 x 240 mm. The capacity of the dough tank is 3 liters. The working temperature of the drum is 160 ÷ 190°C.

Features of arrangement of roasting and baking cabinets, their classification. Frying cabinets are designed for frying meat and fish products, as well as for baking vegetable dishes made from cereals. Baking cabinets are designed for baking meat, bakery and confectionery products. Frying and confectionery cabinets differ in the number and size of working chambers, temperature in the chamber. Frying cabinets "ShZhESM-2K", "ShME-0.85", "ShKe-0.51", 36 "ShZhE-1.36", "ShK-2A" and baking cabinets "ShPESM-3" are in operation. "ESH-3M", "KEP-400". The electric sectional-modulated frying cabinet "ShZhESM-2K" consists of two frying sections of the same type, unified with thermal insulation. The sections are made of steel sheets and are equipped with shelves for decks inside. Sections are heated with the help of shades installed in the inner box of 3 pcs. from above and 3 from below. The upper shade is open, the lower shade is covered with a black leaf. Vapors and gases generated during heat treatment of products are removed through the ventilation hole. On the right is a block of electrical equipment, separately for each section on its front panel there are 2 packet switches for separate control of the upper and lower tenas. Batch switches change the power of adjusting the upper and lower tones in a ratio of 4:2:1. The thermostat automatically maintains the set section temperature in the range from 100°C to 350°C [8-10].

Electric confectionery oven "KEP-400" is designed for baking small bakery and confectionery products. The oven is divided into two halves: in the left part there are shades, a fan, a steam generator, a control system and an alarm system, in the right part there is a baking chamber with a door. In the lower compartment there is a steam generator, which is heated by heaters, a feed pipe and a pipe for draining condensate. Baking takes place on pallet sheets mounted on a rack cart that rolls into the baking chamber of the oven. Steam dehumidification of the baking chamber is carried out by steam obtained in its own steam generator. The limb of the thermostat is set to the required temperature, and with the help of package switches, the working chambers are turned on to strong heating, then switched to weak or strong heating. Productivity – 400 kg/shift. The number of trolley racks is 6. The total power is 50.5 kW, the weight is 2000 kg.

Devices with infrared heating. Electric devices with infrared heating are divided into periodic and continuous devices. The first include grills and universal frying cabinets, the second - a conveyor frying oven.

Electric grill "GE-3" is a parallelepiped-shaped grill with IR generators in the form of a chrome-nickel spiral located in a quartz tube. In the working chamber on the drive shaft with a square socket, a spit with two sliding holders and a set of eight skewers for barbecue is strengthened. Frying schnitzels, cutlets, chops and other products can be done on the grates included in the grill set. The working chamber of the grill is closed by a hinged door made of heat-resistant glass.

Electric grill "GE-2". The grill has two working chambers: the upper - frying and the lower - thermal. Five IR generators ("KI-220-1000") are installed in the frying chamber under the ceiling. Culinary products are mounted on five fork-shaped skewers that perform a complex movement: around their own axis and around the axis of the two disks on which they are fixed. This movement is carried out with the help of a planetary transmission and ensures uniform frying of products. The temperature in the frying chamber is maintained by a thermostat. In the lower part of the frying chamber, a 300W heating element is installed, on which logs are burned, emitting aromatic substances that give the finished product a specific taste and smell. The lower (heat) chamber is heated by three heaters with a total power of 1050 W, and the finished products are kept hot in it [11].

Universal frying cabinets "Oven-0.51" and "Oven-0.85". The cabinets consist, respectively, of three and five chambers, each of which houses one deck. The chambers are heated using IR generators (a nichrome spiral in a quartz tube) located in the upper and lower parts of the chamber. The temperature inside the chambers is regulated with the help of temperature relay sensors in the range from 100 to 300° C. Cabinets are designed for frying, baking and preparing culinary products and work with the use of functional capacities. These cabinets are part of a parametric series of universal infrared heating cabinets, which includes cabinets with the number of decks 3, 5, 6, 8, 9 and 10, to suit catering establishments of various capacities.

Ovens conveyor frying PKZH. The furnace is a device of continuous action. Its main nodes are the conveyor, the frying chamber itself and the blocks (upper and lower) of IR generators. In the working mode, the chain conveyor, on which the tray with products is installed, makes a step (intermittent) movement, which is achieved with the help of a special time relay. IR generators, assembled in blocks of 6 pcs. (block power 4.5 kW), made in the form of a chrome-nickel spiral placed in a quartz tube. The generators are protected from below by a metal mesh that prevents glass from entering the product. Decks have a size of 420x285 mm. From above, the products are heated due to radiant energy, from below - by contact with heated trays. The oven is used in large catering enterprises for frying semi-finished meat products.

Microwave. A microwave oven or UHF oven is an electrical appliance designed for quick cooking or heating of food, defrosting of household products using electromagnetic waves of the decimeter range (usually with a frequency of 2450 MHz). In industry, these furnaces are used for drying, defrosting, melting plastics, heating glues, firing ceramics, etc. In some industrial furnaces, the radiation frequency can vary (so-called variable frequency microwave, VFM). In contrast to classic ovens (for example, an oven or a Russian oven), heating of products in a microwave oven does not occur from the surface, but from the entire volume of the product containing polar molecules (for example, water), since radio waves penetrate quite deeply into almost all food products [12-14]. This reduces the product's heating time. Types of microwave ovens: with grill, with convection (means that a 38 microwave oven can blow hot air on the product in the same way as a conventional oven). The power of microwave ovens varies in the range from 500 to 2500 watts and higher. Almost all household stoves allow the user to adjust the level of radiated power. For this, the heater (magnetron) is periodically turned on and off, according to the setting of the power regulator (that is, the magnetron itself has only two states - on/off, but the longer the duration of the on state relative to the off state, the greater the radiant power of the furnace per unit of time - the so-called wide pulse modulation method, the same is used for the same purposes, for example, in the power regulator of the iron). Microwave radiation cannot penetrate metal objects, so it is impossible to cook food in metal dishes. Metal dishes and metal devices (spoons, forks) in the oven during heating can cause it to malfunction. It is not recommended to microwave dishes with metal coating ("gold stripe") - even this thin layer of metal is strongly heated by eddy currents, and this can destroy the dishes near the area of metal coating. At the same time, metal objects without sharp edges, made of thick metal, are relatively safe in the microwave oven. Liquids in hermetically sealed containers and whole bird eggs should not be heated in a microwave oven: due to the strong evaporation of water, high pressure is created inside them, and as a result, they may explode. For the same reasons, it is undesirable to strongly heat sausage products covered with polyethylene film. When heating water in a microwave oven, you should also be careful - water can overheat, that is, it can heat up above the boiling point. Overheated liquid can boil almost instantly from careless movement. This applies not only to distilled water, but also to any water that contains few suspended particles. The more uniform the inner surface of the water vessel, the higher the risk. If the vessel has a narrow neck, there is a high probability that at the moment of boiling, superheated water will spill out and burn your hands.

Induction electric stove. Today, a new product - induction stoves - is being actively promoted on the household appliances market. When cooking on a regular electric stove, you can use any utensil (steel, aluminum, ceramic, glass). The spiral in the stove heats up and heats the bottom of the dish. A significant disadvantage is the need to buy expensive dishes so that the food burns. A set of good pots and pans can cost more than classic tableware. In such ordinary stoves, there is no protection against human inattention, the result of which can be a burnt pot and a short circuit. Induction stoves work on a different principle, they do not have a heating element at all. The coil creates a magnetic field in which the dishes themselves begin to heat up. The disadvantage of such plates is that it is necessary to buy only dishes with a flat bottom, which is "magnetized". Cooking absolutely does not require a double bottom, the latest developments in the design of the pan, etc. Also, the stove will not turn on if you put unsuitable dishes on it, but it will turn off if the water "ran" or if you remove the pan from it. So it is difficult to start a fire with an induction stove, if the employee forgets that something is being cooked on the stove, the surface temperature sensor is activated, and the stove is turned off. The next advantage of induction stoves is that they cook twice as fast with the same power as resistance stoves (2 liters of water boil in just 3 minutes). With the constant rise in electricity prices, the issue of saving is becoming more and more urgent every day.

### Conclusions

So, the studied data on the use of thermal energy in various technological processes allow us to talk about the effectiveness of this physical method of processing products. The use of thermal heating, as well as its complex with other physical methods and energy carriers, allows to intensify technological processes, reduce the cost of finished products, as well as increase the nutritional and biological value of raw materials, semi-finished products and finished products. At the same time, the mechanisms of the effect of thermal energy on food products remain unexplored.

### References

1. Mazaraki A.A. (2012). Tekhnologiya harchovih produktiv funkcional'nogo pryznachennya. Kiiiv: 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. Antiushko, D., Bozhko, T., Shapovalova, Nutritional value of a dry soluble gerodietetic product for enteral nutrition. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. № 5. C. 35-42. [in Ukrainian].
4. Cherevko O.I. (2017). Innovacijni tekhnologii harchovoї produkcii funkcional'nogo pryznachennya. Harkiv: HDUHT. 591 s. [in Ukrainian].

Ukrainian].

5. 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].

6. Gamayunova V.V. (2020) Innovacionnye tekhnologii v zhizni sovremennogo cheloveka. Odessa: KUPRIENKO SV. 209 s. [in Ukrainian].

7. Preobrazhenskij A.P. (2019) Uroven' razvitiya tekhniki i tekhnologii v HKHI veke. Odesa: KUPRIENKO S.V. 227 s. [in Ukrainian].

8. Lvovych Y.Ia., Nekrasov V.A., Preobrazhenskyi A.P. Perspektivni trendy rozvytku nauky: tekhnika i tekhnolohii. Odesa. KUPRIENKO SV. 2016. 197 s. [in Ukrainian].

9. 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].

10. 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].

11. Kryvoruchko M.Iu. (2012). Strukturno-mekhanichni vlastyvoli prishnoho tista z boroshna proroshchenoho zerna pshenytsi. Mizhnar. nauk.-prakt. zhurn. «Tovary i rynky». № 1. 82–88.

12. Mykhailyk V.S. (2016). Tekhnolohiia ta yakist pechyya zi shrotamy oliinykh kultur. Kharchova nauka i tekhnolohiia: naukovy-vyrobnychi zhurnal. № 1. 72–77.

13. Antonenko A.V. (2014). Boroshno z proroshchenoho zerna vivsa yak osnova dlia boroshnnykh kondyterskykh vyrobiv. Naukovi pratsi Odeskoi natsionalnoi akademii kharchovykh tekhnolohii. № 46 (1). 149–153.

14. Zemlina U.V. (2019) Tekhnologiya boroshnyanih strav na osnovi netradicijnoi sirovini. Naukovij zhurnal «Vcheni zapiski» TNU im.V.I.Vernads'kogo. Seriya «Tekhnichni nauki». Tom 30 (69). №4. 77-82

Сергій БОЙКО

Національний університет «Запорізька політехніка»

<https://orcid.org/0000-0001-9778-2202>

Альона ХЕБДА

Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ

<https://orcid.org/0000-0003-1917-9509>

Юрій СТУЩАНСЬКИЙ

Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ

<https://orcid.org/0000-0002-3021-6756>

Сергій ГОЛОВАНОВ

Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ

<https://orcid.org/0000-0002-0103-0530>

Михайло РИЖИК

Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ

<https://orcid.org/0000-0002-1092-6742>

## ПІДХІД ДО ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЮ СИЛОВОЮ УСТАНОВКОЮ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

Сучасні літальні апарати невід'ємно пов'язані з електронікою, яка забезпечує функціонування всієї авіатранспортної системи. Сучасна авіоніка літальних апаратів являє собою комплекс апаратних та програмних засобів, що є частиною системи автоматичного управління літального апарату та функціонально об'єднує планер з приводом виконавчого органу. Однією з основних функцій сучасної авіоніки є автоматизація процесів керування літальними апаратами, що має на меті забезпечення належного виконання безпечного польоту з найменшою кількістю членів екіпажу. Цей факт спонукає до постійного вдосконалення існуючих бортових комплексів авіоніки літальних апаратів. З поміж іншого, адаптивна система керування має визначати динамічні характеристики керованого літального апарату в процесі польоту, оцінку стану функціональних систем літального апарату та формування керуючих сигналів. Пропонується підхід до побудови системи керування літальним апаратом, який передбачає подвійне визначення характеристик досліджуваного об'єкту. Запропоновано структура системи керування літальним апаратом з електричною силовою установкою. На її побудову мали вплив особливості експлуатації електричної силової установки літального апарату, підхід щодо подвійного визначення характеристик літального апарату та принцип подвійного контролю параметрів польоту літального апарату. У роботі запропоновано підхід до вдосконалення адаптивної системи літальних апаратів з електричною силовою установкою.

**Ключові слова:** модернізація авіоніки, безпека польотів, людський фактор, мала авіація, безпілотна авіація, електричні силові установки, система керування.

Sergey BOIKO, Alona HEBDA, Yuri STUSHCHANSKY, Serhiy GOLOVANOV, Myhailo RUZHUK  
Kremenchug Flight College of Kharkiv National University of Internal Affairs

### APPROACH TO THE IMPROVEMENT OF THE CONTROL SYSTEM OF THE ELECTRIC POWER PLANT OF THE AIRCRAFT

The paper proposes an approach to improving the adaptive system of aircraft with an electric propulsion system. Modern aircraft are inextricably linked with electronics that ensure the functioning of the entire air transport system. Modern aircraft avionics is a complex of hardware and software that is part of the automatic control system of the aircraft and functionally combines the glider with the drive of the executive body. One of the main functions of modern avionics is the automation of aircraft control processes, which aims to ensure the proper execution of a safe flight with the smallest number of crew members. This fact encourages the continuous improvement of the existing on-board avionics complexes of aircraft. Among other things, the adaptive control system should determine the dynamic characteristics of the controlled aircraft during the flight, the assessment of the state of the functional systems of the aircraft and the formation of control signals. An approach to the construction of an aircraft control system is proposed, which involves a double determination of the characteristics of the object under study. The structure of the control system of an aircraft with an electric power plant is proposed. Its construction was influenced by the operating features of the aircraft's electric power plant, the approach to the dual determination of the aircraft's characteristics, and the principle of dual control of the aircraft's flight parameters. The paper proposes an approach to improving the adaptive system of aircraft with an electric propulsion system. There are the following factors: 1) height, accuracy and reliability of sensors of all parameters, regardless of operating conditions; 2) a simple and at the same time reliable and functional interface; 3) timely detection of deviations in the operation of aircraft systems during its operation and transmission of relevant information to the crew and the control system; 4) operational determination of the dynamic characteristics of the aircraft during flight and adaptive optimization of controlled signals taking into account the purpose of control and the specified optimization criteria.

**Key words:** avionics modernization, flight safety, human factor, small aircraft, unmanned aircraft, electric power plants, control system.

### Постановка проблеми

Сучасні літальні апарати невід'ємно пов'язані з електронікою, яка забезпечує функціонування всієї авіатранспортної системи. Сучасна авіоніка літальних апаратів являє собою комплекс апаратних та програмних засобів, що є частиною системи автоматичного управління літального апарату та функціонально об'єднує планер з приводом виконавчого органу [1].

Однією з основних функцій сучасної авіоники є автоматизація процесів керування літальними апаратами, що має на меті забезпечення належного виконання безпечного польоту з найменшою кількістю членів екіпажу. цей факт спонукає до постійного вдосконалення існуючих бортових комплексів авіоники літальних апаратів.

Між тим, сучасні силові установки літальних апаратів класифікуються і за видом палива, в тому числі є і електричні [10].

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Наукова когорта провідних фахівців авіаційної галузі сходиться у висновках про необхідність подальшого вдосконалення системи управління польотом літальних апаратів всіх типів, що має на меті створення сучасної багатофункціональної оптимальної системи керування, що забезпечить безпеку пілотування літальних апаратів та зменшить при цьому чисельність їх екіпажів [1-9].

Крім того, актуальним та сучасним на сьогоднішній день постає питання підходу до керування літальними апаратами з електричними силовими установками [9-12].

#### Формулювання мети дослідження

Метою роботи є аналіз особливостей та перспектив вдосконалення адаптивної системи керування польотом літального апарату з електричною силовою установкою.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

Передусім, слід зауважити той факт, що до складу сучасної авіоники літального апарату входять будь-які системи розміщені на борту літального апарату, що залежать чи функціонують завдяки електриці.

Таким чином, адаптивна система керування має визначати динамічні характеристики керованого літального апарату в процесі польоту, оцінку стану функціональних систем літального апарату та формування керуючих сигналів [2].

Між тим, архітектура бортових комплексів авіоники має бути забезпечена комплексом датчиків, що точно передають параметри до системи керування. Результати вимірювань цих датчиків відіграють важливу роль при визначенні динамічних характеристик літального апарату та стан функціонування його систем під час польоту.

Рівень сучасної комп'ютерної техніки, на сьогоднішній день, дає можливість значною мірою автоматизувати процеси управління польотом літальних апаратів усіх типів. Між тим, для цивільної авіації є важлива вимога до системи пілотування, яка ґрунтується на високій ефективності експлуатації літального апарату. Тому, однією із складових системи керування польотом літального апарату є система оптимізації яка характеризується властивістю адаптації до постійно змінних стохастичних умов польоту.

На сьогоднішній день, є велика кількість програмних та апаратних засобів щодо реалізації оптимізаційних багатокритеріальних задач. Між тим, для ефективного їх використання необхідно проаналізувати рух під час польоту літального апарату, як об'єкта керування та визначити завдання які ставляться перед системою керування польотом літального апарату та їх пріоритетність у досягненні загальної мети керування [3].

Тож, враховуючи той факт, що система керування польотом літального керування літального апарату має на меті зміну фактичних параметрів польоту літального апарату з метою підтримання його руху у завчасно заданому напрямку. Виконання поставлених завдань реалізується шляхом опосередкованої передачі керуючого сигналу на відповідні функціональні системи літального апарату [3].



Рис. 1. Структура керування літальним апаратом

Відповідно до структурної схеми керування літальним апаратом (рис. 1), льотчик візуально та використовуючи покази приладового обладнання відслідковує параметри польоту літального апарату у просторі шляхом порівняння фактичних даних з приладів з початковими, заданими перед польотом. За результатами порівняння даних льотчик приймає рішення щодо керування пілотованим літальним апаратом та виконує відповідні дії шляхом взаємодії з ричагами керування. Таким чином відбувається коригування параметрів польоту літального апарату. В свою чергу, оператор безпілотного літального апарату має можливість частіше за все, керувати польотом пілотованого літального апарату опираючись лише на покази параметрів польоту. А система автоматичного керування літальним апаратом, в свою чергу, опирається

лише на отриманні з датчиків параметри польоту літального апарату.

Таким чином, всі можливі способи керування літальним апаратом мають спільну рису: передача управляючого сигналу до відповідних функціональних систем літального апарату опираючись на аналіз фактичних показів параметрів польоту в порівнянні з заданими перед польотом літального апарату.

Між тим, система керування будь-яким літальним апаратом має відповідати таким базовим вимогам, як забезпечення керування літальним апаратом у всіх його польоту, забезпечення високого рівня безпеки польоту літального апарату, мати мінімальні масогабаритні параметри, невелику вартість, надійність та високі експлуатаційні показники [4].

У будь-якому випадку використання системи керування літального апарату, чи то в режимі автопілоту, чи то в допоміжному режимі, має такі завдання, як забезпечення необхідної стійкості літального апарату та його керованості, стабілізація параметрів руху та ціле направлене керування траєкторією руху літального апарату [5].

Слід також враховувати важливість впливу людського фактору при пілотуванні літального апарату. Сучасна система керування літальним апаратом має забезпечувати не тільки керування літальним апаратом в автоматичному режимі, але і в процесі пілотування льотчиком чи оператором надавати застереження щодо небезпечних маневрів чи режимів польоту та, за необхідності, у критичній ситуації під час польоту стабілізувати польотні параметри літального апарату [6].

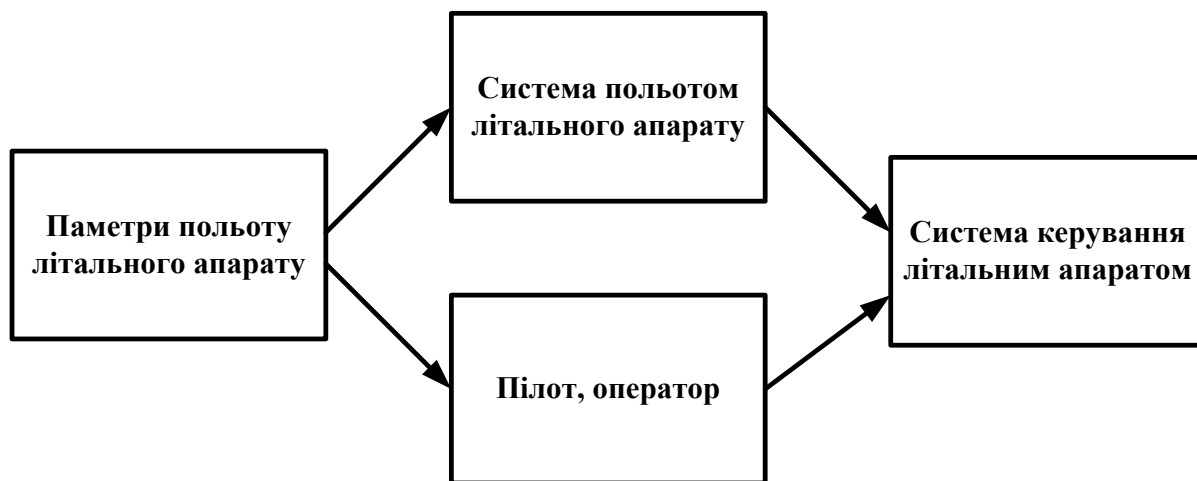


Рис. 2 Структура подвійного контролю параметрів польоту літального апарату

Тому завдання створення оптимальної системи керування польотом літального апарату, яка характеризується властивістю адаптації до стохастичних характеристик умов польоту, має бути вирішена при використанні підходу оптимальної ідентифікації та фільтрації керованого процесу, який ґрунтується на алгоритмах оптимізації керування з використанням прогнозних моделей (рис. 2).

Між тим, система керування польотом літального апарату з посеред іншого, має виконувати такі завдання як, ідентифікація динамічних характеристик керованого літального апарату в процесі експлуатації, оцінка стану літального апарату та його функціональних елементів системи керування польотом, формування керованих сигналів, що ґрунтуються на інформації, що надходить до системи керування відповідно про динамічні характеристики та стан функціональних елементів системи керування польотом літального апарату.

Таким чином, результати вимірів динамічних параметрів польоту надходять до системи керування польотом літального апарату, у якій використовуються для розрахунку та визначення динамічних характеристик літального апарату та за встановленими у алгоритмі системи керування критеріями визначається його стан.

Пропонується підхід до побудови системи керування літальним апаратом, який передбачає подвійне визначення характеристик досліджуваного об'єкту. Перший рівень визначення динамічних характеристики літального апарату реалізує програмну оптимізацію параметрів на основі сигналів із датчиків. Другий рівень визначення динамічних характеристики літального апарату являє собою параметричну ідентифікацію. Досягнення завдань другого рівня визначення динамічних характеристик обумовлене використанням вхідних і вихідних сигналів функціональних систем керування польотом літального апарату (рис. 3).

Після виконання усіх зазначених дій, система керування польотом літального апарату виконує оптимізацію керованих сигналів, що ґрунтуються на даних про мету керування польотом та заданих критеріїв оптимізації.

Таким чином, запропонований підхід щодо реалізації системи керування польотом літального апарату складається з наступних етапів реалізації: розробка математичної моделі літального апарату, як об'єкту керування, визначення критеріїв оптимізації за якими синтезуються закони оптимізації керування польотом, розробка алгоритмів від лагодження законів керування польотом відносно режимів його

функціонування та безпосередньо реалізація отриманих алгоритмів системи керування польотом літального апарату в умовах апаратної реалізації бортової комп'ютеризованої системи.

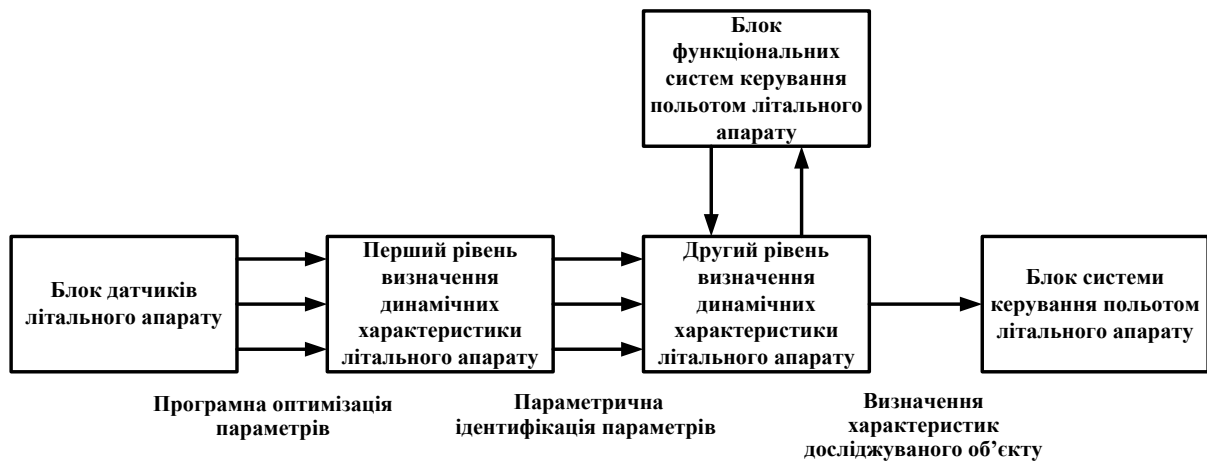


Рис. 3 Структура подвійного визначення характеристик літального апарату

Силові установки літальних апаратів не менш інших функціональних систем літального апарату задіяні у керуванні його польотом. Тому актуальним є розгляд системи керування електричною силовою установкою літального апарату в контексті особливостей його експлуатації [10].

На рис.4 показана запропонована структура системи керування літальним апаратом з електричною силовою установкою. На її побудову мали вплив особливості експлуатації електричної силової установки літального апарату, підхід щодо подвійного визначення характеристик літального апарату та принцип подвійного контролю параметрів польоту літального апарату.



Рис. 4 Структура системи керування літальним апаратом з електричною силовою установкою

### Висновки

Отже, враховуючи сучасні вимоги до бортових систем керування літальними апаратами, при їх вдосконаленні слід звернути увагу на такі чинники: 1) висота точність та надійність датчиків усіх параметрів, не в залежності від умов експлуатації; 2) простий і в той же час надійний та функціональний інтерфейс; 3) своєчасне виявлення відхилення в роботі систем літального апарату під час його експлуатації та передача відповідної інформації екіпажу та до системи керування; 4) оперативне визначення динамічних характеристик літального апарату під час польоту та адаптивна оптимізація керування сигналами з урахуванням мети керування та заданих критеріїв оптимізації.

У роботі запропоновано підхід до вдосконалення адаптивної системи літальних апаратів з електричною силовою установкою.

### Література

1. Безпека авіації / В. П. Бабак, В. П. Харченко, В. О. Максимов та ін. К. : Техніка, 2004. 584 с.
2. Харченко В.П., Остроумов І.В. Авіоніка: навч. посіб. К. : НАУ, 2013. 272 с.

3. Boiko S.M. Modern aspects of helicopters' modernization. Monograph / S.M. Boiko, V.H. Romanenko, Yu.V. Stushchanskyi, M.O. Nozhnova, V.M. Doludariiev, Ya.S. Doludarieva, I.M. Koval, N.A. Koversun Warsaw : iScience Sp. z.o.o. 2020. 140 p.
4. 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.
5. *World Energy Outlook –2021*, OECD/IEA, Paris.
6. Кутовий О.П. Тенденції розвитку безпілотних літальних апаратів. *Наука і озброєння*. 2014. № 4. С. 39 - 47.
7. Білолід В.Д., Таранець К.В. Мала енергетика та її значення в регіональних системах майбутнього. *Проблеми загальної енергетики*. 2008. №18. С. 40–47.
8. Головко В.М., Денисюк П.Л., Кириленко В.М. Аналіз принципів побудови локальних систем енергозабезпечення на базі відновлювальних джерел енергії. *Відновлювана енергетика XXI століття: IX міжнар. конф., 15–19 вересня 2008 р.: тези доп. АР Крим, 2008. С. 124– 125.*
9. Глоба Л. С. Розробка інформаційних ресурсів та систем / Л. С. Глоба, Т. М. Кот. – К. : НН ІТС НТУУ «КПІ», 2012. – 322 с.
10. Демківський Є. О. Система підтримки прийняття рішень при прогнозуванні нестационарних процесів / Є. О. Демківський, П. І. Бідюк // *Наукові праці Миколаївського державного гуманітарного університету ім. Петра Могили*. – 2008. – Вип. 77. – С. 137-159.
11. Мясичев А. А. Построение БПЛА длительного полета с использованием солнечных модулей / А. А. Мясичев // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. – 2017. - № 2. – С.132-136.
12. Функціональна стратифікація структур систем керування безпілотних авіаційних комплексів / Сергій Нестеренко, Андрій Акименко, Оксана Герасименко [та ін.] // *Технічні науки та технології*. – 2016. - № 2. – С. 123-129.

#### References

1. Bezpeka aviatsii / V. P. Babak, V. P. Kharchenko, V. O. Maksymov ta in. K. : Tekhnika, 2004. 584 s.
2. Kharchenko V.P., Ostroumov I.V. Avionika: navch. posib. K. : NAU, 2013. 272 s.
3. Boiko S.M. Modern aspects of helicopters modernization. Monograph / S.M. Boiko, V.H. Romanenko, Yu.V. Stushchanskyi, M.O. Nozhnova, V.M. Doludariiev, Ya.S. Doludarieva, I.M. Koval, N.A. Koversun Warsaw : iScience Sp. z.o.o. 2020. 140 p.
4. 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.
5. *World Energy Outlook –2021*, OECD/IEA, Paris.
6. Kutovyi O.P. Tendentsii rozvytku bezpilotnykh litalnykh aparativ. *Nauka i ozbroiennia*. 2014. № 4. S. 39 - 47.
7. Bilolid V.D., Taranets K.V. Mala enerhetyka ta yii znachennia v rehionalnykh systemakh maibutnoho. *Problemy zahalnoi enerhetyky*. 2008. №18. S. 40–47.
8. Holovko V.M., Denysiuk P.L., Kyrylenko V.M. Analiz pryntsyypiv pobudovy lokalnykh system enerhozabezpechennia na bazi vidnovliuvalnykh dzherel enerhii. *Vidnovliuvana enerhetyka KhKhI stolittia: IKh mizhnar. konf., 15–19 veresnia 2008 r.: tezy dop. AR Krym, 2008. S. 124– 125.*
9. Hloba L. S. Rozrobka informatsiinykh resursiv ta system / L. S. Hloba, T. M. Kot. – K. : NN ITS NTUU «KPI», 2012. – 322 s.
10. Demkivskyi Ye. O. Systema pidtrymky pryiniattia rishen pry prohnozuvanni nestatsionarnykh protsesiv / Ye. O. Demkivskyi, P. I. Bidiuk // *Naukovi pratsi Mykolaivskoho derzhavnoho humanitarnoho universytetu im. Petra Mohyly*. – 2008. – Vyp. 77. – S. 137-159.
11. Miasyshchev A. A. Postroyeny BPLA dlytelnoho poleta s yspolzovanyem solnechnykh modulei / A. A. Miasyshchev // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. – 2017. - № 2. – S.132-136.
12. Funktsionalna stratyfikatsiia struktur system keruvannia bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv / Serhii Nesterenko, Andrii Akymenko, Oksana Herasymenko [ta in.] // *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*. – 2016. - № 2. – S. 123-129.



Анна БОНДАРЄВА

Державний торговельно-економічний університет  
<https://orcid.org/0000-0002-3241-2726>  
e-mail: [Aa-aa@i.ua](mailto:Aa-aa@i.ua)

Олена МОКРОУСОВА

Державний торговельно-економічний університет  
<https://orcid.org/0000-0003-1943-8048>  
e-mail: [olenamokrousova@gmail.com](mailto:olenamokrousova@gmail.com)

## ЗАСТОСУВАННЯ ГІБРИДНИХ ПІГМЕНТІВ У ФОРМУВАННІ ПОЛІМЕРНО-МІНЕРАЛЬНОГО ПОКРИТТЯ ДЛЯ ОЗДОБЛЕННЯ ШКІР

Стаття присвячена дослідженню фізико-механічних властивостей полімерних плівок в результаті застосування гібридних пігментів на основі монтморилоніту для формування полімерно-мінерального покриття для оздоблення шкір. Запропоновано механізму структуривання полімерної матриці гібридним пігментом, згідно якого високорозвинена сорбційна поверхня монтморилоніту сприяє адсорбції полімеру та стабілізує його структуру. Застосування гібридних пігментів на основі монтморилоніту забезпечує підвищення фізико-механічних властивостей покривних плівок, пластифікує та структурує полімерну композицію, сприяє отриманню шкір з високими експлуатаційними характеристиками за показниками адгезії покриття до мокрої та сухої шкіри, стійкості до мокрого тертя та до багаторазових вигинів.

Ключові слова: гібридні пігменти, монтморилоніт, покриття, оздоблення, шкіра, властивості

Anna BONDARYEVA, Olena MOKROUSOVA  
State University Of Trade And Economics

## THE APPLICATION OF HYBRID PIGMENTS IN THE FORMATION OF A POLYMER-MINERAL COATING FOR LEATHER FINISHING

The paper is focused to the study of the physical and mechanical properties of a polymer-mineral coating based on hybrid pigments for leather finishing. The aim of this research is to study the effect of hybrid pigments based on montmorillonite on the formation of a polymer-mineral coating for leather finishing.

Hybrid pigments obtained by complex modification of native montmorillonite with sodium carbonate and basic chromium (III) sulfate with further subsequent adsorption of anionic dyes on the cationic surface of the mineral particles were used for this research. A ready-made mixture of various structures film-formers, intended for the finishing of facial and polished leather was used as a film-former. For the leather finishing, coating paints were prepared in the form of polymer-mineral compositions by mixing hybrid pigments with a film-forming agent in the ratio, wt. part 1: 5.

In this study it was calculated that montmorillonite consumption at the level of 1.5-2.0% in terms of the mass of montmorillonite from the mass of dry polymer residue was optimal for obtaining high physical and mechanical properties of polymer films for finishing leather. A mechanism for structuring the polymer matrix with a hybrid pigment was proposed. According to this mechanism the highly developed sorption surface of montmorillonite provided adsorption of the polymer and stabilized its structure with the formation of a mixed polymer-mineral composite. It was shown that the use of montmorillonite in the composition of hybrid pigment allowed to adjust the physical and mechanical properties of the polymer-mineral composition for leather finishing, provided an increase in strength and regulated the level of elasticity of the covering film, which ensured an increase in the operational properties of the leather coating.

Keywords: hybrid pigments, montmorillonite, coating, finishing, leather, properties

### Постановка проблеми

Сучасні вимоги до шкіряних виробів через щорічну зміну модних тенденції та дизайнерських рішень вимагають постійного та швидкого оновлення асортименту шкір, що забезпечується оздобленням лицьової поверхні в широкому кольоровому спектрі, формуванням багатокольорового покриття зі складними ефектами тиснення, нарізання або імітації різної текстури.

Надання необхідного кольору або відтінку лицьовій поверхні шкір є найскладнішою задачею для виробництва, оскільки кольорова гама існуючих пігментних концентратів достатньо обмежена, що обумовлено складністю їх отримання та хімічною основою. Для отримання пігментів як зв'язуючу речовину використовують казеїн, через що казеїновий пігментний концентрат має ряд недоліків, а саме, низьку агрегативну стійкість при зберіганні, невисоку покривну здатність, загниває без антисептика, характеризується вузькою гамою кольорів [1].

Інноваційні розробки гібридних пігментів на основі дисперсій монтморилоніту дозволили розширити асортимент пігментних концентратів для оздоблення шкір з високою криючою здатністю та стійкістю у часі [2]. Застосування гібридних пігментів на основі монтморилоніту розкриває широкі перспективи у створенні екологічно орієнтованих матеріалів для оздоблення шкір, отримання яких характеризується простотою отримання та стабільністю їх властивостей у часі.

### Аналіз останніх досліджень

Покривне оздоблення шкір забезпечує комплекс хімічних, фізико-хімічних та механічних впливів на шкіру [3]. Покриття для оздоблення шкір повинно забезпечувати високі естетичні та експлуатаційні властивості лицьової поверхні шкір. Під експлуатаційними властивостями покриття прийнято вважати

стійкість до тертя та багаторазових згинів, адгезію, морозостійкість, світлостійкість та гігієнічні властивості шкір. Необхідний рівень стійкості покриття до зовнішніх впливів залежить від фізико-механічних властивостей полімерних плівок. При формуванні складу покривних композицій необхідно враховувати не тільки плівкоутворювальну здатність полімерної матриці, але й еластичність та міцність покривної плівки, стійкість до дії води та криючу здатність. Останнє, в основному, залежить від пігментної складової, вміст якої особливо впливає на структуру полімерного плівкоутворювача та фізико-механічні властивості покриття на його основі.

Аналіз останніх досліджень виявив, що мінеральна складова здатна впливати на зміну фізико-механічних властивостей полімерної матриці. При цьому встановлено підвищення модуля еластичності, межі міцності та зниження показника видовження полімерно-мінерального покриття для оздоблення шкір, виявлено ефект структурування полімеру та підвищення фізико-механічних властивостей покриття для шкіри в результаті термостатування [4].

Встановлено структуруючий вплив на акрилові та поліуретанові полімери як результат введення дисперсій монтморилоніту в натрієвій формі, що забезпечує утворення додаткових хімічних зв'язків між поверхневими гідроксильними групами мінералу та карбоксильними групами акрилату [5]. Встановлені взаємодії забезпечують зміну функціональних властивостей полімеру [6-8] та обумовлюють створення нанокompозитів для покривного оздоблення шкір. Однак зазначені композити не забезпечують зафарбовування лицьової поверхні шкіри, що все рівно потребує додавання пігментного концентрату.

Використання нанокompозитів на основі монтморилоніту змінює реологічну поведінку полімерних систем. Характерним стає домінуюча еластична поведінка та висока фізична стійкість системи «полімер-нанокompозит». Для таких складів характерний гідрофобний ефект, який забезпечується присутністю монтморилоніту в складі полімерного покриття [6-10]. Отримані нанокompозитні полімерні емульсії проявляють хорошу здатність до плівкоутворення та підвищують еластичність покриття під час оздоблення лицьової поверхні натуральних шкір для одягу [6, 7, 9, 10, 11]. Автори відмічають, що шляхом використання монтморилоніту вирішується проблема отримання стійких нанокompозитних полімер-органічно-модифікованих дисперсій монтморилоніту з латексами. Отриманий нанокompозитний латекс є агрегативно стабільним і сприяє формуванню тонкого покриття через нанорозмірні частинки мінералу [10]. Нанокompозитні латекси є електростатично стійкі та надають підвищену температурну стійкість покриттю [11].

Оскільки склад покривної композиції та особливо вміст у ній мінеральної складової впливають на властивості покривної плівки, важливим завданням є дослідження впливу багатокomпонентних гібридних пігментів на властивості та формування полімерно-мінерального покриття для шкір.

Отже, **метою роботи** є дослідження впливу гібридних пігментів на основі монтморилоніту на формування полімерно-мінерального покриття для оздоблення шкір.

### Методи і матеріали дослідження

Гібридні пігменти (ГП) отримували на основі монтморилоніту як складового мінералу бентонітової глини (Дашуківське родовище, Черкаська область, Україна). Вміст монтморилоніту становив  $85 \pm 3$  %.

Гібридні пігменти готували шляхом послідовної модифікації нативного монтморилоніту карбонатом натрію та основним сульфатом хрому (III) з наступною адсорбцією аніонних барвників на катіонній поверхні частинок мінералу [12]. Приготування ГП проводили шляхом перемішування складових з використанням механічної мішалки протягом 30-40 хв за температури 40-45 °C до отримання стійких у часі дисперсій у вигляді пігментних концентратів насиченого глибокого кольору. РН отриманих гібридних пігментів – 5,8-6,0.

Оздоблення шкір здійснювали полімерно-мінеральними композиціями, які готували шляхом змішування ГП з плівкоутворювачем та наносили на поверхню шкір у вигляді покривних фарб. В якості плівкоутворювача було використано готову суміш різноструктурних плівкоутворювачів, призначену для оздоблення лицьових та шліфованих шкір Compound VR (Smit & Zoon). Приготування покривних фарб виконували шляхом змішування ГП з плівкоутворювачем Compound VR у співвідношенні, мас. ч. 1 : 5. Додатково в склад покривних фарб вводили воскову емульсію у кількості 10,0 % від маси плівкоутворювача (варіант 1), казеїн з витратою 10 % від маси мінералу в складі ГП (варіант 2) та казеїн з витратою 20 % від маси мінералу в складі ГП (варіант 3).

Для порівняльного аналізу якості покриття шкір з полімерно-мінеральним оздоблення було використано поліакрилат SMITCRYL 2100 (Smit & Zoon) – високоеластичний, гнучкий, з високою криючою здатністю, покриття з якого характеризується стійкістю до дії води та морозостійкістю, та поліуретан PUR 3365 FF (Smit & Zoon) – високоміцний, стійкий до фізико-механічних навантажень, тертя та зношування.

Ефективність використання ГП для формування полімерно-мінерального оздоблення оцінювали за показниками якості покриття на шкірі згідно традиційних методів [13].

### Виклад основного матеріалу

Відомо, що шляхом введення мінеральної складової можуть бути отримані полімерно-мінеральні композиції різних видів [14]. В першу чергу, може бути отриманий традиційних мікрокомполит, в якому частинки наповнювача зберігають свої вихідні розміри (декілька мікрометрів). Такий матеріал отримують,

коли молекули полімеру не проникають в міжшаровий простір шаруватого мінералу. Другий варіант – це композит з інтеркаліативною структурою. В даному випадку молекули полімеру входять в міжшаровий простір шаруватого мінералу. При цьому в останнього збільшується міжшарувата відстань, але зберігається впорядкована структура. І третій варіант – ексfolіативна структура, з повним розшаруванням частинок силікату на окремі наношари, які дисперговані в матриці полімеру. Однак залежно від умов отримання полімерної матриці та від особливостей самого мінералу можуть утворюватись змішані полімерно-мінеральні композиції, які вміщують різні типи композитів в певних пропорціях [14].

При введенні монтморилоніту в полімерну композицію в мінімальній кількості, в першу чергу, відбуватиметься отримання мікрокомпозитів та починається процес входження молекул полімеру в міжшаровий простір монтморилоніту. При цьому полімерна дисперсія втрачає свою структурну стабільність через появу мінеральних центрів, нерівномірно розташованих в дисперсії, які адсорбують на своїй поверхні активні центри полімеру. Збільшення вмісту мінеральної складової сприяє утворенню змішаного типу композиту з ймовірною присутністю ексfolіативних структур.

Зазначене дозволяє припустити, що за рахунок високорозвиненої сорбційної поверхні наночастинки модифікованого монтморилоніту в складі ГП адсорбують полімер, стабілізують його структуру та підвищують колоїдну стійкість композиції. Механізм структурування полімерної матриці гібридним пігментом на основі монтморилоніту в складі ГП представлено на рис. 1. Такі полімерно-мінеральні композити можуть бути ефективними для формування оздоблювального покриття еластичних шкір різного цільового призначення.

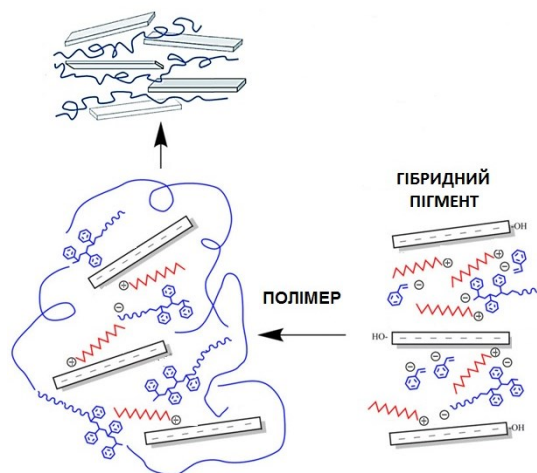


Рис 1. Механізм структурування полімерної матриці гібридним пігментом на основі монтморилоніту

Враховуючи результати досліджень [4], згідно яких витрати монтморилоніту на рівні 1,5-2,0 % (в перерахунку на масу монтморилоніту від сухого залишку полімеру) є оптимальними для отримання високих фізико-механічних властивостей полімерних плівок для оздоблення шкір, досліджували вплив ГП на основі монтморилоніту для створення полімерно-мінеральної композиції для покриття шкір.

В межах досліджень запропоновано варіанти покривних композицій для оздоблення шкір з використанням ГП на основі монтморилоніту та плівкоутворювача Comround VR та оцінено хімічний склад покривних фарб (табл. 1).

Таблиця 1

**Показники хімічного складу покривних фарб для оздоблення**

Варіант покривної фарби	Колір покривної фарби	Вміст сухих залишків, %	В'язкість покривної фарби, сек	Густина, г/см <sup>3</sup>
1	Темно-зелений	20,63	67,3	1,030-1,035
2		21,12	66,0	
3		20,38	64,0	
1	Чорний	20,95	48,3	
2		21,07	42,7	
3		20,37	40,7	
1	Синій	21,08	47,5	
2		20,99	38,0	
3		20,42	37,0	

Отримані результати хімічного складу покривних фарб вказують на високий рівень в'язкості. Для покривних фарб темно-зеленого кольору в'язкість становить 67,3-64,0 с, для покривних чорних фарб – 48,3-40,7 с, для фарб синього кольору – 47,5-37,0 с. Висока в'язкість покривних фарб темно-зеленого кольору, ймовірно, зв'язана з характером взаємодії частинок монтморилоніту з аніонними барвником та з асоціативністю самого барвника. В цілому, вміст сухих залишків та густина покривних фарб майже

ідентичні в межах різних варіантів.

Використання отриманих ГП у складі покривної композиції сприяє отриманню шкір з високими органолептичними характеристиками лицьової поверхні, а саме, об'ємність мереживки, зернистість, приємний гриф.

Отримання полімерно-мінеральних композицій на основі плівкоутворювача Compound VR та ГП в кількості 1,5-2,0 % в перерахунку на сухий мінерал та від маси сухого залишку полімеру підвищує фізико-механічні властивості покривних плівок, пластифікує та структурує полімерну композицію [2, 4].

Фізико-механічні показники покривних плівок на основі полімерно-мінеральних композицій представлені на рис. 2-4. Результати досліджень фізико-механічних властивостей плівок покривних фарб вказують, що введення в склад казеїну (варіант 3) зменшує міцність покривних плівок для темно-зеленої плівки на 16,6 % (рис. 2), для чорної – на 25 % (рис. 3), для синьої на 3,8 % (рис. 4).

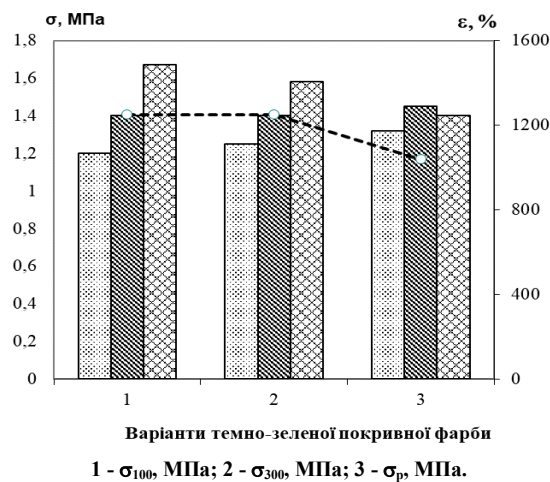


Рис. 2. Фізико-механічні властивості плівок темно-зеленої покривної фарби

При цьому відносне видовження при розриві знижується для плівки темно-зеленого кольору на 16,8 % (рис. 2), для чорної – 17,3 % (рис. 3), для синьої – 12,1 % (рис. 4). Це може бути пояснено тим, що присутність казеїну в покривних фарбах підвищує твердість плівки, що викликає зміни фізико-механічних властивостей покривних плівок. Часткова присутність казеїну (варіант 2) для темно-зеленої покривної плівки практично не впливає на фізико-механічні властивості.

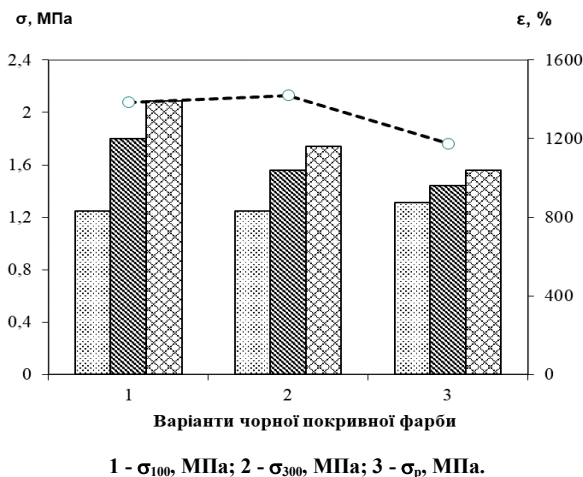
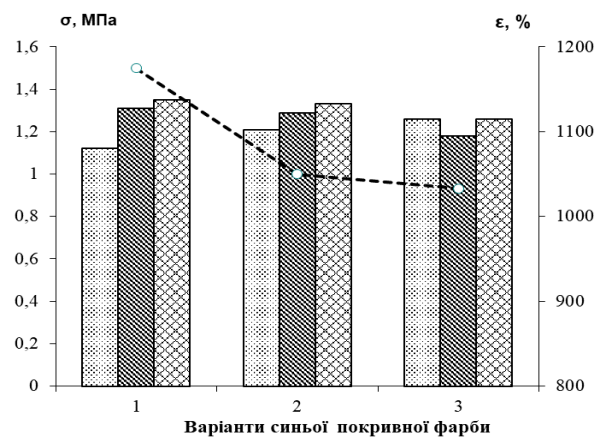


Рис. 3. Фізико-механічні властивості плівок чорної покривної фарби

Для чорної покривної плівки при незначному зростанні відносного видовження на 2,5 % зменшується міцність плівки на 16,7 % (рис. 3). У випадку синьої покривної плівки (за варіантом 2) значне зменшення межі міцності на 11 % супроводжується збереженням відносного видовження на рівні 1050 МПа (рис. 4).

Слід відмітити, що за експлуатаційними показниками покривні фарби різних кольорів можуть бути використанні без додавання казеїну або інших структуруючих агентів та дозволять створити еластичне покриття на шкірах.



1 -  $\sigma_{100}$ , МПа; 2 -  $\sigma_{300}$ , МПа; 3 -  $\sigma_p$ , МПа.

Рис. 4. Фізико-механічні властивості плівок синьої покривної фарби

Порівняльний аналіз фізико-механічних показників покривних плівок на основі різнофункціональних полімерів акрилового – SMITCRYL2100, поліуретанового – PUR 3365 FF та Compound VR – суміш акрилового та поліуретанового плівкоутворювачів (рис. 5) дозволяє обґрунтувати вибір типу плівкоутворювача з урахуванням впливу пігментного концентрату на основі монтморилоніту.

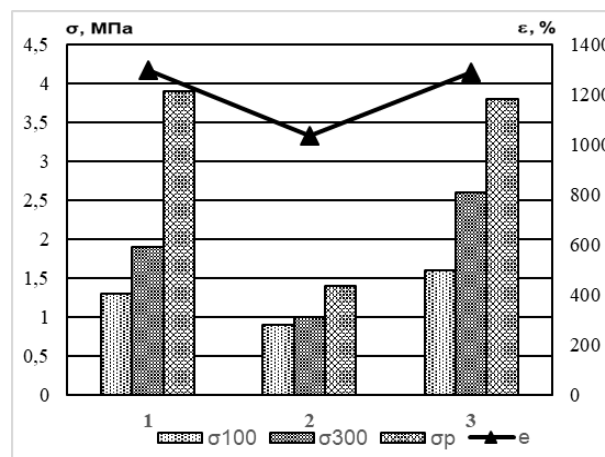


Рис. 5. Фізико-механічні властивості плівок різнофункціональних полімерів  
1 – SMITCRYL2100; 2 – PUR 3365 FF; 3 – Compound VR

Згідно представлених на рис. 5 результатів, встановлено, що поліуретановий плівкоутворювач PUR 3365 FF характеризується значною жорсткістю порівняно з акриловим плівкоутворювачем SMITCRYL2100 та сумішшю акрилового та поліуретанового плівкоутворювачів Compound VR. Це підтверджено рівнем показників міцності ( $\sigma$  при видовженні 100 % й 300 % та також при розриві) та показником відносного видовження  $\epsilon$ . Плівкоутворювач SMITCRYL2100 формує м'яку та високоеластичну плівку з значним рівнем межі міцності при розриві 3,9 МПа. Вищі показники міцності при видовження 100 % та 300 % характерні для плівок, утворених з використанням плівкоутворювача Compound VR. Даний плівкоутворювач формує плівки, які мають більш рівномірний «відгук» на видовження під час напруження. До того ж, введення ГП на основі монтморилоніту підвищує рівень міцності плівок при видовженні знижує рівень показників міцності та видовження 100 % та 300 %, та знижує рівень міцності при розриві. При цьому рівень еластичності падає несуттєво – з 1280 % до 1175 % в разі формування покривних плівок чорного кольору (рис. 3). Тобто, плівки, отримані на основі Compound VR та ГП здатні формувати оздоблювальне покриття на шкірі, яке буде витримувати навантаження та мати достатній рівень еластичності. Відповідно шкіри не будуть характеризуватись жорсткістю лицьової поверхні і матимуть хороші органолептичні властивості.

За показниками якості покриття встановлено, що шкіри всіх варіантів оздоблення відповідають вимогам стандарту [15].

Встановлено високий рівень адгезії полімерно-мінерального покриття до мокрої та сухої шкіри, стійкість до мокрої тертя та до багаторазових вигинів, високу криючу здатність при мінімальних витратах покривної фарби (табл. 2).

Характерною особливістю покриття на основі полімерно-мінеральної композиції є висока криюча здатність. При мінімальних витратах покривної фарби на рівні 32,9-38,9 г/м<sup>2</sup> досягнуто повного рівномірного забарвлення поверхні шкіри. Висока в'язкість покривних фарб темно-зеленого кольору за варіантом 1 дещо впливає на рівномірність забарвлення, але знаходиться в допустимих межах. Покриття темно-зеленого кольору характеризуються адгезією до сухої шкіри на рівні 464-424 Н/м, до мокрої – 186-147

Н/м та високою стійкістю до мокрого тертя на рівні 1450-1200 обертів, що залежить від характеру взаємодії частинок монтморилоніту з аніонним барвником в складі ГП та від рівня структурування та пластифікації полімерної композиції. Формування чорного покриття на шкірі характеризується вищими значеннями адгезії до сухої та мокрої шкіри на рівні 721-672 Н/м та 205-175 Н/м, але низькою стійкістю до мокрого тертя (250-300 обертів), однак, в цілому, задовольняє вимоги стандартів. Покриття синього кольору на шкірі характеризується зменшеним рівнем адгезії, але достатньою стійкістю до мокрого тертя.

Таблиця 2

**Властивості полімерно-мінерального покриття для оздоблення шкір**

Показник	Варіанти покриття								
	Темно-зелене			Чорне			Синє		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Адгезія покриття до шкіри, Н/м:									
– сухої	464	463	424	687	721	672	212	207	211
– мокрої	147	157	186	205	185	175	137	135	172
Стійкість покриття :									
– до багаторазового вигину, бали	5 1300	5 1450	4 1200	5 300	4 280	4 250	5 550	5 460	4 440
– до мокрого тертя, оберти									
Криюча здатність, г/м <sup>2</sup>	33,9	32,3	32,9	33,7	35,6	37,6	32,9	38,9	34,8
Рівномірність забарвлення, бали	4	5	5	5	5	5	5	5	5

В цілому, застосування монтморилоніту в складі ГП дозволяє коригувати фізико-механічні властивості полімерно-мінеральної композиції для оздоблення шкір, забезпечує підвищення міцності та урегулює рівень еластичності покривної плівки, що забезпечує підвищення експлуатаційних властивостей покриття шкіри. Загалом отримується високоякісне покриття на шкірі з хорошими експлуатаційними показниками при зменшених витратах покривної фарби при оздобленні шкір.

**Висновки**

1. Досліджено фізико-механічні властивості полімерних плівок в результаті застосування гібридних пігментів на основі монтморилоніту для формування полімерно-мінерального покриття шкір.
2. Представлено механізм структурування полімерної матриці гібридним пігментом на основі монтморилоніту, згідно якого високорозвинена сорбційна поверхня модифікованого монтморилоніту сприяє адсорбції полімеру, стабілізує його структуру та підвищує колоїдну стійкість покривної композиції.
3. Показано, що застосування гібридних пігментів на основі монтморилоніту підвищує фізико-механічні властивості покривних плівок, пластифікує та структурує полімерну композицію, сприяє отриманню шкір з високими органолептичними характеристиками лицьової поверхні, а саме, об'ємність мереживки, зернистість, приємний гриф.
4. Встановлено високий рівень адгезії полімерно-мінерального покриття до мокрої та сухої шкіри, стійкість до мокрого тертя та до багаторазових вигинів, високу криючу здатність при мінімальних витратах покривної фарби.

**Література**

1. Osgood m. J. Pigments in modern leather finishing. *J. Soc. Leather. Technol. Chem.* 1990. Vol. 74, № 1. P. 1-6.
2. Бондарєва А. О., Мокроусова О. Р., Охмат О. А. Розробка та використання гібридних пігментів у покривному оздобленні шкір. *Вісник ХНУ. Технічні науки.* 2020. № 2 (283). С. 26–35.
3. Касьян Е. С. Фізико-хімія полімерних плівкоутворювачів для оздоблення шкіри: навч. посіб. Київ : Освіта України, 2019. 178 с.
4. Бондарєва А. О., Мокроусова О. Р. Формування фізико-механічних властивостей полімерно-мінерального покриття для оздоблення шкір. *Міжнародний науково-практичний журнал «Товари і ринки».* 2020. № 2. С. 97–109.
5. Отрошко В. А., Мокроусова О. Р., Мережко Н. В. Взаємодія колагену дерми з мінеральними та полімерними сполуками. *Технологічний аудит та резерви виробництва.* 2016. № 2/4(28). С. 48-54.
6. Onur Yılmaz, Catalina N. Cheaburu, Gürbüz Gülümser, Cornelia Vasile. Rheological behaviour of acrylate/montmorillonite nanocomposite latexes and their application in leather finishing as binders. *Progress in Organic Coatings.* 2011. Vol. 70, Issue 1. P. 52–58.
7. Zhang Xiaolei, Liu Liu Qinglan, Zhang Weiping. Nanocomposites of Acrylate-Organosilicon Resin/Layered Silicate for Leather Finishing. *J. Soc. Leather. Technol. Chem.* 2006. № 6. P. 188–193.
8. Ma Jianzhong, Zhang Zhijie, Liu Lingyun et al. Application of Acrylic Coating Agent Modified by Nano

SiO<sub>2</sub>. *J. Soc. Leather. Technol. Chem.* 2006. № 5. P. 250–254.

9. Onur Yılmaz, Aurica P. Chiriac, Catalina Natalia Cheaburu, Loredana E. Nita, Gürbüz Gülümser, Donatella Duraccio, Sossio Cimmino, Cornelia Vasile. Nanocomposites based on montmorillonite/acrylic copolymer for aqueous coating of soft surfaces. *Solid State Phenomena*. 2009. Vol.151. P. 129–134.

10. Onur Yılmaz. A hybrid polyacrylate/OMMT nanocomposite latex: Synthesis, characterization and its application as a coating binder. *Progress in Organic Coatings*. 2014. Vol. 77, Issue 1. P. 110–117.

11. Yılmaz O., Cheaburu C.N., Durraccio D., Gulumser G., Vasile C. Preparation of stable acrylate/montmorillonite nanocomposite latex via in situ batch emulsion polymerization: Effect of clay types. *Applied Clay Science*. 2010. Vol. 49, Issue 3. P. 288–297.

12. Патент на корисну модель UA № 144635 Україна МПК С14С 3/06. Спосіб отримання пігментного концентрату для оздоблення шкір / Винахідники Бондарєва А. О., Мокроусова О. Р., Охмат О. А.; заявник і патентовласник: КНТЕУ. № 202003432; заявл. 05.06.2020. опубл. 12.10.2020. «Промислова власність», бюл. № 19/2020.

13. Данилкович А. Г. Практикум з хімії та технології шкіри та хутра: навч. посібник, К. : Фенікс, 2006. 338 с.

14. Мікульонюк І. О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. 324 с.

15. ДСТУ 2726-94. Шкіра для верху взуття. Технічні умови. [Чинний від 1996-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 1995. 14 с.

#### References

1. Osgood m. J. Pigments in modern leather finishing. *J. Soc. Leather. Technol. Chem.* 1990. Vol. 74, № 1. P. 1-6.
2. Bondarieva A. O., Mokrousova O. R., Okhmat O. A. Rozrobka ta vykorystannia hibrydnykh pihmentiv u pokrynomu ozdoblenni shkir. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2020. № 2 (283). S. 26–35.
3. Kasian E. Ye. Fizyko-khimiia polimernykh plivkoutvoriuvachiv dlia ozdoblennia shkiry: navch. posib. Kyiv : Osvita Ukrainy, 2019. 178 s.
4. Bondarieva A. O., Mokrousova O. R. Formuvannia fizyko-mekhanichnykh vlastyvoستي polimerno-mineralnoho pokryttia dlia ozdoblennia shkir. *Mizhnarodnyi naukovo-praktychnyi zhurnal «Tovary i rynku»*. 2020. № 2. S. 97–109.
5. Otroshko V. A., Mokrousova O. R., Merezhko N. V. Vzaiemodiia kolahenu dermy z mineralnymy ta polimernymy spolukamy. *Tekhnolohichni audyt ta rezervy vyrobnytstva*. 2016. № 2/4(28). S. 48-54.
6. Onur Yılmaz, Catalina N. Cheaburu, Gürbüz Gülümser, Cornelia Vasile. Rheological behaviour of acrylate/montmorillonite nanocomposite latexes and their application in leather finishing as binders. *Progress in Organic Coatings*. 2011. Vol. 70, Issue 1. P. 52–58.
7. Zhang Xiaolei, Liu Liu Qinglan, Zhang Weiping. Nanocomposites of Acrylate-Organosilicon Resin/Layered Silicate for Leather Finishing. *J. Soc. Leather. Technol. Chem.* 2006. № 6. P. 188–193.
8. Ma Jianzhong, Zhang Zhijie, Liu Lingyun et al. Application of Acrylic Coating Agent Modified by Nano SiO<sub>2</sub>. *J. Soc. Leather. Technol. Chem.* 2006. № 5. P. 250–254.
9. Onur Yılmaz, Aurica P. Chiriac, Catalina Natalia Cheaburu, Loredana E. Nita, Gürbüz Gülümser, Donatella Duraccio, Sossio Cimmino, Cornelia Vasile. Nanocomposites based on montmorillonite/acrylic copolymer for aqueous coating of soft surfaces. *Solid State Phenomena*. 2009. Vol.151. P. 129–134.
10. Onur Yılmaz. A hybrid polyacrylate/OMMT nanocomposite latex: Synthesis, characterization and its application as a coating binder. *Progress in Organic Coatings*. 2014. Vol. 77, Issue 1. P. 110–117.
11. Yılmaz O., Cheaburu C.N., Durraccio D., Gulumser G., Vasile C. Preparation of stable acrylate/montmorillonite nanocomposite latex via in situ batch emulsion polymerization: Effect of clay types. *Applied Clay Science*. 2010. Vol. 49, Issue 3. P. 288–297.
12. Patent na korysnu model UA № 144635 Ukraina MPK S14S 3/06. Sposib otrymannia pihmentnoho konsentratu dlia ozdoblennia shkir / Vynakhidnyky Bondarieva A. O., Mokrousova O. R., Okhmat O. A.; zaiavnyk i patentovlasnyk: KNTEU. № 202003432; zaiavl. 05.06.2020. opubl. 12.10.2020. «Promyslova vlasnist», biul. № 19/2020.
13. Danylkovych A. H. Praktykum z khimii ta tekhnolohii shkiry ta khutra: navch. posibnyk, K. : Feniks, 2006. 338 s.
14. Mikulonok I. O. Tekhnolohichni osnovy pereroblennia polimernykh materialiv : navch. posib. Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, Vyd-vo «Politekhnika», 2017. 324 s.
15. DSTU 2726-94. Shkira dlia verkhu vzuttia. Tekhnichni umovy. [Chynnyi vid 1996-01-01]. Vyd. ofits. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 1995. 14 s.

Микола ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ  
Вінницький національний технічний університет  
<https://orcid.org/0000-0002-6586-2563>  
e-mail: [mvasylkivskyi@gmail.com](mailto:mvasylkivskyi@gmail.com)  
Ганна ВАРГАТЮК  
Вінницький національний технічний університет  
e-mail: [annaantonuik@gmail.com](mailto:annaantonuik@gmail.com)  
Ольга БОЛДИРЕВА  
Вінницький національний технічний університет  
e-mail: [rtt13bpoldenko@gmail.com](mailto:rtt13bpoldenko@gmail.com)

## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ МНОЖИННОГО ДОСТУПУ

*Досліджено методи множинного доступу із мультиплексуванням ресурсів та розглянуто переваги і недоліки ортогонального множинного доступу (ОМА) і неортогонального множинного доступу (НОМА). Також виконано порівняльний аналіз схем передачі даних в радіомережі із врахуванням планування ресурсів, зокрема: передачі зі службовою інформацією та передачі без службової інформації. Запропоновано структуру приймача висхідного каналу NOMA на основі сигналів OFDM.*

*Досліджено особливості забезпечення надмасивного підключення в межах обмежених радіоресурсів на основі безгрантового доступу за допомогою NOMA. При цьому, було розглянуто способи вирішення проблем, що властиві поточним застосуванням GF-передачі та NOMA при реалізації надмасивного підключення до мережі доступу на основі технології 6G.*

*Визначено перспективи впровадження передавача із штучним інтелектом на основі схеми передачі множинного доступу з низькою вартістю, низьким PAPR, малою затримкою, високою надійністю та широкими можливостями підключення. А також розглянуто особливості проектування приймача зі штучним інтелектом при застосуванні методів штучного інтелекту / машинного навчання, які можуть відіграти роль у полегшенні проектування MUD для NOMA.*

*Ключові слова: множинний доступ, технологія 6G, штучний інтелект, міжканальна завада, міжсимвольна завада, обладнання користувача, канал передавання даних.*

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

## INTELLIGENT OPTIMIZATION OF MULTIPLE ACCESS INFOCOMMUNICATION NETWORKS

*The methods of multiple access with multiplexing of resources are studied and the advantages and disadvantages of orthogonal multiple access (OMA) and non-orthogonal multiple access (NOMA) are considered. A comparative analysis of data transmission schemes in the radio network was also performed, taking into account resource planning, in particular: transmission with service information and transmission without service information. The structure of the NOMA uplink receiver based on OFDM signals is proposed.*

*The peculiarities of providing supermassive connection within limited radio resources on the basis of grantless access using NOMA have been studied. At the same time, methods of solving the problems inherent in the current application of GF-transmission and NOMA in the implementation of supermassive connection to the access network based on 6G technology were considered.*

*Prospects for the introduction of an artificial intelligence transmitter based on a multiple access transmission scheme with low cost, low PAPR, low delay, high reliability and wide connectivity are determined. And features of artificial intelligence receiver design using artificial intelligence / machine learning techniques that can play a role in facilitating MUD design for NOMA are also considered.*

*Keywords: multiple access, 6G technology, artificial intelligence, inter-channel interference, inter-symbol interference, user equipment, data transmission channel.*

### Постановка проблеми

У бездротовому зв'язку дані передаються між пристроями за допомогою радіоресурсів. Основними фізичними радіоресурсами є час та частота. Проблема множинного доступу (МА) виникає при необхідності обслуговування декількох користувачів, використовуючи ресурси з обмеженими ступенями свободи [1]. Схеми МА не може складатися лише з одного модуля. Натомість вона зазвичай включає кілька модулів обробки сигналів на фізичних каналах, таких як кодування, модуляція, попереднє кодування, картування ресурсів, керування потужністю та форми сигналів. Пропускна здатність одного наскрізного каналу передавання з топологією «точка-точка» є максимальною. Особливість технології множинного доступу полягає в тому, що деякі модулі можуть бути спроектовані спеціально для спільної роботи кількох користувачів або так, щоб максимізувати пропускню здатність системи в цілому. Це особливо актуально, при великій кількості користувачів із одночасно доступними всіма ступенями свободи [2].

### Аналіз останніх джерел

Обслуговування в мережах 6G різноманітних клієнтів із жорсткими та екстремальними вимогами спричиняє необхідність у масштабованій структурі МА, із врахуванням наступних вимог [3]. Для забезпечення можливості роботи з усіма типами розмірів пакетів, які можуть змінюватись від величезних



голограм в службах XR до кількох байтів оновлень статусу промислових датчиків або датчиків моніторингу стану здоров'я механізм МА має бути адекватно масштабованим. Різні розміри пакетів відповідають різній тривалості передачі та різним рівням диверсифікації. Оскільки, до однієї і тієї ж мережі матимуть доступ різні категорії пристроїв, від високоінтелектуальних автомобілів до роботів та надзвичайно недорогих датчиків, які характеризуються значними відмінностями у можливостях обробки сигналів, часової та частотної синхронізації, функціональних параметрів обладнання та засобів живлення можуть пред'являти дуже різні вимоги до МА. Враховуючи, що за 10 років кількість підключень пристроїв приватного, спільного та промислового застосування збільшиться вдесятеро, ця перспектива змушує враховувати потребу у надмасивних підключеннях при проектуванні множинного доступу в мережах 6G [4]. Різноманітність послуг також призводить до різноманіття типів трафіку, що відображається в різних схемах надходження трафіку, а також у різноманітних вимогах до швидкості передачі даних, затримки та надійності. Тому, схема МА в мережі 6G має бути досить масштабованою, щоб ефективно обслуговувати користувачів з довгими пакетами, періодичними та спорадичними моделями трафіку. Ефективне мультиплексування користувачів із різними крайніми вимогами до продуктивності – ще одна проблема, яка досі повністю не вирішена у 5G навіть із використанням трафіку eMBB, URLLC та mMTC. Спроба перекласти все навантаження на MAC планування не буде досить ефективним рішенням, тому необхідно розглянути міжрівневі схеми [1]. Мережа 6G забезпечуватиме тривимірне покриття з NAPS, БПЛА та VLEO як частину RAN. Розширення потенційних сценаріїв розгортання поставить нові завдання проектування 6G МА. Однією з типових проблем для інтегрованого неземного доступу є потенційно велика неузгодженість у часі та обмежений бюджет каналу через великі відстані поширення. Додатковим новим напрямком для дослідження є механізми МА, що включають спільну передачу кількох рівнів 3D RAN [2].

Методи МА при мультиплексуванні ресурсів можна поділити на дві категорії: ортогональний множинний доступ (OMA) і неортогональний множинний доступ (NOMA). Крім того, існують дві схеми, пов'язані з процедурами передачі із врахуванням планування ресурсів: передачі зі службовою інформацією (GB) та передачі без службової інформації або безгрантової передачі (GF). В результаті, обидва методи МА та схеми передачі застосовуються як для передачі даних типу GB, так і GF.

**Метою роботи є:** підвищення ефективності інфокомунікаційних радіомереж за рахунок оптимальної комбінації технологій множинного доступу та ефективного використанні ресурсів систем передавання даних.

### Виклад основного матеріалу

У попередніх поколіннях мереж ортогональний доступ був домінуючою схемою. Термінологія "ортогональний" вказує на існування незалежного ступіню свободи, що належить кожному користувачеві, принаймні в одній з областей, включаючи частоту, час, код та простір. При цьому, на передачу окремого користувача не впливають одночасні передачі інших користувачів. Виходячи з ресурсів, які поділяють, щоб розрізнити множину користувачів, можна виділити наступні схеми OMA: множинний доступ із частотним поділом (FDMA), множинний доступ із часовим поділом (TDMA), множинний доступ із кодовим поділом (CDMA), множинний доступ із просторовим поділом каналів (SDMA) та множинний доступ з ортогональним частотним поділом каналів (OFDMA) [2].

Для підключення декількох користувачів до мережі доступу система FDMA виділяє неперекривні смуги частот кожному користувачу або потоку даних у форматі виділених каналів. Для повного усунення завад від сусідніх користувачів передбачено використання захисних смуг, що знижує ефективність використання спектра системи передавання загалом. Таким чином, FDMA недостатньо ефективний і не дозволяє значній кількості користувачів отримати доступ до мережі. Система TDMA ділить часову область на безліч часових інтервалів (тайм-слотів). Передавач використовує дані слоти для передачі даних різним користувачам. Біти корисного навантаження кожного користувача поділяються за часом і відправляються пакетами в доступні відповідні часові інтервали. Таким чином, у мережі можна розмістити лише обмежену кількість користувачів або потоків даних. У системі CDMA часові та частотні ресурси можуть одночасно використовуватися кількома користувачами або потоками даних. За допомогою кодів розширення користувачі або потоки даних можна поділити на ортогональні або напівортогональні (також відомі як майже ортогональні). Дуже довгі послідовності необхідні для досягнення хорошого вирашу при обробці, а ортогональність потрібна для розміщення великої кількості користувачів. При цьому, така система передавання характеризується недостатньою гнучкістю для роботи з великою смугою пропускання та масивним MIMO. Стандарт OFDMA розроблено на основі сигналів OFDM. Він забезпечує жорстке та ортогональне розташування піднесучих у частотній області із їх рознесенням в часі, що дорівнює зворотній тривалості символу. У системі OFDMA часова та частотна площа поділяються на двовимірний розподіл. Мінімальну одиницю розподілу називають ресурсним елементом (RE), що складається з однієї піднесучої (або тону) в частотній області та одного символу в часовій області. Кожен RE передає модульований символ, що належить одному користувачеві або потоку даних. Таким чином досягається максимальна гнучкість ресурсів, які можна легко поєднувати з такими функціями, як масивний MIMO. Однак стандарт висуває високі вимоги до часової та частотної синхронізації, обслуговування якої може бути занадто дорогим для дуже дешевих та малопотужних телекомунікаційних і радіотехнічних пристроїв. З розвитком сучасних технологій MIMO з'явився стандарт SDMA –ефективний варіант для використання з масивними

антенними ґратами [3]. У системі SDMA аналоговий чи цифровий формувач променю може створювати кілька сфокусованих просторових променів для виділених запланованих користувачів. У поєднанні з ідеальною інформацією про стан каналу промені для запланованих користувачів можуть бути майже ортогональними один одному, як це потрібно для мінімізації завад між користувачами. Однак ортогональністю SDMA багато в чому залежить від точності інформації про канал. На жаль, через зростаючу кількість користувачів і спорадичність трафіку її стає важко відстежувати.

Хоча, для покращення пропускної спроможності системи, зручності користувачів та збільшення кількості підключень можна використовувати різні схеми на основі ОМА, однак все ще залишаються обмеження та прогалини, які необхідно усунути, для задоволення різноманітних та дуже жорстких вимог до послуг у мережах 6G. Зокрема, можна виділити такі проблеми: обмеження кількості користувачів, що одночасно можуть обслуговуватися: кількість користувачів або потоків даних строго обмежена кількістю ортогональних каналів у системі ОМА; високі накладні витрати на службові дані та ресурси для гарантії ортогональності: ортогональність у системі ОМА зазвичай гарантується наданням ресурсів, що надсилаються базовими станціями користувачам до того, як може розпочатися будь-яка передача в будь-якому напрямку, включаючи висхідні, низхідні або прямі лінії передавання. При збільшенні кількості користувачів збільшуються пропорційно накладні витрати на обробку сигналів, зменшуючи пропускну здатність системи загалом. Більше того, для певних послуг IoT динамічна обробка грантів може або вводити неприпустиму затримку, або займати більше 50% корисного навантаження під час кожної передачі. Обидва випадки є неприйнятними з точки зору ефективності використання спектра та енергоефективності. Ортогональність може бути гарантована за допомогою попередньо налаштованих ресурсів, але накладні витрати на ресурси все одно залишаються більшими, особливо коли трафік поводить непередбачувано та спорадично; сильна залежність від точного знання інформації про канал передавання при використанні попереднього кодування зі зворотним зв'язком, оскільки у реальних сценаріях розгортання продуктивність розрахованої на багато користувачів системи МІМО зі зворотним зв'язком (MU-МІМО) і координованої багатоточкової передачі/прийому (CoMP) все ще далека від теоретичних границь, особливо для користувачів високошвидкісного мобільного зв'язку. Тому, при порушенні мережі доступу, отримання точної інформації неможливе, і в результаті погіршується якість роботи систем MU-МІМО або CoMP із зворотним зв'язком. Це може виникнути у випадках старішого каналу, затримки зворотного зв'язку або виражених міжсотових завадах, які зазвичай трапляються на практиці [4]. Для подолання обмеження ОМА, було розроблено технологію неортогонального множинного доступу (NOMA), яка є стійкою до конфлікту ресурсів в ортогональних каналах. З точки зору теорії мережевої інформації [3, 4] як для висхідного каналу MA [5], так і для низхідного ширококомовного каналу [6] сукупна пропускна здатність для декількох користувачів NOMA може бути більшою порівняно з паралельною передачею для одного і того ж набору користувачів на основі ортогонально розділених ресурсів. Доведено, що такі методи, як послідовне придушення завад [5] та попереднє кодування Коста [6] на базових станціях, дозволяють досягти оптимальних значень пропускної спроможності для MA каналу і каналу BC відповідно. Більш того, NOMA може підтримувати подальшу суперпозицію сигналів в ортогональному підпросторі під час передачі MU-МІМО. Інтегруючи кодову частину схеми NOMA у передачу MU-МІМО висхідної лінії зв'язку, можна отримати додатковий вииграш у пропускну здатності навіть для системи з 64 приймальними антенами [7].

У багатьох сценаріях побудови інфокомунікаційних мереж доступу важлива не пропускна здатність для одного користувача, а кількість користувачів, які можуть бути обслужені з гарантованою цільовою швидкістю. У цьому сенсі NOMA можна розглядати як механізм, який обмінює пікову швидкість передачі даних одного підключення на більшу кількість підключень [8]. Це досягається за рахунок використання приймачів NOMA для придушення сусідніх завад між користувачами. Це надзвичайно корисно в ІоЕ, при використанні значної кількості пристроїв із не високими вимогами до швидкості передачі даних. У поєднанні з MU-МІМО технологія NOMA переважно сприяє збільшенню кількості користувачів, що обслуговуються в мережі доступу, ніж простому нарощуванню кількості передавальних або приймальних антен.

Таким чином, при ефективній конструкції приймача технологія NOMA може забезпечити наступні невід'ємні переваги перед ОМА: збільшення пропускної здатності розрахованої для значної кількості користувачів системи: як доведено теорією мережевої інформації, NOMA додатково збільшує пропускну спроможність системи, не використовуючи додаткові спектральні ресурси або антени; підтримка перевантаженої передачі, оскільки технологія NOMA додатково збільшує загальну кількість підключень за рахунок підвищення допустимої колізії символів у ортогональних каналах. При цьому система вважається перевантаженою. Але, завдяки відповідній схемі розрахованого на багато користувачів детектування (MUD) і кодовим книгам NOMA, які можуть включати багатовимірні комбінації [1], сигнатури розбіжності [2] і шаблони конфліктів ресурсів [3], може бути досягнутий коефіцієнт перевантаження вище 300%. В результаті, коефіцієнт перевантаження визначається як співвідношення між кількістю користувачів, до яких одночасно здійснюється доступ, і кількістю ортогональних RE; для уникнення великих накладних витрат на сигнальний механізм і зменшення затримки встановлення зв'язку, заснованої на використанні службової інформації запропоновано використовувати безгрантову передачу, що особливо підходить для послуг з невеликими розмірами пакетів та спорадичним трафіком. Маючи стійкість до конфліктів символів, безгрантовий механізм з підтримкою технології NOMA може реалізувати більш агресивне спільне

використання ресурсів між великою кількістю користувачів, зберігаючи при цьому той самий рівень цільової надійності; для подолання вузького місця, що пов'язане з отриманням інформації про канал в реальному часі при масивних передачах в системі МІМО з петлею зворотного зв'язку, технологія NOMA надає альтернативу MU-MIMO без зворотного зв'язку. Оскільки цей механізм не покладається на точну інформацію про канал, він може бути стійкішим до змін мережі, таких як старіння каналу та мобільність користувачів. Тому, механізм без зворотного зв'язку може бути додатково розширений для випадків з кількома базовими станціями, в яких замість збору точної інформації про канал передавання від цільових користувачів та подальшого відправлення цієї інформації на кожен базову станцію для спільного попереднього кодування кожна з партнерських базових станцій може вибрати неортогональний код і спільно передавати потоки даних без обміну інформацією про канал з користувачами або іншими базовими станціями. Це особливо корисно, при недоступності точної інформації або високої собівартості її отримання; забезпечення гнучкого мультиплексування послуг: традиційним підходом ОМА для ефективного обслуговування диверсифікованого трафіку є динамічне планування ресурсів. Цей підхід вимагає додаткових службових даних і може бути недостатньо швидким для відповідності вимогам до мінімальної затримки у деяких сценаріях. Завдяки суперпозиційній природі NOMA невеликі пакети з малою затримкою можуть бути накладені поверх великих пакетів для спільної передачі, тим самим зменшуючи затримку та одночасно скорочуючи накладні витрати [4].

При використанні технології NOMA в висхідному каналі, базові станції передають суму сигналів для кількох користувачів, які займають однакові частотні та часові ресурси. При цьому, базові станції призначають в одну групу NOMA декількох користувачів з різними відношеннями сигнал/шум. Наприклад, якщо взяти двох користувачів, яким заплановані ті самі ресурси і призначені різні сигнатури NOMA, то один користувач знаходиться поряд з базовою станцією, а інший – далеко від неї; передавач виділятиме високу потужність передачі далекому користувачеві та низьку потужність – розташованому поблизу. На приймальній стороні далекий користувач може розглядати сигнали ближнього користувача як шум, потужність якого набагато нижче, ніж потужність його власних сигналів; ближній користувач може відрізнити власні сигнали від сигналів віддаленого користувача після їх детектування та оброблення.

При використанні технології NOMA у висхідному каналі передавання кілька користувачів передають свої сигнали на базову станцію через спільні часові і частотні ресурси [5]. Схема роботи висхідного каналу NOMA складніша, оскільки до того, як кілька сигналів даних від різних користувачів мультиплексується разом, кожен користувач отримує випадковий канал. Ця особливість унеможливило попереднє проектування складової комбінації з накладенням. Крім того, при проектуванні необхідно враховувати випадковий характер каналів конкретних користувачів. Дослідження висхідного каналу NOMA для 5G NR було розпочато у релізі 3GPP R14. Для передачі даних висхідним каналом було запропоновано безліч різних схем NOMA з підтримкою масового з'єднання і надійних GF-передач. Потім розгляд цього питання було продовжено в релізі R15 як окремий предмет для вивчення [6]. На сьогоднішній день ключові аспекти NOMA у висхідному каналі наступні: уніфікована структура приймача: дослідження NOMA охоплювало схеми передачі для визначення можливості зменшення завади між користувачами, і схеми приймання для коригування решти завад між сусідніми користувачами, для подальшого збільшення їх кількості в мережі доступу. Структура приймача для висхідного каналу на основі технології NOMA та сигналів OFDM зображена на рис. 1. Задіяні у складі передавача специфічні для користувача операції на рівні бітів та/або символів призначені для полегшення декодування накладених даних приймачем із розумною складністю. Методи приймання використовують вдосконалені розраховані на багато користувачів технології прийому для ефективного придушення завад між сусідніми абонентськими каналами з урахуванням витрат на реалізацію і затримки; деякі типові приклади сигнатури NOMA – це множинний доступ із розрідженим кодом (SCMA) [3], багатокористувацький спільний доступ (MUSA) [4], множинний доступ із розподілом ресурсів (RSMA) [5], множинний доступ із розподілом за шаблоном (PDMA) [6], множинний доступ із чергуванням сітки (IGMA) [7] і множинний доступ із поділом-чергуванням (IDMA) [8]. Усі ці схеми можуть бути охарактеризовані різними операціями лише на рівні бітів і символів, які у дослідженні NOMA визначено як сигнатури (signature).

Операції на рівні бітів включають специфічні для користувача обладнання кодування на рівні бітів, скремблювання і перемежування. Операції на рівні символів включають розширення, модуляцію, скремблювання і перемежування на рівні символів, специфічне обладнання користувача.

Важливим типом сигнатури MA є послідовності, що розширюються на рівні символів з властивостями низької взаємної кореляції або низької щільності. В технології NOMA використовуються різні схеми послідовностей, що розширюються на рівні символів, такі як послідовності з рівністю оцінки Уелча, комплексні послідовності з квантованими елементами і грасманові послідовності [1]. Крім того, для підвищення ефективності можуть бути спільно використані розширення та модуляція на рівні символів, наприклад в технології SCMA; реалізація технології NOMA на стороні приймача зумовлена неортогональними властивостями систем NOMA та немінучими завадами між користувачами на стороні приймача систем доступу. В результаті приймач NOMA виконує придушення завад між користувачами. Уніфікована ітераційна схема приймача NOMA [2] складається з двох частин: (1) алгоритм розрахованого на багато користувачів детектування (MUD) і (2) структура ітеративного придушення завад (IC). Алгоритм MUD з низькою складністю та малою затримкою, а також структура придушення завад є дуже важливими

для широкого застосування NOMA, оскільки забезпечують баланс між продуктивністю та витратами на реалізацію.



Рис. 1. Структура приймача висхідного каналу NOMA на основі сигналів OFDM

Дослідження показали, що структура гібридної паралельної інтегральної схеми (PIC) забезпечує найкращий компроміс між продуктивністю та складністю. У гібридній структурі PIC існують ітерації зовнішнього циклу між MUD та каналними декодерами, а програмна та жорстка частини інтегральної схеми працюють паралельно. При цьому, для користувачів з успішно декодованими інформаційними потоками передані сигнали будуть відновлюватись з використанням декодованих інформаційних бітів і виключаються з усіх прийнятих сигналів. Для користувачів з не повністю декодованими інформаційними потоками, зовнішні LLR повертаються в якості вхідних даних в MUD як відправна точка для детектування наступного циклу.

Існує безліч алгоритмів MUD, таких як алгоритм передачі повідомлень (MPA) [3], алгоритм поширення математичного очікування (EPA) [4], лінійна мінімальна середньоквадратична помилка (LMMSE) [5] та елементарна оцінка сигналу (ESE) [6]. Ці алгоритми MUD складаються з наступних елементів: детектор MPA, який може досягти точності, близької до оптимального детектора максимальної правдоподібності, але з набагато меншою складністю, особливо коли розріджений факторний граф. Його вбудована функція «поділай і владарюй» дозволяє реалізувати високий рівень паралелізму; детектор EPA в якому використовується класичний метод наближеного байєсівського виведення [2]. Він проектує справжній апостеріорний розподіл переданих символів в сімейство гаусових розподілів шляхом ітеративного зіставлення середніх і дисперсій з істинним апостеріорним розподілом. В якомусь сенсі EPA є гаусовим наближенням до MPA, але також з урахуванням негаусового розподілу ймовірностей переданих символів. Прямою перевагою цього наближення є лінійна складність щодо розміру модуляції і кількості абонентських пристроїв, при збереженні майже такої ж продуктивності як у MPA в більшості сценаріїв застосування, що представляють інтерес [3]; детектор LMMSE апроксимує апіорний розподіл сигналу як гаусовий, або з середнім значенням та дисперсією, обчисленими з м'яких LLR, що повертаються каналним декодером, або з нульовим середнім значенням та дисперсією, що масштабуються потужністю сигналу, якщо м'який зворотний зв'язок недоступний. LMMSE можна розглядати як окремий випадок EPA, коли кілька антен обробляються спільно без внутрішніх ітерацій між FN і VN; детектор ESE просто апроксимує міжсимвольні завади як гаусовий шум. Детектор ESE повинен покладатися на ітерації зовнішнього циклу (м'який зворотний від каналного декодера) для досягнення прийнятних характеристик детектування. При великій кількості користувачів NOMA кількість ітерацій зовнішнього циклу може бути дуже великою, як і затримка декодування.

Можна спостерігати переваги у збільшенні пропускної здатності системи з точки зору підтримуваної швидкості надходження пакетів (PAR) на заданому рівні збою системи, наприклад, при 1% швидкості відкидання пакетів (PDR). Потім PAR можна використовувати для оцінки підтримуваних з'єднань з урахуванням заданих шаблонів трафіку для кожного користувача.

Таким чином, технологія NOMA є перспективним рішенням для збільшення пропускної спроможності системи за рахунок обслуговування більшої кількості користувачів з тими ж радіоресурсами. Однак у існуючих схем NOMA все ще залишаються проблеми, які потрібно вирішити. По-перше, багато приймачів NOMA використовують ітераційні операції, що робить їх складнішими, ніж приймачі OMA. По-друге, схема NOMA у поєднанні з MIMO все ще вимагає подальшого вивчення щодо підвищення загальної продуктивності. Нарешті, відповідні процедури передачі NOMA, такі як HARQ, вибір сигнатури та адаптація лінії зв'язку, вимагають подальшого вивчення.

Послуги типу URLLC були введені в 5G в основному для підтримки вертикальних додатків, таких як керування рухом в індустрії 4.0 та автономне керування V2X. Завдяки стандартам, визначеним в останніх специфікаціях NR, одночасно можуть бути досягнуті надвисока надійність і низька затримка. Однак через використання ортогональних ресурсів та консервативну адаптацію лінії передавання за кожною обслуговуючою базовою станцією може бути одночасно закріплена лише дуже обмежена кількість користувачів. У мережах 6G такі послуги продовжать розвиток у напрямку розширення списку застосувань з

підвищеними вимогами та більшою кількістю пристроїв, таких як спільні роботи та дистанційне керування. У зв'язку з цим механізм множинного доступу на основі 6G і пов'язані з ним процедури будуть додатково вдосконалені, при цьому очікується, що ключову роль відіграє GF або GB-передача в поєднанні з NOMA [4].

Коли справа доходить до надійності передачі даних на фізичному рівні, її зазвичай можна підвищити за рахунок використання вищих ступенів рознесення для боротьби з невизначеністю, спричиненими явищем завмирання у бездротових каналах. Її також можна покращити за рахунок більш просунутого кодування для боротьби із шумом у каналах. Щодо цих способів підвищення надійності, варто згадати деякі потенційні напрямки для вдосконалення NOMA: NOMA із спільною багаторесурсною схемою для забезпечення покращеного рознесення та допущення збільшеної кількості завад між користувачами, покращуючи характеристики каналів із завмираннями та збільшуючи загальну пропускну здатність; NOMA із спільним каналним кодуванням, яка використовує переваги кодування для придушення перешкод між користувачами. Очікується, що надійність розрахованої на багато користувачів системи доступу можна додатково підвищити, якщо розробляти сигнатури NOMA спільно з каналним кодуванням. Це буде особливо корисно для коротких MA пакетів з вимогами високої надійності.

Множинний доступ недорогих пристроїв буде важливим сценарієм використання мережі 6G. В даний час для підключення недорогих та малопотужних пристроїв у 5G використовуються стандарти NB-IoT та eMTC. При використанні в мережах 6G цільовий термін служби батареї для пристроїв IoT сенсорного типу, як очікується, буде подвоєний (до приблизно 20 років), а кількість пристроїв IoT зросте щонайменше в десять разів, існує постійна потреба в подальшому зниженні енергоспоживання та вартості цих пристроїв. В даний час і в NB-IoT, і в eMTC, як і раніше, потрібна синхронізація часу/частоти. Фактично вона і становить більшу частину енергоспоживання цих пристроїв, у супроводі нечасто та невеликого корисного навантаження.

У мережах 6G постійна синхронізація може бути неприйнятною для деяких сценаріїв використання, особливо для надзвичайно дешевих та малопотужних пристроїв. Однак дешеві компоненти в радіочастотних схемах цих пристроїв можуть викликати проблеми з фазовим шумом в системі 6G, вплив якого збільшуватиметься, якщо пристрої працюють на середніх частотах, а не на низьких. При проектуванні множинного доступу в мережі 6G слід враховувати такі напрями досліджень з прицілом на надзвичайно дешеві та малопотужні пристрої: множинний доступ із стійкістю до зсуву часу/частоти та фазового шуму: асинхронна передача порушить ортогональність між користувачами, навіть якщо застосовується OMA. У цьому випадку будуть доречні сигнатури та приймачі NOMA, стійкі до зсуву часу/частоти та фазового шуму. Крім того, асинхронні сигнали можуть бути розроблені спільно з приймачами NOMA; множинний доступ та сигнали з низьким PAPR базуються на схемах, що включають SCMA на основі DFT та однотональний SCMA [5]. З погляду надзвичайно низьких витрат, множинний доступ треба вивчати разом із новими формами сигналів із низьким PAPR у мережі 6G. Іншими словами, схеми OMA і NOMA повинні бути оптимізовані для підтримки передачі з низьким PAPR.

Надмасивне підключення – це незамінна здатність, необхідна для системи 6G у багатьох застосуваннях, особливо передачі коротких пакетів зі спорадичними моделями трафіку. Для забезпечення надмасивного підключення в межах обмежених радіоресурсів, потрібний безгрантовий доступ за допомогою NOMA. Однак, для реалізації надмасивного підключення спочатку необхідно вирішити наступні проблеми, властиві поточним застосуванням GF-передачі та NOMA: через обмежені загальні радіоресурси та відсутність координації між передачами при масовому підключенні неминуча колізія даних. Для збільшення кількості одночасно активних пристроїв, необхідно провести дослідження щодо покращення схем передачі NOMA та алгоритмів MUD; хоча проблему колізії даних можна зменшити за допомогою передових методів NOMA, колізія пілотних сигналів залишається невиршеною проблемою для множинного безгрантового доступу. Тому подальшого вивчення вимагають схеми розширення пілот-сигналу чи навіть некогерентні схеми без пілот-сигналу. У деяких випадках схеми необхідно розглядати в рамках NOMA, щоб разом вирішувати проблеми колізії пілот-сигналів та проблеми колізії даних, які є двома критичними проблемами для надмасивного підключення; проблему надмасивного підключення у конфігураціях з масивними антенами на стороні базової станції не можна розглядати як просто збільшену версію вихідної проблеми. Вона може бути особливо актуальною, коли кількість антен дуже велика, антени більше не розміщені разом або використовуються нові компоненти, такі як RIS. Деякі особливі властивості каналу у разі застосування надмасивних антен можуть бути застосовані для вирішення проблем колізії як даних, так і пілот-сигналу.

У мережах 6G діапазони міліметрових хвиль і (суб)ТГц повинні використовуватися у поєднанні з масивним MIMO, особливо в застосуваннях з великою пропускну здатністю. При збільшенні кількості антенних елементів та переходом у більш високочастотний діапазон сигнальні промені MIMO стануть надзвичайно вузькими. При цьому, буде складно генерувати кілька дуже вузьких променів, які точно спрямовані для кількох користувачів одночасно, тому що в багатьох сценаріях буде важко отримати точну інформацію про стан каналу. У таких випадках для надійного формування променя можуть бути розроблені покращені схеми NOMA спільно з розрахованим на багато користувачів попереднім кодуванням. Маючи можливість NOMA, MU-MIMO може використовувати модифіковану схему попереднього кодування. Замість формування дуже вузьких і точних променів, націлених для кожного користувача окремо, прекодер MU-MIMO тепер може генерувати ширші промені для роботи із групою користувачів, які додатково мультиплекуються за допомогою NOMA. Збільшення ширини променя робить його більш стійким до змін

параметрів каналу, наприклад, викликаним мобільністю користувача або затримкою вимірювання та зворотного зв'язку. Завади між абонентами всередині групи додатково усуваються приймачем NOMA за допомогою переданих сигнатур NOMA. Аналогічні ідеї можуть бути додатково застосовані при спільній передачі з кількома базовими станціями.

При розробці радіоінтерфейсу в мережах 6G широко застосовуватимуться технології машинного навчання та штучного інтелекту. Методика штучного інтелекту може полегшити розробку багатьох традиційних модулів у каналах зв'язку. Якщо говорити про множинний доступ у мережі 6G, то і передавач, і приймач можуть використовувати методи штучного інтелекту (ШІ).

Передавач із штучним інтелектом базується на результатах розробленої схеми передачі множинного доступу з низькою вартістю, низьким PAPR, малою затримкою, високою надійністю та широкими можливостями підключення. Традиційна методологія проектування на основі класичної моделі може виявитися недостатньою для відповідності результату такій кількості ключових показників. Можливим варіантом вирішення проблеми може бути нейронна мережа, навчена наявними даними. Наприклад, нейронну мережу можна використовувати для розробки сигнатур NOMA спільно з багатьма іншими модулями, такими як форма сигналу та попереднє кодування MIMO.

Приймач зі штучним інтелектом базується на використанні методів штучного інтелекту / машинного навчання, які можуть відіграти роль у полегшенні проектування MUD для NOMA. У мережі 6G з множинним доступом багато традиційних моделей можуть більше не працювати через такі фактори, як асинхронна передача або фазовий шум. Методи штучного інтелекту можуть бути альтернативним рішенням для автоматичного зіставлення сценаріїв. Більше того, за допомогою нейронних мереж можуть бути спільно розроблені різні модулі приймача, наприклад, для виявлення активності користувача, оцінки каналу та MUD.

### Висновки

Обґрунтовано необхідність розроблення та впровадження нового множинного доступу до інформаційних послуг із врахуванням сучасних вимог користувачів мережі доступу.

При дослідженні методів множинного доступу із мультиплексуванням ресурсів розглянуто переваги та недоліки ортогонального множинного доступу (OMA) і неортогонального множинного доступу (NOMA). Крім того, виконано порівняльний аналіз схем передачі даних в радіомережі із врахуванням планування ресурсів, зокрема: передачі зі службовою інформацією (GB) та передачі без службової інформації або безгрантової передачі (GF). Запропоновано структуру приймача висхідного каналу NOMA на основі сигналів OFDM. Досліджено особливості забезпечення надмасивного підключення в межах обмежених радіоресурсів на основі безгрантового доступу за допомогою NOMA. При цьому, було розглянуто способи вирішення проблем, що властиві поточним застосуванням GF-передачі та NOMA при реалізації надмасивного підключення до мережі доступу на основі технології 6G.

Розглянуто перспективи впровадження передавача із штучним інтелектом на основі схеми передачі множинного доступу з низькою вартістю, низьким PAPR, малою затримкою, високою надійністю та широкими можливостями підключення. А також розглянуто особливості проектування приймача зі штучним інтелектом при застосуванні методів штучного інтелекту / машинного навчання, які можуть відіграти роль у полегшенні проектування MUD для NOMA.

### Література

9. Y. Liu, Z. Qin, and Z. Ding, Non-orthogonal multiple access for massive connectivity. Springer, 2020.
10. X. Meng, L. Zhang, C. Wang, L. Wang, Y. Wu, Y. Chen, and W. Wang, Advanced NOMA receivers from a unified variational inference perspective, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020.
11. R. Calderbank and A. Thompson, Chirrup: A practical algorithm for unsourced multiple access, Information and Inference: A Journal of the IMA, vol. 9, no. 4, pp. 875–897, Dec. 2020.
12. A. Decurninge, I. Land, and M. Guillaud, Tensor-based modulation for unsourced massive random access, IEEE Wireless Communications Letters, 2021.
13. Бортник Г.Г., Васильківський М.В., Челюян В.А. Спектральний метод оцінювання джитеру в телекомунікаційних системах. - Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2010, № 2, С. 109-114.
14. Бортник Г.Г., Васильківський М.В., Кичак В.М. Методи та засоби підвищення ефективності оцінювання фазового дрижання сигналів у телекомунікаційних системах: Монографія. - Вінниця: ВНТУ, 2015. - 140 с.
15. Бортник Г.Г., Васильківський М.В., Стальченко О.В. Пристрій аналого-цифрового перетворення височастотних сигналів. - Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013, № 2. – С.82-85.
16. M. Vaezi, Z. Ding, and H. V. Poor, Multiple access techniques for 5G wireless networks and beyond. Springer, 2019.

### References

1. Y. Liu, Z. Qin, and Z. Ding, Non-orthogonal multiple access for massive connectivity. Springer, 2020.

2. X. Meng, L. Zhang, C.Wang, L.Wang, Y.Wu, Y. Chen, and W.Wang. Advanced NOMA receivers from a unified variational inference perspective, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020.
3. R. Calderbank and A. Thompson, Chirrup: A practical algorithm for unsourced multiple access, Information and Inference: A Journal of the IMA, vol. 9, no. 4, pp. 875–897, Dec. 2020.
4. A. Decurninge, I. Land, and M. Guillaud, Tensor-based modulation for unsourced massive random access, IEEE Wireless Communications Letters, 2021.
5. Bortnyk G.G., Vasytkivskiy M.V., Cheloyan V.A. Spektral'nyy metod otsinyuvannya dzhyteru v telekomunikatsiynyykh systemakh. - Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu, 2010, № 2, S. 109-114.
6. Bortnyk G.G., Vasytkivskiy M.V., Kychak V.M. Metody ta zasoby pidvyshchennya efektyvnosti otsinyuvannya fazovoho dryzhannya syhnaliv u telekomunikatsiynyykh systemakh: Monohrafiya. - Vinnytsya: VNTU, 2015. - 140 s.
7. Bortnyk G.G., Vasytkivskiy M.V., Stalchenko O.V. Device for analog-digital conversion of high-frequency signals. - Measuring and computing equipment in technological processes.–2013, No. 2.– P.82-85.
8. M. Vaezi, Z. Ding, and H. V. Poor, Multiple access techniques for 5G wireless networks and beyond. Springer, 2019.

**Анатолій ГОРДЕСВ**Хмельницький національний університет  
<https://orcid.org/0000-0003-4494-4348>**Андрій СТАРИЙ**Львівський фаховий коледж індустрії моди  
Київського національного університету технологій та дизайну  
<https://orcid.org/0000-0001-9277-297X>**Євген УРБАНИУК**Хмельницький національний університет  
<https://orcid.org/0000-0001-8713-501X>**Олексій ГОРДЕСВ**Хмельницький національний університет  
<https://orcid.org/0000-0002-8527-0805>

## ПРОЄКТУВАННЯ МОДУЛЯ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ ДЛЯ ОЧИСТКИ ЗАБРУДНЕНЬ ТА ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЙОГО ЕЛЕМЕНТІВ

Якість і надійність відремонтованих машин істотно залежать від досконалості технологічних процесів розбирання, очищення, підготовки поверхні і складання. Запропоновано конструкцію вібраційної машини для очистки забруднень та загальну методику розрахунків модуля очистки пульсуючим зануреним струменем з твердими частинками. Наведено результати експериментальних досліджень зміни тиску пульсуючого зануреного струменя від частоти коливань приводу. Наведено методику та приклад розрахунку зворотного клапану модуля вібраційної машини для очистки забруднень потоком пульсуючого струменя рідини з твердими частинками.

Ключові слова: вібраційна машина, пульсуючий занурений струмінь рідини з твердими частинками, максимальний тиск рідини, методика проектування.

Anatoliy HORDIEIEV

Khmelnyskiy National University

Andriy STARIY

Lviv vocational college of the fashion industry

Kyiv national university of technology and design

Evgeniy URBANIUK, Alexei HORDIEIEV

Khmelnyskiy National University

## DESIGN OF A VIBRATING MACHINE MODULE FOR POLLUTION CLEANING AND A GENERAL METHOD FOR CALCULATING ITS ELEMENTS

The quality and reliability of repaired machines depend significantly on the perfection of the technological processes of disassembly, cleaning, surface preparation and assembly. The analysis of methods and modern designs of equipment and machines for cleaning and washing pollution showed the possibilities, advantages and disadvantages of various methods and designs of equipment. The main interest for the practice of creating vibrating machines for cleaning and washing parts contamination in small-batch and single-type production when repairing machines is to establish the type of dependencies between the main technological parameters, such as the dynamic pressure of the working environment, the size of the working bodies, their speed, the angle of attack, design parameters and modes of operation of the drive of vibrating machines. The design of a vibrating machine for cleaning contamination with a stream of solid particles and washing parts during equipment repair is proposed, which consists of two modules: a cleaning module with a pulsating submerged jet with solid particles and a module for washing contamination with a pulsating submerged jet of washing liquid. Experimental studies were conducted to measure the maximum pressure of a pulsating jet with a non-return valve installed, depending on the change in the frequency of oscillations of the drive and the change in the diameter of the nozzle. The results of experimental studies of changes in the pressure of a pulsating submerged jet depending on the frequency of oscillations of the drive are presented, which showed a two-fold increase in the maximum pressure of a pulsating submerged jet when using a non-return valve that connects the cleaning bath with the pulsation chamber. In order to reduce the occurrence of a significant number of cavitation bubbles in the pulsation chamber for the non-return valve, it is important to calculate the maximum total area of the holes and their number, based on the volumetric flow of liquid through it during the oscillation period. The determined valve operation time is 0.014s. says that its performance is ensured at frequencies from 0 to 70 Hz of vibrations of the vibration drive. The methodology and example of calculation of the non-return valve of the module of the vibrating machine for cleaning pollution by the flow of a pulsating jet of liquid with solid particles are presented.

Keywords: vibration machine, pulsating immersed liquid jet with solid particles, maximum liquid pressure, design method.

### Постановка проблеми

Якість і надійність відремонтованих машин істотно залежать від досконалості технологічних процесів розбирання, очищення, підготовки поверхні і складання. Ускладнення виробів, вдосконалення технології виробництва і висока точність виготовлення істотно підвищує вимоги до якості очищення і підготовки поверхні. Процес очищення об'єктів ремонту полягає у видаленні за допомогою твердого, рідкого чи газоподібного середовища всіх поверхневих забруднень. Трудомісткість очищення деталей при ремонті становить від 7 до 9 % від загальної трудомісткості ремонту.

Головний інтерес для практики створення вібраційних машин очистки та мийки забруднень деталей у дрібносерійному та одиничному типі виробництва при ремонті машин становить встановлення виду



залежностей між основними технологічними параметрами, такими, як динамічний тиск робочого середовища, розмір робочих тіл (кульок, абразивних зерен, газових пухирців) їхня швидкість руху, концентрація, кут атаки, фізико-механічні властивості частинок та конструктивні параметри і режими роботи приводу вібраційних машин. Це обумовлює необхідність оптимального вибору величин технологічних параметрів, режимів роботи приводу вібраційних машин в умовах конкретного виду забруднення поверхні деталей.

Вирішення науково-технічної задачі, а саме створення модульної вібраційної машини для очистки та мийки деталей при ремонті обладнання та обґрунтування її конструктивних параметрів із визначенням режимів роботи приводу є актуальною науково-технічною задачею.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Очищенню від забруднень та промиванню підлягають деталі обладнання та машин за інструкціями заводів виробників з врахуванням умов їх експлуатації. При промиванні здійснюється розбирання окремих вузлів, очищення розібраних вузлів від стружки та пилу, продуктів зношування. При цьому замінюються запобіжні прокладки, промиваються і прочищаються запобіжні фільтри, мастильні отвори, підшипники кочення.

Вагомим внеском у створенні фундаментальних основ проектування технологічного обладнання і машин для мийки та очищення по праву належить провідним науковцям: Н.Ф. Тельнову, Б.Б. Нефедову, А.П. Садовському, А.Ф. Тельнову, В.І. Савченко, Е.Б. Крутоусу, А.Н. Некричу., Ю.С. Козлову, В.І. Ушмаріну, Н.П. Беяніну, І.В. Фадєєву, Д.П. Гегерсу та ін. Завдяки великій дослідницькій роботі вчених багато питань очищення отримали теоретичне обґрунтування, використовуючи яке вдалося вирішити ряд складних практичних проблем в галузі технології та організації очистки і мийки та визначити шляхи їх вдосконалення.

Високо оцінюючи отримані результати, відображені в роботах вищезазначених авторів, необхідно відзначити, що в них недостатньо повно розглядаються процеси підвищення енергонасиченості водяних затоплених багатофазних струменів в процесі мийки.

У процесі експлуатації на деталях утворюються різні забруднення. А при руйнуванні захисних покриттів посилюються ще й процеси корозійного ураження, які часто розвиваються під шаром зруйнованого покриття. Забруднення можна видаляти механічними, фізичними, хімічними, фізико-хімічними, хіміко-термічними та іншими методами. Вибір методу є важливою передумовою якісного очищення деталей і залежить: від виду забруднення, форми та матеріалу деталі, екологічними вимогами.

Аналіз способів та сучасних конструкцій обладнання та машин для очистки та мийки забруднень показав можливості, переваги і недоліки різних способів та конструкцій обладнання. У результаті проведеного аналізу було запропоновано застосувати для мийки та очистки забруднень пульсуючий занурений струмінь рідини з твердими частинками, який отримується із застосуванням вібраційного приводу з робочим органом у вигляді камери пульсації мембранного типу з насадком.

#### Актуальність дослідження

Мета цієї роботи полягає у розробленні вібраційної машини з пульсуючим зануреним струменем рідини з твердими частинками для очищення деталей при ремонті у дрібносерійному та одиничному виробництві з обґрунтуванням методики розрахунку конструктивних параметрів її елементів і вибору раціональних режимів роботи приводу.

#### Виклад основного матеріалу

Запропонована конструкція вібраційної машини для очистки забруднень потоком твердих часток та мийки деталей при ремонті обладнання [1,2] складається з двох модулів: модуля очистки пульсуючим зануреним струменем з твердими частинками та модуля мийки забруднень пульсуючим зануреним струменем мийної рідини і пояснюється схемою модульної вібраційної машини представленої на рис.1.

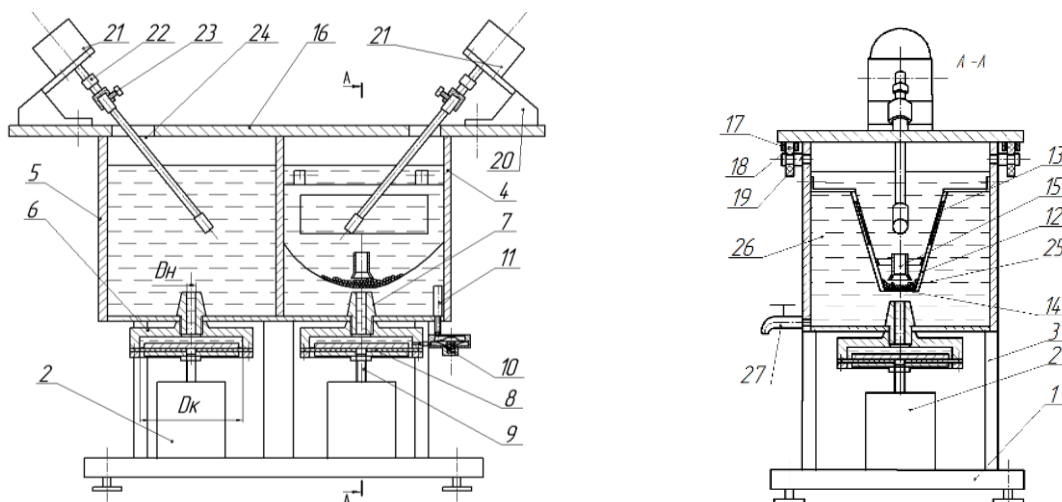


Рис. 1 – Схема загального виду модульної вібраційної машини для очистки потоком твердих частинок та мийки забруднень

Вібраційна машина для очистки забруднень потоком твердих частинок та мийки деталей при ремонті обладнання [1,2] (рис.1) містить основу 1, на якій встановлено вібропривід 2, на стійках 3 розміщено ванну модуля 4 – для очищення у пульсуючому струмені рідини з твердими частинками, ванну модуля 5 – для мийки пульсуючим потоком миючої рідини; на дні ванн 4 та 5 закріплено корпус камери пульсації 6 за допомогою насадка 7 (діаметром  $D_n$ ) та нижня частина корпуса 6 (діаметром  $D_k$ ) закрита мембраною з дисками 8, яка закріплена до штока 9 віброприводу 2, а порожнина камери пульсації 6 з'єднано мембранним клапаном 10 та забірною трубкою 11 з порожниною ванни 4 у яку встановлено контейнер 12 з боковими сітками 13 та сіткою 14, яка розташована над соплом 7, у коробі 12 розміщено сопло 15, ванни 4 та 5 закриті кришкою 16 яка має можливість рухатися по напрямним 17 на роликах 18 які встановлені на осях 19, на крищі 16 за допомогою кутників 20 встановлено мотор-редуктор 21 який за допомогою муфти 22 з'єднано із затискачем 23 для деталі 24, у короб 12 засипано тверді частинки (полістиролові кульки або металеві кульки) 25, а у ванни 4 та 5 залита миюча рідина 26, яку після спрацювання можна злити крізь кран 27.

Працює вібраційна машина наступним чином: у ванни 4,5 заливають миючу рідину 26 та засипають у контейнер 12 тверді частинки (полістиролова крихта або металеві кульки) 25, деталь 24, яка підлягає очищенню, закріплюють у затискачі 23 та встановлюють кришку 16 у напрямні 17. Включається мотор-редуктор 21, який обертає деталь 24 та вібропривід 2, що призводить до коливання мембрани з дисками 8 і у насадку 7 виникає пульсуючий струмінь рідини, який проходить крізь сітку 14 та захоплює тверді частинки 25, вдаряє ними по забрудненню та зриває його не порушуючи поверхню деталі. При русі мембрани з дисками 8 униз миюча рідина 26 проходить крізь отвір у насадку 7 та забірну трубку 11 і відкритий клапан 10 із меншим зусиллям тяги приводу та витратою енергії вібраційного приводу. При русі мембрани з дисками 8 зверху здійснюється протікання миючої рідини 26 крізь насадок 7, а клапан 10 закривається. Деталь 24 обертається, а кришці 16 вручну надається поздовжньо-поступний рух і очистка деталі 24 проводиться зі всіх сторін на необхідній довжині.

Після очищення кришка 16 піднімається та деталь 24 перевстановлюється і проводиться очищення з іншої сторони деталі 24. Після підняття кришки 16 очищена деталь 24 знімається та встановлюється у затискач 23 у ванні 5 для мийки, а забруднена деталь 24 встановлюється у затискач 23 у ванні 4 для очистки. Кришка 16 встановлюється у напрямні 17 та включається мотор-редуктор 21 та вібропривід 2. У ванні 4 проводиться очистка деталі 24, а у ванні 5 проводиться мийка деталі 24 після її очищення. Мийка здійснюється за допомогою пульсуючого струменя рідини з кавітаційними пухирцями, які утворилися у струмені з насадка при певних режимах роботи приводу. Після проведення мийки у ванні 5 деталі 24 та очищення деталі 24 у ванні 4 мотор-редуктор 21 та вібропривід 2 виключаються та проводиться виїмка деталі 24 з ванни 4, а на її місце встановлюється деталь 24 з ванни 5 після очищення. При спрацюванні миючої рідини 26 (забрудненні) її зливають крізь кран 21.

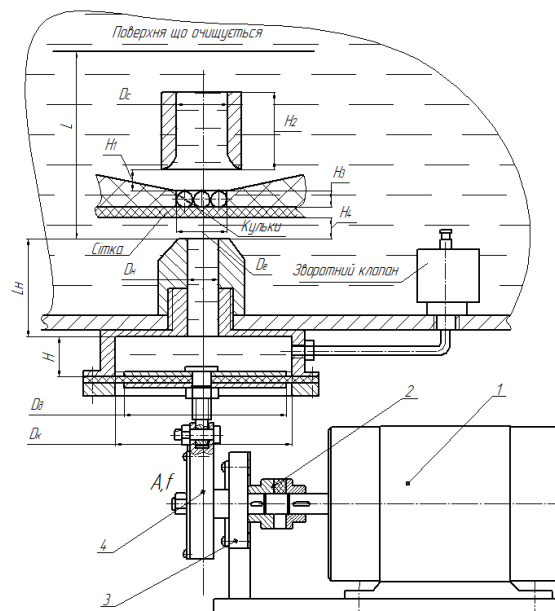


Рис. 2 – Розрахункова схема модуля вібраційної машини для очистки забруднень потоком пульсуючого струменя рідини з твердими частинками: 1 – електродвигун; 2 – муфта; 3 – корпус з підшипником; 4 – обойма ексцентрика з підшипником;  $H$  – висота камери пульсації;  $D_e$  – діаметр ежектора;  $D_c$  – діаметр сопла;  $H_1$  – відстань від сопла до ежектора;  $H_2$  – довжина сопла;  $H_3$  – висота кармана ежектора;  $H_4$  – відстань від зрізу насадка до сітки ежектора  
 $D_n$  – діаметр насадка;  $D_k$  – діаметр камери пульсації;  $D_d$  – діаметр диска;  $L$  – відстань від зрізу насадка до поверхні, що очищується;  $A, f$  – амплітуда та частота коливань приводу вібраційної машини;  $H$  – висота камери пульсації;  
 $L_n$  – довжина насадка

Запропоновані методи очистки та мийки у вібраційній машин базуються на пульсуючих затоплених струменях рідини, які отримуються у вібраційній машині з розташуванням в оптимальній технологічній послідовності. Поєднання двох відомих методів очистки та мийки і їх чергування, дозволяють отримати в єдиній машині новий сукупний позитивний результат по зняттю забруднень з поверхонь деталей.

У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень [3], обґрунтування конструктивних параметрів та визначення режимів роботи приводу модуля вібраційної машини для очистки забруднень зануреним пульсуючим струменем миючої рідини з твердими частинками запропонована загальна методика проектування параметрів вузла очистки вібраційної машини та режимів роботи його приводу.

Послідовність проектування вузла очистки вібраційної машини полягає у наступному:

1. На початку проектування вибираємо конструктивні розміри ежектора та сопла (рис.2) за залежностями:  $D_e = 1,2 D_n$ ;  $H_3 = 0,8 d_k$ ;  $H_1 = 1,5 d_k$ ;  $H_2 = 15 \text{ мм}$ ;  $D_c = 1,3 D_e$ ;  $H_4 = 2 \cdot 3 \text{ мм}$ ;

2. Вибираємо конструктивні розміри камери пульсації  $D_k$  від 100 до 120 мм та діаметр диску мембрани  $D_d = 0,9 D_k$ , діаметр отвору у насадку  $D_H$  від 9 до 10 мм. Довжину камери пульсації  $H_{к.п.}$  приймаємо  $H_{к.п.} = 30 \text{ мм}$ . (рис.2). Відстань  $L$  від зрізу насадка до деталі приймаємо  $h = 50 \dots 60 \text{ мм}$ . Розмір металевих кульок рекомендовано у межах від 0,8 до 1 мм.

3. На основі результатів експериментальних досліджень [3] вимірювання максимального тиску зануреного пульсуючого струменя з встановленим зворотним клапаном та без нього в залежності від зміни частоти коливань приводу [3]. Результати вимірювань після оброблення осцилограм згідно тарувального графіку представлені у вигляді графіків на рис.3. Згідно графіка рис.3., урахуванням застосування зворотного клапану і рекомендованого діаметра насадка 10 мм, вибираємо раціональний діапазон частоти коливань приводу від 16 до 18 Гц та амплітуду коливань мембрани  $A = 0,002 \text{ м}$ .

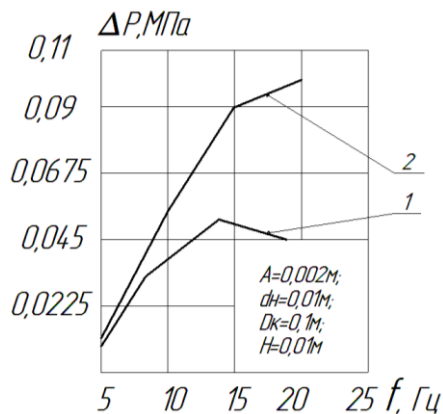


Рис. 3 – Графік залежності зміни максимального тиску пульсуючого струменя від частоти коливань мембрани:

1 – без зворотного клапана; 2 – із застосуванням у камері пульсації зворотного клапана

4. Далі визначаємо конструктивні параметри зворотного клапану для вузла утворення пульсуючого струменя вібраційної машини для очистки забруднень за методикою, яка викладена у вигляді приклада нижче.

5. За рекомендованою частотою коливань визначаємо значення обертів електродвигуна за хвилину. Проводимо розрахунок крутного моменту та потужності електродвигуна.

6. Визначаємо раціональні параметри конструктивних елементів вузла пульсації вібраційної машини для очистки у програмному продукті SolidWorks, а саме товщину мембрани, параметри камери пульсації.

7. Створюємо 3-D модель вузла очистки вібраційної машини у програмному продукті SolidWorks, з якої зручно отримати робочі креслення деталей.

Запропонована методика проектування та розрахунку елементів зворотного клапану для вузла утворення пульсуючого струменя вібраційної машини для очистки забруднень приведена у вигляді прикладу згідно конструкції зворотного клапану рис.4 та рис.5.

На рисунку 4 показана 3-D модель будови пелюсткового зворотного клапану, а на рисунку 5 наведена розрахункова схема зворотного клапану для визначення його основних параметрів.

Клапан працює наступним чином: рідина всмоктується крізь отвори у корпусі 1 при зниженні тиску  $P_2$  (що утворюється в камері пульсації при ході мембрани вниз) при переміщенні пелюстки гумового клапану, яка притискається до входних отворів штоком 2 за допомогою пружини 4, а при зростанні тиску  $P_2$  (приході мембрани вгору в камері пульсації) гумова пелюстка перекриває входні отвори.

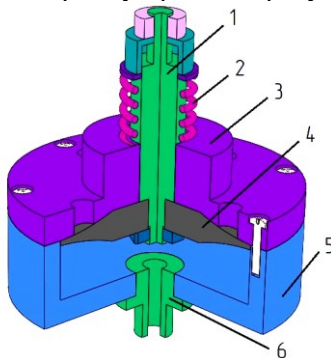


Рис. 4 – Конструкція зворотного клапану для модуля очистки забруднень потоком твердих частинок: 1 – шток; 2 – пружина; 3 – кришка; 4 – гумовий пелюстковий клапан; 5 – корпус; 6 – штуцер

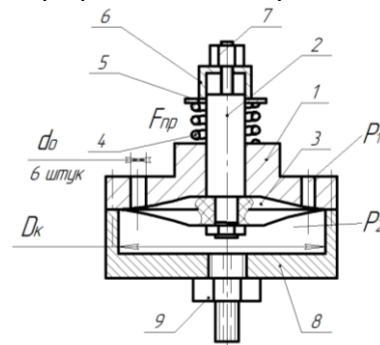


Рис. 5 – Розрахункова схема зворотного клапану вібраційної машини для очистки забруднень потоком пульсуючого струменя рідини з твердими частинками: 1 – корпус; 2 – шток; 3 – пружина мембрана; 4 – пружина; 5 – шайба; 6 – стакан; 7 – гайка регулювальна; 8 – кришка; 9 – штуцер

З метою зменшення виникнення значної кількості кавітаційних пухирців у камері пульсації для зворотного клапана важливо розрахувати максимальну сумарну площу отворів та їх кількість, виходячи з об'ємного витоку рідини крізь нього за період коливання.

Максимальний об'єм рідини, який теоретично може потрапити у камеру пульсації крізь клапан за період коливання, без урахування втягування рідини крізь насадок, визначається за формулою:

$$V_{к.л.} = \frac{\pi \cdot D_k^2}{4} \cdot 2 \cdot A, \quad (1)$$

де  $A$  – амплітуда коливань рідини у камері пульсації;  
 $D_k$  – діаметр камери пульсації,  $D = 0,1$  м.

Об'ємний виток рідини  $V_{кл}$  крізь клапан визначається для рідини, що не стискається, за формулою [4]:

$$V_{кл} = \mu \cdot \Sigma S_o \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}}, \quad (2)$$

де  $\rho$  – густина води,  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;

$\mu$  – коефіцієнт витоку,  $\mu = 0,9$ ;

$\Sigma S_o$  – сумарна площа отворів у клапані;

$\Delta P$  – різниця тисків атмосферного та у камері пульсації  $\Delta P = 0,05$  МПа.

Припустимо, що максимальний об'єм рідини  $V_{к.л.}$  дорівнює об'ємному витоку крізь клапан  $Q_{кл}$  без урахування об'єму рідини, що може втягуватися крізь насадок.

$$\frac{\pi \cdot D_k^2}{2} \cdot A = \mu \cdot \Sigma S_o \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}}. \quad (3)$$

Звідки можна отримати загальну площу вхідних отворів клапана за формулою:

$$\Sigma S_o = \frac{\pi \cdot D_k^2 \cdot A}{2 \cdot \mu \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}}}. \quad (4)$$

Проведемо чисельні розрахунки за формулою (4) при наступних параметрах: діаметр камери пульсації

$D_k = 0,1$  м; амплітуда  $A = 0,002$  м;  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $\mu = 0,9$ ; перепад тиску  $\Delta P = 0,05$  МПа.

$$\Sigma S_o = \frac{\pi \cdot D_k^2 \cdot A}{\mu \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}}} = \frac{3,14 \cdot 0,1^2 \cdot 0,002}{2 \cdot 0,9 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 0,05}{1000}}} = 0,000348 \text{ м}^2.$$

Прийmemo діаметр отворів  $d = 0,01$  м та кількість 6 штук. Визначимо їх сумарну площу за формулою:

$$\Sigma S_o = \frac{\pi \cdot d_o^2}{4} \cdot n = \frac{3,14 \cdot 0,01^2}{4} \cdot 6 = 0,000471 \text{ м}^2.$$

Порівнявши сумарну теоретичну площу отворів з прийнятою фактичною сумарною площею отворів та враховуючи, що об'ємний виток крізь клапан фактично буде меншим, за рахунок втягування рідини у камеру пульсації крізь насадок, можна зробити висновок, що фактичні конструктивні розміри забезпечують роботоздатність запропонованої конструкції зворотного клапану.

Виконаємо перевірку за частотною характеристикою спрацювання клапана запропонованої конструкції.

Час спрацювання зворотного клапана визначається за формулою [5,6]:

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot h}{(P_1 - P_2) \cdot \Delta S - R}}, \quad (5)$$

де  $m$  – маса клапана з штоком, 0,02 кг;

$h$  – максимальний хід мембрани, 1 мм;

$\Sigma S$  – площа прохідного січення клапану, 4710 мм<sup>2</sup>;

$R$  – сумарна сила опору руху мембрани клапана з штоком, 5 Н;

$P_1$  – тиск вхідний, зовнішній, 0,1 МПа;

$P_2$  – тиск на виході з клапану, 0,05 МПа;

Проведемо розрахунок, за отриманими конструктивними параметрами, за формулою (5):

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,02 \cdot 1}{(0,1 - 0,05) \cdot 4710 - 5}} = 0,00412 \text{ с.}$$

Визначений час спрацювання клапану говорить, що його роботоздатність буде забезпечуватися при частотах від 0 до 30 Гц коливань вібраційного приводу машини.

Тому при рекомендованих частотах від 16 до 18 Гц його ефективна робота забезпечена.

Проведемо розрахунок конструктивних параметрів пружної системи клапану. Пружина клапану призначена для роботи в певному діапазоні тиску і характеризується двома робочими тисками: початковим

$P_{\min} = 0,01 \text{ МПа}$  і кінцевим  $P_{\max} = 0,05 \text{ МПа}$ .

Діапазон роботи пружини визначається наступними умовами:

1) Перевищення тиску над робочим при відкритті клапану на розрахункову величину  $h_0$  має бути  $\Delta P \leq 0,1 P_p$  тобто  $\Delta F_{np} \leq 0,1 F_p$  або  $\eta \geq 0,9$ ;

2) При нормальному розрахунковому тиску  $P_H = 0,5(P_{\min} + P_{\max})$  для клапану має бути  $\Delta F = (0,06 \dots 0,07) F_H$  або  $\eta = (0,94 \dots 0,93)$  (де  $F_H$  номінальне навантаження);

3) Максимальне розрахункове навантаження можливо бути в 1,5 рази більше номінальної, тобто  $F_{\max} = 1,5 F_H$ .

Співвідношення максимальної і мінімального навантаження для пружини дає коефіцієнт діапазону пружини:

$$\psi = \frac{F_{\max}}{F_{\min}} = \frac{P_{\max}}{P_{\min}} = \frac{0,005}{0,001} = 5.$$

Визначимо параметри пружини зворотного клапану.

Прийемо для пружини матеріал, з якої вона виготовляється, Сталь 60С2. Діаметр штока клапану конструктивно прийнято  $d_{шт} = 10 \text{ мм}$ .

Діаметр дроту пружини визначається за формулою:

$$d = \sqrt[3]{\frac{8kF_2 D_{сер}}{\pi \tau}} = \sqrt[3]{\frac{8 \cdot 1,2 \cdot 1,7 \cdot 12}{3,14 \cdot 375 \cdot 0,5}} = \sqrt[3]{0,166} = 0,55 \text{ мм}, \quad (7)$$

де  $D_{сер}$  – середній діаметр пружини, який приймаємо, виходячи із конструктивних розмірів клапану,  $D_{сер} = 13,2 \text{ мм}$ ;  $D_{сер} = 12 \text{ мм}$ ;

$k$  – коефіцієнт кривизни витків, який приймаємо із врахуванням індексу пружини; якщо  $i > 8$ , то  $k = 1,1 \dots 1,2$ ;

$\tau$  – розрахункове значення напружень кручення. Із міркувань, що  $\tau = (0,5 \dots 0,8) [\tau_k]$ , де  $[\tau_k]$  – допустимі напруження для пружин із сталі 60С2,  $[\tau_k] = 750 \text{ МПа}$ , маємо  $\tau = 0,5 \cdot 750 = 375 \text{ МПа}$ ;

$F_2$  – сила стиснення пружини при робочій деформації, яка відповідає максимальному тиску на площу мембрани.  $F_2 = \Sigma S_o \cdot P_{\max} = 0,0034 \cdot 500 = 1,7 \text{ Н}$ .

З конструктивних міркувань діаметр дроту пружини прийемо  $d = 1 \text{ мм}$ . Тоді Зовнішній діаметр пружини визначаємо як:

$$D_{зов} = D_{сер} + d = 12 + 1 = 13 \text{ мм}, \quad (8)$$

де  $d$  – діаметр дроту пружини;

$D_{сер}$  – середній її діаметр.

Внутрішній діаметр пружини визначаємо як:

$$D_{вн} = D_{сер} - d = 12 - 1 = 11 \text{ мм}. \quad (9)$$

Максимальну величину стиснення пружини при збиранні конструкції клапану  $X_k$  визначаємо за формулою:

$$X_k = \frac{X \cdot F_2}{F_2 - F_1} = \frac{2 \cdot 1,7}{1,7 - 0,85} = 4 \text{ мм}, \quad (10)$$

де  $X$  – хід пружини в робочому стані,  $X = 1 \text{ мм}$ ;

$X = 2 \text{ мм}$ ;  $F_2$  – сила пружини при робочій деформації,  $F_2 = 1,7 \text{ Н}$ ;

$F_1$  – сила пружини при попередній деформації,  $F_1 = 0,5 \cdot F_2 = 0,5 \cdot 1,7 = 0,85 \text{ Н}$ .

Тоді число робочих витків:

$$n = \frac{Gd^4 X_k}{8F_2 D_{cep}^3} = \frac{7,85 \cdot 10^4 \cdot 1^4 \cdot 4}{8 \cdot 1,7 \cdot 12^3} = 13,36 \text{ шпук}, \quad (11)$$

де  $G$  – модуль зсуву для пружинної сталі 60С2, прийнято  $G = 7,85 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ .

Повне число витків пружини:

$$n_1 = n + n_2 = 13 + 2 = 15, \quad (12)$$

де  $n$  – число робочих витків;

$n_2$  – число опорних витків, що доповнюють приймаємо  $n_2 = 2$ .

Таким чином, наявність у модулі очищення виробу у пульсуючому струмені рідини з твердими часточками зворотного пелюсткового клапана із параметрами, які визначені згідно запропонованої вище методики та рекомендацій, забезпечить утворення пульсуючого струменя з характеристиками, що необхідні для ефективної роботи як модуля очищення виробу, так і вібраційної машини для очищення забруднень загалом.

### Висновки

1. Запропоновано інноваційну конструкцію вібраційної машини для очистки забруднень потоком твердих частинок та мийки деталей при ремонті обладнання яка складається з двох модулів: модуля очистки пульсуючим зануреним струменем з твердими частинками та модуля мийки забруднень пульсуючим зануреним струменем мийної рідини.

2. Запропонована узагальнена методологія розрахунку раціональних конструктивних і технологічних параметрів модуля очистки вібраційної машини дозволяє визначати необхідні конструктивні параметри модуля та параметри коливань приводу машини.

3. Наведено розрахунок елементів конструкції зворотного клапану для вузла утворення зануреного пульсуючого струменя рідини з твердими частинками. Його застосування дозволяє отримувати збільшення максимального тиску пульсуючого струменя при частотах коливань приводу від 16 до 18 Гц, що призводить до підвищення продуктивності процесу очистки.

### Література

1. Вібраційна машина для очистки забруднень потоком твердих частинок та мийки деталей при ремонті обладнання: пат. 132837 Україна : МПК В08В 3/10. u2018 10344; заявл. 19.10.18; опубл. 11.03.19, Бюл. №5.

2. Старий А. Р., Гордеев А. І., Гордеев О. А. Вібраційна машина для очистки та мийки. Science and civilization – 2020: 2020 рік : materials of the XVI International scientific and practical Conference. 30 January – 07 February, 2020. Sheffield : Science and education LTD, 2020. С. 67–70.

3. Старий А. Р., Гордеев А. І. Аналіз аналітичних моделей вібраційного приводу машини для мийки і очистки пульсуючим струменем рідини та експериментальне дослідження режимів його роботи. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. №4. 2021. С. 77–83. DOI 10.31891/2307-5732-2021-299-4-77-83.

4. Поршневые компрессоры: Учебное пособие для студентов. / Б.С. Фотин, И.Б. Пирумов, И.К. Прилуцкий, П.И. Пластинин Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. 372 с.

5. Гідроприводи та гідропневмоавтоматика: Підручник / В.О. Федорець, М.Н. Педченко, В.Б. Струтинський та ін. За ред. В. О. Федорця. К: Вища школа, 1995. 463 с.

6. Герасимов Є. Г., Герасимов Г. Г., Іванов С. Ю. Динамічні процеси в трубопровідних системах: монографія. Рівне : НУВГП, 2020. 597 с.

### References

1. Vibrating machine for cleaning pollution with a flow of solid particles and washing parts during equipment repair: pat. 132837 Ukraine: IPC B08B 3/10. u2018 10344 ; statement 19.10.18; published 11.03.19, Bul. No. 5.

2. Stariy A. R., Gordeev A. I., Gordeev O. A. Vibrating machine for cleaning and washing. Science and civilization - 2020: 2020 year: materials of the XVI International scientific and practical Conference. 30 January – 07 February, 2020. Sheffield : Science and education LTD, 2020. pp.67–70.

3. Stariy A. R., Gordeev A. I. Analysis of analytical models of the vibration drive of a machine for washing and cleaning with a pulsating stream of liquid and experimental study of its modes of operation. Bulletin of the Khmelnytskyi National University. Technical sciences. No. 4. 2021. P. 77–83. DOI 10.31891/2307-5732-2021-299-4-77-83.

4. Fotin B.S., Pyrumov I.B., Prylutskyi I.K., Plastinin P.I. Piston compressors: Study guide for students. L.: Machine building. Lenigr. otd-nie, 1987. 372 p.

5. Fedorets V. O., Pedchenko M. N., Strutynskiy V. B. and others. Hydraulic drives and hydropneumatic automation: Textbook K: Higher school, 1995. 463 p.

6. Gerasimov E.G., Gerasimov G.G., Ivanov S.Yu. Dynamic processes in pipeline systems: monograph. Rivne: NUVHP, 2020. 597 p.

Ігор ГУЛА

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4434-5794>e-mail: [holmenetwork@gmail.com](mailto:holmenetwork@gmail.com)

Олексій ПОЛІКАРОВСЬКИХ

Одеський національний морський університет

<https://orcid.org/0000-0002-1893-7390>e-mail: [polalexey@gmail.com](mailto:polalexey@gmail.com)

## МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МОДУЛЯЦІЇ СИГНАЛІВ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Стаття присвячена розгляду питання визначення параметрів модуляції сигналів безпілотних літальних апаратів з використанням штучних нейронних мереж шляхом розпізнавання видів цифрової модуляції та виконується системою, яка автоматично класифікує вид цифрової модуляції одержуваного сигналу. Розроблений метод визначення параметрів модуляції сигналів, відрізняється від нині існуючих способом вибору ознак класифікації сигналів. У роботі у якості таких ознак використані кумулянти як парного, так і непарного порядку.

Ключові слова: розпізнавання цифрової модуляції, багатошарова нейронна мережа, система SDR, БПЛА.

Ihor HULA

Khmelnitsky National University

Oleksiy POLIKAROVSKYKH

Odessa National Maritime University

## METHOD OF DETERMINING PARAMETERS OF MODULATION OF UAV SIGNALS USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

The article is devoted to the consideration of the issue of determining the parameters of the modulation of signals of unmanned aerial vehicles using artificial neural networks by recognizing the types of digital modulation and is performed by a system that automatically classifies the type of digital modulation of the received signal. Recognition of digital modulation types is used, which automatically classifies the type of digital modulation of the received signal. The following issues are covered in the article: the analysis of existing approaches in the task of automatic recognition of types of digital modulation is carried out; the analysis and classification of informative features in the task of automatic recognition is carried out the following types of digital modulation: 2-PSK, 4-PSK, 8-PSK, 2-FSK, 8-QAM, 16-QAM, 64-QAM and OFDM.

This article uses a neural network approach based on cumulative characteristics. To solve these problems, the methods of calculation and selection of informative cumulative features described in the developed model of the system of automatic recognition of digital modulation types by means of a neural network on cumulative features at a known value of carrier frequency are described.

A model of the system of automatic recognition of digital modulation types at a known value is constructed carrier frequency. An algorithm for automatic recognition of digital modulation types has been developed using a multilayer neural network.

The influence of noise in the communication channel on the probability of recognizing the types of digital modulation at a known value of the carrier frequency is investigated. It was found that regardless of the type of noise in the communication channel, the law of error distribution in IQ data becomes close to normal. This fact is one important argument for the use of cumulative features in the task of automatic recognition of types of digital modulation. Therefore, the task of automatic recognition of digital modulation types is quite relevant. Further research may be aimed at expanding the range of high-order cumulative features used, due to which it is possible to increase the probability of correct recognition of types of digital modulation, and solving the recognition problem at an unknown value of the frequency and initial phase of the carrier signal.

Keywords: digital modulation recognition, multilayer neural network, SDR system, UAV.

### Постановка задачі

Боротьба з безпілотними літальними апаратами (БПЛА) є важливою складовою сучасних бойових дій, яка прямо впливає на їх результативність. Досвід бойових дій показує що знищення БПЛА не завжди є можливим, тому наперед виходять методи радіоелектронної протидії. Такі системи використовуються для радіоконтролю й радіомоніторингу завданням яких є виявлення, пеленгація й аналіз радіосигналів, а також контролю розподілу частот. Завдання розпізнавання видів цифрової модуляції відіграє важливу роль: по-перше, знання виду цифрової модуляції може бути безпосередньо використане для ідентифікації пристрою, що передає сигнал; по-друге, якщо декодування може бути виконане, то після розпізнавання виду цифрової модуляції передане повідомлення може бути використане для керуванням БПЛА або завадити керуванню супротивника; по-третє, розпізнавання видів цифрової модуляції необхідно для роботи станцій активних перешкод, які порушують передачу сигналів між пристроями. Вони створюють завади, які відповідають виду модуляції сигналу, який передається в просторі [1, 2, 4].

Отже, досить актуальним є завдання автоматичного розпізнавання видів цифрової модуляції. Автоматичне розпізнавання видів цифрової модуляції виконується SDR системою, яка автоматично класифікує вид цифрової модуляції одержуваного сигналу від БПЛА. Існують кілька підходів до розв'язку поставленого завдання: розпізнавання видів цифрової модуляції за формою сигнального сузір'я, граничний підхід і нейромережевий підхід тощо.

Наприклад, при використанні сигнального сузір'я, у підході будується сигнальне сузір'я й проводиться порівняння миттєвої кутової фази сигналу й форми сигнального сузір'я (гістограми розподілу миттєвих фаз) [12 - 14]. Загальними недоліками даного підходу є необхідність синхронізації за носійною частотою, вимога знання максимального числа рівнів сигналу, при цьому ймовірність правильного розпізнавання сильно залежить від ВСШ і якості приймача [13]. При використанні граничного підходу, за вихідними даними обчислюються значення інформативних ознак, далі проводиться порівняння цих значень із граничними значеннями, а граничні значення експериментально визначаються після аналізу отриманих даних. Цю процедуру, яка досліджена в багатьох роботах, наприклад, [1, 13 - 18], можна представити у вигляді дерева логічних рішень. Весь процес вибору параметрів дерева логічних розв'язків виконується вручну. Цей підхід вимагає великих часових ресурсів при великому обсязі набору розпізнаваних видів цифрової модуляції.

Останнім часом штучні нейронні мережі знайшли широке застосування у багатьох сучасних системах. У завданні розпізнавання образів нейронна мережа показує високу ефективність у порівнянні з іншими традиційними підходами. Застосування нейронної мережі в завданні автоматичного розпізнавання видів цифрової модуляції знаходиться на початкових етапах розвитку [7].

У роботі [22] автори досліджували завдання розпізнавання видів 2-FSK, ASK, 2-PSK, 4-PSK, 8-PSK, 16-QAM за допомогою нейронної мережі за кумулянтними ознаками. Використання нейромережевого підходу в завданні розпізнавання видів модуляції зводиться в загальному випадку до знаходження інформативних ознак розпізнавання, проведенню навчання нейронної мережі й використанню навченої нейронної мережі для розпізнавання. Інформативні ознаки можуть бути кумулянтними або спектральними. Нейромережевий підхід дає можливість досліджувати великий обсяг інформативних ознак, і весь процес виконується в автоматичному режимі. У даній роботі застосовується нейромережевий підхід за кумулянтними ознаками. Описаний метод обчислення й вибору інформативних кумулянтних ознак, які використовуються в розробленій моделі системи автоматичного розпізнавання видів цифрової модуляції за допомогою нейронної мережі за кумулянтними ознаками [3].

У завданні розпізнавання образів вибір інформативних ознак визначає успіх або неуспіх розв'язку завдання. У даній роботі досліджуються методи обчислення й вибору інформативних ознак, а також вплив шуму в каналі зв'язку на кумулянтні ознаки в  $IQ$  даних.

У теорії ймовірностей поняття моменту відіграє важливу роль, моменти випадкового процесу являють собою множину параметрів, яка характеризує розподіл щільності ймовірностей випадкового процесу. Однак ця множина не є єдиною й тим більше найкращою для розв'язку ряду практичних завдань. Інша множина параметрів - так званих кумулянтів, має властивості більш корисними як з теоретичної, так і із практичної точки зору. Кумулянти розподілу в багатьох випадках є набагато більш інформативними параметрами розподілу, ніж моменти. Це пов'язано, в основному з тим, що в багатьох практично важливих випадках кумулянтами високих порядків на відміну від моментів можна знехтувати. Більше того, існують такі розподіли випадкових величин, кумулянти яких, починаючи з деякого порядку, усе перетворюють на нуль, у той час як їхні моменти не дорівнюють нулеві. Як обчислюються кумулянти одномірного випадкового стаціонарного процесу та двомірного випадкового стаціонарного процесу описано у [7].

Необхідно розробити метод вибору кумулянтних ознак, щоб використовувати тільки ті ознаки, які збільшують ймовірність розпізнавання видів модуляції. У даному дослідженні описані підходи, на яких ґрунтуються методи вибору кумулянтних ознак.

Основна причина того, що в якості інформативних ознак у даній роботі використовуються кумулянтні ознаки, полягає в тому, що кумулянти вище другого порядку для гаусівського процесу дорівнюють нулю, а шуми в мережах зв'язку, у більшості випадків, носять гаусівський характер, більше того, закон розподілу помилок в  $IQ$  даних, незалежно від виду закону розподілу шуму в каналі зв'язку, близький до нормального закону.

Розглянемо структуру характеристичної функції для випадку, коли комплексні процеси  $d(k)$  і  $\bar{d}(k)$  являють собою суму чистого сигналу й розподіленого за нормальним законом шуму  $\eta(k)$  :  $d(k) = a(k) + \eta(k)$ . Характеристична функція двомірного випадкового процесу дорівнює

$$\varphi_{d,\bar{d}}(u,v) = M(e^{jud + jv\bar{d}}) = M(e^{ju(a+\eta) + jv(\bar{a}+\bar{\eta})}) = M(e^{j(ua+v\bar{a}) + j(\eta u + v\bar{\eta})}) \quad (1)$$

Якщо випадкові процеси незалежні, то математичне очікування їх добутку дорівнює добутку їх математичних очікувань, і, отже, характеристична функція (1) дорівнює добутку характеристичних функцій чистого сигналу й шуму:

$$\varphi_{d,\bar{d}}(u,v) = \varphi_{a,\bar{a}}(u,v) \varphi_{\eta,\bar{\eta}}(u,v) \quad (2)$$

Оскільки кумулянтами є коефіцієнти розкладання логарифма характеристичної функції в ряд Тейлора, то з (2) випливає, що кумулянт процесу дорівнює сумі кумулянтів чистого сигналу  $a(k)$  і кумулянту шуму  $\eta(k)$  в силу (3):



$$\ln \varphi_{d,\bar{d}}(u, v) = \ln \varphi_{a,\bar{a}}(u, v) + \ln \varphi_{\eta,\bar{\eta}}(u, v) \quad (3)$$

Співвідношення (3) підтверджує тезу про те, що у випадку нормального шуму значення кумулянтів сигналу вище другого порядку не залежать від рівня шуму, що спотворює корисний сигнал.

### Виклад основного матеріалу

Метод, за яким потрібно вибирати кумулянти для вхідного вектора нейронної мережі, є наступним:

- значення кумулянтів повинні бути значимими й різними для різних видів цифрової модуляції;
- значення кумулянтів не повинні залежати від величини ВСШ, тобто значення кумулянтів не повинні значно змінюватися, коли змінюються значення ВСШ.

У таблиці 1 представлені значення кумулянтів різних видів цифрової модуляції при значенні ВСШ = 20дБ, потужність чистого сигналу дорівнює одиниці.

Таблиця 1

Значення кумулянтів коли ВСШ = 20 дБ

	2-PSK	4-PSK	8-PSK	2-FSK	8-QAM	16-QAM QAM	64-QAM QAM	OFDM
C <sub>2,0</sub>	1,0000	0,0000	-0,0153	0,0003	0,6467	-0,0515	0,0041	-0,0293
C <sub>1,1</sub>	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9800	1,0018	1,0136	1,0442
C <sub>3,0</sub>	-0,0194	0,0243	0,0194	0,0002	-0,0269	-0,0461	0,0395	0,0365
C <sub>2,1</sub>	-0,0194	-0,0243	0,0055	0,0000	-0,0383	0,0078	-0,0957	-0,0046
C <sub>4,0</sub>	-2,0000	-0,9998	-0,0007	0,0002	-0,9346	-0,6317	-0,7238	-0,0791
C <sub>3,1</sub>	2,0000	0,0000	0,0306	-0,0006	-0,8234	0,1034	-0,0068	-0,0336
C <sub>2,2</sub>	-2,0000	-1,0000	-1,0002	-1,0000	-0,9346	-0,7062	-0,5985	0,0209
C <sub>5,0</sub>	0,1750	0,0258	-0,0167	0,0000	0,1758	-0,0762	0,1924	-0,0340
C <sub>4,1</sub>	0,1750	-0,0722	-0,0577	-0,0005	0,2128	0,1172	-0,0298	0,2691
C <sub>3,2</sub>	0,1750	0,1212	-0,0269	0,0000	0,2501	-0,0164	0,3929	-0,2076
C <sub>6,0</sub>	15,996	-0,0024	0,0153	0,0000	4,2119	-0,4792	0,0853	0,8882
C <sub>5,1</sub>	15,996	4,0083	0,0026	-0,0007	4,3558	1,9518	2,1676	0,08701
C <sub>4,2</sub>	15,996	-0,0005	-0,1685	0,0030	4,2053	-0,5074	-0,0115	-0,2494
C <sub>7,0</sub>	15,996	3,9912	4,0015	3,9999	4,3525	2,2456	1,5602	0,1449
C <sub>6,1</sub>	-3,0138	0,8247	0,0105	0,0000	-2,0113	-1,0021	0,3956	-0,6678
C <sub>5,2</sub>	-3,0139	-0,4994	0,0718	0,0002	-2,3288	0,4903	-1,9144	0,08434
C <sub>4,3</sub>	-3,0139	0,3767	0,4001	0,0033	-2,6184	-0,6712	-0,3330	-0,2154
C <sub>8,0</sub>	-2,9361	-1,0132	0,2270	0,0000	-2,7387	0,0552	-2,6075	0,7265
C <sub>7,1</sub>	-271,81	-34,033	-0,9156	0,0000	-46,140	-12,362	-16,316	-2,5546
C <sub>6,2</sub>	-271,81	0,02994	-0,0927	0,00015	-45,631	4,3513	-0,2413	-0,8581
C <sub>5,3</sub>	-271,81	-34,159	-0,0161	0,00567	-45,967	-13,557	-13,749	-1,3827
C <sub>4,4</sub>	-271,81	0,0128	1,7472	-0,0315	-45,487	4,6404	0,6484	1,2241

У відповідності зі сформульованим вище методом вибору кумулянтних ознак в якості признаков обрано 17 кумулянтів: C<sub>2,0</sub>, C<sub>4,0</sub>, C<sub>3,1</sub>, C<sub>2,2</sub>, C<sub>6,0</sub>, C<sub>5,1</sub>, C<sub>4,2</sub>, C<sub>3,3</sub>, C<sub>7,0</sub>, C<sub>6,1</sub>, C<sub>5,2</sub>, C<sub>4,3</sub>, C<sub>8,0</sub>, C<sub>7,1</sub>, C<sub>6,2</sub>, C<sub>5,3</sub>, C<sub>4,4</sub>. Кумулянт C<sub>1,0</sub> не обраний, тому що його значення при різних видах цифрової модуляції при різних ВСШ майже однакові. Кумулянти C<sub>3,0</sub>, C<sub>2,1</sub>, C<sub>5,0</sub>, C<sub>4,1</sub>, також не обрані, тому що їхні значення майже дорівнюють нулю. Розділові властивості декількох обраних ознак представлені на графіках значень ознак, на рис. 1 кожному виду цифрової модуляції відповідають значення того чи іншого кумулянта.

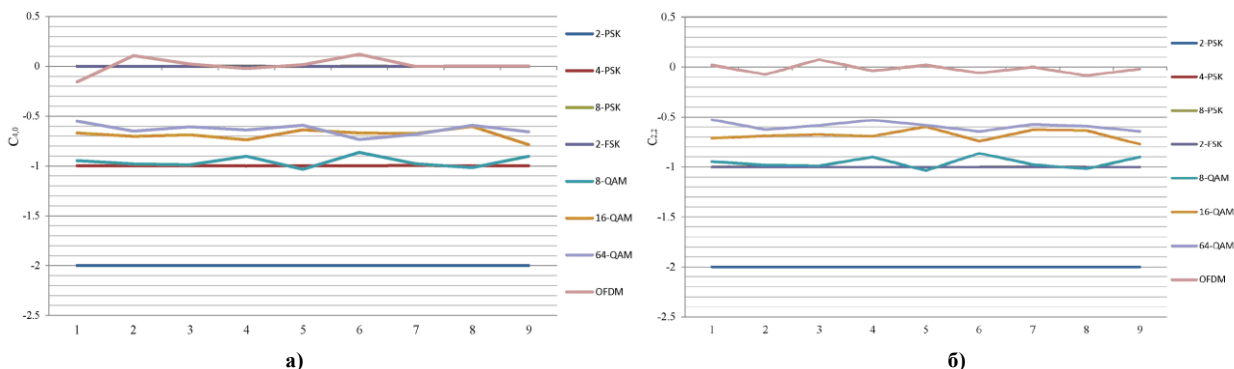


Рисунок 1. Графік розподілу значень кумулянту (ордината) для різних видів модуляції (номер реалізації за віссю абсцис): а – кумулянт C<sub>4,0</sub>, б – кумулянт C<sub>2,2</sub>

У багатьох роботах, присвячених розпізнаванню видів цифрової модуляції при нормальному законі розподілу шуму, представлені результати високої ефективності розв'язку даного завдання. Однак ефективність правильного розпізнавання у випадку, коли шум не гаусовський, не гарантованим. У даній роботі розглянуто три закони розподілу шуму в каналі зв'язку: нормальний, рівномірний і релеєвський.

Для дослідження впливу шуму в каналі зв'язку на кумулянтні ознаки використовуються інтерактивні функції аналізу одномірних розподілів, середовища Scilab . Ці функції дозволяють: імпорт вибірки одномірної випадкової величини із середовища Scilab ; графічне представлення й добір теоретичного розподілу до вибіркових даних; керування декількома можливими розв'язками для однієї вибірки; розрахунки значень функції розподілу для заданих значень випадкової величини.

Аналіз розподілу вибірки виконується з використанням графічного інтерфейсу користувача в середовищі Scilab. При нормальному законі розподілу шуму в каналі зв'язку, на графіках(рисунк 2,а і 2,б) функція щільності розподілу шуму в каналі зв'язку відображається темнішим кольором, помилки в  $I$  даних - світлішим кольором і в помилці  $Q$  даних - чорним кольором. Крива fit1 (огинача) являє собою графік функції щільності теоретичного нормального закону розподілу. Видно, що закони розподілу помилки в  $I$  і  $Q$  даних практично збігаються з нормальним законом розподілу.

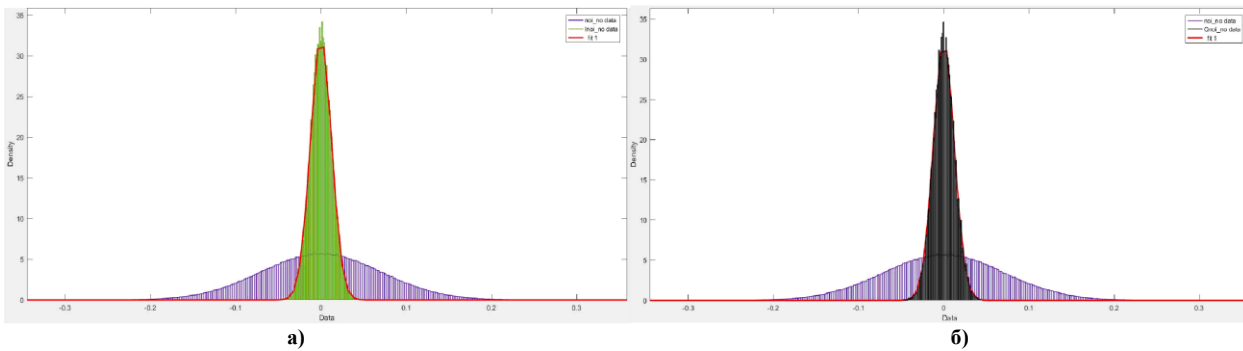


Рисунок 2. Графіки функцій щільності розподілу нормального шуму в каналі зв'язку: а - в  $I$  даних, б - в  $Q$  даних

При рівномірному законі розподілу шуму в каналі зв'язку, на графіках (рис. 3,а і 3,б) функція щільності розподілу завади в каналі зв'язку відображається темнішим кольором, помилки в  $I$  даних - світлішим кольором і в помилці  $Q$  даних - чорним кольором. Крива fit2 (огинача) також являє собою графік функції щільності теоретичного нормального закону розподілу, звідки випливає, що закони розподілу помилки в  $I$  і  $Q$  даних практично збігаються з нормальним законом розподілу.

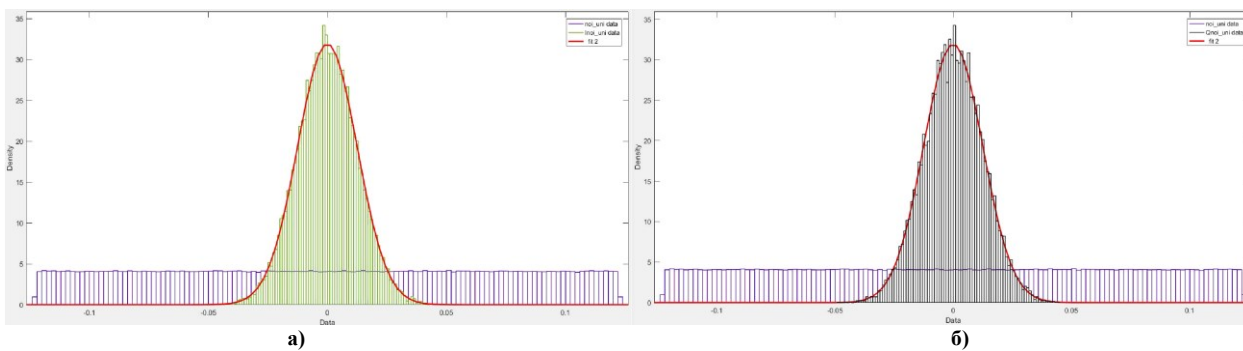
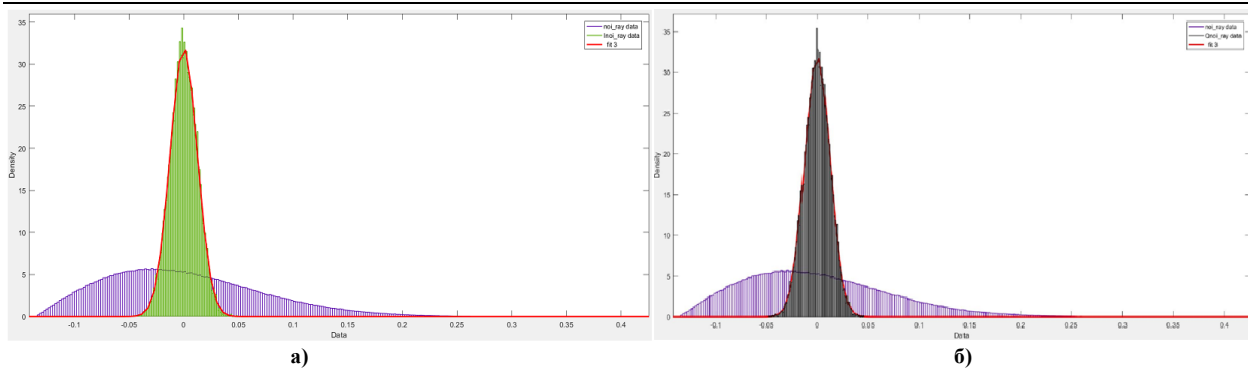


Рисунок 3. Графіки функцій щільності розподілу рівномірного шуму в каналі зв'язку: а - в  $I$  даних, б - в  $Q$  даних

При релеєвському законі розподілу шуму в каналі зв'язку, на графіках (рис. 4,а і 4,б) функція щільності розподілу завади в каналі зв'язку відображається темнішим кольором, помилки в  $I$  даних - світлішим кольором і в помилці  $Q$  даних - чорним кольором. Крива fit3 (огинача) також являє собою графік функції щільності теоретичного нормального закону розподілу до вибіркових даних, і помилкам в  $I$  і  $Q$  даних практично відповідає нормальний закон розподілу.

Рисунки 2 - 4 показують, що незалежно від виду шуму в каналі зв'язку закон розподілу помилки в  $I$  і  $Q$  даних стає близьким до нормального. Цей факт є ще одним важливим аргументом для використання кумулянтних ознак у завданні автоматичного розпізнавання видів цифрової модуляції.



а) б)  
Рисунок 4. Графіки функцій щільності розподілу релєвського шуму в каналі зв'язку: а - в  $I$  даних, б - в  $Q$  даних

Нормалізація помилки в  $IQ$  даних пов'язані з тим, що ці дані є результатом великого числа різних математичних операцій і особливо підсумовування, викликаних проходженням вихідного сигналу через фільтр низьких частот. У теорії ймовірностей доведено, що сума досить великого числа незалежних (або слабо залежних) випадкових величин, підлеглих більшості законів розподілу, приблизно підкоряється нормальному закону, і це виконується тим точніше, чим більша кількість випадкових величин підсумується [21].

Зробимо порівняння дисперсій шуму в каналі зв'язку й у помилці в  $IQ$  даних. Нехай переданий сигнал має дисперсію 0.5, ВСШ = 20 дБ, тоді дисперсія шуму в каналі зв'язку рівна 0.005. У пакеті прикладних програм Statistics також можна обчислити математичне очікування й дисперсію вибірки. Значення цих параметрів для різних законів розподілу шумів представлені нижче на рисунках 5 - 7.

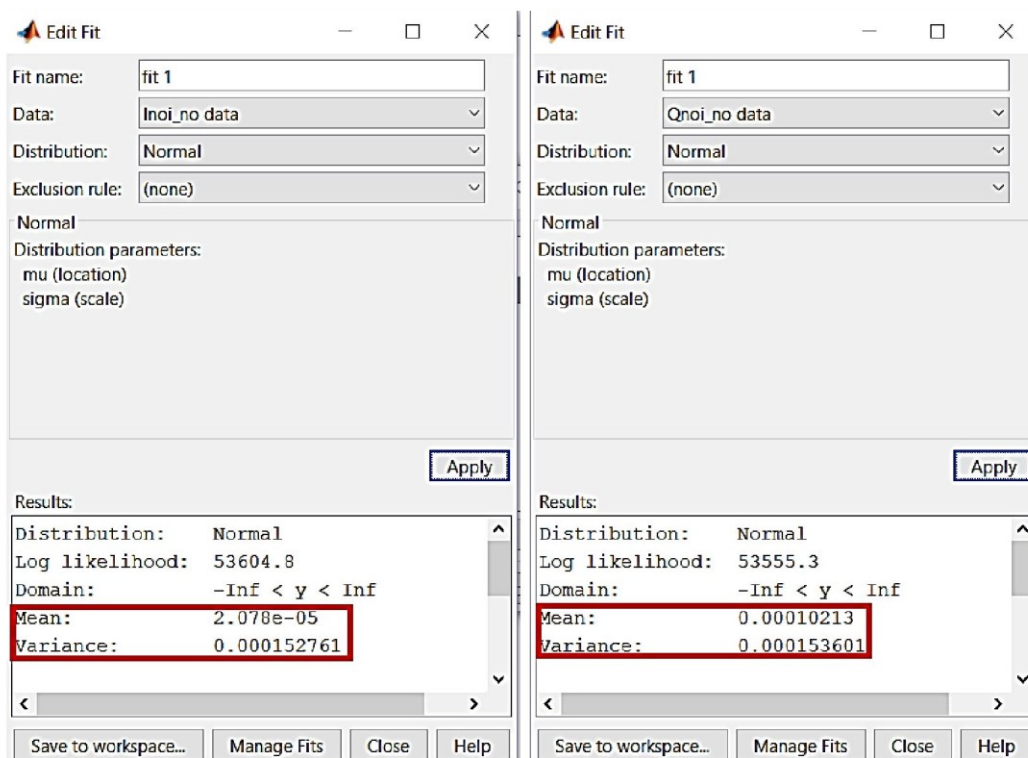


Рисунок 5. Параметри розподілу помилки в  $IQ$  даних при нормальному законі розподілу завади в каналі зв'язку

Оцінка помилки в  $IQ$  даних виконувалася в такий спосіб. Спочатку обчислювалися  $IQ$  дані при відсутності завади в каналі зв'язку, при цьому дисперсія  $I$  і  $Q$  даних рівні 0.5, далі обчислювалися  $IQ$  дані при наявності завади в каналі зв'язку, а різниця цих даних дорівнює значенню помилки в  $IQ$  даних, звідси можна визначити дисперсію помилки в  $IQ$  даних.

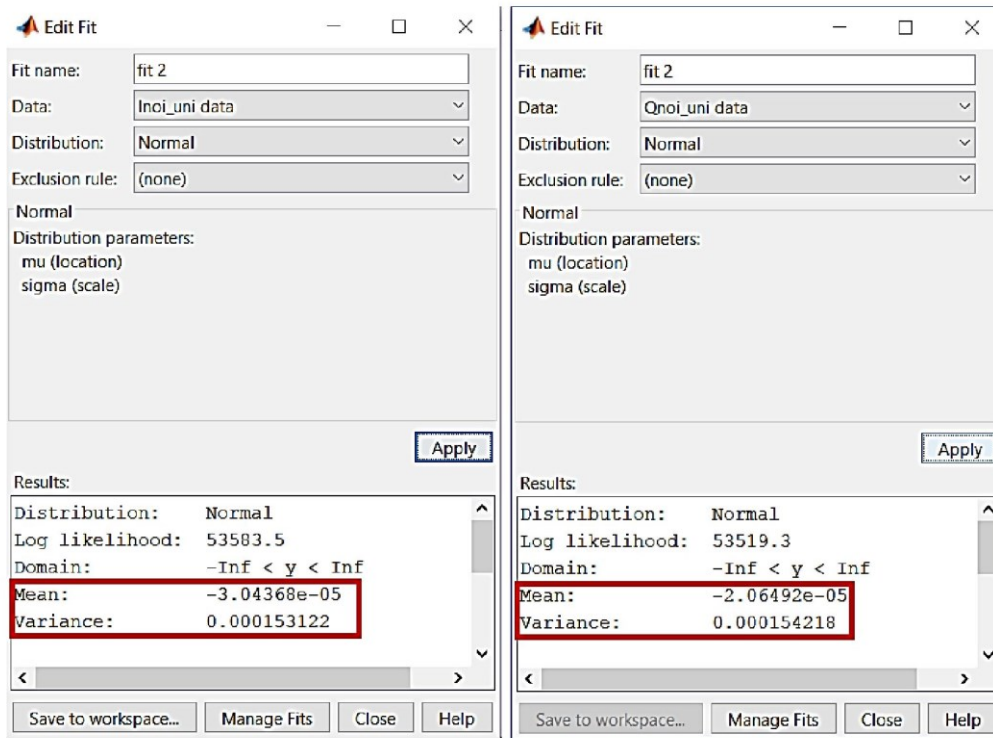


Рисунок 6. Параметри розподілу помилки в IQ даних при рівномірному законі розподілу завади в каналі зв'язку

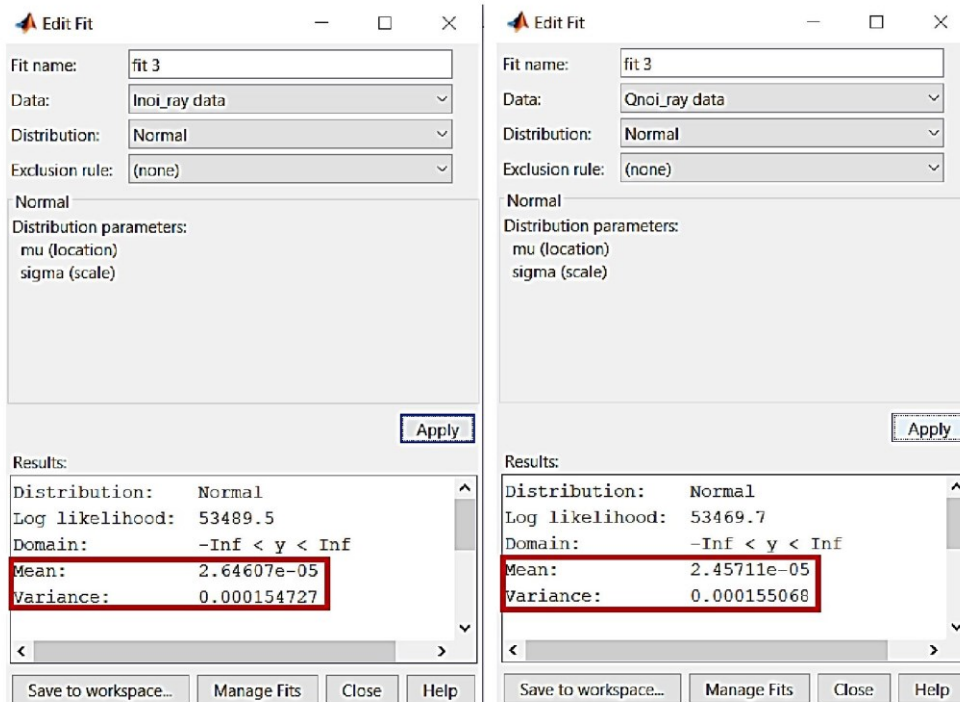


Рисунок 7. Параметри розподілу помилки в IQ даних при релесвському законі в каналі зв'язку

З рисунків 5 - 7 випливає, що дисперсії помилки в  $I$  і  $Q$  даних при різних видах шуму в каналі зв'язку рівні 0,000153916 у середньому й зменшуються в 32,5 рази в порівнянні з дисперсією шуму в каналі зв'язку.

Оскільки вихідним даним є сигнал  $I + jQ$ , тому дисперсія помилки у вихідних даних нашого завдання дорівнює сумі дисперсії помилки  $I$  і дисперсії помилки  $Q$ . Розглянемо коефіцієнти ДО зменшення дисперсії шуму в каналі зв'язку  $k$  помилок у вихідних даних поставленого завдання при різних ВСШ (таблиця 2).

Отримані результати в таблиці 2 показують, що дисперсія помилки у вихідних даних менше дисперсії шуму в каналі зв'язку в 16 раз. Це відбувається за допомогою фільтра, фільтр забирає високочастотні складові, тим самим забирає шум. Тому дисперсія помилки у вихідних даних стає менше, значення

коефіцієнта зменшення  $k$  залежить від використовуваного фільтра. Ця властивість дозволяє розпізнавати сигнали при низьких ВСШ.

Таблиця 2

**Коефіцієнти зменшення дисперсії шуму в каналі зв'язку до помилок у вихідних даних при різних ВСШ**

Вид шуму	Відношення сигналу до шуму в каналі зв'язку					
	0 дБ			20 дБ		
	у каналі зв'язку	в вихідних даних	$k$	у каналі зв'язку	в вихідних даних	$k$
Нормальний	0,5	0,0309	16,1812	0,005	0,000306	16,3399
Рівномірний	0,5	0,0310	16,1290	0,005	0,000305	16,3934
Релеєвський	0,5	0,0308	16,2338	0,005	0,000311	16,1290

### Висновки

Проведене дослідження ознак нейромережевого розпізнавання (кумулянтів), які будуть використовуватися далі в якості інформативних ознак для розв'язку завдання розпізнавання видів цифрової модуляції БПЛА. Запропонований метод вибору інформативних ознак, що володіє властивістю універсальності, при якому для будь-якого набору видів цифрової модуляції можна вибрати набір інформативних ознак для вхідного вектора багатопарової нейронної мережі. У результаті дослідження для поставленого завдання як ознак обрано 17 кумулянтів, у тому числі кумулянти непарного порядку.

З'ясовано, що незалежно від виду шуму в каналі зв'язку закон розподілу помилки в  $IQ$  даних стає близьким до нормального. Цей факт є ще одним важливим аргументом для використання кумулянтних ознак у завданні автоматичного розпізнавання видів цифрової модуляції БПЛА. Крім того, дисперсія помилки в  $IQ$  даних менше дисперсії шуму в каналі зв'язку в десятки раз, і це дозволяє розпізнавати сигнали при низьких ВСШ. Цей факт є одним із важливих аргументів для використання кумулянтних ознак у завданні автоматичного розпізнавання видів цифрової модуляції. Надалі дослідження можуть бути спрямовані на розширення набору використовуваних кумулянтних ознак високих порядків, за рахунок яких можна підвищити ймовірності правильного розпізнавання видів цифрової модуляції, а отже підвищити ймовірність ефективної протидії БПЛА.

### Література

1. Аведьян, Э.Д. К выбору кумулянтных признаков в задаче распознавания видов цифровой модуляции радиосигналов / Э.Д. Аведьян, В.Н. Дам // Информатизация и связь. - 2015. - № 4. - С. 11 - 15.
2. Аджемов, С.С. Методы распознавания видов цифровой модуляции сигналов в когнитивных радиосистемах / С.С. Аджемов, Н.В. Кленов, М.В. Терешонок, Д.С. Чиров // Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия. - 2015. - № 6. - С. 19 - 27.
3. Бакулин, М.Г. Технология OFDM: Учебное пособие для вузов / М.Г. Бакулин, В.В. Крейнделин, А.М. Шлома, А.П. Шумов. - М.: Горячая линия - Телеком, 2017. - 352 с.
4. Гула І.В. Дослідження нейромереж для керування системою Software Defined Radio / Гула І.В., Полікаровських О.І. // Herald of Khmelnytskyi national university. - 2021. - №6. - С. 150-156
5. Дьяконов, В.П. Scilab полный самоучитель / В.П. Дьяконов. - М.: ДМК Пресс, 2012. - 768 с.
6. Магда, Ю.С. LabVIEW: практический курс для инженеров и разработчиков / Ю.С. Магда. - М.: ДМК Пресс, 2012. - 208 с.
7. Малахов, А.Н. Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований / А. Н Малахов. - М.: Советское радио, 1978. - 376 с.
8. Медведев, В.С. Нейронные сети. Scilab 6 / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин. - М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2001. - 630 с.
9. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин; пер. с англ. под ред. Н.Н. Кукуль. - 2-е изд. - М.: Издательный дом "Вильямс", 2006. - 1104 с.
10. Marko, M. R. Application of artificial neural networks in classification of digital modulations for software defined radio / M.R. Marko, M.N. Aleksandar, J.N. Natasa // IEEE EUROCON 2009. - P. 1700 - 1706.
11. Taira, S. Automatic classification of QAM signals by neural networks / S. Taira // Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP '01), 2001. - Vol. 2. - P. 1309 - 1312.
12. Young, A. F. Classification of digital modulation types in multipath environments / A.F. Young // Master's Thesis. Naval Postgraduate School, Monterey, CA 93943-5000, California. June 2008. P. 1 - 65.
13. Velampalli, C. Hierarchical blind modulation classification in the presence of carrier frequency offset / C. Velampalli // Master's Thesis. Communications Research Center, May 2010. - P. 1 - 39.
14. Tejwant, S. Performance comparison of fuzzy c-means with respect to other clustering algorithm / S.

Tejwant, M. Mr. Manish // International journal of advanced research in computer science and software engineering, May 2014. - Vol. 4. - Issue 5. - P. 89 - 93.

15. Bagga, J. Automatic modulation classification using statistical features in fading environment/ J. Bagga, N. Tripathi // International Journal of Advanced Research in electrical, electronics and instrumentation engineering, August 2013, Vol. 2, Issue 8. P. 3701 - 3709.

16. Muhlhaus, M.S. Automatic Modulation Classification for MIMO Systems Using Fourth-Order Cumulants / M. S. Muhlhaus, M. Oner, O. A. Dobre, H. U. Jakel, F. K. Jondral // Vehicular Technology Conference (VTC Fall). 2012 IEEE. P. 1 - 5.

17. Marchard, P. Classification of linear modulations by a combination of different orders cyclic cumulants / P. Marchard, J. L. Lacoume, C. Martret // Proc. Workshop on HOS, 1997. P. 47 - 51.

18. Narendar, M. Modulation classification for cognitive radios using cumulants based on fractional lower order statistics / M. Narendar, A. P. Vinod, A. S. Madhukumar and

19. K. Krishna. // General Assembly and Scientific Symposium, 2011 XXXth URSI. - P. 1 - 4.

20. Dobre, O. Higher-order cyclic cumulants for high order digital modulation classification / O. Dobre, Y. BarNess, W. Su // Proceedings of IEEE MILCOM 2003, October 2003. - Vol. 1. - P. 112 - 117.

21. Iversen, A. Classification of digital modulation schemes using multi-layered perceptrons / A. Iversen // Report, School of Mathematical and Computer Sciences, Heriot-Watt University, 2004.

22. Wong, M. L. D. Automatic digital modulation recognition using artificial neural network and genetic algorithm / M.L.D. Wong, A.K Nandi // Signal Processing 84. 2004. - P. 351 - 365.

#### References

1. Avedian, Э.Д. К выбору кумулянтных признаков в задаче распознавания видов тсифровой модуляции радиосигналов / Э.Д. Avedian, V.N. Dam // Информатизация и связь. - 2015. - # 4. - С. 11 - 15.

2. Adzhemov, S.S. Методы распознавания видов тсифровой модуляции сигналов в кохнитивных радиосистемах / S.S. Adzhemov, N.V. Klenov, M.V. Tereshonok, D.S. Chyrov // Vestnyk Moskovskoho Unyversyteta. Seryia 3. Fyzyka. Astronomiya. - 2015. - # 6. - С. 19 - 27.

3. Bakulyн, M.H. Tekhnolohiya OFDM: Uchebnoe posobyе dlia vuzov / M.H. Bakulyн, B.V. Kreindelyн, A.M. Shloma, A.P. Shumov. - M.: Horiachaia lynyа - Telekom, 2017. - 352 s.

4. Hula I.V. Doslidzhennia neiromerezh dlia keruvannia systemoiu Software Defined Radio /Hula I.V., Polikarovskyyh O.I.// Herald of Khmelnytskyi national university. - 2021. - #6. - S. 150-156

5. Diakonov, V.P. Scilab polnyi samouchytel / V.P. Diakonov. - M.: DMK Press, 2012. - 768 s.

6. Mahda, Yu.S. LabVIEW: prakticheskyi kurs dlia ynzhenеров y razrabotchykov / Yu.S. Mahda. - M.: DMK Press, 2012. - 208 s.

7. Malakhov, A.N. Kumulantnyi analiz sluchainykh nehaussovykh protsessov y ykh preobrazovaniy / A. N Malakhov. - M.: Sovetskoe radio, 1978. - 376 s.

8. Medvedev, V.S. Neironnye sety. Scilab 6 / V.S. Medvedev, V.H. Potemkyn.- M.: DYALOH-MYFY, 2001. - 630 s.

9. Khaikyn, S. Neironnye sety: polnyi kurs / S. Khaikyn; per. s anhl. pod red. N.N. Kussul. - 2-e yzd. - M.: Yzdatelnyi dom "Vyliams", 2006. - 1104 s.

10. Marko, M. R. Application of artificial neural networks in classification of digital modulations for software defined radio / M.R. Marko, M.N. Aleksandar, J.N. Natasa // IEEE EUROCON 2009. - P. 1700 - 1706.

11. Taira, S. Automatic classification of QAM signals by neural networks / S. Taira // Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 01), 2001. -Vol. 2. - P. 1309 - 1312.

12. Young, A. F. Classification of digital modulation types in multipath environments /A.F. Young // Masters Thesis. Naval Postgraduate School, Monterey, CA 93943-5000, California. June 2008. P. 1 - 65.

13. Velampalli, C. Hierarchical blind modulation classification in the presence of carrier frequency offset / C. Velampalli // Masters Thesis. Communications Research Center, May 2010. - P. 1 - 39.

14. Tejwant, S. Performance comparison of fuzzy c-means with respect to other clustering algorithm / S. Tejwant, M. Mr. Manish // International journal of advanced research in computer science and software engineering, May 2014. - Vol. 4. - Issue 5. - P. 89 - 93.

15. Bagga, J. Automatic modulation classification using statistical features in fading environment/ J. Bagga, N. Tripathi // International Journal of Advanced Research in electrical, electronics and instrumentation engineering, August 2013, Vol. 2, Issue 8. P. 3701 - 3709.

16. Muhlhaus, M.S. Automatic Modulation Classification for MIMO Systems Using Fourth-Order Cumulants / M. S. Muhlhaus, M. Oner, O. A. Dobre, H. U. Jakel, F. K. Jondral // Vehicular Technology Conference (VTC Fall). 2012 IEEE. P. 1 - 5.

17. Marchard, P. Classification of linear modulations by a combination of different orders cyclic cumulants / P. Marchard, J. L. Lacoume, C. Martret // Proc. Workshop on HOS, 1997. P. 47 - 51.

18. Narendar, M. Modulation classification for cognitive radios using cumulants based on fractional lower order statistics / M. Narendar, A. P. Vinod, A. S. Madhukumar and

19. A.K. Krishna. // General Assembly and Scientific Symposium, 2011 XXXth URSI. - P. 1 - 4.

20. Dobre, O. Higher-order cyclic cumulants for high order digital modulation classification / O. Dobre, Y. BarNess, W. Su // Proceedings of IEEE MILCOM 2003, October 2003. - Vol. 1. - P. 112 - 117.

21. Iversen, A. Classification of digital modulation schemes using multi-layered perceptrons / A. Iversen // Report, School of Mathematical and Computer Sciences, Heriot-Watt University, 2004.

22. Wong, M. L. D. Automatic digital modulation recognition using artificial neural network and genetic algorithm / M.L.D. Wong, A.K Nandi // Signal Processing 84. 2004. - P. 351 - 365.

Анатолій ДАНИЛКОВИЧ

Київський національний університет технологій та дизайну

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

Богдан НАУМЕНКО

Київський національний університет технологій та дизайну

e-mail: [bohdanych2011@gmail.com](mailto:bohdanych2011@gmail.com)

## ВИКОРИСТАННЯ НАТУРАЛЬНИХ ШКІР У ВЗУТТЄВОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Використання танідовмісної композиції з попереднім жируванням та фіксацією дифундованих реагентів алюмокалієвим галуном забезпечує формування шкіряного матеріалу з напівфабрикату великої рогатої худоби хромового дублення з комплексом гігієнічних, фізико-механічних і технологічних характеристик, що відповідають вимогам до матеріалів для швейних виробів. Отриманий шкіряний матеріал за гігроскопічністю і паропроникністю перевищує промислові зразки відповідно на 13,6 і 11,0 %, а синтетичні шкіри в 5,5–6,0 і 7,0–8,0 раз. Натуральний матеріал, отриманий за розробленою технологією, можна розглядати як перспективний завдяки перевагам порівняно з синтетичними шкірами та відповідністю ДСТУ 2726-94 для виготовлення якісного верху взуття.

**Ключові слова:** шкіряний напівфабрикат хромового дублення, наповнення-жирування, фізико-хімічні властивості, порівняння з синтетичною шкірою, переваги.

Anatolii DANYLKOVIYCH, Bohdan NAUMENKO

Kyiv National University of Technologies and Design

## USE OF NATURAL LEATHER IN SHOE PRODUCTION

In the work, the formation of leather material from semi-finished cattle was carried out – medium chrome-tanned beef at the stage of filling and fattening after it is planed to thickness 0,9–1,1 mm. In this case, the product of the interaction of 2-naphtholsulfonic acid with dioxydiphenylsulfone was used – BNS synthetic tanner (ТУ 17-06-165-89), mimosa extract with a tannin content of 79.0% and an emulsion of a fattening preparation Fosfol L-1301 by company «Cromogenia Units, S.A.» (Spain). Preliminary greasing of the semi-finished product and final fixation of reagents diffused into the structure of the semi-finished product with alumokalium alum gives the leather material a complex of hygienic, physical-mechanical and technological characteristics that meet the requirements for materials for sewing products.

The resulting leather material exceeds industrial samples by 13.6% and 11.0%, respectively, in terms of hygroscopicity and vapor permeability. Compared to natural leather, synthetic leather is characterized by significantly lower hygienic properties, and in terms of specific surface area and sorption capacity, they are inferior to natural leather materials by at least 32.0 and 17.0 times, respectively. Accordingly, their vapor permeability and hygroscopicity are 7.0–8.0 and 5.5–6.0 times lower than natural leather. At the same time, to a greater extent, this also applies to a complex of physical and mechanical indicators, including increased defectability and reduced formability during the operation of footwear products. At the same time, their initial aesthetics are relatively quickly lost. The natural leather material obtained by the developed technology can be considered promising due to its advantages compared to synthetic leathers and compliance (ДСТУ 2726-94) for the production of high-quality shoe uppers.

**Key words:** chrome tanned leather semi-finished product, filling and fattening, physical and chemical properties, comparison with synthetic leather, benefits.

### Постановка проблеми

Сучасні тенденції розвитку виробництва шкіряних матеріалів широкого асортименту свідчить про те, що основна увага в наукових і технологічних дослідженнях приділяється питанням щодо створення матеріалів з комплексом важливих експлуатаційних властивостей та зменшенню собівартості їх виробництва. Останнім часом питома вага синтетичних шкір у загальному обсягу шкіряної продукції збільшується зважаючи на відносну простоту технології їх виробництва [1, 2], меншу технологічну небезпеку, кращі розкрійні властивості [3] і нижчу собівартість. Незважаючи на це натуральні шкіри мають низку переваг. Це стосується комплексу гігієнічних та фізико-механічних властивостей, естетичності, високої довговічності та ефективного використання вторинних ресурсів. Особливо це важливо з підвищеними вимогами до експлуатаційних властивостей шкіряних матеріалів для взуттєвих виробів, їх екологічності та ефективної утилізації після експлуатації [4].

Разом з тим, слід відзначити багатостадійність і трудомісткість технологій виробництва натуральних шкіряних матеріалів [5] та особливостями отримання і зберігання сировини [6], яка залежно від походження характеризується неоднорідністю структури, широким діапазоном площі та контуру. Для підвищення рівномірності структури і властивостей, технології виробництва натуральних шкір передбачають необхідність проведення стадії наповнювання з використанням широкого асортименту хімічних реагентів і матеріалів [7], залежно від виду сировини та особливостей виробництва шкіряних матеріалів.

### Аналіз попередніх досліджень і публікацій

Аналіз науково-технічної літератури свідчать про використання у взуттєвому виробництві шкіряних матеріалів натурального і синтетичного походження. При цьому перевага віддається натуральним матеріалам завдяки, в першу чергу, комплексу гігієнічних і фізико-механічним властивостям. Це

обумовлено особливостями макро- і мікроструктури натуральних шкіряних матеріалів. Як відомо [2] пориста структура шкіри включає макропори діаметром 20–40 мкм утворені переплетенням пучків колагенових волокон і пори між первинними волокнами діаметром до 1,2 мкм та мікропори між фібрилами діаметром до 0,12 мкм. Причому основна питома поверхня шкіри складає близько 30 м<sup>2</sup>/г і відповідає, в основному, порам діаметром менше 0,2 мкм, а 5,3 м<sup>2</sup>/г – макропорам. В той час структура синтетичних шкір характеризується переважно наявністю пор діаметром 4–10 мкм, з'єднаних каналами діаметром 0,5–2,0 мкм [8] при питомій поверхні 3–4 м<sup>2</sup>/г. Разом з тим синтетичні шкіри, внаслідок низької гідрофільності матеріалу, мають невисокі гігієнічні властивості. Це обумовлює їх низьку здатність накопичувати вологу у взуттєвих виробках [10], які здебільшого втрачають сорбційну здатність уже за 20–30 хв, в той час як натуральні шкіри здатні накопичувати вологу протягом 10 год. Вироби з натуральної шкіри при експлуатації збільшують площу в 4–6 разів протягом 10–12 год і легко приформовуються до стопи людини порівняно з синтетичними матеріалами [11]. При цьому синтетичні шкіри є нестійкими до знакоперемінних навантажень, проколів і розривів, мають дефектосхильну лицьову поверхню, що не підлягає реставрації. Незважаючи на це світовий обсяг виробництва натуральних шкір для взуття і одягу збільшується порівняно з виробництвом натуральних шкір [12]. Оскільки шкіряний напівфабрикат хромового дублення великої рогатої худоби характеризується нерівномірною структурою і властивостями за топографічними ділянками, особливо з сировини яловиці, то для отримання натурального матеріалу більш рівномірної товщини за площею виникає необхідність у проведенні процесу наповнювання.

Враховуючи фізико-хімічні і технологічні властивості натуральної сировини при виготовленні шкіряних матеріалів для взуттєвих виробів на стадії наповнювання-жирування напівфабрикату хромового дублення використовуються композиції природних і синтетичних реагентів різного хімічного складу. Так у роботі [13] досліджено вплив композицій танідів з алюмосилікатами і синтетичним дубителем на формування натуральної шкіри. При цьому отримані еластичні шкіри характеризуються підвищеними експлуатаційними властивостями. Авторами роботи [14] досліджений вплив рослинного екстракту хни на комплекс показників шкір хромового дублення. Використання танідів мімози сумісно з оксазолідном [15] при наповненні напівфабрикату хромового дублення з шкір великої рогатої худоби дає можливість виготовляти шкіри з натуральної сировини з підвищеними фізико-хімічними показниками. Для підвищення експлуатаційних властивостей натурального матеріалу автором [16] досліджено комплексний вплив танідів сумаху і сполук алюмінію на властивості шкіряного напівфабрикату. Встановлено, що таке поєднання реагентів дає можливість підвищити міцнісно-деформаційні показники отриманих шкір. Дослідження впливу плазмової модифікації танідів і шкіряного напівфабрикату на процес їх взаємодії і волокнисту структуру матеріалу [17]. Встановлено механізм взаємодії в системі колаген дерми-дубитель. При виготовленні шкір для верху взуття автори рекомендують комплексно використовувати таніди квебрахо і дисперсії полімерів [18]. Застосування таких композицій сприяє отриманню якісної лицьової поверхні матеріалу з рівномірним забарвленням при 50 % економії натурального дубителя. У роботі [19] досліджено пластифікаційні властивості композиції аніонного типу на основі лецитину і пальмового масла для комплексного наповнювання шкіряного напівфабрикату. При цьому отримано натуральний шкіряний матеріал з високим ступенем формування його структури. Використання авторами роботи [20] дисперсій поліакрилату і полімалеїнату з розміром частинок 17–562 нм на завершальній стадії наповнювання напівфабрикату хромового дублення з сировини великої рогатої худоби і свиней забезпечує формування шкіри для деталей взуттєвих матеріалів з підвищеними гігієнічними властивостями.

Таким чином, проведено порівняльний аналіз властивостей синтетичних і натуральних шкір. Завдяки перевагам натуральних шкір перед синтетичними для верху взуттєвих виробів, їх можна вважати незамінними. Для підвищення однорідності властивостей за топографічними ділянками шкіряного напівфабрикату хромового дублення проведено процес його наповнювання-жирування з використанням танідовмісної композиції.

#### Формулювання цілей статті

Метою роботи є дослідження процесу формування натуральних шкір для верху взуття на стадії наповнювання-жирування напівфабрикату хромового дублення з сировини великої рогатої худоби з використанням танідовмісної композиції та їх переваги порівняно з синтетичними шкіряними матеріалами.

#### Виклад основного матеріалу

Для дослідження у роботі використано п'ять шт. двоеного напівфабрикату яловиці легкої після його подублювання сполуками хрому (III) і стругання на товщину 0,9–1,1 мм середньою площею 254,0 дм<sup>2</sup>/шт., вироблений за технологією публічного АТ «Чинбар» з температурою зварювання 103 °С, встановленій у стандартній точці. Відібраний напівфабрикат розділений за методом чергування половинок [21] по хребтовій лінії на групи – дослідну і контрольну. Наповнювально-жирувальні процеси виконуються при обертанні барабана дослідного цеху об'ємом 0,5 м<sup>3</sup> з частотою 12–18 хв<sup>-1</sup>. Після подвійного промивання дослідної групи зразків з 100 % витратою води від їх маси за температур 25–27 °С і 33–36 °С протягом 15–20 хв додавали нейтралізуючі розчини 10 % концентрації – форміат і гідрокарбонат натрію до рН 5,8–6,3. Для наповнювання-жирування напівфабрикату температуру середовища підвищували дворазовим промиванням по 10–15 хв до 53–55 °С. Як жирувальний препарат використано емульсію Fosfol L-1301 компанії «Cromogenia Units, S.A.» (Іспанія) з витратою 7 % маси напівфабрикату. Через 20 хв додається продукт



взаємодії 2-нафтолсульфокислоти з діоксидифенілсульфоном – синтетичний дубитель БНС (ТУ 17-06-165-89), а ще через 10 хв екстракт мімози з вмістом танідів 81,7 % та витратами відповідно 1,2 і 5,0 мас. %. Для фіксації дифундованих реагентів на волокнистій структурі напівфабрикату через 60 хв додають 5 мас. % алюмокалієвого галууну. При цьому рН розчину знижується до 4,2. Для визначення впливу тільки наповнення на властивості напівфабрикату хромового дублення отримано відповідні зразки у лабораторних умовах. Технологічний процес завершувався промиванням протягом 5–10 хв за температури 20–25 °С. Сушильно-зволожувальні процеси виконувались за методикою ПАТ «Чинбар».

Промисловим варіантом технології наповнювання-жирування напівфабрикату хромового дублення передбачено застосування жирувального препарату на основі фенольних сполук Trupol DL фірми Trumpler (Німеччина), полімерного наповнювача Relugan D фірми BASF (Німеччина), диспергатора танідів Trupotan G фірми Trumpler (Німеччина), екстракту квебрахо (Китай). Для фіксування наповнювально-жирувальних матеріалів передбачено використання 1 % мурашиної кислоти від маси напівфабрикату.

Фізико-хімічні властивості отриманого шкіряного матеріалу визначали за методиками [21]. Зокрема, пористість напівфабрикату – за відношенням об'ємів пор зразка, заміряних шляхом їх заповнення гасом, до його уявного об'єму; об'ємний вихід – за об'ємом напівфабрикату, що містить 100 г білка; паропроникність – ексікаторним методом з використанням сірчаної кислоти густиною 1,84 г/мл; повітропроникність – за об'ємом повітря, що проходить через одиницю площі напівфабрикату при різниці тисків з обох боків зразка 1 кПа; гігроскопічність – за різницею між масою зразків при 100 % та витриманих у стандартних умовах; питома поверхня встановлена за сорбцією парів води. Фізико-механічні показники напівфабрикату – розраховані після випробування зразків витриманих у стандартних умовах на розривній машині марки РТ-250М при швидкості деформування 90 мм·хв<sup>-1</sup>.

В процесі наповнювання-жирування шкіряного напівфабрикату хромового дублення відбувається поступове формування його об'єму (таблиця 1). При цьому спостерігається збільшення товщини зразків після наповнювання та наповнювання-жирування відповідно на 15,0 і 22,0 %. Аналогічним чином змінюються об'ємний вихід і питома поверхня зразків. Це обумовлено зменшенням взаємодії між елементарними волокнами і збільшенням відстаней між пучками волокон та окремими первинними волокнами і фібрилами. При цьому жирувальний матеріал сорбується на поверхні волокон, таніди дифундують у між структурні проміжки і поступово відкладаються у крупних порах. Разом з тим, для наповнених-жированих зразків спостерігається зменшення гігроскопічної ємності та паропроникності внаслідок зниження гідрофільності поверхні колагенових волокон при сорбції жирувальної емульсії.

Таблиця 1

**Фізико-хімічні властивості шкіряного напівфабрикату хромового дублення на різних стадіях формування**

Показник	Напівфабрикат для верху взуття			
	хромового дублення	дослідний		промисловий
		наповнений	наповнений-жирований	
Товщина, мм	1,0	1,15	1,22	1,2
Границя міцності при розриванні, МПа	14,0	14,7	16,4	15,9
Подовження при напруженні 10 МПа, %	21,0	25,0	39,0	37,0
Подовження при розриванні, %	33,0	47,0	65,0	61,0
Пористість, %	49,0	56,0	60,0	58,0
Питома поверхня, м <sup>2</sup> /г	52,0	63,0	71,0	64,0
Об'ємний вихід, см <sup>3</sup> /100 г білка	183,0	215,0	256,0	239,0
Гігроскопічність, %	7,8	8,3	7,4	6,6
Паропроникність, мг/(см <sup>2</sup> ·год), з боку бахтарми	13,2	11,7	9,1	8,2
– лицьового	4,7	3,9	2,7	2,5
Повітропроникність, мл/(см <sup>2</sup> ·год), з боку бахтарми	410,0	590,0	720,0	680
– лицьового	330,0	530,0	590,0	560
Сорбційна ємність, мг/г	9,7	10,5	9,2	8,6

Порівняльний аналіз наповнених-жированих зразків дослідного і промислового напівфабрикату свідчить про дещо більші значення об'ємного виходу напівфабрикату і гігієнічних характеристик. Зокрема, це стосується паро- і повітропроникності, що може бути обумовлено хімічним складом реагентів використаних у промисловій технології.

Разом з тим, отримані зразки шкіряного напівфабрикату відрізняються суттєво вищими гігієнічними показниками з боку бахтарми порівняно з лицьовою поверхнею. Особливо це стосується паропроникності наповненого-жированого напівфабрикату. Це важливо при використанні такого напівфабрикату у взуттєвому виробництві з орієнтацією деталей взуття лицьовою поверхнею на зовні. Цей ефект обумовлений ефективним наповненням лицьового шару шкіряного напівфабрикату в результаті заповнення реагентами отворів, утворених внаслідок видалення волосяного покриву.

Враховуючи суттєво нижчу вартість синтетичних шкір та збільшення обсягів їх виробництва в останні роки, слід відзначити використання їх для обмеженого асортименту взуттєвих і одягових виробів, переважно літнього сезону експлуатації. Це обумовлено, в першу чергу, значно нижчими експлуатаційними показниками синтетичних шкір порівняно з натуральними матеріалами, що добре видно при порівнянні їх характеристик (таблиці 1, 2).

Таблиця 2

**Фізико-хімічні властивості синтетичної шкіри [2, 9]**

Показник	Одиниця виміру	Значення
Питома поверхня	м <sup>2</sup> /г	1,5–2,0
Паропроникність	мг/(см <sup>2</sup> ·год)	1,5
Гігроскопічність	%	0,9
Сорбційна ємність	мг/г	0,5

Наведені дані свідчать про те, що синтетичні шкіри характеризуються суттєво нижчими гігієнічними властивостями, причому за питомою поверхнею і сорбційною ємністю вони поступаються натуральним шкіряним матеріалам як мінімум у 32,0 і 17,0 раз відповідно. Разом з тим, у більшій мірі, це також стосується комплексу фізико-механічних показників, в тому числі підвищеної дефектоздатності та зниженої формоздатності при експлуатації взуттєвих виробів. При цьому початкова їх естетичність відносно швидко втрачається.

**Висновки**

1. Використання танідовмісної композиції з попереднім жируванням забезпечує формування шкіряного матеріалу з напівфабрикату великої рогатої худоби хромового дублення з комплексом гігієнічних, фізико-механічних і технологічних характеристик, що відповідають вимогам до матеріалів для швейних виробів.

2. Отриманий шкіряний матеріал за гігроскопічністю і паропроникністю перевищує промислові зразки відповідно на 13,6 і 11,0 %, а синтетичні шкіри в 5,5–6,0 і 7,0–8,0 раз.

3. Натуральний матеріал, отриманий за розробленою технологією, можна розглядати як перспективний завдяки перевагам порівняно з синтетичними шкірами та відповідністю ДСТУ 2726-94 для виготовлення якісного верху взуття.

**Перспективи подальших досліджень**

В подальшому будуть проведені фізико-механічні дослідження властивостей отриманих шкір за топографічними ділянками з метою ефективного програмного їх розкроювання для деталей верху взуття.

**Література**

1. Гладкова С. Отличие экокожи от искусственной кожи и кожзама / С. Гладкова // Tkaner.com. Онлайн-журнал про ткани и одежду : вебсайт. URL: <https://tkaner.com/materialy/ekokozha/otlichie-ot-iskusstvennoj-kozhi/> (дата звернення: 10.12.2022).
2. Касьян Е. Є. Екошкіра: фейки та реальність / Е. Є. Касьян // Перспективні матеріали та інноваційні технології: біотехнологія, прикладна хімія та екологія : монографія. Київ: «Світ Успіху», 2020. – С. 459–490.
3. Розкрийні властивості шкіряних матеріалів, наповнених мінералами мінерального походження / О. П. Козарь, О. Р. Мокроусова, В. І. Ліщук, В. П. Коновал // Technology audit and production reserves. – № 1/2(15). – 2014. – С. 13–17.
4. Скиба М. Є. Технології переробки вторинних шкіряних ресурсів у матеріали та вироби / М. Є. Скиба // Інноваційні технології виробництва шкіряних і хутрових матеріалів та виробів : монографія / за ред. А. Г. Данилковича. – Київ : Фенікс, 2012. – С. 231–255.
5. Данилкович А. Г. Комплексне формування шкіри з використанням рослинних дубителів : монографія / А. Г. Данилкович, О. В. Сангінова. – Рига, Латвія : «Baltija Publishing», 2020. – 180 с.
6. Andreyeva O. Natural Products Chemistry: Tutorial / O. Andreyeva, I. Gryshchenko. – Kyiv: Svit Uspichu, 2022. – 496 с.
7. Resource-saving technologies for the production of elastic leather materials: collective monograph / edited by A. Danylkovych and O. Korotych. Riga, Latvia: «Baltija Publishing», 2020. – 420 p.
8. Бокова Е. С. Полиуретаны в производстве искусственных и синтетических кож / Е. С. Бокова, Г. П. Андрианова // Полиуретановые технологии. – 2008. – № 4 (17). – С. 23–28
9. Никитина Л. Л. Полимерные материалы в обуви с улучшенными эргономическими характеристиками / Л. Л. Никитина, Т. В. Жуковская, Р. М. Галялутдинова // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15. – № 7. – С. 121–124.
10. Никитина Л. Л. Полимерные материалы в обуви с улучшенными эргономическими характеристиками / Л. Л. Никитина, Т. В. Жуковская, Р. М. Галялутдинова // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15. – № 7. – С. 121–124.

11. Байдакова Л. І. Товарознавство. Непродовольчі товари: взуттєві і хутряні вироби : підручник / Л. І. Байдакова. – Київ : Вища школа, – 2007. – 183 с.
12. Никитина Л. Л. Обзор развития и состояния производства искусственных кож для изделий легкой промышленности / Л. Л. Никитина, О. Е. Гаврилова // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – С. 184–186.
13. Gürlер Karaman D. Possibilities of usage of alkali aluminosilicates as tanning material in chromium-free leather produgtion / D. Gürlер Karaman, G. Gülümser // JTATK. – 2016. – № 26(1). – С. 117–124.
14. Henna extract: can it be an alternative retanning agen? / A. E. Musa, B. Madchan, W. Madhalulatchan, S. Sadulla, J. A. Gasmelseed // JALCA. – 2008. – № 103(6). – P. 188–193.
15. Combined organic tanning based on mimosa and oxazolidine : development of a semi-industrial scale process for high-quality bovine upper leather / A. D'Aquino, N. Barbani, G. D'Elia et al. // SLTC. – 2013. – № 1(1). – P. 9–15.
16. Плаван В. П. Застосування танідів сумаху для поліпшення експлуатаційних властивостей шкір / В. П. Плаван // Вісник КНУТД. – 2010. – №5. – С. 79–85.
17. Вознесенский Э. Ф. Влияние плазменной модификации дубящих экстрактов и кожевенных полуфабрикатов на качество процессов выделки / Э. Ф. Вознесенский, И. Ш. Абдуллин // Вести Казн. технол. унив. – 2014. – № 17 (21). – С. 66–68.
18. Наполнение и додубливание хромовых кож полимерами нового поколения. Сообщение 2 / В. Д. Виницкий, О. П. Лебедев, Л. Л. Макаров-Землянский, Л. И. Гинзбург, С. В. Горбатов // Кож.-обув. пром. – 2003. – № 1. – С. 33–34.
19. Wang, C. Preparation of organosilicone modified palm oil fatliquor / C. Wang, S. Feng, J. Wu // J. Amer. Leather Chem. Assoc. – 2011. – Vol. 106. – P. 161–169.
20. Fordzyun, Yu. Level of comfort: artificial and natural shoe materials. A comprehensive assessment / Yu. Fordzyun, O. Andreyeva, L. Maistrenko // Key Engineering Materials. – 2013. – Vol. 559. – P. 25–30.
21. Данилкович А. Г. Практикум з хімії і технології шкіри та хутра / А. Г. Данилкович. – Київ : Фенікс, 2006. – 340 с.

#### References

1. Gladkova S. The difference between eco-leather and artificial leather and leatherette /S. Gladkova// Tkaner.com. Online journal about fabrics and clothes : website. URL: <https://tkaner.com/materialy/ekokozha/otlichie-ot-iskusstvennoj-kozhi/> (date of calling: 10.12.2022).
2. Kasyan E. E. Eco-leather: fakes and reality / E. E. Kasyan // Promising materials and innovative technologies: biotechnology, applied chemistry and ecology : monograph. Kyiv: " Svit Uspichu", 2020. – P. 459–490.
3. Cutting properties of leather materials filled with minerals of mineral origin / O. P. Kozar, O. R. Mokrousova, V. I. Lischuk, V. P. Konoval // Technology audit and production reserves. – № 1/2(15). – 2014. – P. 13–17.
4. Skiba M. E. Technologies of processing secondary leather resources into materials and products / M. E. Skiba // Innovative technologies for the production of leather and fur materials and products: monograph / under the editorship A. G. Danylkovicha. - Kyiv : Phenix, 2012. – P. 231–255.
5. Danylkovich A. G. Complex formation of skin using plant tannins: monograph / A. G. Danylkovich, O. V. Sanginova. - Riga, Latvia: «Baltija Publishing», 2020. – 180 p.
6. Andreyeva O. Natural Products Chemistry: Tutorial / O. Andreyeva, I. Gryshchenko. – Kyiv: Svit Uspichu, 2022. – 496 с.
7. Resource-saving technologies for the production of elastic leather materials: collective monograph / edited by A. Danylkovich and O. Korotych. Riga, Latvia: «Baltija Publishing», 2020. – 420 p.
8. Bokova E. S. Polyurethanes in the production of artificial and synthetic leather / E. S. Bokova, G. P. Andrianova // Polyurethane technologies. – 2008. – № 4 (17). – С. 23–28
9. Nikitina L. L. Polymer materials in shoes with improved ergonomic characteristics / L. L. Nikitina, T. V. Zhukovskaya, R. M. Galyalutdinova // Herald of the Kazan Technological University. – 2012. – Т. 15. – № 7. – P. 121–124.
10. Nikitina L. L. Polymer materials in shoes with improved ergonomic characteristics / L. L. Nikitina, T. V. Zhukovskaya, R. M. Galyalutdinova Vestnik of the Kazan Technological University. – 2012. – Т. 15. – № 7. – С. 121–124.
11. Baidakova L. I. Commodity science. Non-food products: footwear and fur products: textbook / L. I. Baidakov. – Kyiv: Higher school, – 2007. – 183 p.
12. Nikitina L. L. Overview of the development and state of production of artificial leather for products of light industry / L. L. Nikitina, O. E. Gavrilova // Herald of the Kazan Technological University. – 2013. – P. 184–186.
13. Gürlер Karaman D. Possibilities of usage of alkali aluminosilicates as tanning material in chromium-free leather produgtion / D. Gürlер Karaman, G. Gülümser // JTATK. – 2016. – № 26(1). – С. 117–124.
14. Henna extract: can it be an alternative retanning agen? / A. E. Musa, B. Madchan, W. Madhalulatchan, S. Sadulla, J. A. Gasmelseed // JALCA. – 2008. – № 103(6). – P. 188–193.
15. Combined organic tanning based on mimosa and oxazolidine : development of a semi-industrial scale process for high-quality bovine upper leather / A. D'Aquino, N. Barbani, G. D'Elia et al. // SLTC. – 2013. – № 1(1). – P. 9–15.
16. Plavan V. P. Use of tannins of sumac to improve the performance properties of hides / V. P. Plavan // Visnyk KNUТD. – 2010. – №5. – С. 79–85.
17. Voznesensky E. F. Influence of plasma modification of tanning extracts and leather semi-finished products on the quality of fork processes / E. F. Voznesensky, I. Sh. Abdullin // Vesty Kazn. technol. Univ.– 2014. – № 17 (21). – С. 66–68.
18. Filling and dubbing with chromed polymers of the new generation. Message 2/ V. D. Vynytskyi, O. P. Lebedev, L. L. Makarov-Zemlyanskyi, L. I. Ginzburg, S. V. Horbatov // Leth.-shoe.Ind – 2003. – № 1. – С. 33–34.
19. Wang, C. Preparation of organosilicone modified palm oil fatliquor / C. Wang, S. Feng, J. Wu // J. Amer. Leather Chem. Assoc. – 2011. – Vol. 106. – P. 161–169.
20. Fordzyun, Yu. Level of comfort: artificial and natural shoe materials. A comprehensive assessment / Yu. Fordzyun, O. Andreyeva, L. Maistrenko // Key Engineering Materials. – 2013. – Vol. 559. – P. 25–30.
21. Danylkovich A. G. Workshop on chemistry and technology of leather and fur / A. G. Danylkovich. - Kyiv.: Phenix, 2006. – 340 с.

Сергій ГОМЕНЮК

Запорізький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7340-5947>e-mail: [gserega71@gmail.com](mailto:gserega71@gmail.com)

Владислав КОЗУБ

Луганський національний університет імені Тараса Шевченка

<https://orcid.org/0000-0003-2710-7206>e-mail: [v.y.kozub@gmail.com](mailto:v.y.kozub@gmail.com)

## ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПАРАЛЕЛЬНИХ ОБЧИСЛЕНЬ В ПАКЕТІ ПРИКЛАДНИХ ПРОГРАМ «MIRELA+»

У статті досліджуються підходи до оптимізації розрахунків конструкцій, що потребують всебічного аналізу процесів деформування під дією експлуатаційних навантажень. Для розв'язання таких задач зазвичай використовується метод скінченних елементів. Моделювання конструкцій з урахуванням концентраторів напружень потребує використання розрахункових сіток великих розмірів. В реальних умовах експлуатації більшість елементів конструкцій знаходяться під дією механічних і теплових навантажень. Пакет прикладних програм «MIRELA+» призначений для розв'язування задач термопружності конструкцій із слабкостисливих еластомерів та композитів з еластомерною матрицею. Одним з етапів розв'язування задач термопружності є формування матриць жорсткості з урахуванням слабкої стисливості та теплопровідності скінченних елементів. При формуванні матриць жорсткості та теплопровідності виникає необхідність проводити інтегрування по області скінченного елемента. Для елементів одного типу використовуються обчислення за однаковою процедурою і кількість таких обчислень зумовлює час розв'язування задачі. У традиційному підході ці обчислення виконуються послідовно. У випадку великих розмірів сіток кількість та час розрахунків збільшуються, що потребує оптимізації обчислень з використанням алгоритмів паралельних обчислень. За допомогою бібліотеки OpenMP побудовано паралельний алгоритм формування матриці розв'язувальних рівнянь. До паралельної області алгоритму включені обчислення доданків згідно квадратурної схеми. Заповнення матриці жорсткості скінченного елемента відбувається в послідовній області. Час виконання паралельних обчислень визначається найповільнішою підзадачею. Використання моментної схеми скінченних елементів переміщення і деформації апроксимуються однаковими поліномами, що спрощує обчислення інтегралів. Розроблено алгоритми паралельного програмування для побудови розв'язувальних рівнянь пакету програм «MIRELA+». Отримано розв'язки для розрахункових сіток різних розмірів. Досліджено вплив паралелізації на час розрахунку.

**Ключові слова:** скінченний елемент, паралельні обчислення, OpenMP, матриця жорсткості, матриця теплопровідності.

Serhii HOMENIUK

Zaporizhzhia National University

Vladyslav KOZUB

Luhansk Taras Shevchenko National University

## FEATURES OF THE USE OF PARALLEL CALCULATIONS IN THE PACKAGE OF APPLICATION PROGRAMS «MIRELA+»

The article examines approaches to the optimization of structural calculations, which require a comprehensive analysis of deformation processes under the action of operational loads. The finite element method is usually used to solve such problems. Modeling of structures taking into account stress concentrators requires the use of large-sized calculation grids. In real operating conditions, most structural elements are under the influence of mechanical and thermal loads. The package of application programs «MIRELA+» is intended for solving problems of thermoelasticity of structures made of weakly compressible elastomers and composites with an elastomeric matrix. One of the stages of solving problems of thermoelasticity is the formation of stiffness matrices taking into account weak compressibility and thermal conductivity of finite elements. When forming the stiffness and thermal conductivity matrices, it is necessary to perform integration over the area of the finite element. For elements of the same type, calculations are used according to the same procedure, and the number of such calculations determines the time to solve the problem. In the traditional approach, these calculations are performed sequentially. In the case of large grid sizes, the number and time of calculations increase, which requires optimization of calculations using parallel calculation algorithms. Using the OpenMP library, a parallel algorithm for forming the matrix of solving equations was built. The calculation of terms according to the quadrature scheme is included in the parallel area of the algorithm. Filling of the stiffness matrix of the finite element takes place in the sequential region. The execution time of parallel calculations is determined by the slowest subtask. Using the moment scheme of finite elements, displacement and deformation are approximated by the same polynomials, which simplifies the calculation of integrals. Parallel programming algorithms for constructing solving equations of the "MIRELA+" program package have been developed. Solutions for calculation grids of different sizes have been obtained. The effect of parallelization on the calculation time was studied.

Keywords: finite element, parallel computing, OpenMP, stiffness matrix, thermal conductivity matrix.

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

Проектування сучасних конструкцій в будівництві, машинобудуванні, авіакосмічній галузі потребують надійних методів розрахунку. Найбільш поширеним методом є метод скінченних елементів, який дозволяє моделювати конструкції складної форми. Для побудови розрахункових моделей конструкцій з отворами, розрізами та іншими концентраторами напружень зазвичай використовуються великорозмірні сітки скінченних елементів, що веде до виконання дуже великого обсягу обчислень. За традиційною схемою

побудова розрахункових рівнянь проводиться послідовно і, в такому випадку, на кожному етапі виконуються процедури за однаковою схемою. Використання обчислювальних станцій з декількома процесорами, процесорів з декількома ядрами або комп'ютерних мереж дозволяє виконувати однотипні обчислення паралельно. Тому актуальною задачею є розробка паралельних алгоритмів для методу скінченних елементів.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для методу скінченних елементів можна виділити три етапи розв'язування задачі: формування вхідних даних з нанесенням розрахункової сітки; формування матриць системи рівнянь і розв'язування системи рівнянь; процедура виведення результатів. У випадку лінійної задачі процес формування матриць розв'язувальних рівнянь та рішення системи алгебраїчних рівнянь складає основні затрати часу. Прискорення виконання цих етапів дозволить зменшити затрати машинного часу. Більшість існуючих пакетів прикладних програм методу скінченних елементів створені за послідовною схемою. Паралелізація обчислювальних процесів для вже існуючої архітектури коду являється нетривіальною задачею [1].

Одним з напрямів оптимізації обчислювальних процесів являється використання гібридних алгоритмів паралелізації процедур розв'язування систем рівнянь з урахуванням симетричності та розрідженості матриць [2]. Використання ітераційних методів розв'язування систем рівнянь також допускає можливість використання паралельних обчислень [3].

Ефективність методу можна також підвищити використовуючи гібридні паралельні схеми методу скінченних елементів з використанням підходів зі спільною та роздільною пам'яттю декількох комп'ютерів [4, 5]. Використання декомпозиції розрахункової області також допускає можливість розділення на окремі задачі, розв'язання яких можна розділити на незалежні потоки [6, 7]. Однак в цьому випадку необхідно забезпечити передумовленість розбиття на підобласті.

Для прискорення процедур використовуються підходи розпаралелювання обчислень між процесором та графічним прискорювачем [8, 9]. Використання апроксимаційних поліномів спеціального виду дозволяє дещо спростити розв'язувальні співвідношення і разом з тим спростити паралелізацію обчислень [10].

### Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття.

Незважаючи на достатню велику кількість досліджень у напрямку паралелізації скінченно-елементних обчислень можна відмітити, що майже відсутні роботи присвячені процедурі формування матриць розрахункових систем рівнянь. Розробка та використання паралельних алгоритмів при формуванні розв'язувальних рівнянь методу скінченних елементів потребують подальших досліджень.

### Формулювання цілей статті

Метою статті є розробка методики паралельних обчислень розрахункових матриць скінченних елементів для задач термомеханіки твердих тіл на основі пакету прикладних програм «МІРЕЛА+».

**Виклад основного матеріалу.** Пакет прикладних програм «МІРЕЛА+» використовується для розв'язання задач механіки еластомерів, які проявляють гіперпружні властивості [12]. В умовах циклічних навантажень еластомерним конструкціям притаманні термов'язкопружні властивості [13]. Процеси деформування таких конструкцій супроводжуються тепловими ефектами. Тому при побудові математичної моделі таких тіл використовуються співвідношення теорії пружності і рівняння теплопровідності.

Для підвищення точності розв'язків, усунення ефекту «хибного» зсуву, врахування слабкої стисливості матеріалу використовується моментна схема скінченних елементів [13,14]. Апроксимація переміщень, деформацій та функції зміння об'єму здійснюється за допомогою степеневих функцій  $\psi^{(pqr)} = (x_1^p x_2^q x_3^r) / (p!q!r!)$ , для яких виконується співвідношення  $\partial^{(\alpha+\beta+\gamma)} \psi^{(pqr)} = \psi^{(p-\alpha, q-\beta, r-\gamma)}$ :

$$u_k = \omega_k^T \psi, \quad \varepsilon_{ij} = \mathbf{e}_{ij}^T \psi, \quad \theta = \xi \psi, \quad (1)$$

де між компонентами розкладання переміщень, деформацій і функції зміння об'єму встановлюється достатньо простий зв'язок [13] у вигляді матриць відповідності  $\mathbf{A}$ . Варіація енергії пружної деформації має вигляд:

$$\delta W = \delta \mathbf{u}^T \mathbf{A}_{ij}^T \mathbf{E}^{ijkl} \mathbf{A}_{kl} \mathbf{u} + \delta \mathbf{u}^T \mathbf{A}_\theta^T \mathbf{E}^\theta \mathbf{A}_{kl} \mathbf{u}, \quad (2)$$

$$\mathbf{E}^{ijkl} = \iiint_V \psi_{(ij)} 2\mu g^{ik} g^{jl} \psi_{kl}^T \sqrt{g} dv, \quad (3)$$

$$\mathbf{E}^\theta = \iiint_V \psi_{(\theta)} \lambda g^{ij} \psi_{(\theta)}^T \sqrt{g} dv, \quad (4)$$

де  $\mathbf{u}$  – вектор вузлових переміщень;  $\mu, \lambda$  – коефіцієнти Ляме;  $g$  – метричний тензор.

Аналогічно температура тіла представляється у вигляді розкладання за степеневими функціями:

$$T = \gamma^T \psi. \quad (5)$$

З варіаційного рівняння теплопровідності визначається матриця теплопровідності:

$$\mathbf{H} = \iiint_V \mathbf{B} \boldsymbol{\Psi}_i \lambda_{ij} \boldsymbol{\Psi}_j^T \mathbf{B}^T \sqrt{g} dv, \quad (6)$$

де  $\mathbf{B}$  – матриця перетворення розкладення температури по об'єму тіла за вузловими значеннями.

Процедура побудови матриць (3), (4), (6) пов'язана з чисельним інтегруванням по області скінченного елемента за квадратурою Гауса-Лежандра. Для обчислення компонентів матриці теплопровідності необхідно виконати наступні кроки:

- обчислення компонентів тензора переходу від глобальної системи координат до локальної;
- обчислення якобіана перетворень;
- обчислення похідних степеневих функцій у вузлах інтегрування;
- обчислення суми доданків за квадратурною схемою.

Для прискорення обчислень три перших пункти можна виконати паралельно. Останній пункт необхідно виконувати в послідовній області.

За аналогічною схемою розпаралелюються обчислення для матриці жорсткості та матриці змінення об'єму.

Оскільки при побудові матриць спільно використовуються масиви даних, то для паралельного обчислення використано бібліотеку OpenMP. Вона доступна для широкого спектру архітектури процесорів, підтримує мультиплатформне програмування спільної пам'яті на мовах програмування C, C++ і Fortran. Бібліотека OpenMP складається з набору директив компілятора, підпрограм бібліотеки та змінних середовища, які впливають на поведінку під час виконання.

Програмування в OpenMP полягає у використанні так званих паралельних конструкцій (директив компілятора), які вставляються у вихідний код, інструктуючи компілятор генерувати певний код. OpenMP визначає різні конструкції, що дозволяють розпаралелювати послідовний код і синхронізувати окремі потоки.

Запропоновані підходи до застосування паралельних обчислень використано при розв'язуванні задачі термопружності композитного параболічного обтічника під дією стаціонарного нерівномірного теплового потоку.

Досліджено залежність часу формування матриць системи рівнянь від кількості розрахункових вузлів.

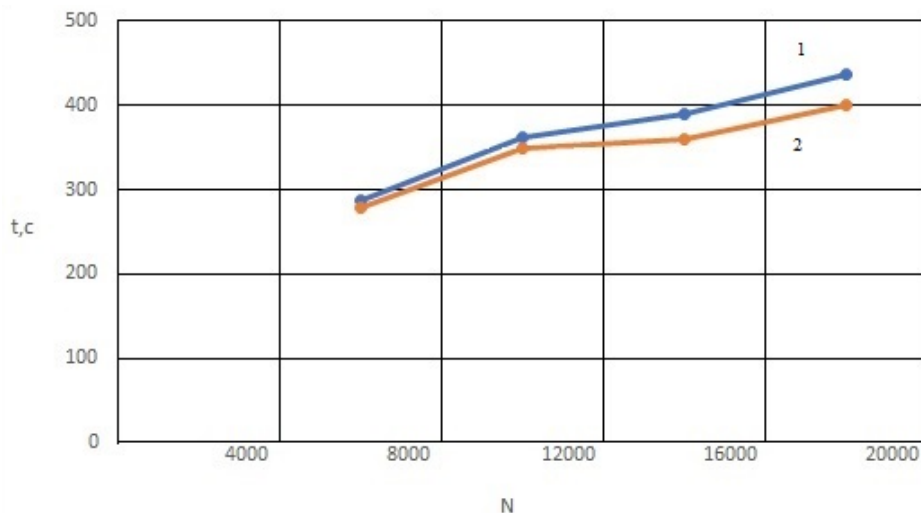


Рис. 2. Час розв'язку для різної кількості вузлів: 1 – традиційна схема; 2 – схема з паралельними обчисленнями.

Для розрахунку використано обчислювальний комплекс «МІРЕЛА+» із застосуванням паралельних обчислень матриць скінченного елемента. Тестування виконувалось на пристрої з Intel i7-9750H (6 ядер та 12 потоків) та 16 ГБ RAM.

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

Розроблена методика формування матриць жорсткості та теплопровідності на основі використання паралельних обчислень інтегральних квадратурних складників дозволяє оптимізувати обчислення і більш ефективно використовувати можливості процесора, прискорити процес розв'язування задач механіки конструкцій. Використання паралельних обчислень в пакеті прикладних програм «МІРЕЛА+» дозволяє скоротити час рішення на 6-7% в залежності від розмірів розрахункової сітки. При збільшенні розрахункової сітки відносне скорочення часу розв'язання збільшується. Паралельні алгоритми зі спільною пам'яттю мають перспективу подальшого впровадження в методі суперелементів.

## Література

1. Jarzebski P. On parallelization of the loop over elements in FEAP / P. Jarzebski, K. Wisniewski, R. L. Taylor // *Computijnal Mechanics*, – 2015. – 56. – P. 77–86.
2. Ju S.H. An Out-of-Core Eigen-Solver with OpenMP Parallel Scheme for Large Spare Damped System [Електронний ресурс] / S.H. Ju, H.H. Hsu // *Int. J.Computational Methods* – 2019. – Vol. 16. No 7. – Режим доступу : <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0219876219500385>.
3. Жданов А.И. Об одной вычислительной реализации блочного метода Гаусса-Зейделя / А.И. Жданов, Е.Ю. Богданова // *Вестн. Сам.гос. тех.ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*. – 2016. – Т.20, №4. – С. 730 – 738.
4. Leonardo Nunes da Silva. Performance of hybrid openMP/MPI parallel programming application of finite element method [Електронний ресурс] / Leonardo Nunes da Silva, Flávia Romano Villa Verde, Gerson Henrique Pfitscher // *Proc. COBEM 2007 19th International Congress of Mechanical Engineering*, – November 5-9, 2007. – Режим доступу : <https://www.abcm.org.br/anais/cobem/2007/pdf/COBEM2007-1463.pdf>
5. Yamaguchi T. Performance Evaluation of 3-D Hybrid Parallel Finite Element Method by MPI/OpenMP / T. Yamaguchi, Y. Kawase, A. Nagase, S. Ishimura // *J. Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*. – 2019. – Vol.27. No.1. – P.85-90.
6. Wozniak M. Comparison of multi-frontal and alternating direction parallel hybrid memory iGRM direct solver for non-stationary simulations / M. Wozniak, A. Bukowska // *Computer Science*. – 2020. – 21(4). – P. 419-439.
7. Bošanský M. Parallelization of assembly operation in finite element method / M. Bošanský, B. Patzák // *Acta Polytechnica*. – 2020. – 60(1). – P.25–37.
8. Amorim L. GPU Finite Element Method Computation Strategy Without Mesh Coloring / L. Amorim, T. Goveia, R. Mesquita, I. Baratta // *J. Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*. – 2020. – Vol. 19. No.2. – P. 252-264.
9. Atallah A.M., Younes A.B. Parallel Evaluation of Chebyshev Approximations :Applications in Astrodynamics / A.M. Atallah, A.B. Younes // *J. Astro-nautical Science*. – 2022. – Vol. 69. – P. 692–717.
10. Utpal Kiran. GPU-warp based finite element matrices generation and assembly using coloring method / Utpal Kiran, Deepak Sharma, Sachin Singh Gautam // *Journal of Computation Design and Engineering*, – 2019. – No 6. – P. 705-718.
11. Atallah A.M. Parallel Evaluation of Chebyshev Approximations / A.M Atallah., A.B. Younes // *Applications in Astrodynamics J. Astro-nautical Science*. – 2022. – Vol. 69. – Pp. 692–717.
12. Suchocki C. On Finite Element Implementation of Polyconvex Incompressible Hyperelasticity / C. Suchocki, S. Jemioło // *Theory, Coding and Applications, International Journal of Computational Methods*. – vol. 17, no 8. – 2020. – P. 1-10.
13. Метод конечных элементов в вычислительном комплексе «МИРЕЛА+» / В.В. Киричевский, Б.М. Дохняк, Ю.Г. Козуб и др. ; под общ. ред. В.В. Киричевского. – К.: Наук. думка. – 2005. – 403 с.
14. Bazhenov V.A. Thermoelasticity of elastomeric constructions with initial stresses / V.A. Bazhenov, Yu.G. Kozub, I.I. Solodei // *Strength of Materials and Theory of Structures*. – 2020. – Issue 104. – P. 299 – 308.

## References

1. Jarzebski P. On parallelization of the loop over elements in FEAP / P. Jarzebski, K. Wisniewski, R. L. Taylor // *Computijnal Mechanics*, – 2015. – 56. – P. 77–86.
2. Ju S.H. An Out-of-Core Eigen-Solver with OpenMP Parallel Scheme for Large Spare Damped System [Elektronnij resurs] / S.H. Ju, H.H. Hsu // *Int. J.Computational Methods* – 2019. – Vol. 16. No. 7. – Rezhim dostupu : <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0219876219500385>.
3. Zhdanov A.I. Ob odnoj vychislitelnoj realizacii blochnogo metoda Gaussa-Zejdelya / A.I. Zhdanov, E.Yu. Bogdanova // *Vestn. Sam.gos. teh.un-ta. Ser. Fiz.-mat. nauki*. – 2016. – Т.20, №4. – С. 730 – 738.
4. Leonardo Nunes da Silva. Performance of hybrid openMP/MPI parallel programming application of finite element method [Elektronnij resurs] / Leonardo Nunes da Silva, Flavia Romano Villa Verde, Gerson Henrique Pfitscher // *Proc. COBEM 2007 19th International Congress of Mechanical Engineering*, – November 5-9, 2007. – Rezhim dostupu : <https://www.abcm.org.br/anais/cobem/2007/pdf/COBEM2007-1463.pdf>.
5. Yamaguchi T. Performance Evaluation of 3-D Hybrid Parallel Finite Element Method by MPI/OpenMP / T. Yamaguchi, Y. Kawase, A. Nagase, S. Ishimura // *J. Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*. – 2019. – Vol.27. No 1. – P.85-90.
6. Wozniak M. Comparison of multi-frontal and alternating direction parallel hybrid memory iGRM direct solver for non-stationary simulations / M. Wozniak, A. Bukowska // *Computer Science*. – 2020. – 21(4). – P. 419-439.
7. Bosansky M. Parallelization of assembly operation in finite element method / M. Bosansky, B. Patzak // *Acta Polytechnica*. – 2020. – 60(1). – P.25–37.
8. Amorim L. GPU Finite Element Method Computation Strategy Without Mesh Coloring / L. Amorim, T. Goveia, R. Mesquita, I. Baratta // *J. Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*. – 2020. – Vol. 19. No 2. – P. 252-264.
9. Atallah A.M., Younes A.B. Parallel Evaluation of Chebyshev Approximations :Applications in Astrodynamics / A.M. Atallah, A.B. Younes // *J. Astro-nautical Science*. – 2022. – Vol. 69. – P. 692–717.
10. Utpal Kiran. GPU-warp based finite element matrices generation and assembly using coloring method / Utpal Kiran, Deepak Sharma, Sachin Singh Gautam // *Journal of Computation Design and Engineering*, – 2019. – No 6.– P. 705-718.
11. Atallah A.M. Parallel Evaluation of Chebyshev Approximations / A.M Atallah., A.B. Younes // *Applications in Astrodynamics J. Astro-nautical Science*. – 2022. – Vol. 69. – P. 692–717.

- 
12. Suchocki C. On Finite Element Implementation of Polyconvex Incompressible Hyperelasticity / C. Suchocki, S. Jemioło // *Theory, Coding and Applications, International Journal of Computational Methods*. – Vol. 17, no 8. – 2020. – P. 1-10.
  13. Metod konechnykh elementov v vychislitel'nom komplekse «MIRELA+» / V.V. Kirichevskij, B.M. Dohnyak, Yu.G. Kozub i dr. ; pod obsh. red. V.V. Kirichevskogo. – K.: Nauk. dumka. – 2005. – 403s.
  14. Bazhenov V.A. Thermoelasticity of elastomeric constructions with initial stresses / V.A. Bazhenov, Yu.G. Kozub, I.I. Solodei // *Strength of Materials and Theory of Structures*. – 2020. – Issue 104. – P. 299 – 308.



**Олександр ОСАДЧУК**Вінницький національний технічний університет  
<https://orcid.org/0000-0001-6662-9141>  
e-mail: [osadchuk.av69@gmail.com](mailto:osadchuk.av69@gmail.com)**Ярослав ОСАДЧУК**Вінницький національний технічний університет  
<https://orcid.org/0000-0002-5472-0797>  
e-mail: [osadchuk.j93@gmail.com](mailto:osadchuk.j93@gmail.com)**Денис ДУМЕНКО**Вінницький національний технічний університет  
<https://orcid.org/0000-0002-4051-9355>  
e-mail: [doomdenny@gmail.com](mailto:doomdenny@gmail.com)

## СТАБІЛІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ТРАНЗИСТОРНИХ АНАЛОГІВ ІНДУКТИВНОСТІ

У статті проаналізовано методи стабілізації параметрів транзисторних аналогів індуктивності (TAI), визначено їх переваги та недоліки. Розглянуто шляхи реалізації завдяки яким вдається ослабити вплив всіх дестабілізуючих факторів, таких як температура, нестабільність джерел живлення, виробничий розкид параметрів, зміну параметрів внаслідок старіння та інших. Виокремлені універсальні засоби для стабілізації параметрів усіх транзисторних пристроїв. Розглянуті стабілізація робочого режиму на постійному струмі та негативний зворотній зв'язок (НЗЗ) на змінному струмі. Здійснено оцінку режиму нестабільності параметрів TAI по величині приросту еквівалентної індуктивності та добротності. Визначена методика при стабілізації параметрів TAI, а також пристроїв надвисоких частот, в кожному конкретному випадку описана необхідність вибору допустимої нестабільності робочої точки, здійснення розрахунку нестабільності параметрів, що очікується, після чого задля отримання заданої стабільності введення негативного зворотнього зв'язку по змінному струму. Наведені графіки залежності еквівалентної добротності від температури та графіки залежності еквівалентної індуктивності від температури. Наведено вираз приросту індуктивності у випадку, коли основну дестабілізуючу дію на робочий режим транзистора здійснює зміна зворотнього струму колектора, коефіцієнт передачі по струму, напругу колектор – база, напругу емітер – база, струм емітера. Проведено розрахунок коефіцієнта режимної нестабільності. Розглянуто ефективність стабілізуючих впливів від негативного зворотнього зв'язку на змінному струмі, яка сприяє стабілізації практично всіх параметрів TAI. В якості параметра, що характеризує властивості TAI при наявності і відсутності зворотнього зв'язку розглянуто індуктивність. Наведено вираз для відносної похибки індуктивності при наявності НЗЗ на змінному струмі.

**Ключові слова:** параметри; стабілізація; нестабільність; транзистор; TAI; сигнал; рівень; НВЧ; робоча точка; змінний струм; зворотній зв'язок; емітер; колектор; база; індуктивність; добротність; навантаження.

Olexander OSADCHUK, Jaroslav OSADCHUK, Denys DUMENKO  
Vinnytsia National Technical University

## STABILIZATION OF TRANSISTOR ANALOGUES OF INDUCTANCE PARAMETERS

The article analyzes methods for stabilizing the parameters of transistor analogues of inductance (TAI), their advantages and disadvantages are determined. Ways of implementation are considered, thanks to which it is possible to weaken the influence of all destabilizing factors, such as temperature, instability of power supplies, production variation of parameters, changes in parameters due to aging, and others. Allocated universal means to stabilize the parameters of all transistor devices. The stabilization of the operating mode at direct current and negative feedback at alternating current are considered. An assessment of the mode of instability of the parameters of the TAI was carried out by the magnitude of the increase in the equivalent inductance and quality factor. A technique for stabilizing the parameters of the TAI, as well as microwave devices, is defined, in each specific case, the need to select the allowable instability of the operating point, to perform the expected calculation of the instability of the parameters, and then to obtain the desired stability, input negative feedback on alternating current is described. The graphs of the dependence of the equivalent quality factor on temperature and the graphs of the dependence of the equivalent inductance on temperature are presented. An expression is given for the increase in inductance in the case when the main destabilizing effect on the operating mode of the transistor is a change in the reverse collector current, current transfer coefficient, collector-base voltage, emitter-base voltage, emitter current. The coefficient of regime instability was calculated. The effectiveness of stabilizing influences from negative feedback on alternating current, which contributes to the stabilization of almost all parameters of the TAI, is considered. Inductance is considered as a parameter characterizing the properties of TAI in the presence and absence of feedback. An expression is given for the relative error of inductance in the presence of NZS on alternating current.

**Keywords:** parameters; stabilization; instability; transistor; TAI; signal; level; UHF; working point; alternating current; feedback; emitter; collector; base; inductance; goodness; load.

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

Із поширенням транзисторних структур, як фундаментальної основи всіх електронних пристроїв, гостро виникає проблема регуляції параметрів та забезпечення їх стабільності у різних режимах роботи. А так як мініатюризація радіоелектронних пристроїв, на сьогоднішній день, досягає граничних рівнів, що можуть забезпечити технології виробництва радіоелектронних компонентів, то ця проблема є особливо актуальною. Відповідно, коли виникає необхідність замінити індуктивність транзисторною структурою, то транзисторний аналог індуктивності [1] є ще більш нестабільною одиницею системи, яка надчутлива до

зовнішніх та внутрішніх чинників. Виникає необхідність стабілізації параметрів ТАІ для коректної роботи всієї системи в цілому.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

На даний час постійно проводяться наукові дослідження, що аналізують проблематику та пропонують нові підходи до стабілізації параметрів, чи нові рішення в реалізації вже існуючих. Найбільш ґрунтовними дослідженнями серед опублікованих є роботи таких авторів як Берман Л.С., Андрєєв В.С., Ареф'єв О.О., Осадчук В.С., Dutta Roy S. C., Saito T., Lindmayer J.. Всі вони описують питання, що безпосередньо пов'язані з питаннями стабілізації параметрів чи аспекти індуктивних ефектів в напівпровідникових пристроях.

А оскільки тенденція мініатюризації та роботи на надвисоких частотах напівпровідникових пристроїв залишається однією з течій розвитку сучасного приладобудування, то ми потребуємо і подальших досліджень цієї проблематики.

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

Незважаючи на значну кількість досліджень у цій сфері проблема все ще є актуальною і потребує вирішення та виявлення нових методів стабілізації, чи покращення існуючих. Різноманіття компонентної бази дозволяє покращувати розкид параметрів й досягати більш стабільної роботи системир[2]. Проте оскільки всі системи й задачі, що ставляться перед ними є унікальними, й ідеальних результатів досягти апріорі неможливо, то проблема потребує подальших досліджень.

**Формулювання цілей статті**

Метою статті є аналіз методів стабілізації параметрів транзисторних аналогів індуктивності, та способів ослабити вплив всіх дестабілізуючих факторів[3], таких як температура, нестабільність джерел живлення, виробничий розкид параметрів, зміну параметрів внаслідок старіння, тощо.

**Виклад основного матеріалу.**

Стабілізація параметрів ТАІ як і інших транзисторних пристроїв може бути здійснена двома шляхами:

- ізоляцією ТАІ від різного роду дестабілізуючих впливів;
- шляхом створення таких умов, при яких нестабільність параметрів транзисторів буде в найменшій степені здійснюватися на стабільність параметрів ТАІ, або пристроїв на основі ТАІ[4].

Для нас інтерес представляє другий спосіб, так як він дозволяє одночасно ослабити вплив всіх дестабілізуючих факторів, таких як температура, нестабільність джерел живлення, виробничий розкид параметрів, зміну параметрів внаслідок старіння і т.д.

Тому при стабілізації параметрів ТАІ, а також пристроїв НВЧ на їх необхідно в кожному конкретному випадку вибирати допустиму нестабільність робочої точки[5], здійснити розрахунок очікуємої нестабільності параметрів, а після для отримання заданої стабільності ввести негативний зворотній зв'язок по змінному струму.

Оцінку режиму нестабільності параметрів ТАІ будемо здійснювати по величині приросту еквівалентної індуктивності та добротності.

Якщо припустити, що основну дестабілізуючу дію на робочий режим транзистора здійснює зміна зворотнього струму колектора  $i_{k0}$ , коефіцієнт передачі по струму  $\alpha$ , напругу колектор – база, напругу емітер – база, струм емітера[6], то вираз для приросту індуктивності та добротності можна представити у вигляді

$$dL = \frac{\partial L}{\partial i_{k0}} di_{k0} + \frac{\partial L}{\partial \alpha} d\alpha + \frac{\partial L}{\partial U_{кБ}} dU_{кБ} + \frac{\partial L}{\partial U_{БЕ}} dU_{БЕ} + \frac{\partial L}{\partial I_E} dI_E, \tag{1}$$

$$dQ = \frac{\partial Q}{\partial i_{k0}} di_{k0} + \frac{\partial Q}{\partial \alpha} d\alpha + \frac{\partial Q}{\partial U_{кБ}} dU_{кБ} + \frac{\partial Q}{\partial U_{БЕ}} dU_{БЕ} + \frac{\partial Q}{\partial I_E} dI_E, \tag{2}$$

Перейдемо до кінцевих приростів

$$\Delta L = B_i^L \Delta I_{k0} + B_\alpha^L \Delta \alpha + B_K^L \Delta U_K + B_{U_{БЕ}}^L \Delta U_E + B_{I_E}^L \Delta I_E, \tag{3}$$

$$\Delta Q = B_i^Q \Delta I_{k0} + B_\alpha^Q \Delta \alpha + B_K^Q \Delta U_K + B_{U_E}^Q \Delta U_E + B_{I_E}^Q \Delta I_E, \tag{4}$$

де  $B_i^L = \frac{\partial L}{\partial i_{k0}}$ ,  $B_\alpha^L = \frac{\partial L}{\partial \alpha}$ ,  $B_K^L = \frac{\partial L}{\partial U_K}$ ,  $B_E^L = \frac{\partial L}{\partial I_E}$ ,  $B_i^Q = \frac{\partial Q}{\partial i_{k0}}$ ,  $B_\alpha^Q = \frac{\partial Q}{\partial \alpha}$ ,  $B_K^Q = \frac{\partial Q}{\partial U_K}$ ,  $B_E^Q = \frac{\partial Q}{\partial I_E}$ .

по аналогії з (1) отримаємо вираз для коефіцієнта режимної нестабільності індуктивності.

$$S_L = B_i^L \Delta I_{k0} \left( 1 + \frac{B_\alpha^L \Delta \alpha}{B_i^L \Delta I_{k0}} + \frac{B_K^L \Delta U_K}{B_i^L \Delta I_{k0}} + \frac{B_E^L \Delta I_E}{B_i^L \Delta I_{k0}} \right), \tag{5}$$

та добротності

$$S_Q = B_i^Q \Delta I_{k0} \left( 1 + \frac{B_\alpha^Q \Delta \alpha}{B_i^Q \Delta I_{k0}} + \frac{B_K^Q \Delta U_K}{B_i^Q \Delta I_{k0}} + \frac{B_E^Q \Delta I_E}{B_i^Q \Delta I_{k0}} \right), \tag{6}$$

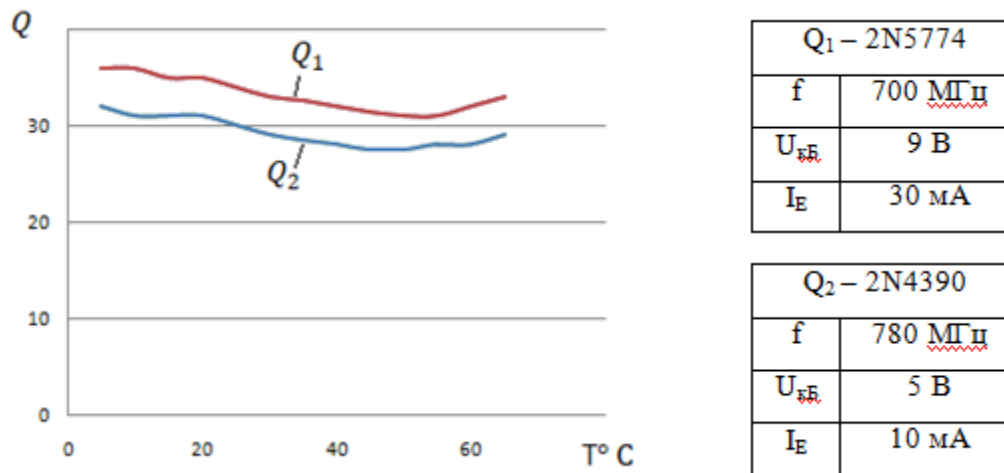


Рисунок 1 – Графік залежності еквівалентної добротності від температури

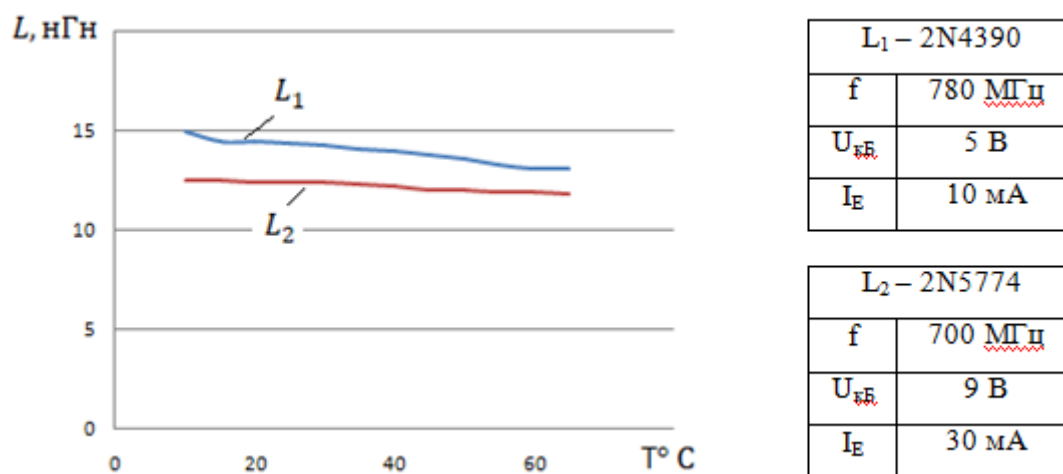


Рисунок 2 – Графік залежності еквівалентної індуктивності від температури

В кожному окремому випадку при розрахунку коефіцієнта режимної нестабільності, необхідно враховувати несумісність умов, що мають місце при переважанні різних видів нестабільностей. Тому їх варто розглядати окремо, а потім вибрати номінальне значення коефіцієнта режимної нестабільності для гіршого випадку [7].

Розглянемо ефективність стабілізуючих впливів від негативного зворотнього зв'язку на змінному струмі, яка сприяє стабілізації практично всіх параметрів ТАІ.

В якості параметра, що характеризує властивості ТАІ при наявності і відсутності зворотнього зв'язку розглянемо наприклад, індуктивність. Вираз для відносної похибки індуктивності при наявності НЗЗ на змінному струмі можливо визначити виразом [8]:

$$\frac{dL_{зз}}{L_{зз}} = \frac{1}{F} \cdot \frac{dL}{L}, \quad (7)$$

де  $\bar{L}$  - середнє значення індуктивності при відсутності НЗЗ;

$F$  - глибина НЗЗ, визначається відносно вихідних зажимів каскада із спільним колектором.

Аналіз впливу НЗЗ на параметри транзисторних пристроїв наведено в [9].

На основі цього аналізу можна зробити вивід, що вибір того, чи іншого методу стабілізації визначається конкретними схемами каскадів. При цьому необхідно враховувати також вплив стабілізації робочого режиму.

Одним із методів стабілізації параметрів ТАІ, також як і в інших транзисторних пристроях є використання негативного зворотнього зв'язку на постійному струмі, яка дозволяє автоматично керувати базовим зміщенням.

Для цих цілей може бути використаний паралельний, послідовний і паралельно-послідовний зворотній зв'язок.

Дослідження, наведені в роботі [10], в області низьких частот, показали, що дія паралельного НЗЗ на постійному струмі в випадку, якщо опір навантаження є мало ефективним. Так як в області НВЧ узгоджені навантаження опором 50 або 75 Ом, то застосування даного методу стабілізації є малоефективним, що підтвердили теоретичні та експериментальні дослідження. Застосування послідовного

НЗЗ на постійному струмі дозволяє стабілізувати напругу живлення, проте в випадку коливань температури цей метод є також малоефективним[11].

Застосування комбінованого НЗЗ на постійному струмі також не призводить до бажаних результатів, оскільки його введення призводить до зменшення добротності еквівалентної індуктивності[12].

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

В результаті проведеного аналізу можна зробити вивід, що вибір того, чи іншого методу стабілізації визначається конкретними схемами каскадів. При цьому необхідно враховувати також вплив стабілізації робочого режиму.

А також варто підкреслити, що застосування комбінованого НЗЗ на постійному струмі також не призводить до бажаних результатів, оскільки його введення призводить до зменшення добротності еквівалентної індуктивності.

### Література

1. Теорія електричних кіл-2. Нелінійні електричні кола. навч. посіб. для студ. спеціальності 171 / В. Я. Ромашко, Л. М. Батрак. – Київ : КПІ імені Ігоря Сікорського, 2020. – 88 с.
2. Осадчук В. С. Генератори електричних коливань на основі транзисторних структур з від'ємним опором : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. О. Семенов. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 183 с.
3. Філінюк М. А. Елементи та пристрої автоматики на основі нелінійних властивостей динамічних негатронів : монографія / М. А. Філінюк, О. В. Войцеховська. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 189 с.
4. Функціональні вузли радіовимірювальних приладів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. О. Семенов та ін. — Вінниця : ВНТУ, 2011. — 336 с.
5. Електроніка і мікросхемотехніка : Підручник у т4. Т. 1. Аналогові та імпульсні пристрої / [В. І. Сенько, М. В. Панасенко, Є. В. Сенько та ін.] – Харків: Фоліо, 2002. – 510 с.
6. O. Faruq, M.T. Amin, Active Inductor with Feedback Resistor Based Voltage Controlled Oscillator Design for Wireless Applications / INTL JOURNAL OF ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS, 2018, VOL. 65, NO. 1, PP. 57-64
7. Осадчук О. В. Математичне моделювання генератора НВЧ на основі транзисторної структури з від'ємним опором / О. В. Осадчук, А. О. Семенов // Вісник Хмельницького національного університету. – 2005. – № 4, Ч. 1, Т. 2. – С. 256–259.
8. Філінюк М. А. Основи негатроніки. Том I. Теоретичні і фізичні основи негатроніки : монографія / М. А. Філінюк. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 456 с.
9. S. Diao and Y. Wang and C. Wang and F. Lin and C. H. Heng, VCO Design for Low-Power, High-Efficiency Transmitter Applications, in 2014 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology, Hefei, China, 2014, pp. 1-4.

### References

1. Theory of electric circuits-2. Nonlinear electric circuits. education manual for students specialties 171 / V. Ya. Romashko, L. M. Batrak. - Kyiv: Ihor Sikorskyi KPI, 2020. - 88 p.
2. V. S. Osadchuk Generators of electric oscillations based on transistor structures with negative resistance: monograph / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, A. O. Semenov. – Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia, 2009. – 183 p.
3. M. A. Filynyuk Elements and devices of automation based on nonlinear properties of dynamic negatrons: monograph / M. A. Filynyuk, O. V. Voytsekhovska. – Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia, 2008. – 189 p.
4. Functional nodes of radio measuring devices based on reactive properties of transistor structures with negative resistance: monograph / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, A. O. Semenov, et al. — Vinnytsia: VNTU, 2011. — 336 p.
5. Electronics and microcircuit technology: Textbook in volume 4. T. 1. Analog and pulse devices / [V. I. Senko, M. V. Panasenکو, E. V. Senko, etc.] - Kharkiv: Folio, 2002. - 510 p.
6. O. Faruq, M.T. Amin, Active Inductor with Feedback Resistor Based Voltage Controlled Oscillator Design for Wireless Applications / INTL JOURNAL OF ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS, 2018, VOL. 65, NO. 1, pp. 57-64
7. O. V. Osadchuk Mathematical modeling of a microwave generator based on a transistor structure with negative resistance / O. V. Osadchuk, A. O. Semenov // Bulletin of the Khmelnytskyi National University. – 2005. – No. 4, Part 1, Volume 2. – P. 256–259.
8. Filynyuk M. A. Fundamentals of negatronics. Volume I. Theoretical and physical foundations of negatronics: a monograph / M. A. Filynyuk. – Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia, 2006. – 456 p.
9. S. Diao and Y. Wang and C. Wang and F. Lin and C. H. Heng, VCO Design for Low-Power, High-Efficiency Transmitter Applications, in 2014 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology, Hefei, China, 2014, pp. 1-4.

Андрій КОТИШ

Центральноукраїнський національний технічний університет  
<https://orcid.org/0000-0002-4938-5234>  
e-mail: [akotysh@gmail.com](mailto:akotysh@gmail.com)

Іван САВЕЛЕНКО

Центральноукраїнський національний технічний університет  
<https://orcid.org/0000-0002-0078-5755>  
e-mail: [ivan.savelenko@gmail.com](mailto:ivan.savelenko@gmail.com)

Катерина ПЕТРОВА

Центральноукраїнський національний технічний університет  
<https://orcid.org/0000-0002-1928-6833>  
e-mail: [kateflash27@gmail.com](mailto:kateflash27@gmail.com)

## НАДЛИШКОВІ ТЕХНІЧНІ ВТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ

*В роботі проведено аналіз виникнення втрат електроенергії в електротехнічних системах та електричних мережах різного класу напруг. Особливу увагу приділено так званим надлишковим втратам, які не враховуються при проектуванні та експлуатації.*

*Ключові слова: комерційні та технічні втрати електроенергії, енергоринок, електрична мережа, підстанція*

Andrii KOTYSH, Ivan SAVELENKO, Kateryna PETROVA  
Central Ukrainian National Technical University

### THE EXCESSIVE TECHNICAL LOSSES OF ELECTRICITY IN ELECTRICAL SYSTEMS OF POWER CONSUMPTION

*Reducing electricity losses in electrical networks is a complex complex problem that requires significant capital investments necessary for optimizing the development of electrical networks, improving the electricity accounting system, introducing new information technologies in marketing activities and managing network modes, training personnel and equipping them with means of testing measuring devices etc. In reality, in recent years, in connection with the inclusion of normative losses in the tariff for electric energy transmission services, a dangerous trend of adapting these norms to actual losses has emerged.*

*The article analyzes the occurrence of power losses in electrical engineering systems and electrical networks of various voltage classes. Special attention is paid to the so-called excess losses, which are not taken into account during design and operation. These losses occur in insulators, linear fittings, current-limiting reactors, electricity meters, windings of current and voltage transformers, etc. Excessive losses of electricity in electric networks are direct financial losses of electric power companies. Savings from reducing losses could be directed to technical re-equipment of networks; staff salary increase; improvement of the organization of electricity transmission and distribution; increasing the reliability and quality of electricity supply to consumers. Unaccounted losses reach approximately 1% of the total amount. This fact must be taken into account. Because currently we are talking about millions of losses.*

*Keywords: commercial and technical losses of electricity, energy market, electrical network, substation*

#### Постановка проблеми

Зниження втрат електроенергії в електричних мережах - складна комплексна проблема, що вимагає значних капітальних вкладень, необхідних для оптимізації розвитку електричних мереж, вдосконалення системи обліку електроенергії, впровадження нових інформаційних технологій в маркетинговій діяльності і управління режимами мереж, навчання персоналу і його оснащення засобами перевірки пристроїв вимірювань тощо.

Наднормативні втрати електроенергії в електричних мережах - це прямі фінансові збитки електроенергетичних компаній. Економію від зниження втрат можна було б спрямувати на технічне переоснащення мереж; збільшення зарплати персоналу; вдосконалення організації передачі і розподілу електроенергії; підвищення надійності і якості електропостачання споживачів; зменшення тарифів на електроенергію.

#### Аналіз останніх джерел

Питанню зменшення втрат електроенергії присвячено чимало наукових праць, як чисто теоретичного так і прикладного характеру [1, 2, 3]. Та реальна картина залишається не дуже втішною, втрати електроенергії у кращому випадку перевищують 10%, а іноді й 13% [4, 5]. Методика визначення технологічних втрат регламентується нормативними документами, а саме наказами міністерства Енергетики та вугільної промисловості України [6, 7].

Реально ж останніми роками у зв'язку з включенням нормативних втрат в тариф на послуги по передачі електричної енергії намітилася небезпечна тенденція підгонки цих нормативів під фактичні втрати. Така практика приводить до зростання тарифів на послуги по передачі електроенергії і тарифів на електроенергію для її споживачів. Зростання тарифів на електроенергію створює додаткові стимули для її розкрадань, що призводить до подальшого зростання втрат.

В ідеальному випадку комерційні втрати електроенергії в електричній мережі, що визначаються розрахунковим шляхом, повинні бути рівні нулю. У реальних умовах передача в мережу електроенергії,

корисна передача і технічні втрати визначаються з похибками. Їх різниці фактично і є структурними складовими комерційних втрат. Вони повинні бути по можливості зведені до мінімуму за рахунок виконання відповідних заходів щодо їх зниження. У загальному випадку складові комерційних втрат електроенергії можна об'єднати в три групи:

- обумовлені похибками вимірювань відпущеною в мережу і корисно відпущеної електроенергії споживачам;
- обумовлені заниженням корисної передачі через недоліки енергозбутової діяльності і розкрадання електроенергії;
- обумовлені заборгованістю по оплаті за електроенергію.

**Метою роботи є:** дослідження обсягів технічних втрат електричної енергії в обладнанні мереж та підстанцій.

#### Виклад основного матеріалу

До устаткування, втрати в якому фахівці з розрахунків втрат електроенергії в мережах вважають незначними і не враховують в розрахунках, можна віднести:

- лінійну арматуру повітряних ліній, призначену для кріплення проводів, - підтримуючі зажими (човники), гасителі вібрації (на лініях 110-220 кВ), дистанційні розпірки між проводами розщепленої фази (на лініях 330-750 кВ);
- ізолятори повітряних ліній (втрати від струмів витоку);
- височастотні загороджувачі (ВЗ) і пристрої приєднання ВЧ-зв'язку (УПВЧ);
- вентильні розрядники (ВР) і обмежувачі перенапруг (ОПН);
- вимірювальні трансформатори струму (ТС) і напруги (ТН);
- електричні лічильники 0,38 кВ безпосереднього включення (без ТН);
- кабельні лінії (у частині діелектричних втрат в ізоляції);
- струмообмежувальні реактори;
- сполучні проводи і збірні шини розподільних пристроїв підстанцій.

Наявність в конструкціях лінійної арматури замкнених контурів з магнітних матеріалів (сталевих болтів з плашками і човниками із сталі або ковкого чавуну) призводить до втрат електроенергії в них на перемагнічування і вихрові струми. Втрати потужності в лінійній арматурі з магнітних матеріалів можна виразити через збільшення розрахункових опорів проводів, приведені в таблиці 1.

Таблиця 1

**Питомий опір проводів ПЛ та лінійної арматури**

Напруга ПЛ, кВ	Розрахунковий перетин, мм <sup>2</sup>	Питомий опір проводу, $r_0$ , Ом/мм·10 <sup>-3</sup>	Значення $r_0$ , Ом/мм·10 <sup>-3</sup> , для різновиду лінійної апаратури			
			Підтримуючі зажими	Гасителі вібрації та дистанційні розпірки	Всього	У відсотках $r_0$
110	185	160	2,0	0,7	2,7	1,7
220	300	100	1,2	0,5	1,7	1,7
330	2×300	50	2,4	3,3	5,7	11,4
500	3×400	25	3,7	7,0	10,7	43,0
750	4×400	18	4,9	11,7	16,6	92,0

Вентильний розрядник є послідовно сполучені активний опір, що шунтує іскровий проміжок, і колонка послідовно зібраних дисків, виготовлених з матеріалів на основі карбиду кремнію і що є нелінійними опорами (резистори). У нормальному режимі через ВР тече невеликий струм, визначуваний сумарним опором даному електричному ланцюгу. Обмежувачі перенапруг, що використовуються в мережах 35 кВ і вище, є колонками послідовно зібраних дисків, виготовлених на основі оксидно-цинкових матеріалів і є ще більш нелінійними опорами, ніж у ВР. Найчастіше використовуються резистори діаметром 28 мм і заввишки 8 мм. Висота колонки резисторів пропорційна номінальній напрузі. Наприклад, у фазі ОПН 500 кВ встановлюються колонки резисторів заввишки 4,8 м. Число паралельних колонок у фазі також залежить від номінальної напруги: 1 - при напрузі до 35 кВ; 4 - на 110 кВ; 7 - на 220 кВ; 12 - на 330 кВ; 18 - на 500 кВ; 26 - на 750 кВ. Розрахункові значення втрат в ВР і ОПН різної напруги приведені в таблиці 2.

Вимірювальні трансформатори струму і напруги є багатovitковими трансформаторами спеціальної конструкції, що складаються з однієї первинної обмотки і декількох вторинних. Одна з вторинних обмоток призначена для вимірювальних кіл, до неї приєднуються відповідні кола лічильників, ватметрів і вимірювальних перетворювачів системи телевимірювань. До решти обмоток ТС, званих захисними, приєднуються різні види пристроїв релейного захисту і автоматики. Число захисних обмоток у найбільш поширених типів ТС складає: одна - у трансформаторів 6-10 кВ; дві - 35 кВ; три - 110 кВ і вище. У ТН, що використовуються в мережах загального призначення, передбачаються дві вторинні обмотки: основна і додаткова.

Таблиця 2

## Втрати електроенергії у ВР та ОПН

Вид обладнання	Втрати електроенергії, тис. кВт·год на рік, для класу напруги, кВ											
	6	10	15	20	35	60	110	150	220	330	500	750
ВР	0,00 9	0,02 1	0,03 3	0,04 7	0,09 1	0,27	0,60	1,05	1,59	3,32	4,93	5,31
ОПН	0,00 1	0,00 1	0,00 2	0,00 4	0,01 3	0,10	0,22	0,40	0,74	1,80	3,94	8,54

На кожен тип ТН встановлюються значення найбільшого вторинного навантаження, при якому забезпечується той або інший клас точності. Наприклад, ТН типа ЗНОЛ-06 при потужності вторинного навантаження не більше 50 Вт забезпечує клас точності 0,2, при 75 Вт - клас 0,5, при 150 Вт - клас 1, при 300 Вт - клас 3. Втрати в ТС і його вторинному навантаженні відносяться до втрат навантажень і залежать від квадрата фактичного струму. При відносному струмовому навантаженні ТС, рівному, наприклад, 50% номінального первинного струму, втрати складуть 25% номінальних. Втрати потужності, споживаною ТС від силового ланцюга, визначається сумою чотирьох складових:

- втрат в первинній обмотці -  $\Delta P_1$ ;
- у магнітній системі -  $\Delta P_m$ ;
- у вторинних обмотках - вимірювальною  $\Delta P_{2 \text{ изм}}$  і захисною  $\Delta P_{1 \text{ защ}}$ ;
- і в їх навантаженнях -  $\Delta P_{н \text{ изм}}$  і  $\Delta P_{н \text{ защ}}$ .

Сума перших чотирьох складових є втратами у внутрішніх елементах ТС -  $\Delta P_{вн}$ , а останніх два - в зовнішніх елементах ТС. Дослідження показали, що розрахункові річні втрати в ТС у всьому діапазоні номінальної напруги добре апроксимуються лінійною залежністю (тис. кВт·год/рік):

$$\Delta W_{ТС} = 0,07 U_{ном} \cdot \beta_{ТС}^2, \quad (1)$$

де  $\beta_{ТС}$  - відносне струмове навантаження ТС.

Трансформатори напруги, на відміну від ТС, працюють в практично стабільному режимі впродовж всього розрахункового періоду і належать до втрат холостого ходу.

У кожній точці обліку електроенергії на напрузі 6-35 кВ використовується два ТС, а на напрузі 110 кВ і вище - три, у всіх випадках встановлюється три ТН (у мережах 6-10 кВ можуть використовуватися трифазні ТН).

Втрати електроенергії в ТН і ТС, встановлених в одній точці обліку, складають (тис. кВт·год на рік):

- 2,8 - в мережі напругою 6-10 кВ;
- 5,1 - 35 кВ;
- 14,2 - 110 кВ;
- 17,4 - 220 кВ;
- 23,8 - 330 кВ;
- 36,0 - 500 кВ;
- 68,5 - 750 кВ.

В таблиці 3 приведені дані по споживанню потужності колами струму і напруги індукційних і електронних лічильників безпосереднього включення, нормованому стандартами. Ці втрати відносяться до постійних втрат, тому неважко обчислити річне споживання енергії лічильниками, яке приведене в тій же таблиці. Слід мати на увазі, що приведені цифри відображають витрату електроенергії на забезпечення роботи лічильника і не впливають на свідчення споживаної абонентом енергії.

Таблиця 3

## Параметри лічильників безпосереднього включення

Вид лічильника	Типовий клас точності	Споживана потужність одним колом		Сумарна споживана потужність, Вт	Споживання електроенергії кВт·год на рік
		напруги, Вт	струму, ВА		
Однофазний індукційний	2,5	2,0	0,5	2,1	18,4
Однофазний електронний	2,0	2,0	2,5	2,5	21,9
Трифазний індукційний	1,0	3,0	2,5	10,5	92,0
Трифазний електронний	1,0	2,0	4,0	8,4	73,6

Річні втрати в ізоляції кабелів залежать від напруги кабелю і тангенса кута діелектричних втрат. Для найбільш поширених в даний час кабелів річні втрати в ізоляції, залежно від їх перетину, складають:

- 0,9 - 1,5 тис. кВт·год/км для кабелів 6-10 кВ;

2,5 - 5,5 тис. кВт-год/км для кабелів 20-35 кВ;

30 - 60 тис. кВт-год/км для кабелів 110 кВ.

Втрати в струмообмежувальних реакторах залежать від робочого струму, що протікає по його обмотках. Розрахункові значення втрат при середньому значенні робочого струму можуть бути визначені по формулі:

$$\Delta W_p = 0,66\sqrt{3}U_{ном} \cdot I_{ном}, \quad (2)$$

Втрати в сполучних проводах і збірних шинах розподільних пристроїв підстанцій визначаються сумарною довжиною провідників на території підстанції. Відомо, що опір алюмінієвого проводу (Ом/км.) пов'язаний з його перетином  $F$ , мм<sup>2</sup> співвідношенням  $r_0 = 32/F$ . При економічній щільності струму  $I=F$  і річні втрати електроенергії можуть бути визначені за формулою (тис. кВт-год/рік):

$$\Delta W_{n/cm} = 96F \cdot L \cdot \tau \cdot 10^{-9}, \quad (3)$$

Середні протяжності, розрахункові перетини провідників на підстанціях різної напруги і річні втрати електроенергії, визначені по формулі (3) при  $\tau = 4000$  год, приведені в таблиці 4.

Таблиця 4

**Втрати електроенергії у з'єднувальних проводах та збірних шинах розподільчих пристроїв підстанцій**

Номинальна напруга, кВ	Середня довжина з'єднувальних проводів та збірних шин на підстанції, м	Розрахунковий перетин, мм <sup>2</sup>	Втрати електроенергії, тис. кВт-год на рік
6-20	50	70	1,3
35	50	150	2,9
110	160	185	11,4
150	200	240	18,4
220	270	300	31,1
330	430	600	99,1
500	900	1200	414,7
750	1200	1600	737,3

Розрахунки показали, що для порівняно невеликої у лінійній арматурі - 1 млн. кВт-год;  
у ізоляторах ПЛ - 7 млн. кВт-год;  
у ВР і ОПН - 1 млн. кВт-год;  
у пристроях ВЧ-зв'язку - 1,5 млн. кВт-год;  
у струмообмежувальних реакторах - 0,5 млн. кВт-год;  
у ізоляції кабелів - 0,1 млн. кВт-год;  
у ТС і ТН - 5,5 млн. кВт-год;  
у лічильниках - 6,7 млн. кВт-год;  
у сполучних проводах і збірних шинах підстанцій - 1,2 млн. кВт-год.

### Висновок

Таким чином сумарні втрати складають 23,3 млн. кВт-год або близько 1% загального споживання енергії. При звичайних значеннях технічних втрат від складових, що традиційно враховуються, близько 8-12%, додаткові втрати у розмірі 1% не можуть вважатися неістотними.

### Література

1. Буцьо З. Ю. Аналіз втрат електричної енергії в електромережах усіх рівнів напруги в енергосистемах провідних зарубіжних країн та України / З.Ю. Буцьо, В.І. Мартинюк // Енергетика та електрифікація – 2020. – № 2. – С. 15 – 17.
2. Васюченко П.В. Особенности внедрения мероприятий по снижению потерь электрической энергии на промышленных предприятиях Украины / П.В. Васюченко, И.Г. Кирисов, А.М. Чернюк // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. Том 29 (68) Ч. 2 № 3 2018. С. 66 – 69.
3. Ципленков Д.В. Методи та засоби зниження технічних втрат електроенергії в елементах систем електропостачання / Д.В. Ципленков, П.Ю. Красовський // Електротехніка та електроенергетика – 2015. – № 1. – С. 77 – 82.
4. РБК-Україна: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.rbc.ua/ukr/news/poteri-elektroenerгии-ukrainskih-setyah-2020-1627646052.html>



5. ЕнергоВсесвіт: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://vse.energy/news/pek-news/electro/1214-techno-energy-losses>
6. Методика по визначенню втрат електроенергії у трансформаторах і лініях електропередач: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ips.ligazakon.net/document/FIN7392>
7. Про Методичні рекомендації визначення технологічних витрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередавання: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ips.ligazakon.net/document/FIN96969>
8. Котиш А.І. Аналіз заходів по зниженню надлишкових технічних втрат електроенергії в електричних мережах /А.І. Котиш, І.О. Переверзев // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. /Вип. 19. – Кіровоград: КНТУ, 2007. – С.235-239.
9. Орлович А.Е. Анализ возникновения сверхнормативных технических потерь электроэнергии в электрических сетях / А.Е. Орлович, А.И. Котыш // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – С. 99-105.
10. Котиш А.І. Автоматизовані засоби технічної діагностики та електричного контролю за станом ізоляції в сільських електричних мережах: Автореф. дис... к-та техн. наук: 05.11.13 / НТУ «ХПІ». – Харків, 2001. – 17 С.

#### References

1. Butso Z. Yu. Analiz vtrat elektrychnoi enerhii v elektromerezhakh usikh rivniv napruhy v enerhosystemakh providnykh zarubizhnykh krain ta Ukrainy / Z.Iu. Butso, V.I. Martyniuk // Enerhetyka ta elektryfikatsiia – 2020. – № 2. – С. 15 – 17.
2. Vasiuchenko P.V. Osobennosti vnedreniya meropyriaty po snyzheniyu poter elektrycheskoi enerhyu na promyshlennykh predpriyatiyakh Ukrainy / P.V. Vasiuchenko, Y.H. Kyrsov, A.M. Cherniuk // Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: tekhnichni nauky. Tom 29 (68) Ch. 2 № 3 2018. S. 66 – 69.
3. Tsyplenkov D.V. Metody ta zasoby znyzhennia tekhnichnykh vtrat elektroenerhii v elementakh system elektropostachannia / D.V. Tsyplenkov, P.Iu Krasovskiy // Elektrotehnika ta elektroenerhetyka – 2015. – № 1. – С. 77 – 82.
4. RBK-Ukraina: [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://www.rbc.ua/ukr/news/poteri-elektroenerhii-ukrainskih-setyah-2020-1627646052.html>
5. EnerhoVsesvit: [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://vse.energy/news/pek-news/electro/1214-techno-energy-losses>
6. Metodyka po vyznachenniu vtrat elektroenerhii u transformatorakh i liniyakh elektroperedach: [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://ips.ligazakon.net/document/FIN7392>
7. Pro Metodychni rekomendatsii vyznachennia tekhnolohichnykh vytrat elektrychnoi enerhii v transformatorakh i liniyakh elektroperedavannia: [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://ips.ligazakon.net/document/FIN96969>
8. Kotysh A.I. Analiz zakhodiv po znyzhenniu nadlyshkovykh tekhnichnykh vtrat elektroenerhii v elektrychnykh merezhakh /А.І. Котыш, І.О. Переверзев // Zbirnyk naukovykh prats Kirovohrads'koho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu / техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. /Вип. 19. – Кіровоград: КНТУ, 2007. – С.235-239.
9. Orlovych A.E. Analiz voznyknovenyia sverkhnormatyvnykh tekhnicheskyykh poter elektroenerhyu v elektrycheskykh setiakh / А.Е. Орлович, А.І. Котыш // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – С. 99-105.
10. Kotysh A.I. Avtomatyzovani zasoby tekhnichnoi diahnostryky ta elektrychnoho kontroliu za stanom izoliatsii v sil'skykh elektrychnykh merezhakh: Avtoref. dys... k-ta tekhn. nauk: 05.11.13 / NTU «KhPI». – Kharkiv, 2001. – 17 S.

Владислава МІЩЕНКО

Український державний хіміко-технологічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-1867-3874>

e-mail: vlada@ua.fm

Станіслав КОВАЛЬОВ

Український державний хіміко-технологічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-8839-2392>

e-mail: sv\_kovalyov@i.ua

## ЕЛЕКТРООСАДЖЕННЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ ЗАЛІЗНИХ ПОКРИТТІВ ОДЕРЖАНИХ У МАГНІТНОМУ ПОЛІ НИЗЬКОЇ ІНДУКЦІЇ

В роботі наведено результати досліджень електроосадження та властивості залізних покриттів одержаних електрокристалізацією у магнітному полі низької індукції.

Ключові слова: електроосадження, магнітне поле, залізні покриття, корозійна стійкість, мікротвердість.

Vladyslava MISHCHENKO, Stanislav KOVALYOV  
Ukrainian State University of Chemical Technology

### ELECTRODEPOSITION AND PROPERTIES OF IRON DEPOSITS OBTAINED IN A MAGNETIC FIELD OF WEAK INDUCTION

The paper presented the electrodeposition, morphology and properties of iron deposits were obtained using a low-induction magnetic field of 0.001 T in the electrocrystallization process. The vector of magnetic field induction was directed perpendicular to the electrode surface. Iron deposits were obtained in an electrolyte  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  – 1.5 mol/l and  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  – 0.15 mol/l. The current density was 7 A/dm<sup>2</sup>. Deposits were obtained on a copper base. The influence of the magnetic field on the process of electrodeposition of deposits was studied using the method of stationary potentiometry and cyclic voltammetry. Determination of the influence of the magnetic field on the morphology of deposits was carried out using scanning electron microscopy. Determination of the properties of the obtained iron deposits was carried out by measuring microhardness, reflectivity and corrosion resistance. Studies have shown that a magnetic field with an inductance of 0.001 T affects the processes of electrodeposition of an iron deposit, increasing its overvoltage by more than 1 volt. The morphology of the deposits does not change significantly, but the crystallites obtained in the magnetic field have a more rounded shape and the surface of the deposit is more uniform. The microhardness of deposits obtained by electrodeposition without the use of a magnetic field was 2610 MPa, and with a magnetic field - 2720 MPa. The reflectivity of deposits obtained in a magnetic field is 17% higher. The corrosion resistance of deposits obtained in a magnetic field is approximately two times higher. After conducting corrosion studies, the microhardness of the deposits obtained using a magnetic field did not change (2630 MPa), however, the microhardness of the deposits obtained under normal conditions decreased by approximately two times. Electrolysis parameters for maximum corrosion resistance, microhardness and reflectivity are proposed in the work.

Key words: electrodeposition, magnetic field, iron deposits, corrosion resistance, microhardness.

### Постановка проблеми

Покриття залізом в основному використовуються для відновлення розмірів зношених деталей машин. В роботі поставлена задача відновити шар заліза і одночасно покращити його властивості, а саме мікротвердість та корозійну стійкість поверхні.

### Аналіз останніх джерел

Залізні покриття, електроосадженні у магнітному полі, мають покращені показники властивостей, саме тому, вивченню впливу магнітного поля на електрокристалізацію залізних покриттів присвячено багато публікацій [1-9].

На думку деяких авторів вплив магнітного поля при електрокристалізації полягає у збільшенні швидкості осадження магнітних та немагнітних частинок за рахунок створення конвекції. Поле конвекції виникає за рахунок сили Лоренца, тобто виникає перемішування шару біля електрода, що дозволяє збагатити частинками приелектродний шар [1-5]. У роботі [6] проводились дослідження з електроосадження заліза у статичному однорідному магнітному полі індукцією від 0,8 до 5 Т та щільності струму до 10 мА/дм<sup>2</sup> за допомогою стандартної трьохелектродної системи при температурі 25 °С. В ході експерименту було встановлено, що вихід за струмом при електроосадженні заліза значно зменшувався у магнітному полі. В процесі збільшення щільності магнітного потоку, морфологія поверхні зерен заліза ставала більш округлою та гладкою.

У роботі [7] досліджувались магнітні та структурні властивості заліза, нанесеного електроосадженням на мідь та срібло. Щільність струму сягала 2 А/дм<sup>2</sup>. Індукція магнітного поля до 20,5 Т. Результати дослідження описуються моделлю суперферромагнетизму.

Вплив прикладених магнітних полів (до 1 Т) з перпендикулярною та паралельною орієнтацією відносно поверхні електрода на електрокристалізацію заліза досліджували в заліzosульфатному кислому електроліті [8]. Магнітне поле має впливає на процес зародкоутворення, коли воно прикладене паралельно до поверхні електрода. Було встановлено, що прикладене магнітне поле змінює морфологію поверхні осадженого заліза, шари стають більш однорідні.

В роботі [9] досліджено вплив горизонтального магнітного поля з індукцією 0,333 Т на сумісне осадження заліза та нікелю. Щільність струму 4 А/дм<sup>2</sup>. Встановлено, що вплив магнітного поля збільшує вміст заліза в осаді та дестабілізує коливання потенціалу електрохімічної комірки при гальваностатичному осадженні.

У всіх зазначених роботах проводили дослідження з використанням магнітного поля індукцією від 0,3 Т до 8 Т. Магнітне поле впливає на електрохімічний процес, властивості покриттів, але використання магнітного поля значенням в декілька Тесла важко організувати технологічно та воно завдає шкоди виробничому персоналу та навколишньому середовищу.

За допомогою магнітного поля низької індукції можлива зміна процесів, які відбуваються при електролізі, що, безумовно, змінить морфологію та властивості покриття. Це дозволить виключити органічні домішки з електролітів та організувати керований електрохімічний процес [10].

В роботі по дослідженню електроосадження міді в магнітному полі низької індукції було одержано збільшення мікротвердості мідного осаду в декілька разів [11]. В цій роботі показано вплив параметрів електролізу та індукції магнітного поля на швидкість електроосадження, структуру, морфологію та властивості осаду.

**Метою роботи є:** вивчення впливу магнітного поля низької індукції (до 0,001 Т) на електроосадження, морфологію та властивості залізних покриттів.

#### Виклад основного матеріалу

Залізні покриття отримували в електроліті складу, моль/л: FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O – 1,5 та Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·18H<sub>2</sub>O – 0,15. Електроосадження проводилось при температурі 298±3 °К. Щільність струму складала 7 А/дм<sup>2</sup>.

Електрохімічну комірку розташовували у магнітному полі індуктивністю 0,001 Т згідно методу, описаному у [11].

Електродом порівняння слугував хлорсрібний електрод заповнений насиченим розчином КСl. В якості матеріалу робочого електрода використовували мідь. Циклічні вольтамперограми одержані за допомогою потенціостата ПИ-50-1.1 та програматора ПР-8.

Фазовий аналіз отриманих покриттів проводили за допомогою рентгенівського дифрактометра ДРОН-2. Морфологію поверхні залізних осадів вивчали за допомогою РЕМ-106І з використанням формування зображень у вторинних електронах.

Мікротвердість та відбивна здатність вивчалась з метою виявлення зміни фізико-механічних властивостей отриманих осадів та проводилась за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 та фотоелектричного блискоміра ФБ-2. Корозійні випробування проводились шляхом занурення зразків покриття з площею поверхні 1 см<sup>2</sup> у розчин 3 % мас. NaCl та витримування зразків у розчині протягом 3 діб при кімнатній температурі.

**Електрохімічні дослідження.** Виявлення впливу магнітного поля низької індукції на процес електроосадження залізних покриттів досліджувалось з використанням методів стаціонарної хронопотенціометрії та циклічної вольтамперометрії.

Експериментальні дослідження методом хронопотенціометрії (рис.1) показали, що потенціал електрода, при осадженні заліза, за наявності магнітного поля, більше на 1 В, порівняно з електроосадженням без використання магнітного поля. Це вказує, що магнітне поле впливає на процес електроосадження покриттів значно збільшуючи перенапруження процесу.

На циклічній вольтамперограмі, одержаній на платиновому електроді, можна виявити сумарний пік катодного осадження заліза і виділення водню при потенціалах від -0,4 В до -1,5 В (рис.2) та анодний пік при потенціалах вище -0,2 В, що відповідає окисленню заліза.

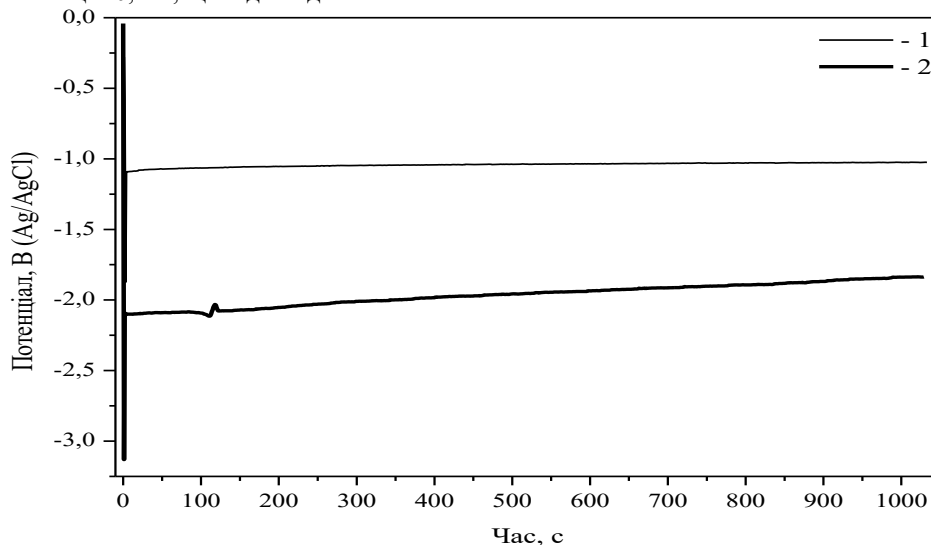


Рис. 1. Хронопотенціограма електроосадження залізного покриття на мідну основу при щільності струму 7 А/дм<sup>2</sup> при індукції магнітного поля, Т: 1 – 0; 2 – 0,001.

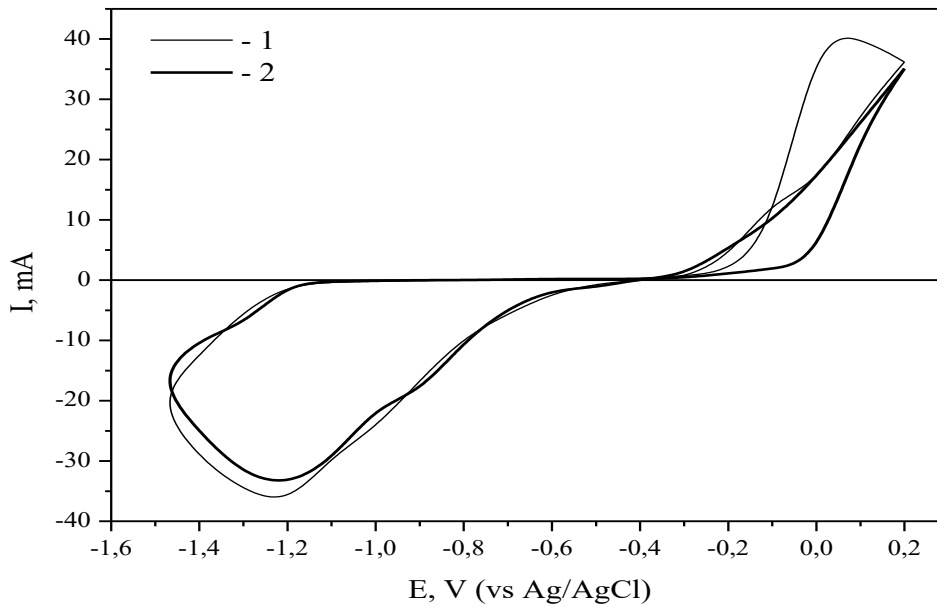


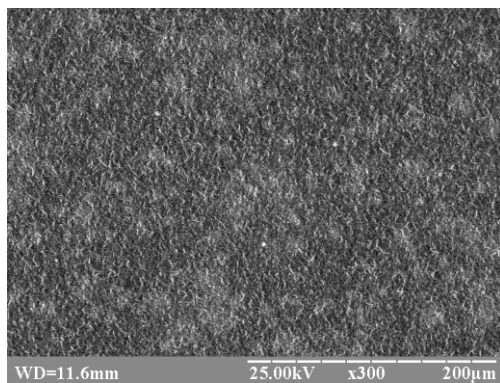
Рис. 2. Циклічна вольтамперограма на платиновому електроді, одержана при швидкості розгортки потенціалу 0,1 В/с і індукції магнітного поля, T: 1 – 0; 2 – 0,001.

Застосування магнітного поля приведе до збільшення перенапруження відновлення іонів заліза, що вказує на гальмування процесу виділення заліза при застосуванні магнітного поля.

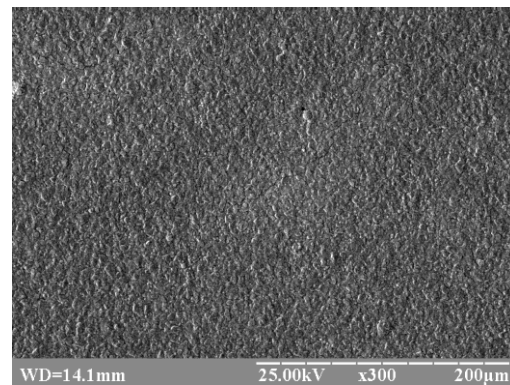
Одержані електрохімічні дані вказують на різницю процесів, які проходять на електродах при застосуванні магнітного поля і без нього, що безперечно впливає на морфологію і властивості залізних покриттів.

Збільшення перенапруження процесу, як відомо, також спостерігається при додаванні поверхнево-активних речовин до складу електроліту, що призводить до утворення осадів з більш однорідною морфологією поверхні, зменшенням пористості та розміру кристалітів.

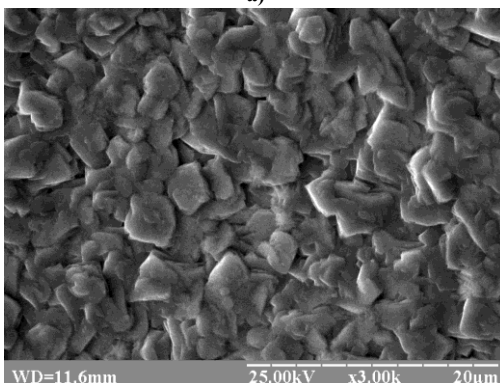
**Структурні дослідження.** Згідно до фото скануючої електронної мікроскопії (рис. 3), одержані у магнітному полі осаді мають структуру з кристалітами у вигляді прямогранних лусочок. За відсутності магнітного поля структура осаду подібна, але з більш округлою формою кристалітів.



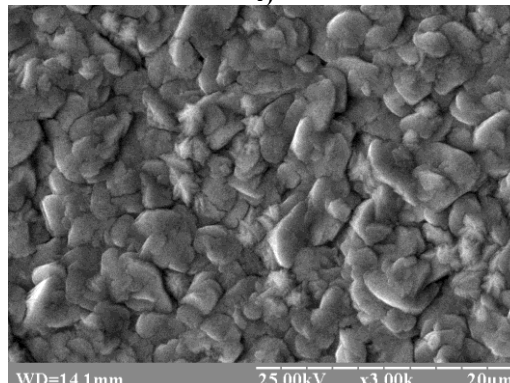
а)



г)



б)



д)

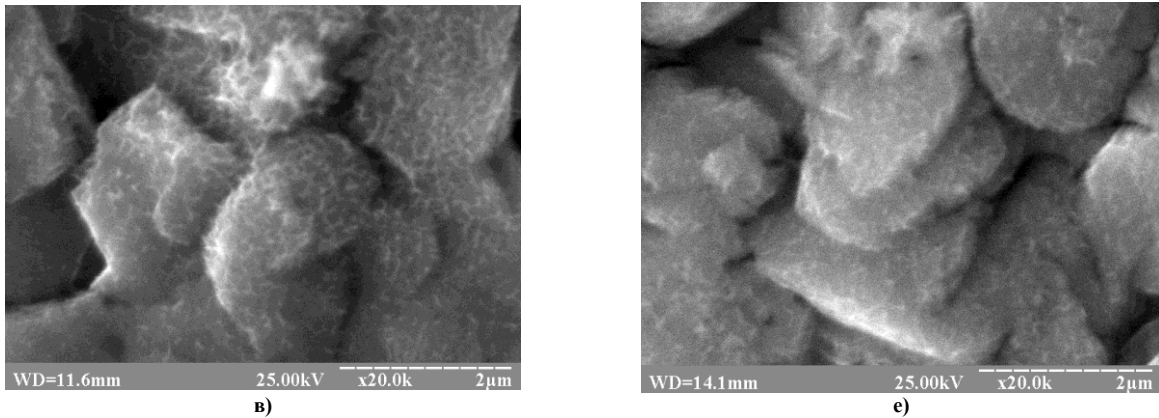


Рис. 3. Фото поверхні залізних покриттів отриманих методом СЕМ, збільшення: а), г) –x300; б), д) – x3000; в), е) –x20000. а), б), в) – зразок осаду в одержаний у звичайних умовах; г), д), е) – зразок осаду одержаний при застосуванні магнітного поля.

Як видно з рис. 3 морфологія покриття одержаного у магнітному полі візуально більш однорідна (рис. 3, г) порівняно зі звичайними покриттями (рис. 3, а), що характеризується меншою наявністю пор.

Дані фазового дослідження свідчать про те, що в осадах присутня тільки фаза заліза, на що вказують однакові піки на рентгенівських дифрактограмах (рис.4).

**Властивості покриттів.** Фізико-механічні властивості досліджували вимірюванням мікротвердості покриттів, їх відбивної здатності та корозійної стійкості.

Отримані залізні покриття, як у магнітному полі, так і без, це осади світло сірого кольору, які не змінюються протягом зберігання при кімнатній температурі. Значення відбивної здатності покриттів наведені у таблиці 1. Покриття одержані у магнітному полі мають декілька кращу відбивну здатність, проте ця різниця не суттєва і складає близько 17%.

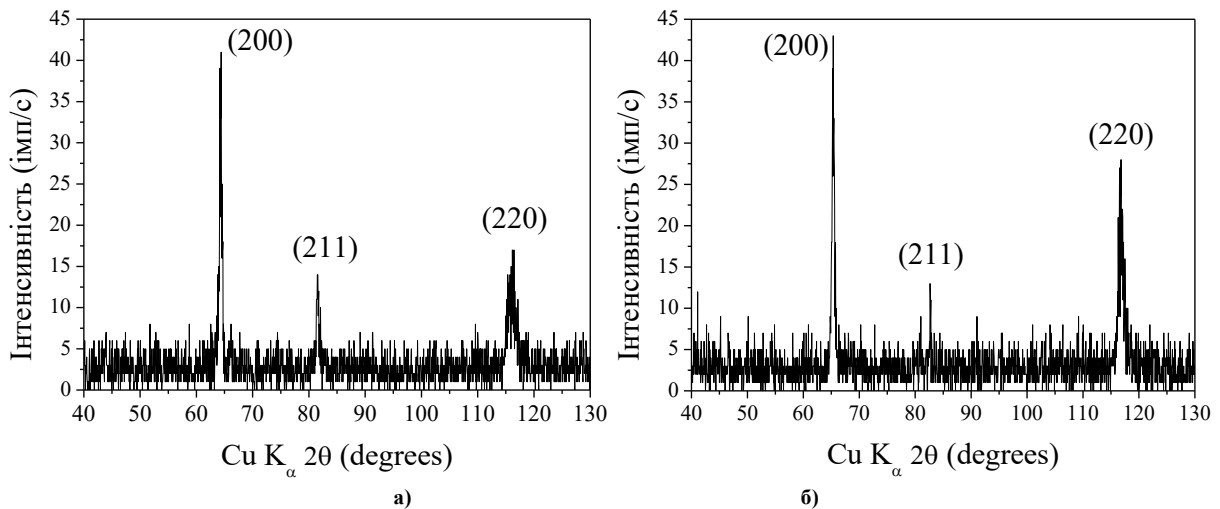


Рис. 4. Рентгенівські дифрактограми електроосаджених покриттів заліза на мідну основу при щільності струму 7 А/дм<sup>2</sup> та індукції магнітного поля, Т: а – 0; б – 0,001.

Таблиця 1

Залежність відбивної здатності		
Індукція магнітного поля, Т	0	0,001
Відбивна здатність у % по відношенню до еталону	16	19

Виміряні значення мікротвердості покриттів наведені в таблиці 2 і вказують на те, що магнітне поле впливає на мікротвердість, незначно збільшуючи її.

Таблиця 2

Індукція магнітного поля, Т	Залежність мікротвердості зразків до та після корозійних випробувань	
	Мікротвердість, МПа	
	До корозійних випробувань	Після корозійних випробувань
0	2610	1300
0,001	2720	2630

Результати корозійних досліджень показали, що покриття одержані електроосадженням у магнітному полі мають більшу корозійну стійкість. На рис. 5 наведені фото зразків, які пройшли корозійні випробування у 3% мас. розчині NaCl. Так на рис. 5а видно, що поверхня покриття на 100% зруйнована і покрита окислами. На відміну від неї, на зразку покриття отриманого із застосуванням магнітного поля (рис. 5, б) зруйновано лише половину поверхні.

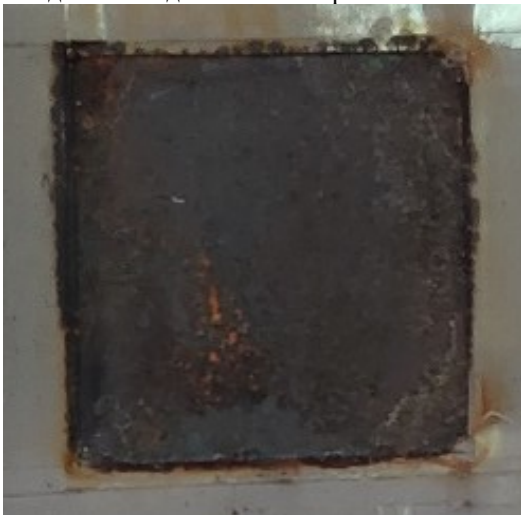
Значення мікротвердості залізних покриттів виміряні після корозійних випробувань наведені в таблиці 2. Мікротвердість покриттів отриманих з застосуванням магнітного поля майже не змінилася, на відміну від мікротвердості зразків покриття отриманих у звичайних умовах, яка зменшилась у два рази (див. рис. 5 в та г, це фотографії поверхонь зразків з відбитками від алмазної піраміди, де збільшення розміру відбитку вказує на зменшення мікротвердості). Це, вірогідно, пов'язано з більшою глибиною корозії зразків покриття отриманих без застосування магнітного поля (на що вказують також фото на рис. 5 а і б).

Магнітне поле змінює перенапруження процесу електроосадження, що приводить до зміни морфології поверхні осаду, яка стає більш рівномірною, що, вірогідно, затримує проникнення корозійного середовища у пори заліза та його окислення і руйнування. Тому даний метод дозволяє отримувати покриття, що мають більшу корозійну стійкість та зберігають свої механічні властивості при роботі у корозійному середовищі.

### Висновки

Загальний висновок по результатам досліджень полягає у тому, що застосування магнітного поля низької індукції впливає на електроосадження осадів, змінює морфологію залізного покриття і покращує його властивості. Детальні висновки наведені нижче:

1. При застосуванні магнітного поля індукцією 0,001 Т спостерігається збільшення перенапруження виділення заліза.
2. Морфологія покриття при застосуванні магнітного поля змінюється і стає більш рівномірною.
3. Корозійна стійкість покриттів, одержаних магнітному полі вища, ніж без його застосування.
4. Запропоновано умови електроосадження залізних осадів (магнітне поле індукцією 0,001 Т та щільність струму 7 А/дм<sup>2</sup>), що дозволяє отримати покриття з покращеною мікротвердістю, відбивною здатністю та корозійною стійкістю.



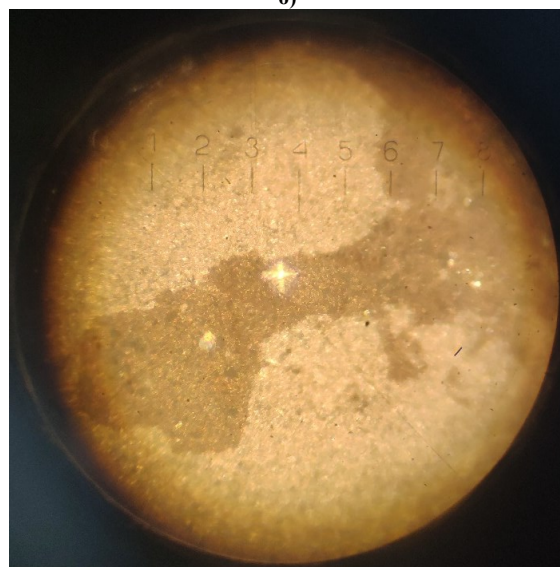
а)



б)



в)



г)

Рис. 5. Фото зразків та мікрофотографії зразків залізного покриття отримані після корозійних випробувань у водному розчині 3% мас. NaCl. Умови одержання покриття: а), в) – без застосування магнітного поля; б), г) – при використанні магнітного поля індукцією 0,001 Т. Одна поділлка шкали на фото в), г) дорівнює 0,3 мкм.

### Література

1. Coey J. M. D., Hings G. Magnetic electrodeposition // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2001. – № 326. – P. 238 – 245.
2. Chopart J.-P., Aaboubi O., Merienne E. MHD-control on limiting Faradaic currents // *Energy Conversion and Management*. – 2002. – № 43. – P. 365 – 371.
3. Bund A., Koehler S., Kuehnlein H. H. Magnetic field effects in electrochemical reactions // *Electrochimica Acta*. – 2003. – № 49. – P. 147 – 152.
4. Coey J. M. D., Rhen F. M. F., Dunne P. The magnetic concentration gradient force — Is it real? // *J Solid State Electrochem*. – 2007. – № 11. – P. 711 – 717. – DOI: 10.1007/s10008-006-0254-4.
5. Mutschke G., Bund A. On the 3D character of the magnetohydrodynamic effect during metal electrodeposition in cuboid cells // *Electrochemistry Communications*. – 2008. – № 10. – P. 597 – 601.
6. Matsushima H., Nohira T., Mogi I. Effects of magnetic field on iron electrodeposition // *Surface and Coatings Technology*. – 2004. – № 179. – P. 245 – 251. - DOI:10.1016/S0257-8972(03)00860-0.
7. Kömpe K., Kühl E., Nagorny K. Magnetic and Structural Properties of Electrodeposited Iron on Copper and Silver // *Hyperfine Interactions*. – 2002. – № 141/142. – P. 419 – 424.
8. Koza J., Uhlemann M., Gebert A. The effect of magnetic fields on the electrodeposition of iron // *J Solid State Electrochem*. – 2008. – № 12. – P. 181 – 192. - DOI:10.1007/s10008-007-0379-0.
9. Gu Z. H., Fahidy T. Z. On the effect of a horizontal magnetic field on the electrolytic deposition of thin Fe-Ni films // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2000. – № 33. – P. 113 – 114.
10. Ковальов С.В, Науменко О.П., Міщенко В.І. Порівняння та поліпшення теплообмінних апаратів харчових виробництв шляхом зміцнення деталей електрохімічним осадом у слабкому магнітному полі // *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ. Мелітополь: ТДАТУ. – 2021. – Т. 1, вип. 21. – С. 28-34.*
11. Kovalyov S. V., Girin O. B., Debiemme-Chouvy C., Mishchenko V. I. Copper electrodeposition under a weak magnetic field: Effect on the texturing and properties of the deposits // *Journal of Applied Electrochemistry*. – 2021. – Vol. 51, № 11. – P. 1 – 9. - DOI:10.1007/s10800-020-01492-3.

### References

1. Coey J. M. D., Hings G. Magnetic electrodeposition // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2001. – № 326. – P. 238 – 245.
2. Chopart J.-P., Aaboubi O., Merienne E. MHD-control on limiting Faradaic currents // *Energy Conversion and Management*. – 2002. – № 43. – P. 365 – 371.
3. Bund A., Koehler S., Kuehnlein H. H. Magnetic field effects in electrochemical reactions // *Electrochimica Acta*. – 2003. – № 49. – P. 147 – 152.
4. Coey J. M. D., Rhen F. M. F., Dunne P. The magnetic concentration gradient force — Is it real? // *J Solid State Electrochem*. – 2007. – № 11. – P. 711 – 717. – DOI:10.1007/s10008-006-0254-4.
5. Mutschke G., Bund A. On the 3D character of the magnetohydrodynamic effect during metal electrodeposition in cuboid cells // *Electrochemistry Communications*. – 2008. – № 10. – P. 597 – 601.
6. Matsushima H., Nohira T., Mogi I. Effects of magnetic field on iron electrodeposition // *Surface and Coatings Technology*. – 2004. – № 179. – P. 245 – 251. - DOI:10.1016/S0257-8972(03)00860-0.
7. Kömpe K., Kühl E., Nagorny K. Magnetic and Structural Properties of Electrodeposited Iron on Copper and Silver // *Hyperfine Interactions*. – 2002. – № 141/142. – P. 419 – 424.
8. Koza J., Uhlemann M., Gebert A. The effect of magnetic fields on the electrodeposition of iron // *J Solid State Electrochem*. – 2008. – № 12. – P. 181 – 192. - DOI:10.1007/s10008-007-0379-0.
9. Gu Z. H., Fahidy T. Z. On the effect of a horizontal magnetic field on the electrolytic deposition of thin Fe-Ni films // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2000. – № 33. – P. 113 – 114.
10. Kovalyov S.V, Naumenko O.P., Mishchenko V.I. Porivniannia ta polipshennia teploobminnykh aparativ kharchovykh vyrobnystv shliakhom zmitsnennia detalei elektrokhimichnym osadom u slabkomu mahnitnomu poli // *Pratsi Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu: naukove fakhove vydannia / TDAТУ. Melitopol: TDAТУ. – 2021. – Т. 1, вып. 21. – С. 28-34.*
11. Kovalyov S. V., Girin O. B., Debiemme-Chouvy C., Mishchenko V. I. Copper electrodeposition under a weak magnetic field: Effect on the texturing and properties of the deposits // *Journal of Applied Electrochemistry*. – 2021. – Vol. 51, № 11. – P. 1 – 9. – DOI:10.1007/s10800-020-01492-3.

Микола ОДЕГОВ

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку

<https://orcid.org/0000-0001-5526-2487>

onick\_64@ukr.net

Л. БУКАТА, І. БАЛЄЄВ

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку

## ВСТАНОВЛЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ПОШИРЮВАННЯ СПЕКТРІВ ОПТИЧНИХ ІМПУЛЬСІВ МЕТОДАМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

У прикладному аспекті вирішувана проблема відноситься до завдань збільшення швидкості передачі в магістральних волоконно-оптичних мережах (ВОСП). Оскільки таких систем зараз ще не існує, то поширення сигналів досліджується за допомогою імітаційної моделі. Ця модель заснована на нелінійному диференціальному рівнянні Шредингера та реалізована авторською програмою *Nonlinear*. Встановлення аналітичних форм залежностей між шириною спектру оптичних імпульсів на стороні передачі та прийому здійснюється за допомогою методів штучного інтелекту, які реалізовано авторською програмою *Band Relative*.

**Ключові слова:** волоконно-оптичні системи передачі, нелінійні ефекти, спектр, імітаційне моделювання, штучний інтелект, методи структурної ідентифікації.

Nikolay ODEGOV N. A., L. BUKATA, I. BALEEV

State University of Intellectual Technologies and Communication

## ESTABLISHING THE REGULARITIES OF SPECTRUM BROADENING IN OPTICAL PULSES BY METHODS OF SINGLE INTELECTU

In the applied aspect, the problem solved refers to the tasks of increasing the speed of information transmission in trunk fiber-optical networks (FOTS). Since such systems are not yet available, the distribution of signals is studied using an imitation model. This model is based on the nonlinear differential equation of Schrödinger. The problem of the problem is carried out in the author's program *Nonlinear*. As a result of modeling, a significant array of experimental data was obtained. The data was obtained for different types of envelope optical signals and different levels of nonlinear effects. The transfer of information by optical solitons is considered one of the promising areas of improvement of the FOTS. Solitonic effects are achieved in the nonlinear regime of FOTS. In this case, there is either the preservation of the effective duration of optical impulses. At the same time, the effect of expanding the spectrum of these impulses arises. This phenomenon should be taken into account with the synthesis of optimal uneven frequency plans for adaptive sags.

To solve this problem, it is important to minimize the number of measurements in promising SPP. For this, it is necessary to establish patterns of changes in the spectra of optical impulses in the form of analytical dependencies. In this work, this problem is solved by the methods of artificial intelligence. The task of interpolation on sparse channel plans is solved by parametric identification methods. The task of extrapolation to arbitrary frequency plans is solved by structural identification methods.

The work found that the dependences between the initial width of the spectrum of optical impulses and the width of the spectrum on the side of the reception are quite smooth. The problem of interpolation is solved on a lot of sedate polynomes. The solution to the problem of extrapolation on different methods of organizing frequency plans shows that the effective models between the initial and final width of the impulses are optimal are polynomes of the fourth or fifth order.

**Keywords:** fiber optic transmission systems, nonlinear effects, spectrum, computer simulation, artificial intelligence, structural identification methods

### Постановка проблеми та аналіз джерел

Передача інформації оптичними солітонами вважається одним з перспективних напрямків вдосконалення волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП) в напрямку підвищення пропускної здатності та дальності [1, 2]. Солітонні та квазісолітонні ефекти досягаються у нелінійному режимі ВОСП. При цьому спостерігається або збереження ефективної тривалості оптичних імпульсів (ОІ), або навіть їх компресія [4-7]. Втім, у багатоканальних ВОСП виникає додаткова проблема: поширення спектрів ОІ, що може призводити до негативних явищ типу між каналної інтерференції. Таке явище треба враховувати при синтезі оптимальних нерівномірних частотних планів адаптивних ВОСП. Взагалі, при даній формі ОІ у часовому просторі частотний план визначається двома векторами параметрів:

$$[f_n(z=0), F_n(z=0)] \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

де  $f_n$  – значення центральної (несучої) частоти каналу;  $z$  – довжина лінії ВОСП;  $F_n$  – ширина полоси каналу;  $N$  – загальна кількість каналів частотного плану.

Можливе вирішення проблеми формування ОІ із заданими характеристиками дано у роботах [8-11]. Тобто, будемо вважати, що оптичне випромінювання у ВОСП може бути керованим з достатньою точністю як по формі ОІ у часовому просторі, так і по характеристикам його спектру. Втім, при поширенні спектру ОІ внаслідок нелінійних ефектів викується очевидна нерівність:

$$F_n(z=L) \geq F_n(z=0),$$

де  $L$  – максимальна або реальна довжина лінії ВОСП. Вочевидь, на стороні прийому канали будь-якого оптимального частотного плану повинні утворювати суцільну полосу, але без перекриття сусідніх каналів. На стороні передачі, де саме й генеруються сигнали, полоси окремих каналів можуть бути відокремлені



одна від одної захисними інтервалами. Таким чином, виникає задача зворотної екстраполяції ширини полоси певного каналу з несучою частотою  $f_n$  на стороні прийому  $F_n(z=0)$  на ширину полоси  $F_n(z=L)$  на стороні передачі.

Як показують дослідження [12,13], в оптимальних частотних планах ширина полос каналів може змінюватись з досить малим кроком. Врахуємо, що технічно досяжний діапазон зміни ширини каналів складає від 10 до 100 ГГц у сучасних системах ВОСП DWDM. Також врахуємо, що кількість каналів при малій ширині полоси у визначеному спектрі DWDM може сягати близько 1000 [14]. Якщо тестувати реальну ВОСП методом повного перебору всіх частот та всіх можливих значень початкової ширини спектру  $F_0$  з досить грубим кроком 1 ГГц, то треба буде виконати 50000 – 100000 вимірів. Навіть при можливості паралельних (одночасних) вимірів на різних частотах, така метрологічна задача потребуватиме відносно великого часу. Який час може вважатись прийнятним для синтезу нового оптимального частотного плану у випадку, наприклад, технологічного регламенту або встановлення факту перевищення проценту помилок над заданим? Відповідь проста: затримка передачі даних користувачів не повинна викликати втрату цих даних. Тобто, на час переналаштування ВОСП треба зберігати дані у якомусь оперативному буфері. Якщо ВОСП розрахована на передачу зі швидкістю 8 Тбіт/с, то, відповідно, треба мати накопичувач проміжних даних з об'ємом пам'яті не менше 1 Тбайта при затримці передачі лише в одну секунду!

Тому виникає **проблема** суттєвого зменшення кількості прямих вимірів. Дана проблема може вирішуватись синтезом аналітичних залежностей коефіцієнта нелінійного поширення спектру ОІ  $K_F$  від несучої частоти  $f$  та ширини полоси каналів  $F_0$ . Коефіцієнт визначимо у вигляді:

$$K_F(f, F_0) = \frac{F(z=L, f, F_0)}{F_0} - 1. \quad (2)$$

Зауважимо, що в силу даного визначення:  $K_F(f, F_0) \geq 0$ .

**Метою даної роботи** є вирішення задач синтезу моделей виду (2), досить точних для інтерполяції по параметру  $f$  та стійких до екстраполяції по параметру  $F_0$ .

#### Пропонована методика вирішення задачі

У реальних ВОСП базові залежності виду (2) повинні отримуватись за допомогою прямих вимірів. Втім, мова йде про перспективні ВОСП DWDM з адаптовано керованими частотно-сигнальними планами. Оскільки, таких ВОСП на даний час ще не існує, метрологічна схема замінюється комп'ютерними моделями. У попередніх дослідженнях [12, 13] динамічне моделювання перетворень ОІ в оптичному волокні виконувалось за допомогою авторської програми Nonlinear. Основа моделі – нелінійне узагальнене диференціальне рівняння Шредингера. Приклад еволюції ширини спектру та тривалості ОІ, отриманий за допомогою цієї програми, показано на рис. 1.

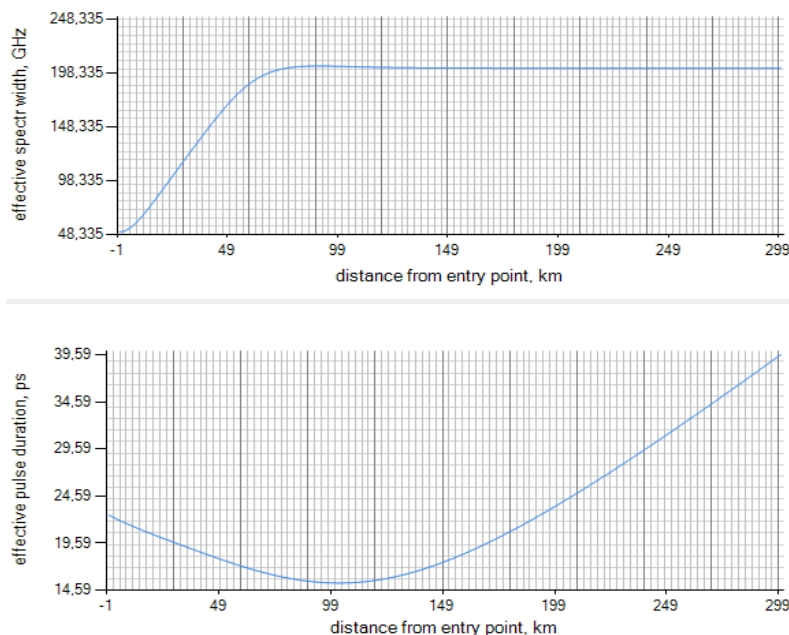


Рис. 1. Приклад еволюції ширини спектру та тривалості ОІ для каналу шириною 50 ГГц: центральна частота 192,425 ТГц, значення коефіцієнту дисперсії -0,147 пс/(нм\*км)

В цілому, моделі у програмі Nonlinear, досить адекватно відповідають відомим теоретичним уявленням [1]. Програма дозволяє виконувати багаторазове моделювання для обраного частотного плану з

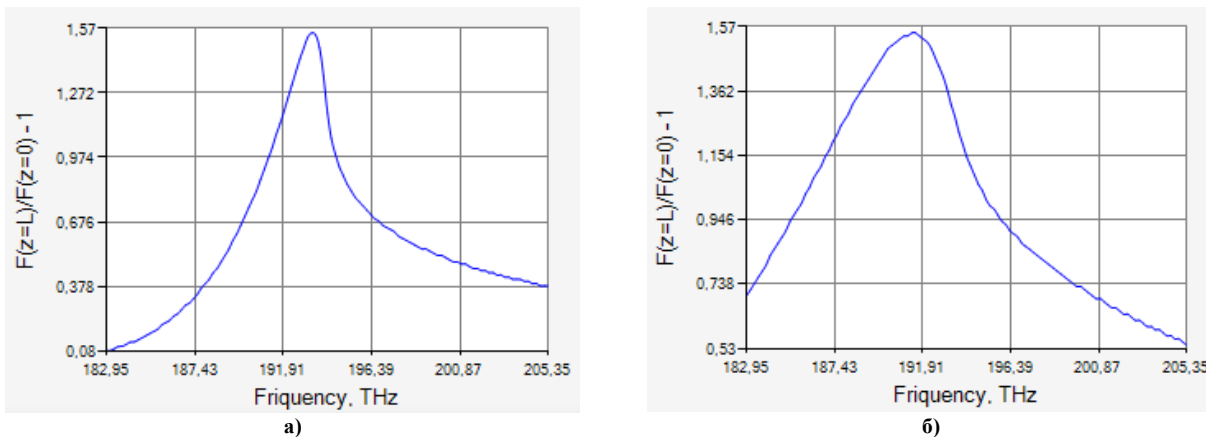
перебором каналів. Результати роботи можуть зберігатися як протокол у файлі. Фрагмент такого протоколу показано у табл. 1.

Таблиця 1

**Фрагмент протоколу результатів роботи програми Nonlinear для сітки частот з кроком 100 ГГц**

Довжина хвилі, нм	Частота, ТГц	Коефіцієнт дисперсії, пс/(нм•км)	$K_F(f, F_0)$
1640,241	182,95	8,965	0,7
1638,449	183,15	8,763	0,72
1636,661	183,35	8,562	0,74
1634,877	183,55	8,361	0,76
1633,097	183,75	8,161	0,78
1631,321	183,95	7,961	0,8
1629,549	184,15	7,762	0,83
1627,781	184,35	7,563	0,85

У графічному вигляді приклади залежностей  $K_F(f, F_0)$  згідно протоколів за табл. 1 показано на рис. 2.



**Рис. 2. Приклади залежностей  $K_F(f, F_0)$  : а) для полос 100 ГГц; б) для полос 50 ГГц;**

Графіки на рис. 2 отримано за допомогою авторської програми Band Relative (мова програмування C#; IDE Visual Studio), головне вікно якої показано на рис. 3.

Дана програма дозволяє не тільки відображати графіки залежностей, але й вирішує задачу синтезу аналітичних моделей цих залежностей методами штучного інтелекту. Втім, зробимо ряд важливих зауважень:

- з метою підкреслення впливу нелінійних ефектів моделювання для даних для рис. 1-3 відбувалось з досить великою потужністю джерела випромінювання – більше 10 дБм (10 мВт), тоді як у промислових стандартах [15] використовуються лазерні діоди з потужністю до 6 дБм (приблизно 4 мВт);
- значення коефіцієнту  $K_F$  дано для встановленого режиму, коли внаслідок загасання у волокні нелінійні ефекти не мають значного впливу і діють лише фактори загасання та дисперсії: при цьому ширина спектру ОІ вже не змінюється; дана умова слідує із зрозумілої потреби підвищення дальності передачі ВОСП;
- у табл. 2 дано протокол розрахунків для сітки з кроком 100 ГГц, тоді як канали, для яких виконувались «вимірювання» рознесені з кроком 200 ГГц, тобто показано лише кожний другий канал;
- відповідно, на рис. 3 показано фрагмент протоколу для сітки з кроком 25 ГГц, але результати «вимірювань» дано знову з кроком 200 ГГц, тобто для кожного восьмого каналу;
- як показують результати багатократного моделювання, можливість проведення реальних вимірів лише для певної частини каналів витікає з достатньо «гладкої» форми залежностей  $K_F(f, F_0)$ : саме дана обставина дозволяє суттєво зменшити кількість вимірювань у реальних ВОСП;
- неформальний аналіз графіків на рис. 1-3 та багатьох інших показує, що залежності при різних значення полоси тестуючого чого сигналу відрізняються лише масштабом та зсувом по аргументу  $f$ .

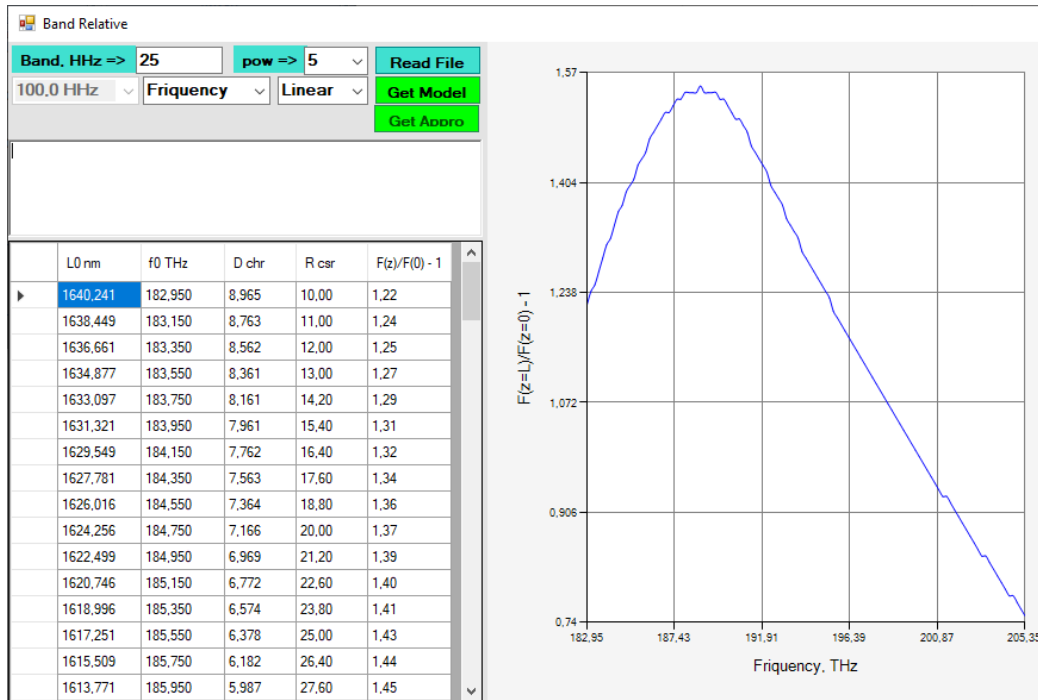


Рис. 3. Варіант стану вікна програми Band Relative: ширина полос каналів 25 ГГц

Нехай визначено аналітичний вид залежності для певної ширини каналів:

$$K_F(f, F_0) = K_{F_0}(f, F_0, \overline{A_M}), \quad A_M = [a_1, a_2, \dots, a_M], \quad (3)$$

де  $A_M$  – вектор невизначених параметрів. Тоді для іншої ширини смуги гіпотетичною моделлю буде залежність:

$$K_F(f, F_1) = K_{F_0}(f^*, F_0, \overline{A_M}), \quad f^* = \beta(F_0, F_1) \cdot [f - \Delta f(F_0, F_1)], \quad (4)$$

де  $\beta$  та  $\Delta f$  – відповідно параметри масштабу та зсуву.

З урахування «гладкості» експериментальних залежностей, будемо розглядати інтерполяційні моделі на класі ступеневих поліномів:

$$K_{F_0}(f, F_0, \overline{A_M}) = \sum_{m=0}^M a_m(F_0) \cdot f^m. \quad (5)$$

Задача встановлення параметрів моделі (5) може вирішуватись відомими методами параметричної ідентифікації (регресійного аналізу), наприклад методом найменших квадратів (МНК) або методом найменших модулів. При цьому ступень поліному є невизначеною. Остаточне вирішення задачі синтезу екстраполяційних моделей (4) при цьому вже вирішується методами штучного інтелекту, такими як метод групового врахування аргументів [16] або метод максимуму компактності [17]. Останні методи поєднують загальну парадигму перевірки екстраполяційної стійкості моделей за допомогою зовнішніх критеріїв, які визначаються на незалежних масивах експериментальних даних. У нашому випадку такі критерії природно витікають із постановки задачі екстраполяції на різні полоси каналів різних частотних планів. Конкретно у якості методу параметричної ідентифікації обираємо МНК, а інтерполяційну точність та екстраполяційну стійкість будемо оцінювати за допомогою показника відносної похибки:

$$\delta K = \max_f \frac{|K_{F,exp}(f) - K_{F,mod}(f)|}{K_{F,exp}(f)}, \quad (6)$$

де  $K_{F,exp}(f)$  та  $K_{F,mod}(f)$  – відповідно значення експериментально вимірюваного та розрахованого за допомогою моделей (4) або (5) коефіцієнта поширення ОІ.

Графічно приклади інтерполяції за допомогою моделі (5) показано на рис. 4.

Значення показника (6) для цього ж випадку та для різних ступенів інтерполяційних поліномів дано у табл. 2.

Дані табл. 2 підтверджують відому закономірність: чим вище ступень поліному, тим вища точність інтерполяції. Дана закономірність порушується лише для поліномів дуже високих ступенів внаслідок поганої обумовленості матриці рівнянь МНК. У даному випадку складність структури моделі вирішується навіть не формальними критеріями, а достатньою для практики точністю. Наприклад, якщо достатньою за показником (6) є точність порядку 1%, то згідно табл. 2 прийнятними будуть моделі у вигляді поліномів четвертого або п'ятого ступеню.

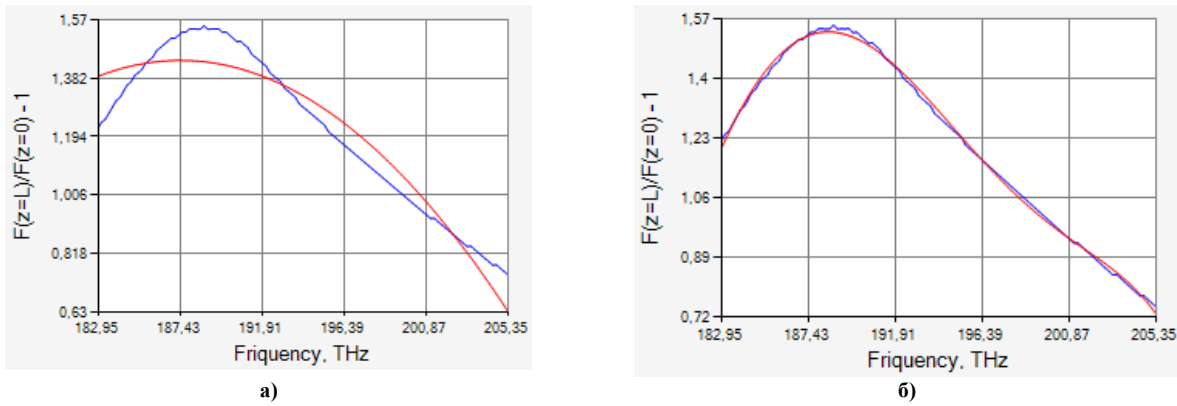


Рис. 4. Приклади вирішення задачі інтерполяції експериментальної залежності коефіцієнта поширення ОІ для полоси каналів 25 ГГц:  
а) поліномом другого ступеню; б) поліномом п'ятого ступеню

Таблиця 2

**Залежність відносної похибки інтерполяції від ступеню інтерполяційного поліному**

Ступень поліному	Відносна похибка	Ступень поліному	Відносна похибка	Ступень поліному	Відносна похибка
2	5,164E-002	5	7,499E-003	8	2,341E-003
3	1,640E-002	6	3,112E-003	9	2,103E-003
4	8,116E-003	7	3,001E-003	10	2,056E-003

Втім, при вирішенні задач структурної ідентифікації показники екстраполяційної стійкості можуть погіршуватись при неадекватному підвищенні складності моделі [16, 17]. Дане явище ілюстровано рис. 5.

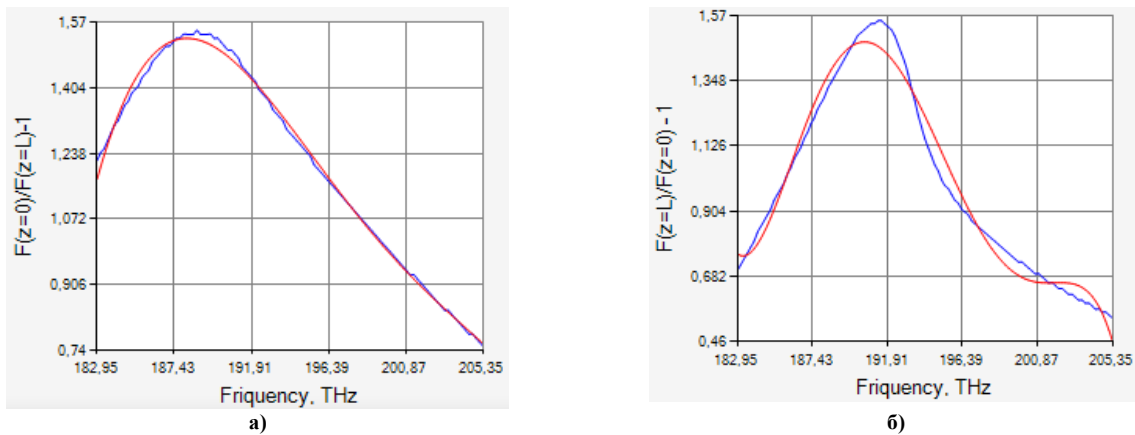


Рис. 4. Приклади вирішення задачі екстраполяції:  
а) поліномом п'ятого ступеню з полос шириною 50 ГГц на полоси 25 ГГц;  
б) поліномом сьомого ступеню з полос шириною 100 ГГц на полоси 50 ГГц;

Багаторазове моделювання ВОСП та екстраполяції у програмі Band Relative показують, що найбільш стійкими є моделі у вигляді ступеневих поліномів четвертого або п'ятого ступеню. Типова залежність показника (б) від ступеню поліному, розрахованого для контрольного масиву даних, показана у табл. 3.

Таблиця 3

**Залежність відносної похибки екстраполяції від ступеню інтерполяційного поліному при екстраполяції з ширини полоси 100 ГГц на полюсу 50 ГГц**

Ступень поліному	Відносна похибка	Ступень поліному	Відносна похибка	Ступень поліному	Відносна похибка
2	1,146E-001	5	5,984E-003	8	2,5781E-001
3	3,237E-001	6	9,871E-002	9	7,209E-001
4	8,116E-002	7	1,053E-001	10	2,547E-000

Аналогічні результати отримуються і для інших випадків екстраполяції.

### Висновки

Ефекти спотворення оптичних імпульсів у перспективних ВОСП з гнучкими частотними планами можуть на даний час досліджуватись за допомогою імітаційних моделей. Моделювання у програмі Nonlinear дозволяє виявити основні характеристики еволюції імпульсів у нелінійному режимі, зокрема, характеристики поширення спектру.

Для адаптивного формування частотних планів треба встановити залежність між шириною спектру імпульсів на стороні передачі та на стороні прийому. Для оперативного вирішення такої задачі треба мінімізувати кількість вимірювань у реальних ВОСП. Одним із способів вирішення даної проблеми є встановлення аналітичних залежностей поширення спектрів оптичних імпульсів.

Встановлено, що внаслідок досить гладкої форми таких залежностей, можна використовувати досить прості інтерполяційні та екстраполяційні моделі у вигляді ступеневих поліномів. Для вирішення задач екстраполяції найбільшу екстраполяційну стійкість забезпечують при цьому поліноми четвертого або п'ятого ступеню.

Зрозуміло, що у реальних ВОСП такі залежності можуть бути іншими. Втім, підхід вирішення проблеми за допомогою штучного інтелекту, застосований у даній роботі, можна вважати універсальним і перспективним.

### Література

1. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика / Агравал Г. – М.: Мир, 1996. – 323 с.
2. Макаров Т.В. Когерентные волоконно-оптические системы передачи / Т.В. Макаров. – Одесса: ОНАС им. А.С. Попова, 2009. – 220 с.
3. Sonia Boscolo, Frederic Chaussard, Esben Andresen, Hervé Rigneault, Christophe Finot, Impact of initial pulse shape on the nonlinear spectral compression in optical fibre, *Optics & Laser Technology*, Volume 99, 2018, Pages 301-309, ISSN 0030-3992, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.08.033>.
4. S. N. Li, H. P. Li, Q. M. Wang, J. K. Liao, X. G. Tang, Y. Liu, Y. Z. Liu, "Numerical simulation on spectral compression of frequency-shifting femtosecond pulses in photonic crystal fiber," *Proc. SPIE 8198*, 2011 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Devices and Integration, 819800 (5 December 2011); doi: 10.1117/12.906297.
5. Esther Lidiya A., Vasantha Jayakantha Raja R., Anton Husakou, Pulse compression and pedestal suppression by self-similar propagation in nonlinear optical loop mirror, *Optics Communications*, Volume 474, 2020, 126083, ISSN 0030-4018, <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126083>.
6. Zhenguo Dou, Wenhui Fang, Chenglin Sun, Zhiwei Men, Pulse compression and spectral broadening of stimulated Raman scattering in water via cascading amplification, *Optics Communications*, Volume 501, 2021, 127393, ISSN 0030-4018, <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.127393>.
7. A. Sharafali, D Vigneswaran, Bora Ung, Self-similar pulse compression by suspended core photonic crystal fiber with cubic-quintic nonlinearities, *Results in Optics*, Volume 5, 2021, 100117, ISSN 2666-9501, <https://doi.org/10.1016/j.rio.2021.100117>.
8. Одегов Н.А. Основы теории аппроксимации оптических сигналов гауссовыми импульсами / Н.А. Одегов // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. - 2018. - № 5. - С. 42-72.
9. Одегов Н.А. Аппроксимация оптических сигналов короткими импульсами лазера в форме гиперболического секанса / Одегов Н.А. // *Электронное научное специализированное издание – журнал «Проблемы телекоммуникаций», ХНУРЭ*. - № 2 (23). - 2018. - С. 48 - 61.
10. Одегов М.А. Спосіб формування низькочастотної обвідної оптичного сигналу надкоротким імпульсом лазера гауссової форми // Патент України на корисну модель № 142946, зареєстрований 10.07.2020
11. Одегов М.А. Спосіб формування низькочастотної обвідної оптичного сигналу імпульсом лазера у формі гіперболічного секанса // Патент України на корисну модель № 142945, зареєстрований 10.07.20.
12. Одегов Н.А. Динамическое моделирование линейных и нелинейных эффектов в оптических волокнах систем передачи DWDM / Н.А. Одегов // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. - 2020. - №2. - С. 150-158. DOI 10.31891/2307-5732-2020-283-2-150-157.
13. Одегов Н.А. Численно-аналитический метод синтеза оптимальных неравномерных частотных планов DWDM / Н.А. Одегов, И.С. Балеев // *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*, 2020, № 2. - С. 68-80.
14. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid // *Recommendation ITU-T G.694.1*. – 2012. – 16 p.
15. Рекомендация МСЭ-Т G.698.1: Многоканальные приложения DWDM с одноканальными оптическими интерфейсами, 2005. – 18 с.
16. Ивахненко А.Г., Степашко В.С. Помехоустойчивость моделирования. - Киев: Наукова думка, 1985. – 216 с.
17. Левин С. Ф. Теория стохастической компактности / С. Ф. Левин // *Статистический анализ и синтез систем технического обеспечения эксплуатации*. – Одесса: ОВВКИУ ПВО, 1984. – С. 40-178.

## References

1. Ahraval H. Nelyneinaia volokonnaia optyka / Ahraval H. – M.: Myr, 1996. – 323 s.
2. Makarov T.V. Koherentnye volokonno-opticheskiye systemy peredachy / T.V. Makarov. – Odessa: ONAS ym. A.S. Popova, 2009. – 220 s.
3. Sonia Boscolo, Frederic Chaussard, Esben Andresen, Hervé Rigneault, Christophe Finot, Impact of initial pulse shape on the nonlinear spectral compression in optical fibre, *Optics & Laser Technology*, Volume 99, 2018, Pages 301-309, ISSN 0030-3992, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.08.033>.
4. S. N. Li, H. P. Li, Q. M. Wang, J. K. Liao, X. G. Tang, Y. Liu, Y. Z. Liu, "Numerical simulation on spectral compression of frequency-shifting femtosecond pulses in photonic crystal fiber," *Proc. SPIE* 8198, 2011 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Devices and Integration, 81980O (5 December 2011); doi: 10.1117/12.906297.
5. Esther Lidiya A., Vasantha Jayakantha Raja R., Anton Husakou, Pulse compression and pedestal suppression by self-similar propagation in nonlinear optical loop mirror, *Optics Communications*, Volume 474, 2020, 126083, ISSN 0030-4018, <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126083>.
6. Zhenguo Dou, Wenhui Fang, Chenglin Sun, Zhiwei Men, Pulse compression and spectral broadening of stimulated Raman scattering in water via cascading amplification, *Optics Communications*, Volume 501, 2021, 127393, ISSN 0030-4018, <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.127393>.
7. A. Sharafali, D Vigneswaran, Bora Ung, Self-similar pulse compression by suspended core photonic crystal fiber with cubic-quintic nonlinearities, *Results in Optics*, Volume 5, 2021, 100117, ISSN 2666-9501, <https://doi.org/10.1016/j.rio.2021.100117>.
8. Odehov N.A. Osnovy teoryi approksymatsiy optycheskykh sygnalov haussovymy ympulsamy / N.A. Odehov // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nuky.* - 2018. - № 5. - S. 42-72.
9. Odehov N.A. Approksymatsiya optycheskykh sygnalov korotkomy ympulsamy lazera v forme hyperbolicheskoho sekansa / Odehov N.A. // *Elektronnoe nauchnoe spetsyalizyrovane yzdanye – zhurnal «Problemy telekommunikatsiy», KhNURЭ.* - № 2 (23). - 2018. - S. 48 - 61.
10. Odehov M.A. Sposib formuvannia nyzkochastotnoi obvidnoi optychnoho sygnalu nadkorotkym impulsom lazera haussvoi formy // Patent Ukrainy na korysnu model № 142946, zareiestrovanyi 10.07.2020
11. Odehov M.A. Sposib formuvannia nyzkochastotnoi obvidnoi optychnoho sygnalu impulsom lazera u formi hiperbolichnoho sekansa // Patent Ukrainy na korysnu model № 142945, zareiestrovanyi 10.07.20.
12. Odehov N.A. Dynamicheskoe modelyrovanye lyeinnykh y nelyneinykh effektov v optycheskykh voloknakh system peredachy DWDM / N.A. Odehov // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nuky.* - 2020. - №2. - S. 150-158. DOI 10.31891/2307-5732-2020-283-2-150-157.
13. Odehov N.A. Chylenno-analytycheskyi metod synteza optymalnykh neravnometnykh chastotnykh planov DWDM / N.A. Odehov, Y.S. Baleev // *Naukovi pratsi ONAZ im. O.S. Popova*, 2020, № 2. - С. 68-80.
14. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid // Recommendation ITU-T G.694.1. – 2012. – 16 r.
15. Rekomendatsiya MSЭ-T G.698.1: Mnohokanalnye prylozheniya DWDM s odnokanalnymy optycheskymy ynterfeysamy, 2005. – 18 s.
16. Yvakhnenko A.H., Stepashko V.S. Pomekhoustoichyvost modelyrovannia. - Kyev: Naukova dumka, 1985. – 216 s.
17. Levyn S. F. Teoriya stokhastycheskoi kompaktnosti / S. F. Levyn // *Statystycheskyi analiz y syntezy system tekhnicheskoho obespechennia ekspluatatsiy.* – Odessa: OVVKYU PVO, 1984. – С. 40-178.

Надія ПОТАПОВА

Донецький національний університет імені Василя Стуса

<https://orcid.org/0000-0003-4566-4102>e-mail: [potapova.nadin@gmail.com](mailto:potapova.nadin@gmail.com)

Людмила ВОЛОНТИР

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0001-9022-9332>e-mail: [mlavolontyr@ukr.net](mailto:mlavolontyr@ukr.net)

## МЕТОД МОДЕЛЮВАННЯ В УПРАВЛІННІ ЗАПАСАМИ ІЄРАРХІЧНИХ ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМ

*В роботі висвітлено питання використання методу моделювання в управлінні запасами ієрархічних логістичних систем. Обґрунтовується питання необхідності моделювання управління запасами як одного з ключових параметрів логістики розподілу. Доведено, що ієрархічна логістична система може генерувати потокові процеси за законом Пуассона, що робить можливим застосування теорії систем масового обслуговування при формалізації процесів надходжень поставок ресурсів для поповнення запасів логістичного центру з подальшим розподілом потоків по філіям регіонального типу.*

*Даний метод ґрунтується на отриманні оптимальних характеристик інтенсивності поставок ресурсів в розрізі конкретної номенклатури за умови обмежень на наявні обігові кошти та формування резервного запасу забезпечення ремонтних робіт.*

*Ключові слова: моделювання, теорія управління запасами, оптимізація, теорія масового обслуговування, ієрархічна логістична система, сервісні пункти.*

Nadiia POTAPOVA

Vasyl' Stus Donetsk National University

Ludmila VOLONTYR

Vinnytsia National Agrarian University

## MODELING METHOD IN STOCK MANAGEMENT HIERARCHICAL LOGISTICS SYSTEMS

*The work highlights the issue of using the modeling method in inventory management of hierarchical logistics systems. The issue of the necessity of inventory management modeling as one of the key parameters of distribution logistics is substantiated. It has been proven that the hierarchical logistics system can generate flow processes according to Poisson's law, which makes it possible to apply the theory of mass service systems in the formalization of the processes of incoming supplies of resources to replenish the stocks of the logistics center with further distribution of flows among regional branches.*

*This method is based on obtaining optimal characteristics of the intensity of supply of resources in the section of a specific nomenclature, subject to restrictions on available working capital and the formation of a reserve stock for maintenance of repair works.*

*Keywords: modeling, inventory management theory, optimization, mass service theory, hierarchical logistics system, service points.*

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

Методи обробки даних є одним із ключових елементів процесингу інформаційних систем. В логістичних інформаційних системах блок задач управління запасами направлений на вирішення питань обробки даних та прийняття рішень щодо управління закупками, класифікації номенклатурних груп, розробки моделей прийняття рішень в системі планування витрат на процеси управління запасами тощо. Моделі управління запасами є не тільки інструментарієм вирішення ключових питань логістики запасів, а й засіб математичної формалізації та розв'язку прикладних задач логістики та менеджменту, що розвивається в напрямку дослідження операцій та аналізу даних. Більшість задач управління запасами мають на меті отримати математичний підхід до вирішення питань пошуку оптимальної кількості запасів або замовлень, які мають урівноважувати витрати, пов'язані із дефіцитом запасів або їх надлишками, отримавши при цьому оптимальну траєкторію змін сукупних витрат.

Проте, існує множина факторів, які прямо або приховано впливають на результативність процесів поповнення запасів, що відображують характеристики їхнього просування у часі, зокрема такими факторами можна визнати розподіл надходження замовлень у часі та інтенсивність їх обслуговування. Тоді виникає задача отримання оптимального рівня системи управління запасами з урахуванням інтенсивності потоків за визначений часовий період, розв'язок якої можливо отримати імплементацією положень теорії масового обслуговування в базис класичних моделей управління запасами.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Класичними є моделі управління запасами (з фіксованим рівнем запасів, з двома рівнями управління запасами, s-політики управління запасами, одноразових закупок, закупок партіями ресурсів), які докладно описав Таха Х.А. [15] визначивши основні риси процесів управління запасами та математичні ідентифікатори їх оцінювання. В своїх працях Вагнер Х.М. [16] досліджує математичні стохастичні моделі

управління запасами, зокрема модель економічно обґрунтованого розміру запасів. Теорія управління запасами набула свого подальшого розвитку в роботах науковців Гамалія В.Ф.[1], Лісовської В.П. [3], Пишнограєва І.О. [5] та ін. Ними проведено математичну формалізацію прикладних моделей управління запасами та приклади їх практичної реалізації для оптимізації управлінських рішень [7, 8, ]. Проте, залишається ряд невирішених питань, зокрема застосування методів та моделей управління запасів в логістичних системах у випадку інтегрованих потоків попиту багатоміністерських ресурсів.

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є визначення сутності методу моделювання в управлінні запасами ієрархічних логістичних систем на основі отримання оптимальних характеристик інтенсивності поставок ресурсів в розрізі конкретної номенклатури за умови обмежень на наявні обігові кошти та формування резервного запасу забезпечення ремонтних робіт.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Функціонування ієрархічної логістичної системи формалізується безліччю внутрішніх та зовнішніх зв'язків, що утворюються внаслідок фізичного просування матеріальних ресурсів. Ієрархії відповідає надходження замовлень від нижчого рівня системи до її верхнього виконавчого рівня. Поряд з цим генерується інформаційний потік замовлень, що містить категорійну сутність ресурсів і безпосередньо пов'язаний з матеріальними потоками. В такому випадку розглядається не тільки процес руху замовлення в логістичній системі з отриманням часових характеристик, а й інші процеси, що обумовлені економікою діяльності. Вони описуються: обсягом закуплених ресурсів; цінами виробників; витратами на зберігання; грошовими коштами, що вкладають у процес закупки; витрати, пов'язані з відсутністю замовлених ресурсів. Такі задачі відносяться до класу задач управління запасами. Основні питання, що вирішують математичні моделі таких задач: яку кількість ресурсу потрібно купувати та в який термін часу потрібно здійснювати поставки. [15]

Слід зазначити, що дані моделі побудовані на основі твердження про отримання попиту від конкретного замовника, тоді сам процес представлений у вигляді ординарного потоку від одного джерела виникнення. Класична модель економічного розміру партії поставки ресурсу для утворення запасу передбачає попереднє визначення попиту і поповнення запасу за умови відсутності часу на доставку. Оптимальний розмір партії поставки визначається за формулою Уілсона [16]:

$$q_0 = \sqrt{2C_0S/C_u i},$$

де  $q_0$  – оптимальний розмір запасу;

$C_0$  – витрати на заключно-підготовчі операції;

$S$  – річний обсяг поставок;

$C_u$  – вартість ресурсу;

$i$  – розмір витрат на зберігання ресурсу.

Дана модель призначена для аналітичного оцінювання оптимального розміру обсягів поставок однономенклатурних ресурсів з фіксованою ціною, часового інтервалу між поставками, а також мінімальних витрат за рік. В цьому випадку неврахованими залишаються параметри невизначеності попиту, багатоміністерності продукції, штрафи внаслідок дефіциту продукції. Проте, одним із ключових факторів є фактор часу, з урахуванням якого відбувається налагодження процесу надходження ресурсів у часі. Тому, особливий інтерес викликають моделі, що розглядають поставки в динаміці [5, 7, 8]. Загальні витрати на поставки складаються із змінної і постійної частини. Метою застосування моделі є визначення мінімального рівня запасу. При такому моделюванні знаходять верхній рівень запасів і розробляється політика управління запасами однономенклатурної продукції. Тому, доцільним є зведення процесу моделювання не тільки до визначення окремої точки поповнення запасу, а й встановлення інтервалу оптимального рівня запасів. За межами даного інтервалу поповнення запасів не є ефективним. Тому доцільною є використання методики визначення інтервалу оптимального рівня запасів, з урахуванням економічної оцінки та інтенсивності проходження потоку за часовий період.

В багатьох випадках розглядаються задачі управління запасами з обмеженнями. Методами вирішення таких задач є оптимізація на основі показників Лагранжа. Тому, одним із таких обмежень можна визнати використання обігових коштів, від обороту яких залежить швидкість та оновленість потоків у часі. Тобто, формується політика управління запасами з урахуванням обмежень на обіговий капітал.

На обсяг ресурсів, що закуповується по різних джерелах, впливає організація процесу обслуговування замовлення, зокрема: часові затримки при оформленні замовлень, порядок їх розміщення в процесі обслуговування, можливість очікування для обслуговування тощо. Процес постачання ресурсів з множини декількох джерел може бути формалізованим у вигляді складної відкритої системи масового обслуговування. Опис процесів надходження та зберігання запасів на центральні координаційні склади системи застосовано методику вирішення задач управління запасами через характеристики системи масового обслуговування. В основі методики є використання моделей, оптимального розміру замовлення багатоміністерських поставок та формування резервного комплексу обслуговування.

Розглянемо задачу управління запасами при однономенклатурних і багатоміністерських



поставках ресурсів. Поставки ресурсів розподілені за законом Пуасона і мають інтенсивність  $\lambda$ . Попит на ресурси розподілений за законом Пуасона з інтенсивністю  $\mu$ . Імовірність наявності запасу ресурсів в центрі обслуговування замовлень вищого рівня позначимо  $P_n$ , а імовірність відсутності запасу  $P_0$ . Необхідним є визначення інтенсивності поставок ресурсів  $\lambda_{\text{опт}}$ .

В логістичній ієрархічній системі пріоритетними є вертикальні зв'язки постачання, які утворюються на рівні територіальних районів та області (центру). Інтенсивність попиту від генераторів замовлень нижчого рівня ієрархії системи визначена за формулою:

$$\mu_{\text{район}} = \sum_j^N \sum_i^M \mu_{ij},$$

де  $\mu_{\text{район}}$  – інтенсивність попиту в окремому територіальному районі;

$i$  – змінна, що визначає попит на конкретну номенклатуру ресурсів,  $i = 1, 2, 3, \dots, M$ ;

$j$  – змінна, що визначає кількість замовників в даному ринковому сегменті,  $j = 1, 2, 3, \dots, N$ ;

$\mu_{ij}$  – інтенсивність попиту  $j$ -го замовника на  $i$ -ту номенклатуру ресурсів.

Тоді, інтенсивність попиту від підприємств нижчого (територіального районного) рівня до центрального (обласного) буде,

$$\mu_{\text{обл}} = \sum_j^R \sum_i^M \mu_{\text{район } ij},$$

де  $\mu_{\text{обл}}$  – інтенсивність попиту на ресурси, сформована на вищому (центральному) рівні;

$i$  – змінна, що визначає кількість номенклатур ресурсів,  $i = 1, 2, 3, \dots, M$ ;

$j$  – змінна, що визначає кількість підприємств на нижчому (територіальному районному) рівні системи поставок ресурсів,  $j = 1, 2, 3, \dots, R$ ;

$\mu_{\text{район } ij}$  – інтенсивність попиту  $j$ -го районного підприємства системи на  $i$ -ту номенклатуру ресурсів.

Система постачання ресурсів приймає вид М/М/1 по класифікації Кендала [2, 4]. Чергою на центральному обласному рівні є кількість ресурсів, що необхідні на нижчому територіальному районному рівні системи. Чергою на територіальному районному рівні є кількість ресурсів необхідних замовникам зовнішнього попиту в конкретному сегменті ринку. Розв'язок для стаціонарного стану отримуємо на основі рівнянь Чепмена-Колмогорова [9, 12, 13, 14]:

$$\begin{cases} \rho_0 = 1 - \lambda / \mu = 1 - \rho \\ \rho_n = (\lambda / \mu)^n \rho_0 = \rho^n (1 - \rho) \end{cases}$$

де  $\rho_0$  – коефіцієнт завантаження системи в нульовому стані;

$\rho_n$  – коефіцієнт завантаження системи в  $n$ -му стані.

Величину середньої кількості запасів обчислено за формулою 1.1, а її середньоквадратичне відхилення по формулі 1.2, :

$$\bar{n} = \frac{\rho}{\rho - 1}, \quad (1.1)$$

де  $\bar{n}$  – середня кількість запасів на складі;

$\rho$  – коефіцієнт завантаження системи.

$$\sigma_n^2 = \frac{\rho}{(1 - \rho)^2}, \quad (1.2)$$

де  $\sigma_n^2$  – середньоквадратичне відхилення середньої кількості запасів;

$\rho$  – коефіцієнт завантаження системи.

Оптимальний коефіцієнт завантаження системи через витрати управління запасами приймає вигляд:

$$\rho_{\text{опт}} = 1 - \sqrt{C_u / C_z},$$

де  $\rho_{\text{опт}}$  – оптимальний коефіцієнт завантаження системи;

$C_u$  – витрати на зберігання ресурсів, грн.;

$C_z$  – втрати, які виникають внаслідок дефіциту ресурсів, грн.

Оптимальна інтенсивність поставок, виведена через економічні характеристики управління запасами дорівнюватиме:

$$\lambda_{\text{опт}} = \mu \left(1 - \sqrt{\frac{C_u}{C_z}}\right) \quad (1.3)$$

де  $\lambda_{\text{опт}}$  – оптимальна інтенсивність попиту;  
 $\mu$  – інтенсивність попиту;  
 $C_u$  – витрати на зберігання ресурсів, грн.;  
 $C_z$  – втрати, які виникають внаслідок дефіциту ресурсів, грн.  
 У випадку вирішення питань оптимізації поставок при однономенклатурних ресурсах задача багатноменклатурних поставок доповниться виразом:

$$C_{ui} = k_i C_i,$$

де  $C_{ui}$  – витрати на зберігання одиниці  $i$ -го ресурсу, грн.;  
 $k_i$  – коефіцієнт витрат управління запасами, прийнятий як доля ціни  $i$ -го ресурсу;  
 $C_i$  – ціна  $i$ -го ресурсу, грн.  
 Тоді загальні витрати управління запасами по  $M$ -номенклатурах складуть:

$$C_{\text{заг}} = \sum_{i=1}^M \left( C_i k_i \frac{\rho_i}{1 - \rho_i} + C_{z_i} (1 - \rho_i) \right),$$

де  $C_{\text{заг}}$  – загальні витрати управління запасами по  $M$ -номенклатурах;  
 $M$  – кількість номенклатур,  $i = 1, 2, \dots, M$ ;  
 $C_i$  – ціна  $i$ -го ресурсу, грн.;  
 $k_i$  – коефіцієнт витрат управління запасами, прийнятий як доля ціни  $i$ -го ресурсу;  
 $\rho_i$  – завантаження системи з  $i$ -им видом ресурсів;  
 $C_{z_i}$  – втрати внаслідок дефіциту  $i$ -го ресурсу, грн.  
 Кошти, які будуть витрачені на поповнення певної кількості одиниць ресурсів:

$$C_{\text{пок}} = T \sum_{i=1}^M \lambda_i C_i,$$

де  $C_{\text{пок}}$  – кошти, що будуть витрачені на поповнення конкретної кількості одиниць ресурсів, грн.;  
 $T$  – період часу проектування поставок, дні;  
 $M$  – кількість номенклатур,  $i = 1, 2, 3, \dots, M$ ;  
 $\lambda_i$  – інтенсивність поставок  $i$ -го ресурсу;  
 $C_i$  – ціна  $i$ -го ресурсу, грн.

Оптимальна інтенсивність поставок по конкретній номенклатурі ресурсів, за умови обмежень наявності вільних обігових коштів, може бути отриманою методом невизначених множників Лагранжа і дорівнюватиме:

$$\lambda_{i_{\text{опт}}} = \mu_i + \frac{C_o / T - \sum_{i=1}^M C_i \mu_i}{\sum_{i=1}^M C_i \sqrt{\frac{\mu_i T (C_{z_i} - C_i k_i)}{C_i}}} \sqrt{\frac{\mu_i T (C_{z_i} - k_i C_i)}{C_i}}, \quad (1.4)$$

де  $\lambda_{i_{\text{опт}}}$  – оптимальна інтенсивність поставок по  $i$ -й номенклатурі ресурсів;  
 $\mu_i$  – інтенсивність попиту на  $i$ -й вид ресурсу;  
 $C_o$  – кількість вільних обігових коштів, грн.;  
 $T$  – період часу проектування поставок по замовленнях, дні;  
 $M$  – кількість номенклатур,  $i = 1, 2, 3, \dots, M$ ;  
 $C_i$  – ціна  $i$ -го ресурсу, грн.;  
 $k_i$  – коефіцієнт витрат управління запасами, прийнятий як доля ціни  $i$ -го ресурсу.  
 $C_{z_i}$  – втрати, які виникають внаслідок дефіциту ресурсів, грн.

Таким чином, визначення оптимальної кількості поставок по  $M$ -номенклатурах залежить від величини  $\mu_i$ , тобто від розподілу попиту на ресурси, що дає змогу при певних співвідношеннях величин управління запасами прогнозувати обсяг поставлених ресурсів, а також обсяг запасу ресурсів з метою їх подальшого постачання у визначений інтервал часу.

Модель, яка оптимізує процес управління запасами для організаційної структури логістичної системи ієрархічного типу з урахуванням сервісних служб враховує їх ієрархічну територіальну підпорядкованість. Постановка задачі передбачає: наявність в територіальному підпорядкуванні сервісні служби для технічного обслуговування;  $n$  одиниць однотипового технологічного обладнання (логістично обґрунтованого для взаємозаміни ремонтних частин),  $g$  одиниць запасного ремонтного комплексу. Елемент обладнання, що вийшов з ладу замінюється запасним і надходить в сервісну центральну службу. Після ремонту він поповнює запасний ремонтний комплект обладнання. В територіальному регіоні працює  $s$

сервісних обслуговуючих центрів. Чергою є непридатне обладнання, що очікує на ремонт. Наступні позначення:

а)  $\lambda$  – інтенсивність напрацювання на відмову одиниці обладнання, яка є випадковою величиною розподіленою по закону Пуасона;

б)  $\mu$  – параметр процесу відновлення одиниці обладнання, який розподілений по експоненціальному закону ( $1/\mu$  – середній час ремонту обладнання).

Метою використання моделі є визначення оптимального розміру комплексу запасного обладнання  $r$  і кількості сервісних пунктів  $s$ , які мінімізують загальні витрати на створення і утримання регіональної сервісної організації.

Цільова функція враховує витрати на функціонування сервісної служби:

$$\Pi(s, r) = C_p s + C_3 r + C_n \bar{U}(s, r), \quad (1.5)$$

де  $\Pi(s, r)$  – загальні витрати на утримання сервісної системи, грн;

$r$  – комплект запасного обладнання, шт;

$s$  – кількість сервісних пунктів, одиниць;

$C_p$  – вартість утримання одного сервісного пункту в одиницю часу, грн.;

$C_3$  – вартість одиниці запасного обладнання, грн.;

$C_n$  – вартість простою техніки в одиницю часу, грн.;

$\bar{U}(s, r)$  – середня кількість техніки в територіальному регіоні, яка не працює через відмову в сервісному обслуговуванні, шт.

Оптимальними значеннями  $s$  і  $r$  будуть такі значення, які мінімізуватимуть функцію (1.5). Визначимо складову  $\bar{U}(s, r)$ . Модель може бути описана марківським процесом з поглинаючим бар'єром в точці  $n+r$ . [12] Для такого процесу система рівнянь Чепмена-Колмогорова матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{dP_0(t)}{dt} &= -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t). \\ \frac{dP_i(t)}{dt} &= \lambda P_{i-1}(t) - (\lambda + i\mu)P_i(t) + (i+1)\mu P_{i+1}(t); i < s. \\ \frac{dP_i(t)}{dt} &= \lambda P_{i-1}(t) - (\lambda + s\mu)P_i(t) + s\mu P_{i+1}(t); s \leq i \leq m, \end{aligned}$$

де  $m = n+r$ .

Розв'язком даної системи рівнянь в стаціонарному стані є імовірності:

$$\begin{aligned} P_i &= \frac{\rho^i}{i!} P_0, i < s, \\ P_i &= \frac{(\rho/s)^i s^s}{s!} P_0, s \leq i \leq m, \end{aligned} \quad (1.6)$$

де  $\rho = \lambda/\mu$ .

Імовірність  $P_0$  може бути визначена із умови нормування і матиме вигляд виразу:

$$P_0 = \left[ \sum_{i=0}^{s-1} \frac{\rho^i}{i!} + \frac{s^s}{s!} \sum_{i=s}^m \left( \frac{\rho}{s} \right)^i \right]^{-1}. \quad (1.7)$$

Якщо використати властивості кінцевих сум, тоді отримаємо вираз 1.8:

$$\sum_{i=0}^{s-1} \frac{\rho^i}{i!} = \frac{1}{(s-1)!} e^\rho \int_\rho^\infty t^{s-1} e^{-t} dt = \frac{e^\rho}{(s-1)!} \Gamma(s, \rho), \quad (1.8)$$

де  $\Gamma(s, \rho)$  - неповна гама-функція, значення якої табульовані.

Підставивши (1.8) в (1.7) отримуємо:

$$P_0 = \left\{ \frac{e^\rho}{(s-1)!} \Gamma(s, \rho) + \frac{\rho^s}{(1-\rho/s)s!} \left[ 1 - \left( \frac{\rho}{s} \right)^{m-s+1} \right] \right\}^{-1}.$$

Тоді  $\bar{U}(s, r)$  буде дорівнювати виразу 1.9:

$$\bar{U}(s, r) = \sum_{i=0}^m iP_i = P_0 \left\{ \sum_{i=0}^{s-1} i \frac{\rho^i}{i!} + \sum_{i=s}^m i \frac{(\rho/s)^i s^s}{s!} \right\}. \quad (1.9)$$

Підставивши значення  $\bar{U}(s, r)$  в цільову функцію  $C(s, r)$  отримаємо остаточний вираз. При  $s=1$ ,  $m \rightarrow \infty$  результати приводяться до виду системи масового обслуговування типу М/М/1 по класифікації Кендала. Запропонований підхід можна застосувати для децентралізованої організаційної сервісної структури зумови вибору в якості критерію конкретизоване значення коефіцієнту готовності техніки  $K_r^*$  та цільової функції вигляду:

$$K_r^* = \sum_{i=0}^r P_i,$$

де  $P_i$  – імовірність, яка визначається по формулам (1.6).

Відмітимо, що потреба у зверненні до сервісного центру визначається замовником самостійно, з урахуванням факторів наявності запасних частин у себе, рівень сервісного обслуговування, кваліфікацію спеціалістів, можливості оплатити обслуговування.

**Висновок.** Використання методу моделювання при вивченні функціонування логістичної ієрархічної системи дозволяє всебічно розглянути її роботу, внутрішні і зовнішні зв'язки, проаналізувати механізм потокового просування ресурсів, оцінити її поведінку.

Функціонування системи формалізується шляхом декомпозиції окремих процесів виконання замовлень, поставок ресурсів на центральні склади та їх розподілу у залежності від попиту і пропозиції. Для опису даних процесів доцільно застосовувати методи математичної статистики, теорії масового обслуговування, теорії управління запасами.

Застосування подальшого об'єднання оптимальних моделей та методу імітаційного моделювання дозволить відобразити поведінку системи з урахуванням багатоваріантності початкових значень параметрів.

### Література

1. Гамалій В.Ф., Романчук С.А. Вибір базових даних для оптимального керування запасами в економіко-організаційних системах з використанням імітаційного моделювання. URL: [https://core.ac.uk/display/81587821?utm\\_source=pdf&utm\\_medium=banner&utm\\_campaign=pdf-decoration-v1/](https://core.ac.uk/display/81587821?utm_source=pdf&utm_medium=banner&utm_campaign=pdf-decoration-v1/)
2. Литвинов А. Л. Теорія систем масового обслуговування: навч. посібник. Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 141 с.
3. Лісовська В.П., Манжос Т.В. Про ефект централізації управління запасами за нормально розподіленого попиту. Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Фізико-математичні науки: зб. наук. пр. Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільськ. нац. ун-т, 2012. Вип. 7. С. 175-185.
4. Майстренко О.В., Бубенщиков Р.В., Карга О.В. Теорія масового обслуговування як засіб удосконалення моделі прийняття рішень. Військово-технічний збірник. 2019. №20. С. 14-19.
5. Пишнограєв І.О., Омельченко Ю.В. Моделювання управління запасами підприємства в умовах невизначеності попиту. Актуальні проблеми економіки та управління: збірник наукових праць молодих вчених. 2020. Вип. 14. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37811/>
6. Стеценко І.В. Моделювання систем: навч. посіб. М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. Черкаси : ЧДТУ, 2010. 399 с.
7. Хоменко М.М. Динамічна модель управління запасами з обґрунтуванням величини партій присадок. Вісник Хмельницького національного університету. 2011. № 3. Т. 3. С. 12-18.
8. Цеслів О.В., Гришко М.П. Стохастичні моделі управління запасами поставок товару. Економічний вісник НТУУ «КПІ», 2019. С. 451 – 459.
9. Agboola S.O., Ojieniyi, A. (2018) The Chapman-Kolmogorov equations of solving weather condition in markov chain. URL: [https://www.researchgate.net/publication/330535754\\_the\\_Chapman\\_Kolmogorov\\_equations\\_of\\_solving\\_weather\\_condition\\_in\\_markov\\_chain](https://www.researchgate.net/publication/330535754_the_Chapman_Kolmogorov_equations_of_solving_weather_condition_in_markov_chain).
10. Chican, A. Inventory models /Ed. by A. Chican. Akademiai kiado, Budapest, 1990. 419 pp.
11. Mills, Edwin S. "The Theory of Inventory Decisions." *Econometrica*, vol. 25, no. 2, 1957, pp. 222-238. *JSTOR*, <https://doi.org/10.2307/1910251>. Accessed 18 Oct. 2022.
12. Dynkin E.B. (1989) Kolmogorov and the Theory of Markov Processes. *The Annals of Probability*. Vol. 17, No. 3 (Jul., 1989), pp. 822-832. <https://www.jstor.org/stable/2244385>.
13. Nicholas W. Barendregt, Krešimir Josić, and Zachary P. Kilpatrick Analyzing dynamic decision-making models using Chapman-Kolmogorov equations. *J Comput Neurosci*. 2019 Dec; 47(2-3): 205-222. doi: 10.1007/s10827-019-00733-5.
14. Haken, H., Mayer-Kress, G. (1981) Chapman-Kolmogorov equation and path integrals for discrete chaos in presence of noise. *Z. Physik B - Condensed Matter* 43, 185–187. <https://doi.org/10.1007/bf01293609/>
15. Hamdy A. Taha. *Operations Research An Introduction*, seventh edition. Pearson Education, 2017. 848 pp.
16. Wagner Harvey M. *Principles of operations research: with applications to managerial decisions*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1975. 1039 pp.

## References

1. Hamalii V.F., Romanchuk S.A. Vybir bazovykh danykh dlia optymalnoho keruvannia zapasamy v ekonomiko-orhanizatsiinykh systemakh z vykorystanniam imitatsiinoho modeliuvannia. URL: [https://core.ac.uk/display/81587821?utm\\_source=pdf&utm\\_medium=banner&utm\\_campaign=pdf-decoration-v1/](https://core.ac.uk/display/81587821?utm_source=pdf&utm_medium=banner&utm_campaign=pdf-decoration-v1/)
2. Lytvynov A. L. Teoriia system masovoho obsluhovuvannia: navch. posibnyk. Kharkiv. nats. un-t misk. hosp-va im. O. M. Beketova. Kharkiv: KhNUMH im. O. M. Beketova, 2018. 141 s.
3. Lisovska V.P., Manzhos T.V. Pro efekt tsentralizatsii upravlinnia zapasamy za normalno rozpodilenoho popytu. Matematychna ta kompiuterne modeliuvannia. Serii: Fizyko-matematychni nauky: zb. nauk. pr. Kamianets-Podilskyi: Kamianets-Podilsk. nats. un-t, 2012. Vyp. 7. S. 175-185.
4. Maistrenko O.V., Bubenshchykov R.V., Karha O.V. Teoriia masovoho obsluhovuvannia yak zasib udoskonalennia modeli pryiniattia rishen. Viiskovo-tekhnichnyi zbirnyk. 2019. №20. S. 14-19.
5. Pyshnohraiev I.O., Omelchenko Yu.V. Modeliuvannia upravlinnia zapasamy pidprijemstva v umovakh nevyznachenosti popytu. Aktualni problemy ekonomiky ta upravlinnia: zbirnyk naukovykh prats molodykh vchenykh. 2020. Vyp. 14. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37811/>
6. Stetsenko I.V. Modeliuvannia system: navch. posib. M-vo osvity i nauky Ukrainy, Cherkas. derzh. tekhnol. un-t. Cherkasy: ChDTU, 2010. 399 s.
7. Khomenko M.M. Dynamichna model upravlinnia zapasamy z obgruntuvanniam velychyny partii prysadok. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. 2011. № 3. T. 3. S. 12-18.
8. Tseliv O.V., Hryshko M.P. Stokhastychni modeli upravlinnia zapasamy postavok tovaru. Ekonomichnyi visnyk NTUU «KPI», 2019. S. 451 – 459.
9. Agboola S.O., Ojeniyi, A. (2018) The Chapman-Kolmogorov equations of solving weather condition in markov chain. URL: [https://www.researchgate.net/publication/330535754\\_the\\_Chapman\\_Kolmogorov\\_equations\\_of\\_solving\\_weather\\_condition\\_in\\_markov\\_chain](https://www.researchgate.net/publication/330535754_the_Chapman_Kolmogorov_equations_of_solving_weather_condition_in_markov_chain).
10. Chican, A. Inventory models /Ed. by A. Chican. Akademiaikiado, Budapest, 1990. 419 pp.
11. Mills, Edwin S. "The Theory of Inventory Decisions." *Econometrica*, vol. 25, no. 2, 1957, pp. 222-238. JSTOR, <https://doi.org/10.2307/1910251>. Accessed 18 Oct. 2022.
12. Dynkin E.B. (1989) Kolmogorov and the Theory of Markov Processes. *The Annals of Probability*. Vol. 17, No. 3 (Jul., 1989), pp. 822-832. <https://www.jstor.org/stable/2244385>.
13. Nicholas W. Barendregt, Krešimir Josić, and Zachary P. Kilpatrick Analyzing dynamic decision-making models using Chapman-Kolmogorov equations. *J Comput Neurosci*. 2019 Dec; 47(2-3): 205-222. doi: 10.1007/s10827-019-00733-5.
14. Haken, H., Mayer-Kress, G. (1981) Chapman-Kolmogorov equation and path integrals for discrete chaos in presence of noise. *Z. Physik B - Condensed Matter* 43, 185–187. <https://doi.org/10.1007/bf01293609/>
15. Hamdy A. Taha. *Operations Research An Introduction*, seventh edition. Pearson Education, 2017. 848 pp.
16. Wagner Harvey M. *Principles of operations research: with applications to managerial decisions*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1975. 1039 pp.

**Дмитро СТАЦЕНКО**Київський національний університет технологій та дизайну  
<https://orcid.org/0000-0002-3064-3109>  
e-mail: [statsenko.dv@knutd.com.ua](mailto:statsenko.dv@knutd.com.ua)**Володимир СТАЦЕНКО**Київський національний університет технологій та дизайну  
<https://orcid.org/0000-0002-3932-792X>  
e-mail: [statsenko.v@knutd.edu.ua](mailto:statsenko.v@knutd.edu.ua)**Євгенія РОМАНЮК**Київський національний університет технологій та дизайну  
<https://orcid.org/0000-0003-4805-959X>  
e-mail: [romanyuk.yo@knutd.edu.ua](mailto:romanyuk.yo@knutd.edu.ua)**ОСИПЕНКО В.В.**Київський національний університет технологій та дизайну  
<https://orcid.org/0000-0002-1077-1461>  
e-mail: [osypenko.vv@knutd.edu.ua](mailto:osypenko.vv@knutd.edu.ua)

## ВИКОРИСТАННЯ ПРОТОКОЛУ 1-WIRE У КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ «РОЗУМНОГО БУДИНКУ»

У статті розглядаються комп'ютерні системи, які використовуються у «Розумному будинку». Проведено порівняльний аналіз цих комп'ютерних систем. Наголошено, що такі системи мають ряд переваг, які позитивно впливають на життя та безпеку людини. Використання пристроїв для вимірювання температури широко використовується у комп'ютерних системах для моніторингу умов «Розумного будинку». Необхідність встановлення великої кількості датчиків призводить до зростання складності таких комп'ютерних систем. Важливу роль у розробці систем відіграють протоколи з'єднання датчиків з мікроконтролером.

Представлені дві імітаційні моделі комп'ютерних систем «Розумного будинку» для визначення температури в приміщенні на базі класичного протоколу з'єднання так і з використанням протоколу 1-Wire. У імітаційній моделі на базі стандартного протоколу використано: плата Arduino Uno на базі мікроконтролера Atmega328p, датчики температури LM35 та мультиплексор 74HC4051D. У імітаційній моделі з використанням протоколу 1-Wire використано: плата Arduino Uno та цифровий датчик температури DS18B20. Наведено інформацію про роботу протоколу 1-Wire, який широко застосовується для підключення великої кількості датчиків з таким інтерфейсом, а саме існує теоретична можливість адресації необмеженої кількості подібних пристроїв на однопровідній лінії. В імітаційній моделі системи з використанням протоколу 1-Wire кількість датчиків під'єднаних до одного виводу збільшена до 12 з метою аналізу та демонстрації можливостей системи. За результатами моделювання представлені наступні параметри: кількість можливих з'єднань, складність конструкції, використання компактного програмного коду, частота тактового сигналу та вартість комп'ютерних систем «Розумного будинку».

У висновках подано результати проведеного аналізу розглянутих імітаційних моделей комп'ютерних систем. Наведено переваги та недоліки систем з 1-Wire протоколом.

Ключові слова: імітаційна модель, комп'ютерна системи, 1-Wire, датчик температури, Arduino UNO, мікроконтролер.

Dmytro STATSENKO, Volodymyr STATSENKO, Yevheniia ROMANIUK, Volodymyr OSYPENKO  
Kyiv national university of technologies and design

## USE OF THE 1-WIRE PROTOCOL IN SMART HOME COMPUTER SYSTEMS

The article examines the computer systems used in the "Smart House". A comparative analysis of these computer systems was carried out. It was emphasized that such systems have a number of advantages that have a positive impact on human life and safety. The use of temperature measuring devices is widely used in computer systems to monitor Smart Home conditions. The need to install a large number of sensors leads to an increase in the complexity of such computer systems. Protocols for connecting sensors to a microcontroller play an important role in system development.

The analysis of the latest publications and studies provides information on the widespread use of the 1-Wire protocol in various fields to solve practical problems and the need for further improvement of systems using this protocol.

Two simulation models of "Smart House" computer systems for determining indoor temperature based on the classic connection protocol and using the 1-Wire protocol are presented. The simulation model based on the standard protocol uses: an Arduino Uno board based on an Atmega328p microcontroller, LM35 temperature sensors and a 74HC4051D multiplexer. In the simulation model using the 1-Wire protocol, the following are used: Arduino Uno board and DS18B20 digital temperature sensors. Information is given on the operation of the 1-Wire protocol, which is widely used to connect a large number of sensors with such an interface, namely, there is a theoretical possibility of addressing an unlimited number of similar devices on a single-wire line. In the simulation model of the system with the used 1-Wire protocol, the number of sensors connected to one output is increased to 12 in order to analyze and demonstrate the capabilities of the system. According to the simulation results, the following parameters are presented: the number of possible connections, the complexity of the design, the use of compact software code, the frequency of the clock signal, and the cost of the Smart Home computer systems.

The results of the analysis of the considered simulation models of computer systems are presented in the conclusions. Advantages and disadvantages of systems with 1-Wire protocol are given.

Keywords: simulation model, computer systems, 1-Wire, temperature sensor, Arduino UNO, microcontroller.

### Постановка проблеми

Системи «Розумного будинку» виконують різноманітні функції аналізу подій, що відбуваються в приміщеннях різних типів. Обробка подій відбувається відповідно до програми, що завантажена у мікроконтролер, який аналізує та відправляє необхідні команди або сповіщення до підключених пристроїв. Налаштування систем «Розумного будинку» відбувається автоматично та налаштовує роботу всіх систем відповідно до вимог користувача, часу доби, його положення в приміщенні, погоди та зовнішнього освітлення для забезпечення комфортного стану перебування у будинку [1].

Системи «Розумного будинку» об'єднують підсистеми наступного типу у єдину для керування пристроями та додатковими елементами в приміщенні [2]: 1) Підсистеми управління та зв'язку; 2) Підсистема вентиляції, опалення та кондиціонування; 3) Підсистема освітлення; 4) Підсистема електроживлення; 5) Підсистема безпеки та моніторингу.

Підсистема вентиляції, опалення та кондиціонування забезпечує надходження свіжого повітря, регулювання температури та вологості. Підсистема, такого типу, дозволяє знизити витрати енергії за рахунок раціонального використання температури середовища. До цієї підсистеми входять: 1) Дистанційне керування кондиціонерами приміщення; 2) Механізми автоматичного відкриття або закриття вікон приміщень для регулювання температури та вологості приміщення за рахунок зовнішніх умов.

Одним з елементів, який широко застосовується у даних підсистемах є датчик температури. В більшості випадків, датчики температури використовуються для одночасного дистанційного вимірювання та контролю температури в різних частинах приміщення та пристроях «Розумного будинку» [3]. Використання значної кількості датчиків температури у приміщеннях «Розумного будинку» пов'язана з необхідністю своєчасного визначення подій пов'язаних з підвищенням або зниженням температури та прийняття заходів відповідних до програми системи керування.

Це, у свою чергу, призводить до зростання складності комп'ютерної системи «Розумного будинку», а також до підвищення витрат необхідних для розробки та встановлення такої системи. Проте, готові до придбання рішення не завжди задовольняють всім вимогам, а їх вартість перевищує допустимі межі.

Для вирішення такої проблеми використовуються сучасні мікроконтролери та різноманітні датчики. Важливу роль в цьому будуть відігравати інтерфейс та протоколи з'єднання, які покращують зв'язок та передачу сигналів між пристроями.

### Аналіз останніх джерел

Огляд публікацій за останні роки показав широке використання протоколу 1-Wire підключення в різних галузях людської діяльності.

У статті [4] представлено систему автоматичного керування побутовими пристроями у домашніх умовах, яка використовує 1-Wire протокол в якості каналу зв'язку для шифрування передачі даних та підвищення захищеності від кібер-злочинців.

В роботі [5] розглянуто практичне застосування 1-Wire цифрових датчиків температури. Завдяки поєднанню практичних інженерних умов температурне поле вертикально заглибленого однострубного теплообмінника ґрунтового теплового насоса перевіряється 1-провідними цифровими датчиками в широкій зоні. Представлена в статті інтелектуальна система вимірювання температури дозволяє довгостроково проводити широкомасштабні дослідження температурного поля підземного теплообмінника.

У дослідженні [6] запропонована система моніторингу замерзлих глибоких свердловин, яка розроблена за технологією 1-Wire, відповідно до середовища застосування моніторингу замерзання для великих відстаней і кількох точок вимірювання при будівництві вугільної шахти на кілометр.

У статті [7] представлено систему моніторингу температури на основі 1-Wire протоколу зв'язку та мікроконтролера AVR фірми Microchip. Апаратна реалізація запропонованої системи моніторингу температури використовує цифровий датчик температури DS18B20, який дозволяє декільком DS18B20 працювати на одній шині 1-Wire. Таким чином, один мікроконтролер PIC можна використовувати для керування багатьма DS18B20, розподіленими на великій території.

У дослідженні [8] представлено недорогу систему збору даних і керування на основі мікроконтролера AVR фірми Microchip через 1-Wire протокол. У цій системі всі датчики вологості та температури підключені до контакту цифрового порту мікроконтролера. Основна мета цієї системи — зменшити кількість проводів від датчика до контролера та усунути залежність від вбудованого аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера.

На основі аналізу останніх досліджень і публікацій, в даній роботі, основну увагу присвячено підключенню датчиків до мікроконтролерів за допомогою протоколу 1-Wire.

**Метою роботи є:** порівняльний аналіз використання протоколу 1-Wire та традиційного підключення датчиків температури до мікроконтролеру комп'ютерних систем «Розумного будинку».

### Виклад основного матеріалу

Розробка та створення комп'ютерних систем «Розумного будинку» передбачає використання достатньо великої кількості датчиків під'єднаних до мікроконтролера, який виконує основні функції обробки, аналізу та передачі даних з підключених пристроїв. В статті розглянуто декілька моделей підключення датчиків до мікроконтролера. Аналіз імітаційних моделей проведено за допомогою програмного забезпечення для автоматизованого проектування електронних схем Proteus [9].

На рис. 1 наведено імітаційну модель комп'ютерної системи призначеної для визначення

температури у приміщенні «Розумного будинку».

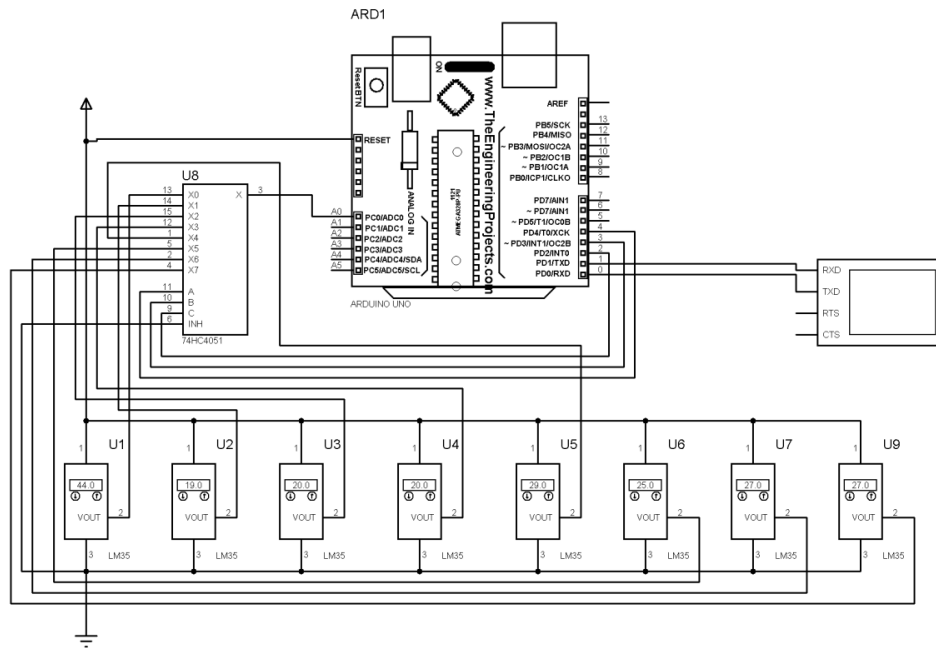


Рис. 1. Імітаційна модель комп'ютерної системи «Розумного будинку» з традиційним підключенням

У даній моделі використані елементи: плата Arduino Uno на базі мікроконтролера Atmega328p [10], датчики температури LM35, мультиплексор 74HC4051D та Virtual Terminal для виводу обробленої інформації з датчиків на консоль персонального комп'ютера.

Датчик температури LM35 є недорогою інтегральною схемою, достатньо надійною та точною при використанні у житлових приміщеннях «Розумного будинку» (похибка вимірювання становить близько  $\pm 0,5$  °C) [11]. Датчик LM35 має лінійну залежність вихідного сигналу (температура/напруга), низький вихідний опір, вбудовану схему калібрування. Датчик працює в діапазоні від  $-55$  °C до  $150$  °C. Аналоговий сигнал на виході прямо пропорційний до зміни температури в градусах Цельсія, на кожен градус припадає 10мВ. Струм споживання датчика становить близько 60 мкА, саморозігрів LM35 становить  $0,1$  °C.

В зв'язку з тим, що до плати Arduino Uno можна підключити лише п'ять аналогових пристроїв одночасно, до імітаційної моделі додано мультиплексор. Плата 74HC4051D – 8-канальний аналоговий мультиплексором. Вона має три цифрових входів (S0 – S2), вхід активації низького рівня, вісім незалежних I/O (Y0 – Y7) та загальний I/O (Z). Якщо вхід активації низького рівня знаходиться в низькому рівні, то вибирається один із восьми перемикачів за допомогою S0 – S2. Коли вхід активації низького рівня знаходиться у високому рівні, всі перемикачі мають високий імпеданс у відключеному стані незалежно від S0 – S2. [12].

Представлена імітаційна модель дозволяє підключити вісім датчиків в даному випадку, а при підключенні додаткових мультиплексорів кількість датчиків може сягати 40. Проте, зростає кількість з'єднань та додаткових елементів, необхідних для покращення ефективності роботи комп'ютерної системи «Розумного будинку».

З метою підвищення ефективності систем «Розумного будинку» можна використати протокол 1-Wire для підключення більшої кількості датчиків без необхідності встановлення додаткових модулів, або заміни мікроконтролера. Протокол 1-Wire – призначений для передачі даних в обидві сторони по одному з'єднанню. Режим зв'язку в цьому протоколі - асинхронний і напівдуплексний. При цьому завжди є ведучий – один пристрій на шині, який відсилає команди, та ведені – пристрої, які ці команди приймають та, за необхідністю, відповідають на них. Кожний з ведених пристроїв підключається безпосередньо до загальної шини.

Протокол 1-Wire не складний у реалізації і вимагає для зв'язку всього декілька дротів (шина даних, земля та за необхідністю живлення); проте також має недоліки, а саме висока чутливість до часу та завад. Також 1-Wire не призначений для передачі великих об'ємів інформації та для швидкісного обміну даними.

Протокол 1-Wire визначає фізичний, каналний, мережевий та транспортний рівні взаємодії.

Фізично для організації інтерфейсу необхідні як мінімум лінія для даних та "земля"; досить часто також для підключення пристроїв необхідна лінія живлення, проте деякі ведені пристрої можна під'єднати до паразитного живлення через шину даних. Спрощений приклад підключення шини представлений на рис. 2. Провідний пристрій *Master* і три ведені, *Slave1*, *Slave2* і *Slave3*.



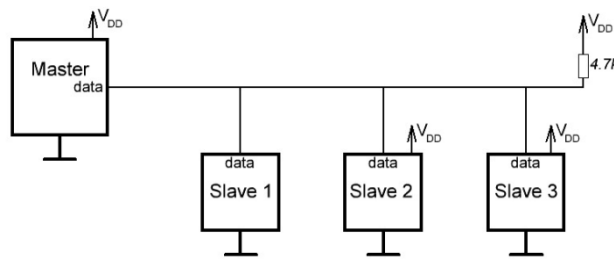


Рис. 2. Приклад підключення ведучого та ведених пристроїв за протоколом 1-Wire.

Обмін інформацією ведеться так званими тимчасовими або тайм-слотами (60 мкс): один тайм-слот служить для обміну одним бітом інформації. Дані передаються біт за бітом, починаючи з молодшого біта молодшого байту. Під час обміну інформацією ведучий ініціює кожну зв'язок на бітному рівні. Передача кожного біта, незалежно від напрямку (передача чи прийом), має бути ініційована провідним.

Розглянемо 5 основних команд для зв'язку по шині 1-Wire: "Запис 1", "Запис 0", "Читання", "Скидання" та "Присутність". Сигнал "Запис 1" відповідає за те, що ведучий встановлює низький рівень протягом 1...15 мкс. Після цього, протягом частини тимчасового слота, що залишилася, він звільняє шину. Сигнал "Запис 0". Ведучий формує низький рівень протягом щонайменше 60 мкс, але з довше 120 мкс. Сигнал "Читання". Ведучий встановлює низький рівень протягом 1...15 мкс. Після цього підлеглий, якщо хоче передати 0, утримує шину низькому стані до 60 мкс; якщо ж підлеглий хоче передати 1, він просто звільняє лінію. Ведучий зазвичай сканує стан шини після 15 мкс після встановлення низького рівня на шині. Основні проблеми, що виникають під час реалізації читання-запису – це проблеми з часом, тобто "невитримування", або навпаки, "перетримування" тимчасових затримок під час читання лінії. Виникають ці проблеми через те, що часто відсутні додаткові правки на повільність мов програмування високого рівня. Сигнал "Скидання/присутність". В даному випадку часові інтервали імпульсів відрізняються. Ведучий встановлює низький рівень протягом 8 тимчасових слотів (480 мкс), а потім звільняє шину (сигнал "Скидання"). Якщо на шині присутній підлеглий, він повинен протягом 60 мкс після звільнення провідним шини встановити низький рівень тривалістю щонайменше 60 мкс (сигнал "Присутність"). Якщо такий сигнал не виявиться, то ведучий повинен вважати, що немає підключених пристроїв до шини і подальший зв'язок неможливий. Ця зв'язок сигналів завжди починає будь-який обмін інформацією між пристроями. Крім цього, потрібно враховувати, що будь-який ведений пристрій після отримання живлення відразу видає сигнал присутності. Сигнал "Скидання" дозволяє ведучому достроково завершити обмін інформацією – наприклад, якщо датчик температури передає всю свою пам'ять, а потрібно тільки перші два байти, які містять значення температури, то після отримання цих двох байт мікросхема просто може опустити лінію в нуль на потрібна кількість часу – датчик зрозуміє, що більше нічого не потрібно пересилати.

На рис. 3 показана імітаційна модель побудована на основі цього методу. В даній схемі використано цифровий датчик температури DS18B20 [13].

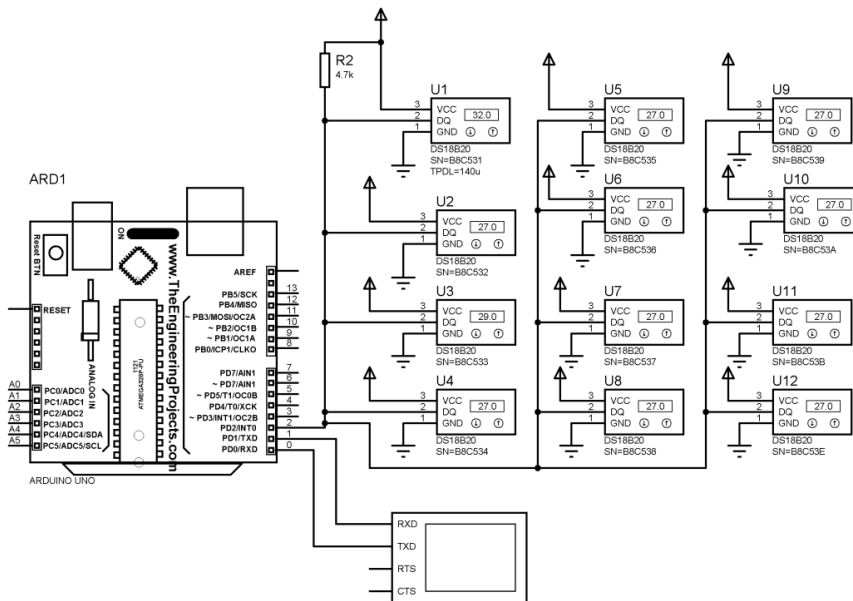


Рис. 3. Імітаційна модель комп'ютерної системи «Розумного будинку» з протоколом 1-Wire

Діапазон вимірюваних температур датчика DS18B20 становить від -55 до +125 °С. Зчитуваний цифровий код є прямим безпосереднім кодом вимірюного значення температури і не потребує додаткових перетворень. Роздільна здатність вбудованого АЦП може бути змінена в діапазоні від 9 до 12 розрядів

вихідного коду. Абсолютна похибка перетворення менше  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  в діапазоні контрольованих температур від  $-10$  до  $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Внутрішня енергонезалежна пам'ять температурних установок забезпечує запис довільних значень верхньої та нижньої межі установок. Мікросхема містить вбудований логічний механізм пріоритетної сигналізації в лінію про факт виходу температури за один з обраних порогів.

В розглянутих імітаційних моделях рис. 1 та рис. 3 обрані схожі за параметрами датчики та загальний тип мікроконтролера, а саме Arduino Uno. У моделі рис. 3 використовується один цифровий вивід (вивід 2), у той час, як у схемі підключеної за допомогою стандартних з'єднань використовується один аналоговий (A0) та три цифрових виводи мікроконтролера. На рис. 4 показано реалізація пошуку адрес всіх підключених до другого виводу мікроконтролера датчиків температури DS18B20.

```
Locating devices...Found 12 devices.  
Found device 0 with address: 2838C5880000002F  
Found device 1 with address: 2834C58800000052  
Found device 2 with address: 2832C588000000E0  
Found device 3 with address: 2838C58800000041  
Found device 4 with address: 2836C5880000003C  
Found device 5 with address: 283EC58800000090  
Found device 6 with address: 2831C588000000B9  
Found device 7 with address: 2839C58800000018  
Found device 8 with address: 2835C58800000065  
Found device 9 with address: 2833C58800000007  
Found device 10 with address: 2838C58800000076  
Found device 11 with address: 2837C5880000000B
```

Рис. 4. Результат пошуку адрес під'єднаних датчиків до мікроконтролера

У моделі рис. 1 використовуються всі виводи мультиплектора 74HC4051D, що збільшує та ускладнює кількість зв'язків, що негативно впливає на конструкцію комп'ютерної системи «Розумного будинку» та на код програми. Для збільшення числа датчиків під'єднаних до плати Arduino UNO (рис. 1), необхідно використати додаткові мультиплектори. Використовуючи плати 74HC4051D максимальна кількість підключених датчиків збільшиться до 32. Проте, комп'ютерна система з протоколом 1-Wire (рис. 3) дозволяє під'єднати до одного виводу мікроконтролера достатньо велику кількість датчиків, як показано на рисунку.

Для імітаційної моделі зі стандартним з'єднанням максимальна частота зчитування приблизно дорівнює  $10\text{ кГц}$ , або  $100\text{ мкс}$ . Час для запису/читання імітаційної моделі з протоколом 1-Wire в стандартному режимі буде становити не більше  $60\text{ мкс}$ .

Вартість використаних елементів у обох імітаційних моделях комп'ютерних систем «Розумного будинку» становить: LM35 –  $57,5$  грн.; 74HC4051D –  $10$  грн.; DS18B20 –  $26$  грн.. Ціни вказані відповідно до магазинів України станом на грудень 2022 року. Відповідно до цього вартість обладнання необхідного для моніторингу та передачі даних у першому випадку (рис. 1) складає  $470$  грн. без врахування плати Arduino UNO. У другому варіанті (рис. 3) вартість обладнання бути дорівнювати  $312$  грн. при встановленні 12 датчиків температури DS18B20.

### Висновки

Проведений аналіз комп'ютерних систем «Розумного будинку» на базі стандартного з'єднання та на базі протоколу 1-Wire показав наступні результати. Використання протоколу 1-Wire має наступні переваги: менша кількість зв'язків, проста для реалізації конструкція, компактність та простота програмного коду, можливість під'єднати до однієї і тієї ж плати мікроконтролера значну кількість датчиків. Частота тактового сигналу більша в порівнянні зі стандартним з'єднанням. Вартість системи з інтерфейсом 1-Wire менша на  $33\%$  ніж при стандартному підключенні. Основним недоліком такої комп'ютерної системи є те, що пошкодження на лінії 1-Wire призведе до виходу з ладу всієї системи.

### Література

1. Alexandra Deschamps-Sonsino Smarter Homes. Apress Berkeley, CA. 2018. pp. 168.
2. Nagender Kumar Suryadevara, Subhas Chandra Mukhopadhyay Design, Implementation and Issues. Springer Cham, 2015. pp. 180.
3. Kamran Souri, Kofi A.A. Makinwa. Energy-Efficient Smart Temperature Sensors in CMOS Technology. Springer Cham, 2018. pp. 118.
4. Magre, Luz & Martinez Santos, Juan Carlos. Leveraging 1-wire Communication Bus System for Secure Home Automation / Colombian Conference on Computing. Communications in Computer and Information Science. Springer Verlag. 2017, pp 759-771.
5. Du, Zuliang & Lv, Z.. An intelligent temperature-measuring system based on 1-wire bus in underground heat exchanger / International Review on Computers and Software, Praise Worthy Prize, s.r.l.. 2012, pp. 1845-1849.
6. Wu, Tao & Zhou, Xiaomin & He, Xiaonan & Xu, Yan.. Design of distributed temperature-measuring system based on 1-wire bus for ultra-kilometre frozen deep well / Evolutionary Intelligence, Springer Nature. 2021.
7. Nasir, Ibrahim & Abdurrahman, Ahmed & Al-Hashmi, Salem & Mohammed, Hamd.. Design and Development of a Temperature Monitoring System Based on PIC Microcontroller and 1- Wire Communication Protocol / Journal of Pure & Applied Sciences. 2017, pp. 8-13.

8. Mohammad, Chowdhury & Masum Refat, Chowdhury.. Design and Implementation of Data Acquisition and Control System Using 1-Wire Protocol. 2021.
9. PCB Design and Circuit Simulator Software – Proteus. URL: <https://www.labcenter.com/>
10. Arduino UNO R3. Product Reference Manual. URL: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>
11. LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>
12. CMOS Digital Integrated Circuits 74HC4051D, 74HC4052D. URL: [https://www.mouser.com/datasheet/2/408/74HC4051D\\_datasheet\\_en\\_20201203-959201.pdf](https://www.mouser.com/datasheet/2/408/74HC4051D_datasheet_en_20201203-959201.pdf)
13. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermomete. URL: <https://arduino.ua/docs/DS18B20.pdf>

#### References

1. Alexandra Deschamps-Sonsino Smarter Homes. Apress Berkeley, CA. 2018. pp. 168.
2. Nagender Kumar Suryadevara, Subhas Chandra Mukhopadhyay Design, Implementation and Issues. Springer Cham, 2015. pp. 180.
3. Kamran Souri, Kofi A.A. Makinwa. Energy-Efficient Smart Temperature Sensors in CMOS Technology. Springer Cham, 2018. pp. 118.
4. Magre, Luz & Martinez Santos, Juan Carlos. Leveraging 1-wire Communication Bus System for Secure Home Automation / Colombian Conference on Computing. Communications in Computer and Information Science. Springer Verlag. 2017, pp 759-771.
5. Du, Zuliang & Lv, Z.. An intelligent temperature-measuring system based on 1-wire bus in underground heat exchanger / International Review on Computers and Software, Praise Worthy Prize, s.r.l. 2012, pp. 1845-1849.
6. Wu, Tao & Zhou, Xiaomin & He, Xiaonan & Xu, Yan.. Design of distributed temperature-measuring system based on 1-wire bus for ultra-kilometre frozen deep well / Evolutionary Intelligence, Springer Nature. 2021.
7. Nasir, Ibrahim & Abdurrrhman, Ahmed & Al-Hashmi, Salem & Mohammed, Hamd.. Design and Development of a Temperature Monitoring System Based on PIC Microcontroller and 1- Wire Communication Protocol / Journal of Pure & Applied Sciences. 2017, pp. 8-13.
8. Mohammad, Chowdhury & Masum Refat, Chowdhury.. Design and Implementation of Data Acquisition and Control System Using 1-Wire Protocol. 2021.
9. PCB Design and Circuit Simulator Software – Proteus. URL: <https://www.labcenter.com/>
10. Arduino UNO R3. Product Reference Manual. URL: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>
11. LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>
12. CMOS Digital Integrated Circuits 74HC4051D, 74HC4052D. URL: [https://www.mouser.com/datasheet/2/408/74HC4051D\\_datasheet\\_en\\_20201203-959201.pdf](https://www.mouser.com/datasheet/2/408/74HC4051D_datasheet_en_20201203-959201.pdf)
13. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermomete. URL: <https://arduino.ua/docs/DS18B20.pdf>

Віктор СТЕЦЮК

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-1413-8724>e-mail: [sv\\_rt@i.ua](mailto:sv_rt@i.ua)

Костянтин ГОРЯЩЕНКО

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-7034-8702>e-mail: [kostyakst@ukr.net](mailto:kostyakst@ukr.net)

## АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ БАГАТОЧАСТОТНИХ П'ЄЗОРЕЗОНАНСНИХ АВТОКОЛИВАЛЬНИХ СИСТЕМ

В роботі проводиться аналіз математичних моделей багаточастотних п'єзореzonансних коливальних систем. Вказано на сутність явища багаточастотного збудження, як нормальної фізичної властивості кварцових резонаторів. Однак для задач побудови високостабільних автоколивальних систем в якості джерела опорного коливання дана властивість КР являється небажаною, більш того, з нею борються всіма можливими методами. В результаті аналізу математичних моделей багаточастотних коливальних систем встановлено, що жодна з них не дозволяє в повній мірі проводити дослідження динаміки багаточастотних коливальних систем в умовах вібраційних дестабілізуючих впливів, що вимагає їх подальшого вивчення. Запропонований власний підхід до вирішення проблем моделювання багаточастотних ПКС.

Ключові слова: кварцовий резонатор, п'єзореzonансна система, коливання, багаточастотність, математична модель.

Viktor STETSIUK, Kostyantyn HORIASCHENKO

Khmelnytskyi National University

## ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS OF MULTI-FREQUENCY PIONEERING AUTOMOTIVE SYSTEMS

In the work the analysis of mathematical models of multi-frequency piezoresonance oscillatory systems is carried out. It is indicated on the essence of the phenomenon of multifrequency excitation, as a normal physical property of quartz resonators. However, for the tasks of constructing highly stable self-oscillating systems as a source of reference oscillation, this property of the CR is undesirable, moreover, it is struggling with all possible methods. As a result of the analysis of mathematical models of multifrequency oscillation systems, it is established that none of them allows to fully study the dynamics of multifrequency oscillation systems under conditions of vibrational destabilizing effects, which requires their further study. Proposed own approach to solving problems of simulation of multi-frequency PCBs. Key words: quartz resonator, piezoresonance system, oscillations, multifrequency, mathematical model.

Будь-яка п'єзореzonансна коливальна система (ПКС) може розглядатися як багаточастотна, адже така сама фізична суть кварцового резонатора (КР). Анізотропія кристалічного елемента в принципі призводить до виникнення різноманітних видів пружного зв'язку напруг і деформацій та викликає появу побічних резонансів у всіх п'єзореzonансних пристроях (ПРП). Зазвичай багаточастотність являється небажаною властивістю ПКС і з нею борються найрізноманітнішими конструктивно-технологічними методами. Однак в умовах масового використання ПКС, безперервного підвищення вимог до їх метрологічним характеристик при дії не одного дестабілізуючого фактора, а ансамблю (температури, вібрації, радіації, електромагнітного поля, тощо) ці методи виявляються малоефективними у вирішенні головної проблеми ПКС – інваріантності до дестабілізуючих факторів.

Дослідження автоколивальних систем значно ускладнюються із збільшенням числа частот збудження. Узагальнення методів усереднення, які використовуються під час аналізу даних систем приведене в [1], де розглядається система диференціальних рівнянь із малим параметром:

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} &= \varepsilon X(p, q) \\ \frac{dq}{dt} &= \omega(p) + \varepsilon Y(p, q) \end{aligned} \quad (1)$$

де  $p = (p_1, \dots, p_m)$  –  $m$ -мірний вектор повільних рухів,  $q = (q_1, \dots, q_n)$  –  $n$ -мірний вектор швидких рухів,  $\omega(p) = (\omega_1(p), \dots, \omega_n(p))$ , а вектор-функції  $X(p, q)$  і  $Y(p, q)$  можуть бути представлені у вигляді доданків:

$$\begin{aligned} X(p, q) &= \sum_{|k| \geq 0} X_k(p) e^{i(k, q)} \\ Y(p, q) &= \sum_{|k| \geq 0} Y_k(p) e^{i(k, q)} \end{aligned} \quad (2)$$

де  $k = (k_1, \dots, k_n)$  – вектор із цілочисленими додатними та від'ємними компонентами, норма якого обчислюється за формулою:

$$|k| = \sum_{i=1}^n |k_i|,$$

Розв'язок диференціальних рівнянь (1) базується на припущенні існування в прямих частинах цих рівнянь рівномірних середніх значень. Однак багато задач приводять до необхідності дослідження диференціальних рівнянь, для яких умова існування рівномірних середніх не виконується. В [2] показано, що неіснування рівномірних середніх значень призводить до того, що рішення системи диференціальних рівнянь типу (1) і відповідної усередненої за простором змінних  $q$  системи

$$\frac{dp}{dt} = \varepsilon \bar{X}(\bar{p}), \quad (3)$$

де

$$\bar{X}(\bar{p}) = \frac{1}{(2\pi)^n} \int_0^{2\pi} \dots \int_0^{2\pi} X(\bar{p}, q) dq_1 \dots dq_n, \quad (4)$$

отримані при однакових початкових значеннях, відрізняються на скінченну величину, при  $t \sim \frac{1}{\varepsilon}$ . У результаті одержується еквівалентна система:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \varepsilon X(x + p_0, y + \omega_0 t + q_0), \\ \frac{dy}{dt} &= \omega(x + p_0) - \omega_0 + \varepsilon Y(x + p_0, y + \omega_0 t + q_0), \end{aligned} \quad (5)$$

де  $\omega_0 = \omega(p)$ .

Так, згідно [3], якщо власні частоти контурів не перебувають у співвідношенні простих цілих чисел і згашання контурів досить малі, укорочені диференціальні рівняння представляються системою виду (для одноконтурних автогенераторів):

$$\begin{aligned} X_1 &= F_1(X_1, \dots, X_n); \\ X_2 &= F_2(X_1, \dots, X_n) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\dots \dots \dots$$

$$X_n = F_n(X_1, \dots, X_n)$$

$$\text{де} \quad F_i = [S_i(X_1, \dots, X_n) R_i k_{33} - 1] X_i. \quad (7)$$

де  $X$  – відносні безрозмірні амплітуди коливань;  $S_i$  – середня крутизна для основної частоти;  $R_i$  – резонансний опір контуру;  $k_{33}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку.

Рівняння стаціонарного режиму, у яких амплітуди коливань постійні, виходять із (6), (7), якщо прийняти  $X_1 = X_2 = \dots = X_n = 0$ :

$$F_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

звідки визначаються стаціонарні значення амплітуд коливань  $X_{i0}$ .

Для дослідження стійкості стаціонарного режиму необхідно скласти рівняння лінійного наближення для варіацій амплітуд  $\xi_i$ . Ці рівняння мають вигляд:

$$\begin{aligned} \xi_i &= s_{i1} \xi_1 + s_{i2} \xi_2 + \dots + s_{ij} \xi_j + \dots + s_{in} \xi_n, \\ i, j &= 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \quad (8)$$

де  $s_{ij} = dF_i / dX_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ , і визначено в точці досліджуваного стаціонарного режиму ( $X_i = X_{i0}$ ).

У загальному вигляді одержати прості умови стійкості стаціонарного режиму не представляється можливим, тому в даній системі обмежуються дослідженнями системи симетричних зв'язаних автогенераторів, що мають однакові коефіцієнти взаємного зв'язку  $k$ . Окрім цього дана модель не дозволяє дослідження динаміки встановлення багаточастотного режиму коливань, що значно обмежує можливості її використання.

В [4] розглянута модель системи для дослідження багаточастотних коливань в газотурбінному двигуні, яка описується системою рівнянь:

$$x + W_1(p)W_2(p)y - W_2(p)z = 0; \quad (9)$$

$$y = F(x). \quad (10)$$

Якщо сигнали на вході та виході нелінійного елемента (НЕ):

$$x = x_0 + Ae^{j\omega_1 t} + Be^{j\omega_2 t} e^{j\alpha}; \quad (11)$$

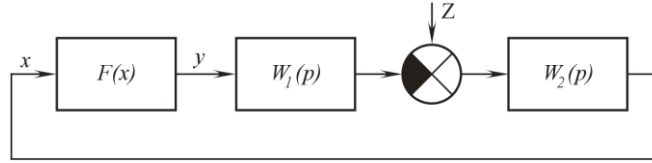
$$y = y_0 + AW(\omega_1 / \omega_2) e^{j\omega_1 t} + BW(\omega_2 / \omega_1) e^{j\omega_2 t} e^{j\alpha}, \quad (12)$$

де  $W(\omega_1/\omega_2)$  – передатна функція НЕ на частоті  $\omega_1$  при впливі сигналу на частотах  $\omega_1$  і  $\omega_2$ ;  $W(\omega_2/\omega_1)$  – передатна функція НЕ на частоті  $\omega_2$  при впливі сигналу на частотах  $\omega_2$  і  $\omega_1$ ;  $A, B$  – амплітуди коливань.

Коефіцієнт поширення:

$$\gamma = \beta + j\alpha, \tag{13}$$

де, за аналогією з електротехнікою, дійсна частина  $\beta$  являє собою коефіцієнт затухання, а уявна частина  $\alpha$  – коефіцієнт фази.



**Рис. 1. Модель системи для дослідження багаточастотних коливань:**  
 $x, y$  – параметри на вході та виході НЕ;  $z$  – зовнішній вплив;  $F(x)$  – характеристика НЕ;  $W_1(p), W_2(p)$  – передатні функції лінійних частин системи

Зовнішній вплив задається у вигляді [4]:

$$z = z_0 + z_1 e^{j\omega_1 t} e^{j\beta_1} + z_2 e^{j\omega_2 t} e^{j\beta_2} \tag{14}$$

В подібних системах, гармонічна лінеаризація може бути застосована не тільки при одно- або двочастотному коливаннях, але й при коливаннях з будь-якою кількістю частот і при будь-якому співвідношенні між частотами та амплітудами складових. Наприклад, для випадку  $y=x^3$  при наявності постійної складової та  $\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$ , маємо:

$$\begin{aligned} x &= x_0 + A \sin \omega_1 t + B \sin(\omega_2 t + \alpha_2) + C \sin(\omega_3 t + \alpha_3); \\ y &= y_0 + A W_{HE1} \sin \omega_1 t + B W_{HE2} \sin(\omega_2 t + \alpha_2) + C W_{HE3} \sin(\omega_3 t + \alpha_3) \end{aligned}$$

Для випадку співвідношення частот  $\omega_1 : \omega_2 : \omega_3 = 1 : 3 : 5$  та  $x_0=0$ , маємо систему рівнянь трьохчастотного режиму має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} W_{HE1} &= \frac{3}{4} A^2 + \frac{3}{2} (B^2 + C^2) - \frac{3}{4} A B e^{j\alpha_2} - \frac{3}{2} B C e^{j(\alpha_3 - \alpha_2)}; \\ W_{HE2} &= \frac{3}{4} B^2 + \frac{3}{2} (A^2 + C^2) - \frac{1}{4} \frac{A^3}{B} e^{-j\alpha_2} - \frac{3}{4} \frac{A^2 C}{B} e^{j(\alpha_3 - \alpha_2)}; \\ W_{HE3} &= \frac{3}{4} C^2 + \frac{3}{2} (A^2 + B^2) - \frac{3}{4} \frac{A^2 B}{C} e^{j(\alpha_3 - \alpha_2)}. \end{aligned} \tag{15}$$

Суттєвим недоліком даної моделі є можливість її використання тільки для дослідження стійкості багаточастотного режиму коливань та її погану придатність для дослідження термо- та вібродинамічних процесів в п'єзорезонансних коливальних системах [5].

Математична модель, яка описує поведінку багаточастотної п'єзорезонансної коливальної системи (БПКС) і найбільш наближена до вирішення поставленої задачі описується системою диференціальних рівнянь [6]:

$$\begin{aligned} \mathbf{T} \frac{d\mathbf{U}}{dt} &= [\mathbf{G}_a \cdot \mathbf{R} - \mathbf{E}_{mm}] \cdot \mathbf{U}; \\ \mathbf{T} \frac{d\Phi}{dt} &= [\mathbf{G}_p \cdot \mathbf{R} - \Delta] \cdot \mathbf{E}_{m1}; \\ \mathbf{T}_{a3} \frac{d\tilde{\mathbf{E}}_{a3}}{dt} &= -(\mathbf{R}_{a3} \cdot \mathbf{I}_0 + \tilde{\mathbf{E}}), \end{aligned} \tag{16}$$

де  $\mathbf{T} = \text{diag}(T_1, \dots, T_m)$ ,  $\mathbf{T}_{a3} = \text{diag}(T_{a3_1}, \dots, T_{a3_n})$  – матриці постійних часу парціальних кіл БПКС;  $\mathbf{U} = (U_1, \dots, U_m)^T$ ,  $\Phi = (\varphi_1, \dots, \varphi_m)^T$ ,  $\tilde{\mathbf{E}}_{a3} = (\tilde{E}_{a3_1}, \dots, \tilde{E}_{a3_n})^T$  – вектори амплітуд, фаз коливань БПКС та напруг автозміщення;  $\mathbf{G}_a = \text{Re } \dot{\mathbf{G}} = |\dot{\mathbf{G}}| \cos \Delta \varphi^T$ ,  $\mathbf{G}_p = \text{Im } \dot{\mathbf{G}} = |\dot{\mathbf{G}}| \sin \Delta \varphi^T$  – матриці дійсної та уявної складових еквівалентної комплексної провідності активної частини генератора, елементи яких формуються за правилом  $g_{a_{ji}} = \delta_{ji} (\text{Re } g_{ji})$ ,  $g_{p_{ji}} = \delta_{ji} (\text{Im } g_{ji})$ , де  $\delta_{ji}$  – символ Кронекера;

$$|\dot{\mathbf{G}}| = \begin{pmatrix} S_{11}K_{11} & S_{12}K_{12} & \dots & S_{1n}K_{1n} \\ S_{21}K_{21} & S_{22}K_{22} & \dots & S_{2n}K_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{m1}K_{m1} & S_{m2}K_{m2} & \dots & S_{mn}K_{mn} \end{pmatrix} - \text{матриця модулів приведених еквівалентних комплексних провідностей}$$

БПКС розміром  $m \times n$ ;  $\mathbf{R} = \mathbf{R}_e \cdot \mathbf{K}_\phi$  – матриця приведених опорів,  $\mathbf{R}_e = \text{diag}(R_{e_1}, R_{e_2}, \dots, R_{e_m})$ ,  $\mathbf{K}_\phi = \text{diag}(K_{\phi_1}, K_{\phi_2}, \dots, K_{\phi_m})$ ;

$$\Delta\varphi = \begin{pmatrix} (\Delta\varphi_{11} + \Delta\varphi_{\phi_1})(\Delta\varphi_{12} + \Delta\varphi_{\phi_1}) \dots (\Delta\varphi_{1n} + \Delta\varphi_{\phi_1}) \\ (\Delta\varphi_{21} + \Delta\varphi_{\phi_2})(\Delta\varphi_{22} + \Delta\varphi_{\phi_2}) \dots (\Delta\varphi_{2n} + \Delta\varphi_{\phi_2}) \\ \dots \\ (\Delta\varphi_{m1} + \Delta\varphi_{\phi_m})(\Delta\varphi_{m2} + \Delta\varphi_{\phi_m}) \dots (\Delta\varphi_{mn} + \Delta\varphi_{\phi_m}) \end{pmatrix} - \text{матриця розміром } m \times n, \text{ яка визначає}$$

фазові співвідношення в каналах збудження БПКС;  $\Delta = \text{diag}(\Delta\omega T_1, \dots, \Delta\omega_m T_m)$  – матриця узагальнених розладнань;  $\mathbf{R}_{az} = \text{diag}(R_{az_1}, \dots, R_{az_n})$  – матриця опорів автозміщень;  $\mathbf{I}_0 = (I_{0_1}, \dots, I_{0_n})^T$  – вектор постійних складових вихідних струмів  $i_{вих_i}(e_i)$ ;  $\mathbf{E}_{mm}$ ,  $\mathbf{E}_{m1}$  – одинична матриця розміром  $m \times m$  та одиничний вектор-стовпець  $m \times 1$ ;  $m$  – кількість частот генерування,  $n$  – кількість каналів збудження.

Дана модель може бути вдосконалена шляхом введення термодинамічної складової нестабільності, що дозволяє проводити дослідження динаміки встановлення коливань як на етапі встановлення теплового балансу резонатора після включення, так і під час дії зовнішніх дестабілізуючих теплових впливів. Таким чином, жодна із існуючих моделей не забезпечує можливість дослідження динаміки термо- та вібродинамічних процесів за багаточастотного збудження п'єзореzonансних коливальних систем, що потребує їх подальшого вивчення і розвитку.

## Висновки

На основі аналізу фундаментальних процесів під час функціонування кварцових резонаторів та пристроїв на їх основі показана необхідність врахування реакцій КР на вібраційні впливи в реальних умовах їх експлуатації. Явища багаточастотного збудження є нормальними фізичними властивостями кварцових резонаторів. Однак для задач побудови високостабільних автоколивальних систем в якості джерела опорного коливання дана властивість КР являється небажаною, більш того, з нею борються найрізноманітнішими конструктивно-технологічними методами. В результаті аналізу математичних моделей багаточастотних коливальних систем встановлено, що жодна з них не дозволяє в повній мірі проводити дослідження динаміки багаточастотних коливальних систем в умовах вібраційних дестабілізуючих впливів, що вимагає їх подальшого вивчення.

## Література

1. Митропольский Ю. А. Метод усреднения в нелинейной механике / Митропольский Ю. А. – К.: Наук. думка, 1971. – 440 с.
2. Арнольд В. И. Математические методы классической механики / Арнольд В. И. – М., Наука, 1974. – 472 с.
3. Уткин Г. М. Автоколебательные системы и волновые усилители / Уткин Г. М. – М.: Сов. радио, 1978. – 272 с.
4. Письменный И. Л. Многочастотные нелинейные колебания в газотурбинном двигателе / Письменный И. Л. – М.: Машиностроение, 1987. – 128 с.: ил.
5. Стецюк В. І. Методи мінімізації вібраційних впливів на стабільність п'єзореzonансних пристроїв. “Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций” / материалы 5-й международной молодежной научно-техн. конф. – Севастополь: изд. “Вебер”, 2009 г. с. 106.

## References

1. Mytropolskyi Yu. A. Metod usredneniya v nelyneinoi mekhaniky / Mytropolskyi Yu. A. – K.: Nauk. dumka, 1971. – 440 s.
2. Arnold V. Y. Matematycheskiye metody klassycheskoi mekhaniky / Arnold V. Y. – M., Nauka, 1974. – 472 s.
3. Utkyn H. M. Avtokolebatelnyye systemy y volnovyye usulytely / Utkyn H. M. – M.: Sov. radyo, 1978. – 272 s.
4. Pysmennyi Y. L. Mnohochastotnyye nelyneinyye kolebaniya v hazoturbynnom dvyhatele / Pysmennyi Y. L. – M.: Mashynostroenye, 1987. – 128 s.: yl.
5. Stetsiuk V. I. Metody minimizatsii vibratsiynykh vplyviv na stabilnist piezorezonansnykh prystroiv. “Sovremennyye problemy radyotekhniky y telekommunyatsiy” / materyaly 5-y mezhduнародnoi molodēzhnoi nauchno-tekhn. konf. – Sevastopol: yzd. “Veber”, 2009 h. s. 106.

**Sergii FILONENKO**National Aviation University, Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-9250-1640>**Vitaliy LARIN**National Aviation University, Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-5042-2426>**Anzhelika STAKHOVA**National Aviation University, Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0001-5171-6330>

## DETERMINATION OF MEASUREMENT ERROR OF ELECTRICAL ENERGY QUALITY INDICATORS BY THE CORRELATION METHOD

*The problem of energy conservation is urgent not only for Ukraine but for the whole world. One of the main causes of non-productive energy costs in the energy sector is high losses in power grids. The problem of electricity quality is the focus of many researchers and practitioners of energy and electrification. The co-supply of single-phase and three-phase electrical energy receivers from a three-phase four-wire network is widespread in the power supply systems of industrial enterprises. In such cases, there is almost always a phase asymmetry of the load, as well as significant currents in the zero wire. These factors lead to a decrease in the quality of the voltage and are the cause of economic damage. Organization of hardware control of electricity quality indicators, organizational and economic mechanism of influence on the cause of deterioration of electricity quality, development of methods and technical methods of distortion are important for normalization of electricity quality. The error of the correlation method for measuring the unbalanced voltage of a three-phase network based on the preliminary conversion of a three-phase voltage to a two-phase voltage with subsequent decomposition into orthogonal components using a discrete Fourier transform is estimated.*

*Keywords: electrical energy, power quality, power system harmonics, calculation methods, asymmetry.*

Сергій ФІЛОНЕНКО, Віталій ЛАРІН, Анжеліка СТАХОВА  
Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

## ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ КОРЕЛЯЦІЙНИМ МЕТОДОМ

*На сучасному етапі розвитку промисловості проблема енергозбереження становиться актуальною не лише для України, а й для всього світу. Одна з головних причин невиробничих затрат енергії в енергетиці це високі втрати в електричних мережах. Проблема якості електроенергії знаходиться у центрі уваги багатьох дослідників і практичних працівників в області енергетики й електрифікації. Спільне живлення однофазних і трифазних приймачів електричної енергії від трифазної чотирипровідної мережі знаходить широке поширення в системах електропостачання промислових підприємств. Трифазний контур, як правило, більш економічний, ніж еквівалентний двопровідний однофазний ланцюг з такою самою напругою лінії та заземлення, оскільки для передачі заданої кількості електричної енергії використовується менше матеріалу провідника. У таких випадках практично завжди виникає несиметрія навантаження за фазами, а також значні струми в нульовому проводі. Ці фактори призводять до зниження якості напруги й є причиною народногосподарського збитку. Для підвищення якості та нормалізації електроенергії важливими є організація апаратного контролю показників якості електроенергії, організаційно-економічний механізм впливу на причину погіршення якості електроенергії, розробка методів та технічних методів усунення спотворень електроенергії. Однак в реальному світі неможливо ідеально збалансувати міжфазну напругу в трифазному контурі. Напруга між лініями в трифазному контурі зазвичай змінюється на кілька вольт, але різниця більше одного відсотка може пошкодити двигуни та інше обладнання. Несбалансована напруга викликає незбалансований струм в обмотках двигуна; невідновлені струми викликають збільшення струму принаймні до однієї з обмоток та підвищення температури цієї обмотки. Такі підвищені температури скорочують термін експлуатації двигуна чи іншого обладнання, що призводить до передчасного виходу з ладу обладнання. Тому для контролю несиметрії напруги використовують цифрові методи вимірювання, що засновані на обробці миттєвих значень напруги. Для цих цілей в роботі оцінюється похибка кореляційного методу вимірювання несиметрії напруги трифазної мережі на основі попереднього перетворення трифазної напруги у двофазну напругу з подальшим розкладанням на ортогональні компоненти за допомогою дискретного перетворення Фур'є. Показана можливість визначення відносної похибки квантування напруги зворотної послідовності, що вноситься перешкодами в цифровий метод вимірювання несиметрії напруг.*

*Ключові слова: електрична енергія, якість електроенергії, гармоніки енергосистеми, методи розрахунку, несиметрія.*

### Introduction

One of the main conditions for ensuring the proper functioning of electrical equipment is the supply of electricity, the parameters of which meet certain requirements for its quality. The main indicators of electricity quality are related to such parameters as frequency and voltage deviation, voltage fluctuations, non-sinusoidal and voltage asymmetry. To avoid prolonged malfunction of electrical equipment, the main indicators of electricity quality should not go beyond their normal values.

Thus, the growth in the production and consumption of electricity makes ever higher demands on the accuracy of its metering. One of the ways to increase accuracy is related to taking into account errors in real working conditions. The purpose of this work is to evaluate the relative error of the quantization of the voltage of the negative sequence introduced by the noise into the digital method of measuring voltage unbalance.



### Theoretical basis

The development of society is accompanied by an increase in electricity consumption. Intensification of production, development of electrical engineering causes a sharp increase in energy intensity and concentration of loads. There is a qualitative and quantitative evolution of industrial consumers. The number of nonlinear, asymmetric, sharply varying industrial electricity consumers is increasing. Damage from the power supply breakdown, reasons for the output of the power quality parameters at normalized values and the resulting damage, these issues became not abstract. All this requires a comprehensive approach to energy quality issues.

The quality of electric energy is one of the most important requirements for the system of production, transmission and consumption of electricity. Deterioration in the quality of electric energy leads to a decrease in the reliability of power supply, an increase in energy losses, a deterioration in the quality and a decrease in the number of products.

Asymmetry of voltage is one of the main indicators of the quality of electric energy. Considering the main standards on the quality of electricity [1-3], we can derive a single asymmetry term as an indicator of the quality of electric energy: the state of a three-phase alternating current power supply system in which the rms values of the main components of the interfacial voltages or the phase shift angles between the main components of the interfacial voltages are not equal between each other.

The symmetric three-phase system of voltages is characterized the same at the modul and the phase of tensions in all three phases. At asymmetric modes of voltage in different phases are not equal.

Asymmetric modes in electrical networks arise for the following reasons:

1. not identical loads in different phases;
2. incomplete-phase operation of lines or other elements in the network;
3. different line parameters in different phases.

There are two types of asymmetry: systematic and random. Systematic asymmetry is caused by the non-uniform constant overload of one of the phases, the random asymmetry corresponds to the unconstant loads, at which different phases are overloaded at different times depending on random factors.

Asymmetry adversely affects the operating and technical and economic characteristics of rotating electric machines. The direct sequence current in the stator creates a magnetic field that rotates at a synchronous frequency in the direction of rotation of the rotor. The reverse sequence currents in the stator create a magnetic field rotating relative to the double synchronous frequency rotor in the direction opposite to rotation. Due to these double frequency currents, an electromagnetic torque and additional heating occur in the electric machine, resulting in a shorter insulation life.

Asynchronous motors have additional losses in the stator [13]. In some cases, it is necessary to increase the rated power of electric motors when designing, unless special measures are taken to symmetry voltage. In synchronous machines, in addition to the additional losses and heating of the stator and rotor, dangerous vibrations can start. Asymmetry shortens the life of transformer isolation and synchronous motors reduce the generation of reactive power [4].

The total loss caused by asymmetry in industrial networks includes the cost of additional losses of electricity, increase of deductions for renovation from capital costs, technological damage, damage caused by the decrease in the luminous flux of lamps installed in phases with low voltage, and the shortening of the service life of the lamps, installed in phases with high voltage, loss due to the reactive power generated by synchronous motors.

According to standard [1], the asymmetry coefficient of voltages in percent is determined from the expression

$$\varepsilon_2 = (U_2/U_n)100\%, \quad (1)$$

where  $U_2$  - reverse sequence voltage;  $U_n$  - nominal voltage value.

It follows from (1) that the control of asymmetry of voltage is reduced to measuring the voltage of the reverse sequence. To control the asymmetry of voltages, digital measurement methods based on the processing of instantaneous values of voltages are used [5-6]. Control of asymmetry of voltage is complicated by the fact that in real signals there is always interference, the value and statistical characteristics of which ultimately determine the error of asymmetry. Such interferences can be higher harmonics, instrumental errors and measurement errors of instantaneous voltage values [6].

### Results

When operating the power supply systems, the asymmetry of the voltages of the three-phase network is monitored. For these purposes, it is most promising to use digital control methods [7-9]. Digital methods are characterized by sampling and quantization errors of input signals.

Measuring the asymmetry of voltages of a three-phase network is complicated by the fact that in real power systems three-phase networks are "clogged" by higher harmonics [6]. At the non-sinusoidal form of the three-phase voltage, the asymmetry is found in the fundamental harmonic. Correlative signal processing methods based on discrete Fourier transforms are allowed to distinguish the fundamental harmonic with minimal error and in real time [9-10].

We estimate the error of the correlation method of measuring the asymmetry of voltages of a three-phase network based on the preliminary transformation of a three-phase network into two-phase, with the subsequent decomposition of each phase into orthogonal components by means of a discrete Fourier transform [9-11]. In this

method, the inverse sequence is described by an expression that allows us to calculate the quadrature components of the converted three-phase voltage into two-phase:

$$U_2^2 = \frac{1}{9}(V_x^2 + V_y^2 + W_x^2 + W_y^2 - 2V_yW_x + 2V_xW_y). \tag{2}$$

Converting (2), we write it in a more compact form

$$U_2^2 = \frac{1}{9}[(V_x + W_y)^2 + (W_x - V_y)^2], \tag{3}$$

where  $V_x, W_x, V_y, W_y$  - quadrature components of voltage,

$$\begin{aligned} V_y &= \frac{2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} v(t_i) \cos \omega t_i, \\ V_x &= \frac{2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} v(t_i) \sin \omega t_i, \\ W_y &= \frac{2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} w(t_i) \cos \omega t_i, \\ W_x &= \frac{2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} w(t_i) \sin \omega t_i, \end{aligned}$$

where  $v(t_i)$  and  $w(t_i)$  - instantaneous values of two-phase voltage converted from three-phase;  $t_i = 2\pi i / (m\omega)$  - moments of sampling voltages  $v$  and  $w$ ;  $m$  - number of sampling points.

Denoting  $(V_x + W_y) = \Phi_1$  and  $(W_x - V_y) = \Phi_2$ , we represent (3) in the form

$$U_2^2 = \frac{1}{9}[\Phi_1^2 + \Phi_2^2].$$

Since the negative sequence voltage is a function of  $U_2^2 = f(\Phi_1, \Phi_2)$ , we determine its absolute error

$$\Delta U_2^2 = \frac{\partial f}{\partial \Phi_1} \Delta \Phi_1 + \frac{\partial f}{\partial \Phi_2} \Delta \Phi_2, \tag{4}$$

where from  $\Delta U_2^2 = \frac{2}{9}[\Phi_1 \Delta \Phi_1 + \Phi_2 \Delta \Phi_2]$ .

On the other hand  $\Delta(U_2^2) = 2U_2 \Delta U_2$ . Thus

$$\Delta U_2 = \frac{1}{9U_2} [\Phi_1 \Delta \Phi_1 + \Phi_2 \Delta \Phi_2],$$

where  $\Delta \Phi_1 = \Delta V_x + \Delta W_y$  and  $\Delta \Phi_2 = \Delta W_x - \Delta V_y$ , and the quadrature components of the phase errors are determined from the expressions

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta V_y &= \frac{2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} \Delta v(t_i) \cos \omega t_i \\ \Delta V_x &= \frac{2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} \Delta v(t_i) \sin \omega t_i \\ \Delta W_y &= \frac{2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} \Delta w(t_i) \cos \omega t_i \\ \Delta W_x &= \frac{2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} \Delta w(t_i) \sin \omega t_i \end{aligned} \right. , \tag{5}$$

$\Delta v(t_i)$  and  $\Delta w(t_i)$  - instantaneous values of phase quantization errors  $V$  and  $W$ .

Believing that the errors  $\Delta v(t_i)$  and  $\Delta w(t_i)$  is small, in (4), we can restrict ourselves to the first term in the Taylor series expansion.

For the mathematical expectation of the error  $\langle \Delta U_2 \rangle$  we write the expression

$$\langle \Delta U_2 \rangle = \frac{1}{9U_2} (\Phi_1 \langle \Delta \Phi_1 \rangle + \Phi_2 \langle \Delta \Phi_2 \rangle).$$

The brackets  $\langle \rangle$  mean averaging by ensemble. The condition stationary of the process allows us to write the variance of the absolute quantization error of the input signal, determined by averaging over the ensemble with a mathematical expectation which equal zero:

$$\langle (\Delta U_2)^2 \rangle = \frac{1}{81U_2^2} (\Phi_1^2 \langle \Delta \Phi_1^2 \rangle + \Phi_2^2 \langle \Delta \Phi_2^2 \rangle + 2\Phi_1 \Phi_2 \langle \Delta \Phi_1 \Delta \Phi_2 \rangle). \tag{6}$$

We express the terms of formula (6) in terms of the quadrature components of errors the phase:

$$\begin{aligned} \langle \Delta \Phi_1 \Delta \Phi_2 \rangle &= (\Delta V_x + \Delta W_y)(\Delta W_x - \Delta V_y) = \\ &= \langle \Delta V_x \Delta W_x \rangle + \langle \Delta W_y \Delta W_x \rangle - \langle \Delta V_x \Delta V_y \rangle - \langle \Delta W_y \Delta V_y \rangle. \end{aligned} \tag{7}$$

We express the terms of expression (7) in terms of the instantaneous values of errors the phase

$$\langle \Delta V_x \Delta W_x \rangle = \frac{2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{k=0}^{m-1} \langle \Delta v(t_i) \rangle \sin \omega t_i \langle \Delta w(t_k) \rangle \sin \omega t_k.$$

Assuming the value of  $v(t_i)$  and  $w(t_i)$  are uncorrelated, we write

$$\langle \Delta v(t_i) \Delta w(t_k) \rangle = \langle \Delta v(t_i) \rangle \langle \Delta w(t_k) \rangle = 0,$$

then  $\langle \Delta V_x \Delta W_x \rangle = 0$ . Similarly, we obtain  $\langle \Delta W_y \Delta V_y \rangle = 0$ .

Another component of the expression (7):

$$\langle \Delta W_y \Delta W_x \rangle = \frac{2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{k=0}^{m-1} \langle \Delta w(t_i) \rangle \cos \omega t_i \langle \Delta w(t_k) \rangle \sin \omega t_k,$$

$$\text{as } \langle \Delta w(t_i) \Delta w(t_k) \rangle = \begin{cases} 0, & i \neq k, \\ \sigma_w^2, & i = k. \end{cases}$$

For stationary process  $\sigma_w^2 = \text{const}$ , then

$$\langle \Delta W_y \Delta W_x \rangle = \frac{2}{m} \sigma_w^2 \sum_{i=0}^{m-1} \cos \omega t_i \sin \omega t_i = 0.$$

Similarly, we find that  $\langle \Delta V_x \Delta V_y \rangle = 0$ . Substituting the obtained expressions in (7) we have  $\langle \Delta \Phi_1 \Delta \Phi_2 \rangle = 0$ , i.e. there is no correlation between random variables  $\Delta \Phi_1$  and  $\Delta \Phi_2$ :

$$\langle \Delta \Phi_1^2 \rangle = \langle (\Delta V_x + \Delta W_y)^2 \rangle = \langle \Delta V_x^2 \rangle + \langle 2\Delta V_x \Delta W_y \rangle + \langle \Delta W_y^2 \rangle. \quad (8)$$

Substituting expressions (5) in (8), we find

$$\begin{cases} \langle \Delta V_x^2 \rangle = \frac{4}{m^2} \sum_{i=0}^{m-1} \langle \Delta v(t_i) \rangle \sin^2 \omega t_i \\ \langle \Delta W_y^2 \rangle = \frac{4}{m^2} \sum_{i=0}^{m-1} \langle \Delta w(t_i) \rangle \cos^2 \omega t_i \end{cases} \quad (9)$$

Assuming the process is stationary, we can write  $\sigma_v^2 \equiv \Delta v^2(t_i)$  and  $\sigma_w^2 \equiv \Delta w^2(t_i)$ . Then expressions (9) take the form

$$\langle \Delta V_x^2 \rangle = \frac{2}{m} \sigma_v^2; \quad \langle \Delta W_y^2 \rangle = \frac{2}{m} \sigma_w^2; \quad (10)$$

$$\langle 2\Delta V_x \Delta W_y \rangle = \frac{2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{k=0}^{m-1} \langle \Delta v(t_i) \rangle \sin \omega t_i \langle \Delta w(t_k) \rangle \cos \omega t_k.$$

Assuming  $v(t_i)$  and  $w(t_i)$  are uncorrelated quantities, we have

$$\langle \Delta w(t_i) \Delta w(t_k) \rangle = \langle \Delta v(t_i) \rangle \langle \Delta w(t_k) \rangle = 0,$$

i.e.  $\langle 2\Delta V_x \Delta W_y \rangle = 0$ .

Similarly, for the terms  $\langle \Delta \Phi_2^2 \rangle$  we find

$$\langle \Delta W_x^2 \rangle = \frac{2}{m} \sigma_w^2; \quad \langle \Delta V_y^2 \rangle = \frac{2}{m} \sigma_v^2. \quad (11)$$

Substituting expressions (10) and (11) in (6), we obtain

$$\langle (\Delta U_2)^2 \rangle = \frac{2}{81mU_2^2} [\Phi_1^2(\sigma_v^2 + \sigma_w^2) + \Phi_2^2(\sigma_w^2 + \sigma_v^2)]. \quad (12)$$

If  $\sigma_v = \sigma_w = \sigma$ , then (12) takes the form

$$\langle (\Delta U_2)^2 \rangle = \frac{4\sigma^2}{81mU_2^2} (\Phi_1^2 + \Phi_2^2)$$

We rewrite the last expression taking into account formula (6):

$$\langle (\Delta U_2)^2 \rangle = \frac{4\sigma^2}{9m} \quad (13)$$

The variance of the error in quantizing the voltage of the negative sequence is determined by the expression (13). The relative error of the quantization of the voltage of the negative sequence is determined by the expression

$$\delta U_2 = \frac{\sqrt{\langle (\Delta U_2)^2 \rangle}}{U_2} \quad (14)$$

We substitute (13) into (14). Assuming that the asymmetry of the voltage of the three-phase network obeys the normal distribution law, the error  $\delta U_2$  is determined by the rule of three sigma:

$$\delta U_2 = 3 \sqrt{\frac{4\sigma^2}{9m}} / U_2 = \frac{2\sigma}{U_2 \sqrt{m}}$$

Multiplying the numerator and denominator of this expression by  $U_n$ , we find

$$\delta U_2 = \frac{2}{\sqrt{m}} \frac{\sigma U_n}{U_n U_2}, \quad (15)$$

where  $\frac{U_2}{U_n} = \varepsilon_2$  - voltage unbalance factor.

It should be noted that with a uniform distribution of the remainder from dividing the quantized quantity by the quantization step  $q$ , the quantity величина  $\sigma = 0.5q\sqrt{3}$  [12]. Then expression (15) takes the form

$$\delta U_2 = \frac{\delta_q}{\sqrt{3m}U_2}, \quad (16)$$

where  $\delta_q = q/U_n$  - relative quantization error.

### Summary & Conclusions

Asymmetry is a serious problem of electricity quality, with a negative impact mainly on low-voltage distribution networks. A successful solution to the problem of asymmetry, of course, leads to lower operating costs and, most importantly, energy loss.

The error of the correlation method of measuring the asymmetry of voltages of a three-phase network based on the preliminary conversion of a three-phase voltage into a two-phase with subsequent decomposition into orthogonal components by means of a discrete Fourier transform is performed in the work.

According to standard [1], the voltage unbalance factor should not exceed 2%. Given the voltage unbalance factor  $\varepsilon_2$  and knowing the digit of the ADC, the formula (16) can be used to calculate the relative error of quantization of the voltage of the reverse sequence  $\delta U_2$  at different numbers of sampling points  $m$ .

### References

1. GOST, "13109-97. E'lektricheskaya e'nergiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv e'lektromagnitnaya. Normy' kachestva e'lektricheskoy e'nergii v sistemakh e'lektrosnabzheniya obshhego naznacheniya," M. Izd-tvo standartov, 1997. [In Russian]
2. ISO 9000: 2015. "Quality Management Systems-Fundamentals and Vocabulary," 2015.
3. "IEEE Std 1547-2003", "IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems", pp. 0\_1-16, 2003.
4. L.S. Czamecki and P.M. Haley, "Unbalanced Power in Four-Wire Systems and Its Reactive Compensation," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 1, pp. 53-63, Feb. 2015.
5. M. Ya. Mincz, V. N. Chinkov, and O. G. Grib, "„Simmetrirovaniye sistemy' tokov v chety'rekhprovodny'kh trekhfazny'kh setyakh", Promy'shlennaya e'nergetika, no. 5, pp. 41–42, 1984. [In Russian]
6. I. Carugati, C. M. Orallo, P. G. Donato, S. Maestri, J. L. Strack and D. Carrica, "Three-Phase Harmonic and Sequence Components Measurement Method Based on mSDFT and Variable Sampling Period Technique," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 65, no. 8, pp. 1761-1772, Aug. 2016.
7. D. Yu. Rudi, and D. A. Korovin, "Analiz Metodov Raschyota Nesimmetrichny'kh Rezhimov Raboty' Sistem E'lektrosnabzheniya do 1 KV," 2018 *IEEE XLII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya. Results of research activities 2018: inventions, methods, innovations*, M.: Izdatel'stvo «Olimp», 2018, pp. 44-47. [In Russian]
8. I. A. Sirotnin, "Orthogonal Components of the Three-Phase Current At Asymmetrical Active - Reactive Load in 4-Wire Circuit," *Electr. Eng. Electromechanics*, vol. 0, no. 3, p. 62, 2016.
9. H. Pezeshki and P. Wolfs, "Correlation based method for phase identification in a three phase LV distribution network," 2012 *22nd Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Bali, 2012, pp. 1-7.
10. Mints M.Ya., Chinkov V.N., Grib O.G. Digital measuring device of asymmetry of three-phase network. Patent of USSR No 746336. Publ. 1980. No 25. [In Russian]
11. T. Tarasiuk and A. Pilat, "Impact of sampling frequency on accuracy of unbalance factor measurement by DFT," 2015 *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*, Pisa, 2015, pp. 1420-1424.
12. E. I. Gitis and E. A. Piskulov, *Analogo-cifrovyy'e preobrazovateli: Ucheb. posobie dlya vuzov. E'nergoizdat*, 1981. [In Russian]
13. V. Nguyen *et al.*, "A Method for Incipient Interturn Fault Detection and Severity Estimation of Induction Motors Under Inherent Asymmetry and Voltage Imbalance," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 3, no. 3, pp. 703-715, Sept. 2017. doi: 10.1109/TTE.2017.2726351

Дмитро ЯЦЕНКО

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"  
<https://orcid.org/0000-0001-6702-569X>  
[19yatsenko94@gmail.com](mailto:19yatsenko94@gmail.com)

Володимир ПОПОВ

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"  
<https://orcid.org/0000-0003-3484-4597>  
[tig@ukr.net](mailto:tig@ukr.net)

Анатолій ЗАМУЛКО

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"  
<https://orcid.org/0000-0001-8018-6332>  
[zai\\_71@ukr.net](mailto:zai_71@ukr.net)

Олена ЯРМОЛЮК

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"  
<https://orcid.org/0000-0001-8571-2573>  
[yarmolyuk.lena@gmail.com](mailto:yarmolyuk.lena@gmail.com)

Олександр АДАНІКОВ

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"  
<https://orcid.org/0000-0003-2773-244X>  
[dreamfavel@gmail.com](mailto:dreamfavel@gmail.com)

## ЗАСТОСУВАННЯ ІНДИКАТИВНОГО ЯКІСНОГО ПОКАЗНИКА ПРИ ДИНАМІЧНОМУ КЕРУВАННІ ТОПОЛОГІЄЮ РОЗПОДІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ З ЛОКАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ З МЕТОЮ МІНІМІЗАЦІЇ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ

*Практично в усіх країнах значна частина розподільних електричних мереж експлуатуються у розімкненому режимі. Тому задача вибору оптимальної топології електричної мережі залишається актуальною і популярною серед дослідників. На сьогодні запропоновано багато шляхів вирішення зазначеної задачі, що знайшло відображення у сотнях публікацій. Для досягнення мети формування оптимальної топології електричної мережі використовують різні оптимізаційні методи, задачу також вирішують, у як однокритеріальній так, і багатокритеріальній постановках.*

*У даній статті проведено бібліографічний аналіз і запропоновано використання індикативного якісного показника для знаходження оптимальної топології розподільної електричної мережі у режимі реального часу, що дає змогу мінімізувати втрати активної енергії. Наразі це актуально через зростання неоднорідності навантаження та збільшення частки локальних джерел енергії у розподільних мережах нашої країни. Дані фактори формують поточні розподіли у добовому розрізі, які у більшості випадків будуть не співпадати з тим режимом, для якого вибиралась відповідна конфігурація мережі, що у свою чергу призводить до зростання втрат електричної енергії. Ефект від запропонованого підходу залежить від належного рівня технічного й інформаційного забезпечення мережі, тим паче, з урахуванням того, що більша частина обладнання розподільних електричних мереж випрацювала свій фізичний ресурс.*

*Використання індикативного якісного показника передбачається у розподільних мережах обладнаних сучасними комутаційними апаратами з можливістю дистанційного керування та наявністю систематичних вимірювань режимних параметрів мережі.*

*На підставі отриманих результатів досліджень можна зробити висновок, що розроблений індикативний показник успішно застосовується при вирішенні задач пошуку оптимальної топології мережі у реальному часі, що дає можливість досягти суттєвого додаткового зменшення втрат активної енергії.*

*Ключові слова: індикативний якісний показник, розподільна мережа, втрати енергії, дистанційно керований вимикач, локальна генерація, керування режимами.*

Dmytro YATSENKO, Vladimir POPOV, Anatolii ZAMULKO,

Olena YARMOLIUK, Oleksandr ADANIKOV

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

## APPLICATION OF INDICATIVE QUALITY INDICATOR IN DYNAMIC MANAGEMENT OF THE TOPOLOGY OF A DISTRIBUTION NETWORK WITH LOCAL ENERGY SOURCES WITH THE PURPOSE OF MINIMIZING ENERGY LOSSES

*In practically all countries, a significant part of distribution electric networks is operated in an open mode. Therefore, the task of choosing the optimal topology of the electrical network remains relevant and popular among researchers. To date, many ways of solving this problem have been proposed, which have been reflected in hundreds of publications. To achieve the goal of forming the optimal topology of the electric network, various optimization methods are used, the problem is also solved in both single-criteria and multi-criteria formulations.*

*In this article, a bibliographic analysis is carried out and the use of an indicative qualitative indicator is proposed for finding the optimal topology of the distribution electric network in real time, which makes it possible to minimize the loss of active energy. Currently, this is relevant due to the growth of load heterogeneity and the increase in the share of local energy sources in the distribution networks of our country. These factors form flow distributions daily, which in most cases will not coincide with the mode for which the appropriate*

network configuration was chosen, which in turn leads to an increase in electrical energy losses. The effect of the proposed approach depends on the proper level of technical and information support of the network, especially since most of the equipment of distribution electric networks has exhausted its physical resource.

The use of an indicative qualitative indicator is envisaged in distribution networks equipped with modern switching devices with the possibility of remote control and the presence of systematic measurements of the mode parameters of the network.

Based on the obtained research results, it can be concluded that the developed indicative indicator is successfully used in solving the problems of finding the optimal network topology in real time, which makes it possible to achieve significant results. additional reduction of active energy losses.

Key words: indicative quality indicator, distribution network, energy losses, remotely controlled switch, local generation, mode control.

### Постановка проблеми

Розподільні електричні мережі напругою 6-10 кВ є важливою ланкою в процесі передачі електричної енергії від об'єктів генерації безпосередньо до кінцевих споживачів. Сумарна протяжність розподільних повітряних і кабельних ліній на території України становить близько 300 тис. км. і простежується тенденція їх зростання [1]. У зв'язку з цим завдання забезпечення надійності й ефективності режимів таких мереж є важливим етапом безпеки постачання електричної енергії [2].

За даними [13] втрати енергії в мережах середнього та низького напруги США, Англії, Німеччини, Японії та ін. становлять в даний час 8 і 12%, відповідно, в той час як втрати енергії в мережах високої напруги не перевищують 4%. В Україні становище ще гірше. Втрати потужності в мережах середньої і низької напруги досягають в середньому 15-20% [13].

У більшості випадків розподільні електричні мережі експлуатуються як розімкнені, що в свою чергу дає змогу використовувати менш дорогі системи релейного захисту й автоматики, що також спрощує керування режимами роботи мережі. Однією з умов вибору такої топології було те, що вона залишалася незмінною у продовж тривалого проміжку часу. Найчастіше певну конфігурацію обирали на визначені сезони року, що обґрунтовувалося характерними графіками навантажень вузлів мережі. Але із зростанням неоднорідного навантаження та появою локальних джерел енергії (ЛДЕ) стало помітним, що дані фактори знижують якість вирішення оптимізаційної задачі.

За останні тридцять років ситуація суттєво змінилася, а саме: керування електричним навантаженням застосовують не тільки на промислових підприємствах, а і у побутовому секторі. Також поява у структурі мережі засобів акумуляування енергії (електромобілів) і джерел локальної генерації з вихідною потужністю, яка залежить від кліматичних чинників, що характеризується нестабільністю. Крім того, виходячи з сучасних тенденцій розвитку енергетичного сектору закордоном, нам у найближчий час слід очікувати появу в мережі й інших гібридних джерел енергії. Наприклад, останнім часом стрімкі темпи зростання попиту на електричну енергію та дефіциту традиційних енергетичних ресурсів, активне використання відновлюваних джерел енергії малої потужності та впровадження систем накопичення енергії вимагає формування нового сегменту в енергетичній галузі, який швидко розвивається в усьому світі – гібридної відновлюваної енергетичної системи.

Метою даної роботи є дослідження можливостей застосування індикативного якісного показника для ефективного керування режимами роботи розподільної мережі за критерієм мінімізації втрат енергії. При цьому підлягають вирішенню наступні задачі: 1) аналіз методів керування режимами розподільної мережі; 2) обґрунтування можливостей використання індикативного показника; 3) аналіз результатів застосування запропонованого індикативного показника.

### Аналіз літературних джерел

У процесі вирішення задачі керування режимами роботи розподільної електричної мережі неодмінно постає питання вибору оптимальної топології мережі, також може використовуватися як одна цільова функція, так і декілька. Традиційно у якості критеріїв розглядають загальні втрати потужності, різні індекси надійності, відхилення напруги, співвідношення вигода/витрати та інші. За для вирішення поставленої задачі з одним чи багатьма критеріями застосовують широкий спектр методів оптимізації, огляд яких наведений нижче.

Варто зазначити, що реалізація методів оптимізації вимагає введення ряду обмежень без яких отримання адекватного результату неможливе. Зазвичай під час вирішення задачі реконфігурації вводять такі обмеження: 1) усі фідерні секції знаходяться під напругою; 2) має підтримуватися радіальна структура мережі; 3) фідери та трансформатори не перевантажені; 4) обмеження падіння напруги [4].

Не торкаючись класичних методів оптимізації, методи, які використовуються в останні роки для вирішення поставленої задачі можна принципово розділити на дві групи: методи штучного інтелекту й евристичні. Евристичні методи в свою чергу поділяються на мета-евристичні та методи спроб і помилок.

Для визначення оптимальної конфігурації розподільної електричної мережі використовуються різні методи спроб і помилок. У [5] представлено метод систематичної зміни топології фідерів, що дає змогу знайти оптимальну схему для досягнення максимального зменшення втрат енергії у розподільній мережі. У процесі оптимізації змінюється топологія електричної мережі шляхом зміни стану комутаційних апаратів. У цій статті використовується дерево рішень для знаходження можливих варіантів зміни топології з метою зменшення втрат енергії. Формула для визначення втрат енергії була отримана та використана для визначення варіанту перемикачів, який забезпечує максимальне зниження втрат у мережі. Запропонована

техніка може визначити найбільш ефективні варіанти зміни топології для зменшення втрат енергії з мінімальними обчислювальними зусиллями. Недоліком використання даної техніки є довготривалість пошуку оптимально рішення.

У роботі [6] запропоновано алгоритм пошуку оптимальної топології розподільних мереж, який враховує характеристики ЛДЕ в мережі нафтового підприємства. Застосовується комбінація методу імітації відпалу (англ. *simulated annealing*) та імунного алгоритму (англ. *Immune Algorithm*), що дає змогу прискорити швидкість пошуку глобального оптимуму та забезпечує кращу продуктивність. Практичну реалізацію запропонованого підходу було виконано на типовій схемі IEEE з 33 вузлами, де було показано, що величину втрат потужності вдається додатково знизити майже вдвічі. Недоліком комбінації даних методів є складність проведення розрахунків.

У роботі [7] використовується алгоритм пошуку Табу (англ. *Tabu Search*) для реконфігурації мережі з ЛДЕ з метою зменшення втрат потужності в системі розподілу. Результати показали, що втрати енергії зменшуються, коли вирішення оптимізаційної задачі та визначення величини генерації ЛДЕ відбуваються паралельно. Крім того, результати визначають оптимальний стан комутаційних апаратів, який призведе до найменших втрат потужності, але при цьому задовольняє обмеження. Результати довели ефективність алгоритму пошуку табу при визначенні оптимального рішення з меншою кількістю ітерацій. В даному дослідженні не враховують мінливий характер роботи ЛДЕ

У статті [8] пропонується вирішення проблеми пошуку оптимальної топології мережі з метою мінімізації втрат потужності з використанням спеціалізованого еволюційного алгоритму з новою кодифікацією й абсолютно новим способом реалізації генетичних операторів з урахуванням характеристик проблеми. Алгоритм представлений і протестований у реальній розподільній системі продемонстрував прийнятні результати й обчислювальну ефективність. Запропонований алгоритм досить складний в реалізації та вимагає проведення значних розрахунків.

У статті [9] використовується поєднання нечіткого багатоцільового підходу й оптимізації колонії мурах (англ. *Ant Colony Optimization*) як мета-евристичного алгоритму, який використовується для вирішення завдань одночасної реконфігурації мережі й оптимального розподілу (потужності та розташування) фотоелектричних (*PV*) панелей і статичного компенсатора. Метою цього дослідження є зменшення втрат, покращення профілю напруги та покращення збалансованості навантаження фідера. Запропонований метод перевірено на типовій схемі IEEE з 33 вузлами та на розподільній мережі Тайваню. Результати показали, що одночасна реконфігурація й оптимальне розміщення масиву *PV* і статичного компенсатора призводить до значного зменшення втрат, покращення профілю напруги. Крім того, запропонований підхід *fuzzy-ACO* є більш точним порівняно з іншими методами оптимізації. Разом з тим запропонований алгоритм вимагає значну кількість вихідної інформації.

У [10] представлено використання методу штучної колонії бджіл (англ. *Artificial Bee Colony*) для задачі вибору оптимальної топології мережі. У якості цільових функцій розглядали профіль напруги, мінімізація реальних втрат потужності та збалансування навантаження фідерів. Результати показали, що втрати потужності було зменшено на 74,88 % завдяки одночасній реалізації декількох керуючих впливів, що доводить ефективність алгоритму *ABC*. В даному дослідженні не враховано механічний ресурс комутаційного обладнання.

У статті [11] представлено методологію визначення оптимальної конфігурації розподільної мережі, засновану на нечіткому багатоцільовому підході для досягнення мінімальних втрат активної потужності та максимальної величини напруги у радіальних розподільних мережах із розосередженою генерацією. Окремі цільові функції передбачають балансування навантаження між фідерами, мінімізацію реальних втрат потужності та відхилення напруги у вузлах за умов обмеження струму гілки, підтримання радіальної структури мережі, в якій усі навантаження повинні бути під напругою. Ці цільові функції моделюються за допомогою нечітких наборів для оцінки неточності досягнення кожної цілі. Результати моделювання показують, що за допомогою цього методу досягається зниження втрат активної потужності на 37,92 %. Водночас даний алгоритм досить складний в реалізації та вимагає значних розрахунків.

У роботі [12] розглянуто застосування алгоритму феєрверку (англ. *Fireworks Algorithm*) для одночасної зміни конфігурації мережі та розподілу в ній блоків ЛДЕ. Під час вибору оптимального розміщення ЛДЕ та реконфігурації мережі розглядається шість різних сценаріїв для оцінки ефективності запропонованої методики. Розрахунки проводяться на типових схемах IEEE з 33 та 69 вузлами при трьох різних рівнях навантаження. Даний алгоритм потребує часу для проведення розрахунку, що не дає змоги проводити керування у режимі реального часу.

З іншого боку існує декілька моментів, які не дають можливості використовувати дані підходи на практиці у процесі керування електричною мережею у режимі реального часу. По-перше, на кожному кроці процес вирішення задачі на підставі розглянутих методів вимагає розрахунку режимних параметрів, що є доволі трудомістким і тривалим процесом. По-друге, особливістю роботи ЛДЕ на базі відновлювальних джерел енергії є мінливий характер їх генерації, що передбачає необхідність розробки механізму для оцінки тривалості зміни навантажень й потужності ЛДЕ та параметрів режиму мережі в цілому. І останнє, необхідно врахувати комутаційний ресурс комутаційного апарату з можливістю дистанційного керування.

### Виклад основного матеріалу

При існуючому комутаційному обладнанні відсутня можливість дистанційного керувати положенням комутаційних апаратів у добовому розрізі, зміну топології мережі можна виконати тільки на місці розташування обладнання та з залученням технічних спеціалістів.

Окрім цього, наявний рівень інформаційного забезпечення не задовольняє умовам забезпечення керування електричною мережею у режимі реального часу. На сьогодні у більшості розподільних мереж відсутні засоби систематичних вимірювань навантажень у відповідних вузлах, що не дає змоги моделювати режими мережі у реальному часі. Тому здебільш використовувались типові графіки навантаження, які відповідали певним сезонам року.

Зростання неоднорідного навантаження, поява ЛДЕ у розподільній електричній мережі викликають суттєві зміни у режимах роботи розподільної мережі традиційного виконання. Внаслідок цих чинників, у розподільній мережі формуються поточкорозподіли у добовому розрізі різної тривалості, які в багатьох випадках істотно відрізнятимуться від того режиму (поточкорозподілу), для якого визначалися оптимальні місця розмикання контурів, що в результаті веде до зростання втрат електричної енергії, а потенційно і до порушення умов забезпечення допустимих відхилень напруги та зниження надійності.

Вже зараз у деяких мережах на заміну обладнання, яке вичерпало свій ресурс, встановлюють сучасне, що дає можливість збирати інформацію та керувати режимами роботи розподільної мережі у режимі реального часу. Це стає ще більш можливим з появою на ринку сучасної комутаційної апаратури зі значним комутаційним ресурсом і можливістю дистанційного керування.

Для вирішення цього завдання необхідна інформація відносно топології мережі, параметрах її елементів та навантажень. Як правило перші два блоки інформації наявні у операторів систем розподілу та завдання полягає у підтриманні їх актуального стану. Концепція *Smart Grid* повністю підходить для вирішення будь-яких задач керування у розподільній мережі. Одна з основних характеристик даної концепції на відміну від міських електричних мереж традиційного виконання є спостережуваність, що потребує впровадження адекватного інформаційного забезпечення [3].

За умов наявності відповідної інформації, алгоритм визначення місць розташування та керування роботою вимикачів з дистанційним керуванням включає в себе:

- вибір ряду контурів розподільних мереж, в яких було б доцільним встановити дистанційно керовані комутаційні апарати, враховуючи добову неоднорідність потоків потужності на окремих ділянках, наявність відновлюваних джерел енергії та засобів її акумуляування;
- по окремих періодах часу, використовуючи характерні добові графіки навантажень вузлів і генерації з боку ЛДЕ, вирішується задача вибору оптимальних місць їх розімкнення, виходячи з мінімізації втрат потужності;
- для контурів, у яких при різних добових режимах оптимальні місця їх розімкнення не збігаються, визначаються вузли де розміщення дистанційно керованих вимикачів було б найбільш доцільним.

Після цього виникає завдання знаходження умов, за яких, у принципі, є доцільним змінити топологію певного контуру розподільної мережі з метою мінімізації втрат потужності відповідно до параметрів поточного режиму. Для спрощення та прискорення розв'язання цього завдання (з огляду на те, що вона має бути реалізована практично в режимі реального часу) пропонується використовувати певний індикативний якісний показник.

На прикладі спрощеної схеми (рис. 1) визначимо сумарні втрати потужності ( $\Delta P_I$ ,  $\Delta P_{II}$ ,  $\Delta P'_I$ ,  $\Delta P'_{II}$ ) для кожної частини контуру розподільної мережі, що розглядається, з урахуванням існуючого місця його розмикання

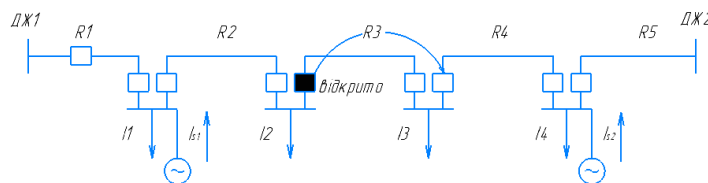


Рис. 1 - Розподільна мережа 10 кВ

$$\Delta P_I = 3I_2^2 R_2 + 3(I_1 + I_2 - I_{s1})^2 R_1 = 3I_2^2 R_2 + 3I_1^2 R_1 + 6I_1 I_2 R_1 + 3I_2^2 R_1 - 6I_{s1} I_1 R_1 - 6I_{s1} I_2 R_1 + 3I_{s1}^2 R_1, \quad (1)$$

$$\Delta P_{II} = 3I_3^2 R_4 + 3(I_3 + I_4 - I_{s2})^2 R_5 = 3I_3^2 R_4 + 3I_3^2 R_5 + 6I_4 I_3 R_5 + 3I_4^2 R_5 - 6I_{s2} I_3 R_5 - 6I_{s2} I_4 R_5 + 3I_{s2}^2 R_5. \quad (2)$$

де  $R_{1...5}$  - опори ділянок електричної мережі;  $I_{1...4}$  - струми вузлів електричної мережі.

За умови відсутності генерації з боку ЛДЕ в правій частині лінії та її наявності в лівій частині, скоріше за все, за рахунок розвантаження лівої частини може виникнути доцільність переносу місця розмикання мережі вправо. У цьому випадку сумарні втрати потужності у правій і лівій частинах контуру становитимуть:

$$\Delta P'_I = 3I_3^2 R_3 + 3(I_3 + I_2)^2 R_2 + 3(I_3 + I_2 + I_1 + I_{s1})^2 R_1 = 3I_3^2 R_3 + 3I_3^2 R_2 + 6I_3 I_2 R_2 + 3I_2^2 R_2 +$$



$$+3I_3^2 R_1 + 6I_3 I_2 R_1 + 3I_2^2 R_1 + 6I_3 I_1 R_1 - 6I_3 I_{s1} R_1 + 6I_1 I_2 R_1 - 6I_{s1} I_2 R_1 + 3I_1^2 R_1 - 6I_{s1} I_1 R_1 + 3I_{s1}^2 R_1, \quad (3)$$

$$\Delta P_{II}' = 3(I_4 + I_{s2})^2 R_5 = 3I_4^2 R_5 + 6I_4 I_{s2} R_5 + 3I_{s2}^2 R_5. \quad (4)$$

Можна зробити висновок, що зміна місця розмикання контуру в даному випадку буде доцільною при виконанні наступної умови:

$$\Delta P_{II}' + \Delta P_I' < \Delta P_I + \Delta P_{II}, \quad (5)$$

Далі представимо наступні розрахункові формули для відповідних моментів навантаження ( $M_I$ ,  $M_{II}$ ,  $M_{s1}$ ,  $M_{s2}$ ):

$$I_{ch} R_{\Sigma} = I_3 (R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5), \quad M_1 = I_1 R_1, \quad M_2 = I_2 (R_1 + R_2), \quad M_{s1} = I_{s1} R_1, \\ M_{s2} = I_{s2} R_5, \quad M_{ch} = I_3 (R_5 + R_4), \quad M_4 = I_4 R_5.$$

Виходячи з умов на рис. 1 маємо:

$$M_I = M_1 + M_2, \quad M_{II} = M_{ch} + M_4,$$

Умова, що визначає доцільність перенесення місця розмикання контуру праворуч матиме вигляд:

$$M_{II} - M_I + M_{s1} - M_{s2} > \frac{I_{ch} R_{\Sigma}}{2}. \quad (6)$$

Умова, що визначає доцільність перенесення місця розмикання контуру ліворуч матиме вигляд:

$$M_I - M_{II} + M_{s2} - M_{s1} > \frac{I_{ch} R_{\Sigma}}{2}, \quad (7)$$

де у випадку (рис. 1)  $M_I = M_1 + M_{ch}$ ,  $M_{II} = M_4 + M_3$ .

Проведемо аналіз роботи індикативного якісного показника на прикладі типової схеми IEEE з 33 вузлами, що також представлено [6, 9, 12] (рис. 2), щоб підтвердити адекватність його застосування.

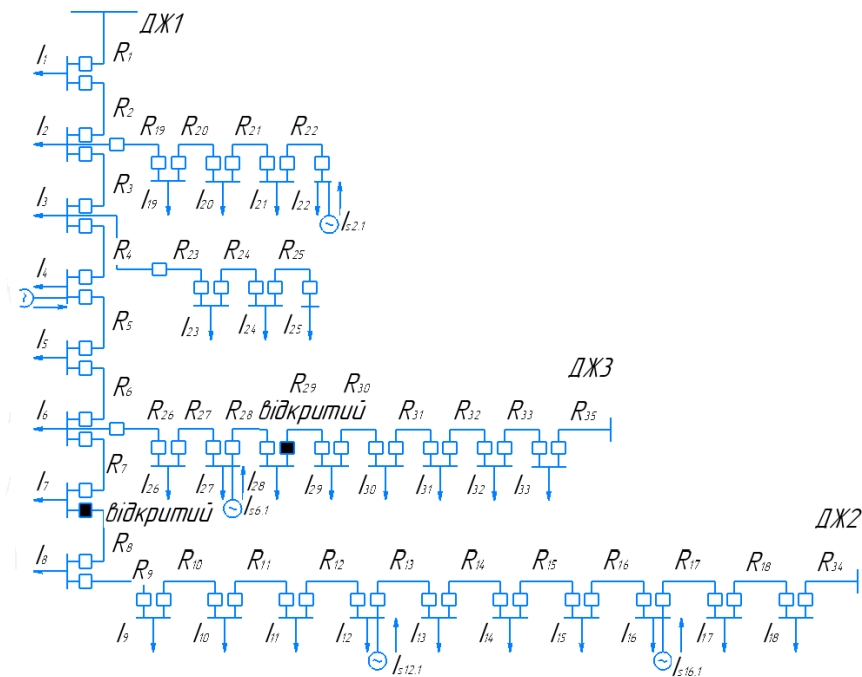


Рис. 2 - Схема розподільної мережі з 33 вузлами

Початковими даними для проведення розрахунку є опори ділянок електричної мережі, значення погодинного навантаження вузлів, розміщення та вихідна потужність ЛДЕ й існуюча топологія мережі (місце розмикання мережі на ділянці 7-8). На рисунку 3а) наведено графік електричного навантаження вузла № 6; на рисунку 3б) згенеровану вихідну потужності ЛДЕ у добовому розрізі вузла № 16.

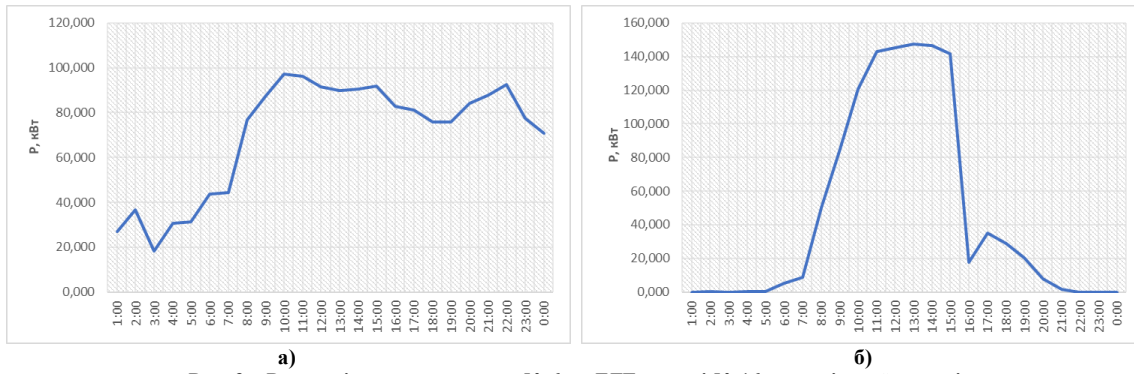


Рис. 3 – Режимні параметри вузла № 6 та ЛДЕ у вузлі № 16 розподільної мережі

Для подальшого розрахунку необхідно розрахувати значення еквівалентних струмів (рис. 4)

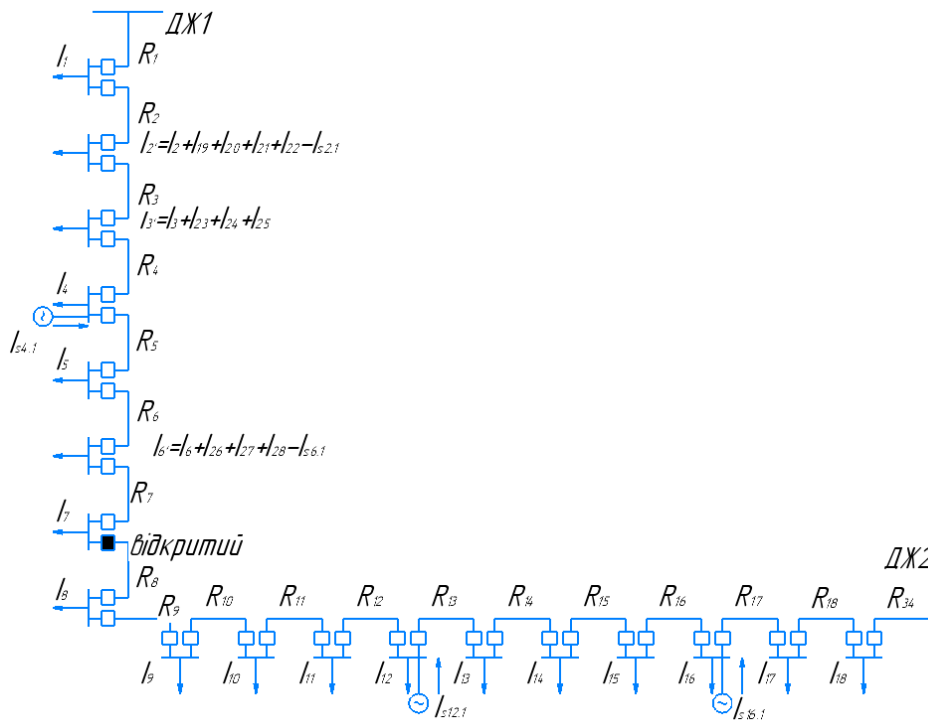


Рис. 4 - Еквівалентна схема розподільної мережі

$$I_2' = I_2 + I_{19} + I_{20} + I_{21} + I_{22} - I_{s2}, \quad I_3' = I_3 + I_{23} + I_{24} + I_{25}, \quad I_6' = I_6 + I_{26} + I_{27} + I_{28} - I_{s6}.$$

Розрахунки проводимо аналогічно до наведеного прикладу вище, де відносно схеми (рис. 4) маємо:

$$I_{ch} R_{\Sigma} = I_8 (R_1 + \dots + R_{18} + R_{34}), \quad M_1 = I_1 R_1, \quad M_2 = I_2' (R_1 + R_2), \quad M_3 = I_3' (R_1 + R_2 + R_3), \quad M_4 = I_4 (R_1 + R_2 + R_3 + R_4),$$

$$M_5 = I_5 (R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5), \quad M_6 = I_6' (R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6), \quad M_{18} = I_{18} R_{34}, \quad M_{17} = I_{17} (R_{34} + R_{18}),$$

$$M_{16} = I_{16} (R_{34} + R_{18} + R_{17}), \quad M_{15} = I_{15} (R_{34} + R_{18} + R_{17} + R_{16}), \quad M_7 = I_7 (R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7),$$

$$M_{14} = I_{14} (R_{34} + R_{18} + R_{17} + R_{16} + R_{15}), \quad M_{13} = I_{13} (R_{34} + R_{18} + R_{17} + R_{16} + R_{15} + R_{14}),$$

$$M_{12} = I_{12} (R_{34} + R_{18} + R_{17} + R_{16} + R_{15} + R_{14} + R_{13}), \quad M_{11} = I_{11} (R_{34} + R_{18} + R_{17} + R_{16} + R_{15} + R_{14} + R_{13} + R_{12}),$$

$$M_{10} = I_{10} (R_{34} + R_{18} + R_{17} + R_{16} + R_{15} + R_{14} + R_{13} + R_{12} + R_{11}), \quad M_{s4} = I_{s4} (R_1 + R_2 + R_3 + R_4),$$

$$M_{s16} = I_{s16} (R_{17} + R_{18} + R_{34}),$$

$$M_{s12} = I_{s12} (R_{13} + R_{14} + R_{15} + R_{16} + R_{17} + R_{18} + R_{34}),$$

$$M_{ch} = I_8 (R_9 + R_{10} + R_{11} + R_{12} + R_{13} + R_{14} + R_{15} + R_{16} + R_{17} + R_{18} + R_{34}), \quad M_I = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_6 + M_7,$$

$$M_{II} = M_{10} + M_{11} + M_{12} + M_{13} + M_{14} + M_{15} + M_{16} + M_{17} + M_{18}.$$

У даному випадку умову для перевірки доцільності переносу місця розмикання мережі праворуч має вигляд:

$$M_{II} - M_I + M_{s12.1} + M_{s16.1} - M_{s4.1} > \frac{I_{ch} R_{\Sigma}}{2}.$$

Умова для перевірки доцільності переносу місця розмикання мережі ліворуч має вигляд:

$$M_I - M_{II} - M_{s12.1} - M_{s16.1} + M_{s4.1} \left. \frac{I_{ch} R_{\Sigma}}{2} \right\}$$

Індикатором в даному випадку виступає виконання умови при вирішенні наведених вище виразів. Даний показник показує лише можливість переносу, тобто доцільно змінювати чи ні наявну топологію мережі. Результатом використання індикативного показника буде «умова виконується» або «умова не виконується».

Таблиця 1

**Результати керування режимом роботи мережі із застосуванням індикативного якісного показника.**

Часовий проміжок	Значення індикативного якісного показника на часовому проміжку	Результати керування режимами роботи електричної мережі (місце розмикання)	Значення додаткового зменшення втрат потужності, Вт·год
01:00	умова виконується	Місце існуючого розриву 7-8 змінюємо на 8-9	2857,5
02:00	умова не виконується	Залишаємо 8-9	1946,2
03:00	умова не виконується	Залишаємо 8-9	4965,9
04:00	умова не виконується	Залишаємо 8-9	4750,2
05:00	умова не виконується	Залишаємо 8-9	5417,0
06:00	умова не виконується	Залишаємо 8-9	3319,3
07:00	умова не виконується	Залишаємо 8-9	2500,2
08:00	умова виконується	Місце існуючого розриву 8-9 змінюємо на 7-8	0
09:00	умова не виконується	Залишаємо 7-8	0
10:00	умова не виконується	Залишаємо 7-8	0
11:00	умова не виконується	Залишаємо 7-8	0
12:00	умова не виконується	Залишаємо 7-8	0
13:00	умова не виконується	Залишаємо 7-8	0
14:00	умова не виконується	Залишаємо 7-8	0
15:00	умова не виконується	Залишаємо 7-8	0
16:00	умова виконується	Місце існуючого розриву 7-8 змінюємо на 8-9	3879,7
17:00	умова не виконується	Залишаємо 8-9	2471,7
18:00	умова не виконується	Залишаємо 8-9	2024,8
19:00	умова не виконується	Залишаємо 8-9	1810,4
20:00	умова виконується	Місце існуючого розриву 8-9 змінюємо на 7-8	0
21:00	умова не виконується	Залишаємо 7-8	0
22:00	умова не виконується	Залишаємо 7-8	0
23:00	умова виконується	Місце існуючого розриву 7-8 змінюємо на 8-9	3415,6
00:00	умова не виконується	Залишаємо 8-9	2839,0
<b>Усього за добу</b>			<b>42197,6</b>

На часових проміжках з 08:00 – 15:00, 20:00 - 22:00 відсутнє додаткове зменшення втрат енергії так як оптимальна конфігурація мережі у дані часові проміжки відповідає існуючій.

Тобто, у добовому розрізі можливо додатково зменшити втрати активної енергії орієнтовно на 42,2 кВт·год, що складає 25 % від загального значення втрат енергії. Тоді за рік маємо можливість зменшити втрати електроенергії орієнтовно на 15 402 кВт·год. (Варто перевести у гроші. Наприклад, через тариф на розподіл) При досить суттєвому ефекту від додаткового зменшення втрат запропонований підхід вимагає додаткового дослідження з точки зору вартісних показників комутаційного обладнання. Також необхідно врахувати механічний ресурс комутаційного обладнання. Середній механічний ресурс комутаційного обладнання, що використовується в електричних мережах даного типу складає 25 – 30 тисяч спрацювань за життєвий цикл апарату, що на добу складає 6-7 спрацювань, що не протирічить отриманим результатам.

**Висновки**

За результатами проведеної роботи можна зробити наступні висновки: запропонований індикативний якісний показник дає можливість оцінити доцільність зміни топології розподільної мережі для мінімізації втрат енергії. Даний показник на відміну від інших технік дає змогу швидко визначити чи є необхідність переносу місця розмикання мережі, що в свою чергу дає змогу керувати режимами роботи мережі у режимі реального часу. За допомогою застосованого методу керування в добовому розрізі на прикладі типової мережі IEEE з 33 вузлами вдалось додатково зекономити 42,2 кВт·год, що зі рік складе 15

402 кВт·год (близько 9200 грн.). Варто зазначити, що величина додаткового зниження втрат потужності залежить від багатьох факторів і тому може не бути постійною.

Для подальшого дослідження можна віднести питання техніко-економічного обґрунтування кількості спрацювань комутаційного обладнання на добу та врахування механічного ресурсу комутаційного обладнання. Також необхідно врахувати використання різних типів обладнання у техніко-економічних розрахунках, так як може відрізнятись механічний ресурс, ціна, життєвий цикл. Актуально також розглянути питання синхронізації релейного захисту комутаційного обладнання з метою недопущення перерви у електропостачанні споживачів.

### Література

1. Циганенко Б.В., Підвищення показників якості електропостачання в розподільних електричних мережах / Б.В. Циганенко, В.В. Кирик//Матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті», 29-30 вересня 2016 р., м.Київ, НТУУ КПІ – Київ, 2016. – стр. 157-162.
2. Бондаренко Р. В. Підвищення надійності функціонування розподільних електричних мереж / Р. В. Бондаренко, О. М. Довгалюк, Г. В. Омеляненко, О. Є. Піротті, Т. В. Сиром'ятнікова // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. - 2018. - Вип. 195. - С. 69-71. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg\\_2018\\_195\\_25](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2018_195_25)
3. В.А. Попов. Особливості використання комутаційних апаратів з дистанційним керуванням в процесі формування активних розподільних мереж / В.А. Попов., Д. В. Яценко, О. В. Аданіков, О. В. Яценко // Енергетика: економіка, технології, екологія. – Київ. – 2020. - №1. – С. 21-28.
4. Prada, R. B. Voltage stability and thermal limit: Constraints on the maximum loading of electrical energy distribution feeders / Souza, L. J. // IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 1998, vol. 145(5), pp. 573. doi:10.1049/ip-gtd:19982186.
5. Kashem M. A new approach of distribution system reconfiguration for loss minimization / Jasmon G, Ganapathy V. // Int J Electr Power, 2000, vol 22, pp. 269–76, doi: 10.1016/S0142-0615(99)00057-5.
6. Zhanga F. Study on oilfield distribution network reconfiguration with distributed generation / Zhanga Y, Xina X, Zhangb L, Fana L. // Int J Smart Grid Clean Energy (SGCE), September 2012, vol. 1, pp. 135–141, doi: 10.12720/sgce.1.1.135-141.
7. Rugthaicharoencheep N. Feeder reconfiguration for loss reduction in distribution system with distributed generators by tabu search / Sirisumrannukul S. // GMSARN Int J, 2009, vol. 3, pp. 47–54.
8. E. M. Carreno. Distribution network reconfiguration using an efficient evolutionary algorithm / N. Moreira and R. Romero, // 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007, pp. 1-6, doi: 10.1109/PES.2007.385648.
9. Bagheri Tolabi, Reconfiguration, Optimal Placement of DSTATCOM, and Photovoltaic Array in a Distribution System Based on Fuzzy-ACO Approach / H. Simultaneous, Ali, M. H., & Rizwan, M. // IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, vol. 6(1), pp. 210–218, DOI: 10.1109/TSTE.2014.2364230.
10. Rao RS. Optimization of distribution network configuration for loss reduction using artificial bee colony algorithm / Narasimham S, Ramalingaraju M. // Int J Electr Power Energy Syst Eng, 2008, vol. 1, pp. 116–22, doi: 10.5281/zenodo.1057591.
11. Syahputra. Reconfiguration of Distribution Network with DG Using Fuzzy Multi-objective Method / Ramadoni & Robandi, Imam & Ashari, Mochamad // ICIMTR 2012 - 2012 International Conference on Innovation, Management and Technology Research, 2012, doi: 10.1109/ICIMTR.2012.6236410.
12. Hemmatpour M. A novel reconfiguration mixed with distributed generation planning via considering voltage stability margin / Mohammadian M, Rashidinejad M. // Amirkabir/Electr Electron Eng (AIJ-EEE), 2011, vol. 43, pp. 23–34.
13. В.А. Попов. Особливості використання комутаційних апаратів з дистанційним керуванням в процесі формування активних розподільних мереж / В.А. Попов., Д. В. Яценко, О. В. Аданіков, О. В. Яценко // Енергетика: економіка, технології, екологія. – Київ. – 2020. - №1. – С. 21-28.

### References

1. Tsyhanenko B.V., Pidvyshchennia pokaznykiv yakosti elektropostachannia v rozpodilnykh elektrychnykh merezhakh / B.V. Tsyhanenko, V.V. Kyryk//Materialy XVII mizhnarodnoinukovo-praktychnoi konferentsii «Vidnovliuvania enerhetyka ta enerhoefektyvnist u KhKhI stoliitti», 29-30 veresnia 2016 r., m.Kyiv, NTUU KPI – Kyiv, 2016. – str. 157-162.
2. Bondarenko R. V. Pidvyshchennia nadiinosti funktsionuvannia rozpodilnykh elektrychnykh merezh / R. V. Bondarenko, O. M. Dovhaliuk, H. V. Omelianenko, O. Ye. Pirotti, T. V. Syromiatnikova // Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka. - 2018. - Vyp. 195. - S. 69-71. - Rezhym dostupu: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg\\_2018\\_195\\_25](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2018_195_25)
3. V.A. Popov. Osoblyvosti vykorystannia komutatsiinykh aparativ z dystantsiinyim keruvanniam v protsesi formuvannia aktyvnykh rozpodilnykh merezh / V.A. Popov., D. V. Yatsenko, O. V. Adanikov, O. V. Yatsenko // Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia. – Kyiv. – 2020. - №1. – S. 21-28
4. Prada, R. B. Voltage stability and thermal limit: Constraints on the maximum loading of electrical energy distribution feeders / Souza, L. J. // IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 1998, vol. 145(5), pp. 573. doi:10.1049/ip-gtd:19982186.
5. Kashem M. A new approach of distribution system reconfiguration for loss minimization / Jasmon G, Ganapathy V. // Int J Electr Power, 2000, vol 22, pp. 269–76, doi: 10.1016/S0142-0615(99)00057-5.

6. Zhanga F. Study on oilfield distribution network reconfiguration with distributed generation / Zhanga Y, Xina X, Zhangb L, Fana L. // *Int J Smart Grid Clean Energy (SGCE)*, September 2012, vol. 1, pp. 135–141, doi: 10.12720/sgce.1.1.135-141.
7. Rugthaicharoencheep N. Feeder reconfiguration for loss reduction in distribution system with distributed generators by tabu search / Sirisumrannukul S. // *GMSARN Int J*, 2009, vol. 3, pp. 47–54.
8. E. M. Carreno. Distribution network reconfiguration using an efficient evolutionary algorithm / N. Moreira and R. Romero, // 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007, pp. 1-6, doi: 10.1109/PES.2007.385648.
9. Bagheri Tolabi, Reconfiguration, Optimal Placement of DSTATCOM, and Photovoltaic Array in a Distribution System Based on Fuzzy-ACO Approach / H. Simultaneous, Ali, M. H., & Rizwan, M. // *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2015, vol. 6(1), pp. 210–218, DOI: 10.1109/TSTE.2014.2364230.
10. Rao RS. Optimization of distribution network configuration for loss reduction using artificial bee colony algorithm / Narasimham S, Ramalingaraju M. // *Int J Electr Power Energy Syst Eng*, 2008, vol. 1, pp. 116–22, doi: 10.5281/zenodo.1057591.
11. Syahputra. Reconfiguration of Distribution Network with DG Using Fuzzy Multi-objective Method / Ramadoni & Robandi, Imam & Ashari, Mochamad // *ICIMTR 2012 - 2012 International Conference on Innovation, Management and Technology Research*, 2012, doi: 10.1109/ICIMTR.2012.6236410.
12. Hemmatpour M. A novel reconfiguration mixed with distributed generation planning via considering voltage stability margin / Mohammadian M, Rashidinejad M. // *Amirkabir/Electr Electron Eng (AIJ-EEE)*, 2011, vol. 43, pp. 23–34.
13. V.A. Popov. Osoblyvosti vykorystannia komutatsiinykh aparativ z dystantsiynym keruvanniam v protsesi formuvannia aktyvnykh rozpodilnykh mrezh / V.A. Popov., D. V. Yatsenko, O. V. Adanikov, O. V. Yatsenko // *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia*. – Kyiv. – 2020. - №1. – S. 21-28.

Наталія ОСТАПЕНКО

Київський національний університет технологій та дизайну  
<https://orcid.org/0000-0002-3836-7073>  
e-mail: [cesel@ukr.net](mailto:cesel@ukr.net)

Алла РУБАНКА

Київський національний університет технологій та дизайну  
<https://orcid.org/0000-0003-0298-0850>  
e-mail: [rubanka.ai@knutd.edu.ua](mailto:rubanka.ai@knutd.edu.ua)

Галина ОЛІЙНИК

Київський національний університет технологій та дизайну  
<https://orcid.org/0000-0002-7471-7325>  
e-mail: [tokar.gm@knutd.com.ua](mailto:tokar.gm@knutd.com.ua)

Тетяна ЛУЦКЕР

Київський національний університет технологій та дизайну  
<https://orcid.org/0000-0003-3230-5303>  
e-mail: [lutskertatyna@gmail.com](mailto:lutskertatyna@gmail.com)

Вікторія ВАРВОЛІК

Київський національний університет технологій та дизайну

## СИСТЕМАТИЗАЦІЯ КОНСТРУКТИВНО-КОМПОЗИЦІЙНИХ РІШЕНЬ У ОФОРМЛЕННІ ГОРЛОВИНИ ВІЙСЬКОВОГО ОДЯГУ

*В статті проаналізовано та узагальнено асортимент сучасного одягу військового призначення провідних світових та вітчизняних компаній виробників. Систематизовано найбільш розповсюджені різновиди конструктивно-композиційних рішень оформлення горловини одягу військового призначення з метою створення інформаційної бази для подальших досліджень. Застосовано інформаційно-дослідницький та візуально-аналітичний підходи у поєднанні із загальнонауковими методами типологічної систематизації та порівняльного аналізу існуючих різновидів швейної фурнітури для виготовлення військового одягу закордонного та вітчизняного виробництва. Систематизовано конструктивно-композиційні рішення оформлення горловини, таких як комір та капюшон за різними ознаками, охарактеризовано їх типи та описано характерні конструктивно-композиційні рішення за формою, ступенем прилягання, способом з'єднання тощо. Розроблено інформаційну базу та графічно представлено види комірів та капюшонів одягу військового призначення. На основі отриманих результатів сформульовано рекомендації щодо перспективного напрямку вдосконалення проектування раціональної конструкції з впровадженням прогресивної технології виготовлення одягу військового призначення. Практична значущість одержаних результатів полягає в виокремленні основних різновидів існуючих рішень оформлення горловини. Результати можуть бути використані при подальшій розробці зазначеного одягу.*

**Ключові слова:** конструктивно-композиційні рішення, комір, капюшон, військовослужбовець.

Nataliia OSTAPENKO, Alla RUBANKA, Halyna OLIINYK, Tetayna LUTSKER, Victoriia VARVOLIK  
Kyiv National University of Technologies and Design

## SYSTEMATIZATION OF CONSTRUCTIVE-COMPOSITION SOLUTIONS IN THE DESIGN OF THE NECK OF MILITARY CLOTHING

*The article analyzes and summarizes the range of modern military clothing of the leading global and domestic manufacturing companies. The most widespread types of structural and compositional solutions for the design of the neck of military clothing are systematized in order to create an information base for further research. Information-research and visual-analytical approaches are applied in combination with general scientific methods of typological systematization and comparative analysis of existing varieties of sewing accessories for the manufacture of military clothing of foreign and domestic production. The structural and compositional solutions for the design of the neck, such as the collar and hood, are systematized according to various features, their types are characterized, and the characteristic structural and compositional solutions are described in terms of shape, degree of fit, method of connection, etc. An information base has been developed and the types of collars and hoods of military clothing are graphically presented. On the basis of the obtained results, recommendations are formulated regarding the prospective direction of improving the design of a rational structure with the introduction of progressive technology for the manufacture of military clothing. The practical significance of the obtained results lies in the identification of the main varieties of the existing neck design solutions. The results can be used in the further development of the specified clothing.*

**Keywords:** structural and compositional solutions, collar, hood, military serviceman.

### Постановка проблеми

Встановлено, що на сьогодні вітчизняні та закордонні підприємства по виготовленню одягу військового призначення пропонують досить широкий асортимент виробів, значна частина яких не повністю задовольняє потреби споживачів, не в повній мірі забезпечує та враховує реалізацію специфічних службових обов'язків. На етапі проектування розробники не завжди враховують вимоги нормативної документації, умов експлуатації, властивості матеріалів, з яких виготовляються вироби.

При проектуванні одягу військового призначення необхідним є розробка конструктивно-композиційних рішень, які здатні забезпечити висунуті до нього вимоги з урахуванням сучасної інформації про призначення, новітні наукові розробки, умови експлуатації в системі «людина – військовий одяг –

середовище». Аналіз існуючого асортименту одягу військового призначення існуючих вітчизняних виробників вказує, що він не відповідає реальним умовам його експлуатації, зокрема не забезпечує в повній мірі комфортності в умовах тривалого носіння при виконанні службових обов'язків та впливу зовнішніх факторів навколишнього середовища, а також унеможливує його комбінування з предметами бойового спорядження та засобами індивідуального захисту в процесі експлуатації, має конструктивні та технологічні недоліки.

#### Аналіз останніх джерел

За останні роки в Україні спостерігається часткове оновлення асортименту одягу військового призначення, пов'язане з появою на вітчизняному ринку сучасних тканин і матеріалів з задекларованими (сертифікованими) захисними і гігієнічними властивостями, що спонукає до пошуку нових ефективних конструктивно-технологічних рішень і вдосконалювати методи промислового проектування та виготовлення.

Авторами робіт [1 – 5] запропоновано підхід до систематизації різновидів елементів на основі принципів трансформації в спеціальному захисному одязі за функціональною ознакою. Розроблено нові конструктивно-технологічні рішення таких елементів з можливістю прогнозування, розширення їх асортименту. Встановлено, що основою для створення асортиментних рядів захисного одягу є різні поєднання параметрів конструкції виробів та їх елементів. Запропонована систематизація різновидів сучасного захисного одягу та окремих його вузлів дає можливість підвищити його надійність та ергономічність.

**Метою роботи** є дослідження існуючих різновидів оформлення горловини одягу військового призначення та систематизація їх конструктивно-композиційних рішень.

#### Виклад основного матеріалу

Завдання, які сьогодні стоять перед державою, це є передусім забезпечення необхідного рівня бойової та мобілізаційної готовності, боєздатності та підготовки військових частин до виконання поставлених бойових завдань.

Обґрунтований вибір виробів захисного одягу є складним процесом та передбачає розробку конструкції, яка повинна врахувати специфіку службових обов'язків. При використанні в передбачуваних умовах одяг військового призначення не повинний створювати додаткових факторів ризику та інших шкідливих чинників. Особливістю проектування зазначеного одягу є необхідність дотримання жорстких вимог нормативних, які суттєво відрізняються від вимог до аналогічних виробів побутового призначення. Виробництво ефективного захисного одягу військового призначення різної функціональності є перспективним напрямом, а наукове підґрунтя повинно сприяти розвитку даного напрямку в Україні, що має важливе соціально-економічне значення.

На розробку захисного одягу для військовослужбовців і його якісний стан впливає низка факторів, серед яких слід зазначити специфіку несення військової служби, економічний рівень розвитку країни, поява нових зразків військової техніки і озброєння, вдосконалення способів ведення бойових дій, віяння громадянської моди, особистісний фактор і інші обставини.

При розробці конструктивно-технологічних рішень військової форми враховують ряд вимог, які висуваються до нього та матеріалів для його виготовлення [6]. Основними вимогами, яким повинен задовольняти одяг військового призначення є запобігання впливу шкідливих і небезпечних чинників (НШЧ), забезпечення безпеки військовослужбовців при виконанні службово-кваліфікаційних обов'язків, збереження нормального функціонального стану людини і його працездатності (рис.1).



Рис. 1. Підхід до проектування захисного військового одягу

Здійснено аналіз асортименту вітчизняних верхніх виробів сучасної парадної (парадно-вихідна), повсякденної, польової (службова морська), спеціальної (робоча), спортивної військової форми одягу сухопутних, високомобільних десантних військ; повітряних Сил, військово-морських Сил Збройних Сил України; Сил спеціальних операцій Збройних Сил України [2], а також закордонного захисного одягу. Одним із складових елементів верхніх виробів є доволі складний вузол «горловина – комір та/або капюшон».

Відомо [6], що комір – деталь або вузол швейного виробу для оброблення та оформлення вирізу горловини, складається із горішнього, нижнього коміра та стояка, які можуть бути суцільновикроєними. Капюшон – деталь або вузол швейного виробу конусоподібної форми, що вкриває голову, він може бути одношовний (класичний); двошовний (чепчик); зі стояком, який закриває шию до підборіддя (анорак); з виточкою або кількома тощо. Конструктивно комір і капюшон можуть бути з'ємними і нез'ємними, виготовлені з різних матеріалів. Крім того, цей вузол може бути посилений клапаном підборідної частини, який залежно від конкретних умов експлуатації виготовляють різноманітних форм і розмірів, з'ємними або нез'ємними, з різними способами і засобами з'єднання з виробами.

Вузол «горловина – комір та/або капюшон, пелерина» забезпечує захист голови, шиї та плечей від дії зовнішніх чинників зношення, а також є важливою деталлю художнього образу. Крім того, цей елемент має бути узгодженим із засобами захисту голови, обличчя, очей, органів дихання, зору, слуху, технічним озброєнням для забезпечення можливості сприйняття і передачі звукової та зорової інформації тощо [6]. Відповідно до умов експлуатації до зазначеного елемента – складової захисного військового одягу висувають конкретні вимоги, забезпечення яких залежить від обґрунтованого вибору матеріалів та раціонального конструктивно-технологічного виконання [6].

Конструкція комірів та капюшонів, їх форма і розміри повинні відповідати антропометричним та фізіологічним характеристикам, бути функціональними та легко трансформуватись, мати можливість регулювання ступеня прилягання на ділянках шиї та голови, мати різні шари матеріалів пакетів (за кількістю, розміщенням, призначенням і способами і засобами з'єднання з виробами).

Форма та розміри комірів/капюшонів залежать від спроектованої у виробі кількості застіжки борту та її розміщення (відкрита або закрита; центральна або суміщена; на застіжки-блискавки, петлі і гудзики, текстильні застіжки, зав'язки тощо), типу з'єднання з виробом, ступеня прилягання до поверхні тіла людини, а також модельних особливостей виробів. Залежно від призначення одягу для військових на капюшоні можуть бути розташовані настроєні елементи для фіксації маскувальних об'єктів та/або швидкого знаходження людини в умовах обмеженої видимості (задимлення, поганого освітлення тощо).

Складовою вузла горловини є частина клапана підборідна – частина вітрозахисного клапана, яка захищає нижню частину обличчя від обвітрювання та планка – деталь для оброблення застіжки, яка перешкоджає проникненню під одяг шкідливих речовин, а також захищає гудзики або блискавки від механічних пошкоджень. Залежно від конкретних умов експлуатації планки (рис. 2) виготовляють різними за призначенням (пилізахисним, вітрозахисним, водозахисним тощо), різноманітних форм і розмірів; з різними способами і засобами з'єднання з виробами.

Застібка утеплених виробів може бути на кнопки, гудзики або застіжку-блискавку. Головною умовою є унеможливлення попадання повітря низької та/або високої температури через горловину, застіжку, виключення контакту охолодженої та /або нагрітої фурнітури з тілом військовослужбовця. Для цього використовують утеплені планки над або під застіжкою-блискавкою, суцільнокрійні або пришивні. При проектуванні застіжки на гудзики бажане використання потайної застіжки.

Систематизовано існуючі різновиди вузла горловина – комір та/або капюшон, узагальнено ці елементи за різними ознаками з метою створення інформаційної бази для подальших досліджень. Коміри розділяють за типом застіжки (відкрита, закрита, зміщена) (рис. 3, а), за ступенем прилягання до шиї (прилеглий, відстаючий від шиї) (рис. 3, б), за способом з'єднання з горловиною (вшивний, суцільнокрійний, комбінований) (рис. 3, в), за формою (відкладний, комір-стояк, комбінований) (рис. 3, г), за типом горловини (із закритою, відкритою горловиною) (рис. 3, д, е) [6, 7].

Капюшон, як функціональний та декоративний елемент одягу, широко використовується при оформленні горловини в верхньому одязі військового призначення для захисту від засліплення, маскуванню, захисту від негативного впливу навколишнього середовища тощо.

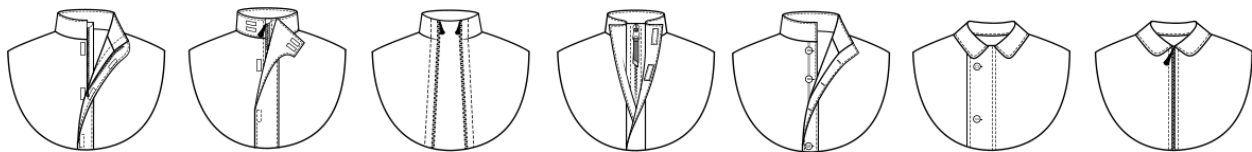


Рис. 2. Приклади різновидів оформлення коміра і планки

Інформації про конструкції капюшонів певних моделей, в той час, як опису закономірностей побудови базових конструкцій капюшонів різних форм недостатньо та жодна з розглянутих методик не містить рекомендацій щодо конкретних параметрів конструкцій капюшонів для утворення їх заданої об'ємної форми. Основою для побудови конструкцій капюшонів різних видів є креслення капюшона



класичної форми. Вихідними даними для побудови креслення є розмірні ознаки, величини конструктивних прибавок і розміри з креслення конструкції пілочки та спинки [8]. Капюшон може бути з козирками, кишенями, клапанами для слухових отворів, планками тощо (різноманітними за формами, розмірами, способами і засобами з'єднання з виробами) або без них [6].

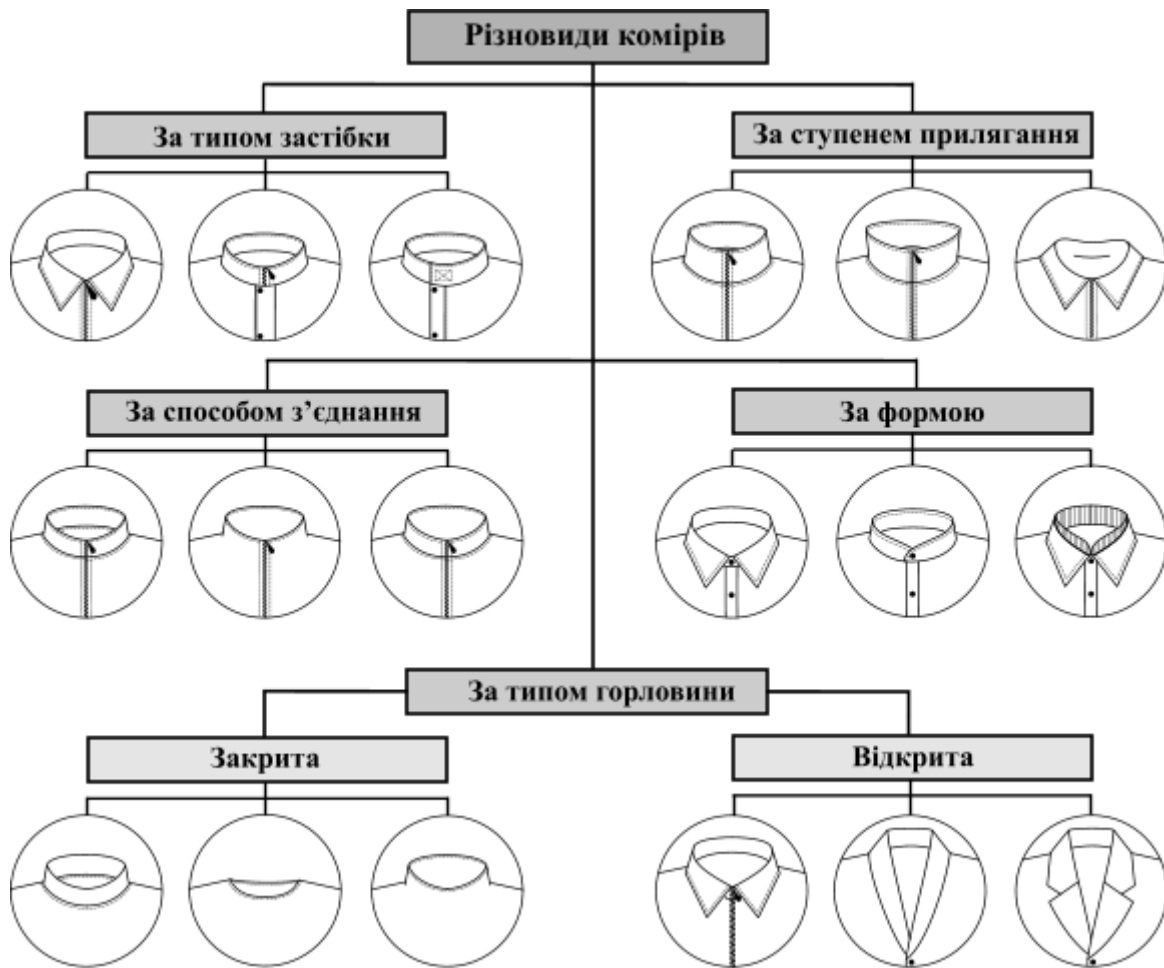


Рис. 3. Систематизація різновидів комірів в одязі військового призначення

Особлива увага приділяється конструктивному рішенню капюшона, його формі і розміру, які повинні враховувати розміри головного убору, дихального обладнання та не обмежувати сприйняття і передачу звукової та зорової інформації. Вибір тієї чи іншої форми капюшона пов'язаний зі створенням певної силуетної та об'ємної форми. Відповідно, об'ємним виробам відповідають широкі капюшони збільшених розмірів, і навпаки, вироби малих об'ємів потребують капюшони прилеглої форми.

Узагальнено і структуровано різновиди капюшонів одягу військового призначення за різними ознаками: типом з'єднання з виробом (вшивний, суцільнокрійний, комбінований, з'ємний) (рис. 4, а); об'ємністю форми (щільноприлеглий, середній, великий) (рис. 4, б); зовнішнім виглядом (класичний, шоломоподібний) (рис. 4, в); за кількістю (одношовний, багатшовний) (рис. 4, г). Так, ступінь прилягання капюшону до голови (або до засобу індивідуального захисту голови) по глибині, ширині та лицьовому вирізу здійснюється за рахунок використання хлястиків, еластичної тасьми, протягнутої в куліси у відповідних місцях тощо. Також зав'язка забезпечує щільне облягання виробу на різних частинах тіла і з'єднання деталей одягу між собою. Регулювання об'єму капюшону теж може бути різним – лицьової частини, висоти капюшону, глибини тощо. Відомі капюшони з отворами в зоні вух, які відкриваються при необхідності.

Для забезпечення ергономічності виробу і захисту голови в одязі військового призначення використовують деталі, такі як вітрозахисна куліса капюшона з затяжками для регулювання ступеня прилягання до обличчя людини, з'ємний капюшон з вологовідштовхуючими застілками для захисту від різного виду рідини та еластичний шнур за допомогою якого регулювання об'ємної форми відбувається в залежності від умов експлуатації, анатомічних особливостей форми голови і товщини нижніх шарів одягу (рис. 5) [9-10]. Для захисту ділянки плечей доцільно використовувати пришивну або з'ємну пелерину, яка прикріплюється до одягу за допомогою гудзиків, кнопок тощо. При ушкодженні матеріалу пелерину можна замінювати, що подовжить термін експлуатації захисного військового одягу.

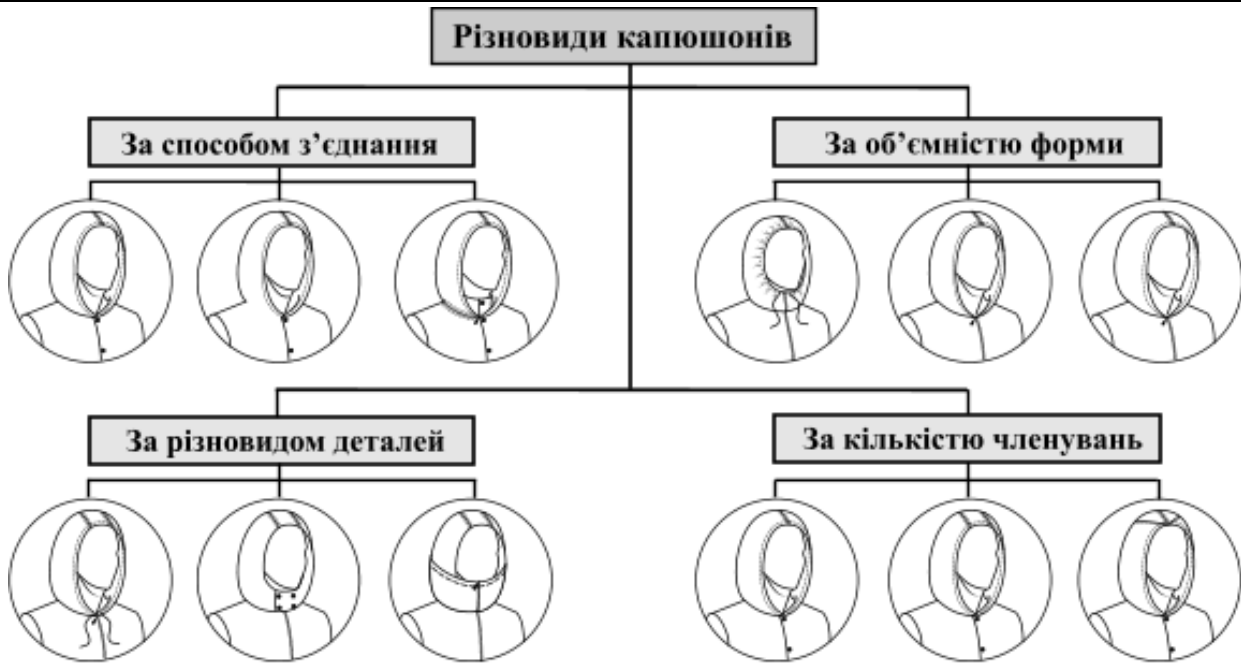


Рис. 4. Систематизація різновидів капюшонів одягу військового призначення

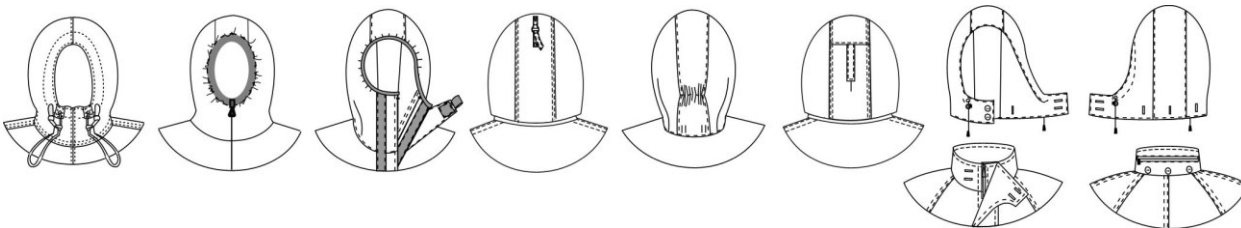


Рис. 5. Систематизація різновидів оформлення капюшонів

В результаті аналізу сучасного асортименту виробів військового призначення виявлено, що при оформленні горловини в верхньому одязі застосовують такі елементи та деталі, які здатні одночасно виконувати кілька функцій, або без зайвих фізичних зусиль перетворюватися в елементи іншого призначення, або навіть асортименту при цьому не погіршуючи ергономічні та захисні властивості.

Використання методів трансформації при розробці конструктивно-технологічних рішень оформлення горловини дає змогу поєднувати комір та капюшон в один елемент одягу, що підвищує універсальність та адаптованість конструкції до зміни антропометричних розмірних ознак [11]. Таким чином, капюшон може трансформуватись в комір-стояк (рис. 7,а,в) вкладатись в спеціальну кишеню в спинці (рис 7,б) або кріпитись до коміра за допомогою додаткових елементів (рис 7,г).

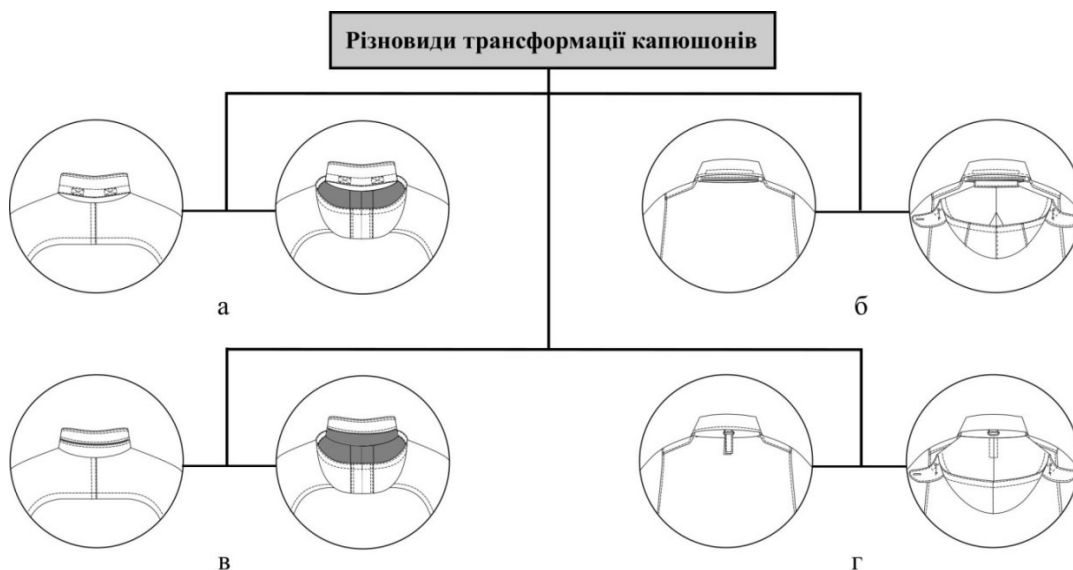


Рис. 7. Варіанти трансформації капюшонів в військовому одязі

Для фіксації капюшонів при виконанні трансформації використовуються різноманітні засоби для кріплення, серед яких найбільш розповсюдженими є застібки-блискавки, текстильні застібки, гудзики, кнопки, гачки, півкільця, тощо. Недоліком використання багатьох засобів для кріплення є те, що вони не можуть бути розташовані на окремих ділянках, які навантажуються під час виконання працівником певних дій. Це пов'язано з тим, що вони мають певну товщину і тому призводять до відчуття дискомфорту під час експлуатації.

Зручність фіксації та регулювання капюшонів забезпечується такими елементами як пати, куліси, еластичні шнури, карабіни тощо із урахуванням характерних рухів та положення тіла працівника. Час, необхідний на кріплення спецодягу та/або їх зняття, повинен бути мінімальним.

### Висновки

Проаналізовано сучасні різновиди конструктивно-композиційних рішень оформлення горловини в одязі військового призначення за обраними ознаками. Засвідчено актуальність подальшого проектування та виготовлення сучасного ергономічного військового одягу на основі принципів трансформації вузла «горловина – комір та/або капюшон».

Систематизовано конструктивно-композиційні рішення оформлення горловини, таких як комір та капюшон за окремими ознаками. Встановлено, що перспективним напрямом при проектуванні одягу військового призначення з підвищеними захисними, експлуатаційними та ергономічними показниками є використання принципів трансформації. Запропонована структуризація дає можливість розробляти нові конструктивно-композиційні рішення оформлення горловини високоякісного одягу військового призначення за визначеними умовами експлуатації.

### Література

1. Formation of structure of protective clothing assortment and its elements on the basis of transformation principles / N. Ostapenko, O. Kolosnichenko, L. Tretiyakova, T. Lutsker, A. Rubanka, H. Tokar // Information and Innovation Technologies in the Life of Society : monograph / ed. by A. Ostenda and N. Svitlychna. – Katowice : Wydawnictwo Wyższej Szkoły Technicznej w Katowicach, 2019. – P. 291-309.
2. Наказ №606 від 20.11.2017 "Про затвердження Правил носіння військової форми одягу та знаків розрізнення військовослужбовцями Збройних Сил України та ліцеїстами військових ліцеїв"
3. Наказ Міністерства оборони України №370 від 18.07.2017 Про затвердження Зразків військової форми одягу та загальних вимог до знаків розрізнення військовослужбовців та ліцеїстів військових ліцеїв
4. K. R. Karpagam, K. S. Saranya, J. Gopinathan & Amitava Bhattacharyya (2017) Development of smart clothing for military application using theochromic colorants, The Journal of The Textile Institute, 108:7, pp. 1122-1127, DOI:10.1080/00405000.2016.1220818.
5. Ostapenko N., Kolosnichenko M., Tretiyakova L., Lutsker T., Pashkevich K., Rubanka A., Tokar H. Definition of the Main Features of Material Assemblies for Thermal Protective Clothing During External High-temperature Effect Modelling. Tekstilec, 2021. 64(2). P. 136-148
6. Проектування тектонічних форм одягу з урахуванням властивостей тканин: монографія / [К.Л. Пашкевич]. – К.: НВЦ «Профі», 2015. – 364 с.
7. Колосніченко О.В. Формоутворення одягу спеціального призначення як об'єкту дизайн-діяльності – К., КНУТД, 2019р. – 365с.
8. Вироби спеціального та військового призначення: дизайн і технології. Остапенко Н.В., Колосніченко О.В., Колосніченко М.В., Третякова Л.Д., Луцкер Т.В., Рубанка А.І., Токар Г.М. К.: КНУТД, 2021. 231с. (14 д.а.).
9. Колосніченко М.В. Мода і одяг. Основи проектування та виробництва одягу: навч. посібник / М.В. Колосніченко, К.Л. Процик. – К.: ПП «НВЦ Профі», 2018. – 237 с.
10. Міністерство оборони України: [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.mil.gov.ua/ministry/sklad-zbrojnih-sil-ukraini/>.
11. Ергономіка і дизайн. Проектування сучасних видів одягу : навчальний посібник / [М. В. Колосніченко, Л. І. Зубкова, К. Л. Пашкевич та ін.]. – К. : ПП «НВЦ «Профі», 2014. – 386 с.

### References

1. Formation of structure of protective clothing assortment and its elements on the basis of transformation principles / N. Ostapenko, O. Kolosnichenko, L. Tretiyakova, T. Lutsker, A. Rubanka, H. Tokar // Information and Innovation Technologies in the Life of Society : monograph / ed. by A. Ostenda and N. Svitlychna. – Katowice : Wydawnictwo Wyższej Szkoły Technicznej w Katowicach, 2019. – P. 291-309.
2. Nakaz №606 vid 20.11.2017 "Pro zatverdzhennia Pravyi nosinnia viiskovoi formy odiahu ta znakiv rozrznennia viiskovosluzhbovtsiamy Zbroinykh Syl Ukrainy ta litseistamy viiskovykh litseiv"
3. Nakaz Ministerstva obrony Ukrainy №370 vid 18.07.2017 Pro zatverdzhennia Zrazkiv viiskovoi formy odiahu ta zahalnykh vymoh do znakiv rozrznennia viiskovosluzhbovtsiv ta litseistiv viiskovykh litseiv
4. K. R. Karpagam, K. S. Saranya, J. Gopinathan & Amitava Bhattacharyya (2017) Development of smart clothing for military application using theochromic colorants, The Journal of The Textile Institute, 108:7, pp. 1122-1127, DOI:10.1080/00405000.2016.1220818.
5. Ostapenko N., Kolosnichenko M., Tretiyakova L., Lutsker T., Pashkevich K., Rubanka A., Tokar H. Definition of the Main Features of Material Assemblies for Thermal Protective Clothing During External High-temperature Effect Modelling. Tekstilec, 2021. 64(2). P. 136-148

- 
6. Proektuvannia tektonichnykh form odiahu z urakhuvanniam vlastyvostei tkanyn: monohrafiia / [K.L. Pashkevych]. – K.: NVTs «Profi», 2015. – 364 s.
  7. Kolosnichenko O.V. Formoutvorennia odiahu spetsialnogo pryznachennia yak ob'ektu dyzain-dialnosti – K., KNUTD, 2019r. – 365s.
  8. Vyroby spetsialnogo ta viiskovoho pryznachennia: dyzain i tekhnolohii. Ostapenko N.V., Kolosnichenko O.V., Kolosnichenko M.V., Tretiakova L.D., Lutsker T.V., Rubanka A.I., Tokar H.M. K.: KNUTD, 2021. 231s. (14 d.a.).
  9. Kolosnichenko M.V. Moda i odiah. Osnovy proektuvannia ta vyrobnytstva odiahu: navch. posibnyk / M.V. Kolosnichenko, K.L. Protsyk. – K.: PP «NVTs Profi», 2018. – 237 s.
  10. Ministerstvo oborony Ukrainy: [Elektronnyi resurs]. — Rezhym dostupu: <http://www.mil.gov.ua/ministry/sklad-zbrojnix-sil-ukraini/>.
  11. Erhonomika i dyzain. Proektuvannia suchasnykh vydiv odiahu : navchalnyi posibnyk / [M. V. Kolosnichenko, L. I. Zubkova, K. L. Pashkevych ta in.]. – K. : PP «NVTs «Profi», 2014. – 386 s.

Олександр ТИМОЩУК  
Хмельницький національний університет  
<https://orcid.org/0000-0003-0149-8878>  
e-mail: [alex.tymoschuk@gmail.com](mailto:alex.tymoschuk@gmail.com)

## АНАЛІЗ І ОЦІНКА ТОЧНОСТІ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ЩІЛЬНОСТІ КАНАЛІВ ТА ПИТОМОЇ ПЛОЩІ ПОВЕРХНІ КОНТАКТУ БЕЗЗМАЩУВАЛЬНИХ ПОРШНЕВИХ УЩІЛЬНЕНЬ

На основі теорії стохастичних полів були розроблені методи розрахунку герметичності беззмашувальних поршневих ущільнень для виконання інженерних методик обчислень, призначені для галузі машинобудування. Мета роботи полягає в проведенні аналізу точності створених методів розрахунку щільності каналів та питомої площі поверхні контакту, що омивається робочим середовищем, беззмашувальних поршневих ущільнень.

Досліджена залежність щільності ймовірності каналів від комплексу умов контактування на основі теорії стохастичних полів. Аналіз досліджень показує, що залежність щільності ймовірності каналів від комплексу умов контактування носить екстремальний характер. Даний результат пояснюється впливом процесу злиття плям контакту в процесі навантаження. Для визначення щільності каналів виведена точна формула, яка залежить від спектральних моментів та ефективного рівня деформації. Значення, розраховані за точною та розрахунковою формулою щільності каналів різняться не більше, ніж на 0,45%.

Виведена і досліджена точна формула питомої площі поверхні стику, що омивається робочим середовищем.

Досліджена залежність зведеної площі поверхні стику, що омивається середовищем, від комплексу умов контактування. Значення величин, розраховані за точними та розрахунковими формулами питомої площі поверхні стику, що омивається середовищем, різняться не більше, ніж на 6,1%.

Ключові слова: контакт; спряжені контактуючі поверхні; щільність ймовірності висот впадин; щільність ймовірності висот вершин; питома площа шорсткої поверхні; питома площа поверхні стику, що омивається робочим середовищем; щільність каналів; комплекс умов контактування; відносна фактична площа контакту; герметичність беззмашувальних поршневих ущільнень; теорія стохастичних полів; нормальний стохастичний процес

Oleksandr TYMOSHCHUK  
Khmelnitsky National University

## ANALYSIS AND EVALUATION OF THE ACCURACY OF METHODS FOR CALCULATING THE DENSITY OF CHANNELS AND THE COMBINED AREA OF THE CONTACT SURFACE OF LUBRICATION-FREE PISTON SEALS

On the basis of the theory of stochastic fields, methods of calculating the tightness of the dead piston seals were developed to perform the engineering methods of calculations intended for the field of mechanical engineering.

The dependence of the channel probability density on the set of contact conditions was investigated based on the theory of stochastic fields. Analysis of research shows that the dependence of the channel probability density on the complex of contact conditions is extreme. This result is explained by the influence of the process of merging the contact spots during the loading process. To determine the density of the channels, an exact formula is derived that depends on the spectral moments and the effective level of deformation. On the basis of the exact formula, the calculation formula of the probability density of the channels was obtained for carrying out engineering calculations of the tightness of lubrication-free piston seals. The values calculated by the exact and estimated channel density formulas differ by no more than 0.0045.

The exact formula of the specific surface area of the joint washed by the working medium is derived and investigated.

The dependence of the combined surface area of the joint washed by the medium on the set of contact conditions was investigated. Values of quantities calculated according to exact and calculation formulas of the specific surface area of the joint washed by the medium differ by no more than 6.1%.

Keywords: contact; interconnected surfaces; density of probability of heights of depressions; the density of the heights of the vertices; the specific area of the rough surface; the specific surface area of the contact joint, which is washed by the working environment; tightness of channels; complex of contact conditions; relative actual contact area; tightness of the penetrating piston seals; the specific surface area of the joint washed by the environment; stochastic field theory

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

На основі теорії стохастичних полів були розроблені методи розрахунку герметичності беззмашувальних поршневих ущільнень для виконання інженерних методик обчислень, призначені для галузі машинобудування [1]. Мета роботи полягає в проведенні аналізу точності створених методів розрахунку щільності каналів та питомої площі поверхні стику, що омивається робочим середовищем, беззмашувальних поршневих ущільнень.

**Виклад основного матеріалу**

Щільність ймовірності висот впадин  $\varphi(\varepsilon)$  і щільність ймовірності висот вершин  $p(\varepsilon)$  описуються відомим рівнянням:

$$\varphi(\varepsilon) = p(-\varepsilon) . \tag{1}$$

При умові врахування залежності щільності ймовірності висот виступів профілю (точок максимумів нормального стохастичного процесу), отримаємо:

$$\varphi(\varepsilon) = \frac{\delta}{\sqrt{2\pi}} \left\{ \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2\delta^2}\right) - \sqrt{\pi} \chi \varepsilon \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2}\right) [1 - \operatorname{erf}(\chi\varepsilon)] \right\} . \tag{2}$$

Щільність ймовірності каналів  $\delta_k$ , що приходиться на одиницю номінальної довжини профілю контакту при проходженні робочого середовища, виглядає як різниця між щільністю ймовірності  $\delta'$  виступів поверхні, які вступили в контакт, та щільністю ймовірності  $\delta''$  впадин, які розташовані вище даного рівня  $u$ :

$$\delta_k = \delta' - \delta'' . \tag{3}$$

При умові, що  $D$  - щільність ймовірності виступів поверхні, величина  $\delta'$  розраховується за формулою:

$$\delta' = D \int_u^{\infty} p(\varepsilon) d\varepsilon . \tag{4}$$

З причини симетрії шорсткої поверхні контакту відносно її середньої площини щільність ймовірності впадин поверхні дорівнює щільності ймовірності виступів:

$$\delta'' = D \int_u^{\infty} \varphi(\varepsilon) d\varepsilon . \tag{5}$$

При підстановці (4) і (5) в (3), маємо:

$$\delta_k = D \left[ \int_u^{\infty} p(\varepsilon) d\varepsilon - \int_u^{\infty} \varphi(\varepsilon) d\varepsilon \right] . \tag{6}$$

При певних перетвореннях рівняння (2) отримуємо:

$$\begin{aligned} \frac{\sqrt{2\pi}}{\delta} \int_u^{\infty} p(\varepsilon) d\varepsilon &= \int_u^{\infty} \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2\delta^2}\right) d\varepsilon + \sqrt{\pi} \chi \int_u^{\infty} \varepsilon \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2}\right) d\varepsilon + \\ &+ \sqrt{\pi} \chi \int_u^{\infty} \varepsilon \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2}\right) \operatorname{erf}(\chi\varepsilon) d\varepsilon \end{aligned} . \tag{7}$$

$$\begin{aligned} \frac{\sqrt{2\pi}}{\delta} \int_u^{\infty} \varphi(\varepsilon) d\varepsilon &= \int_u^{\infty} \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2\delta^2}\right) d\varepsilon - \sqrt{\pi} \chi \int_u^{\infty} \varepsilon \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2}\right) d\varepsilon + \\ &+ \sqrt{\pi} \chi \int_u^{\infty} \varepsilon \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2}\right) \operatorname{erf}(\chi\varepsilon) d\varepsilon \end{aligned} . \tag{8}$$

Підставимо (7) і (8) в (6):

$$\delta_k = \sqrt{2} D \delta \chi \int_u^{\infty} \varepsilon \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2}\right) d\varepsilon . \tag{9}$$

Далі отримуємо:

$$\int_u^{\infty} \varepsilon \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2}\right) d\varepsilon = \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) . \tag{10}$$

При використанні параметру широкополосності  $\alpha$  - безрозмірної фізичної величини, що вираховується за формулою:

$$\alpha = m_0 m_4 / m_2^2 ,$$

наступної формули щільності ймовірності вершин  $D$  :

$$D = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_4}{m_2}}$$

та позначень до формули щільності ймовірності висот виступів профілю, перетворимо множник формули (9):

$$\begin{aligned} \sqrt{2} \delta\chi &= \left( \frac{m_2^2}{m_0 m_4} \right)^{1/2} ; \\ \sqrt{2} D \delta\chi &= \frac{1}{2\pi} \left( \frac{m_2}{m_0} \right)^{1/2} . \end{aligned} \quad (11)$$

Підставивши (10) і (11) в (9), маємо формулу:

$$\delta_k = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{m_2}{m_0} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) . \quad (12)$$

При застосуванні формули ефективного рівня деформації [2] за заданою величиною комплексу умов контактування отримуємо:

$$1 - \exp(-K) - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{u}{\sqrt{2}}\right) = 0 \quad (13)$$

На основі формул (12) та (13) за допомогою програми Kanal [1], написаної з використанням Mathcad Professional, розроблений зв'язок щільності каналів з комплексом умов контактування. Отримані результати були представлені графічно на рис. 1.

Аналіз згідно рис.1 чітко показує, що залежність щільності каналів від комплексу умов контактування носить екстремальний характер. Даний результат експериментально пояснюється впливом процесу злиття плям контакту в процесі навантаження [3]. Максимальна кількість каналів досягається при  $K = 0,69315$  і становить

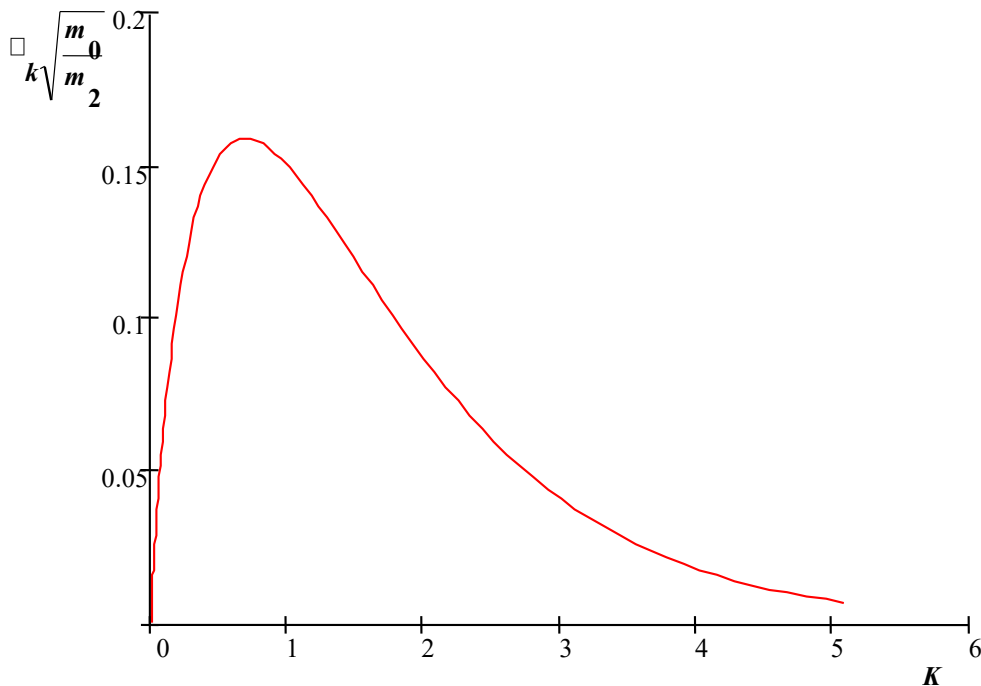


Рис. 1. Залежність щільності каналів контактуючих поверхонь від комплексу умов контактування

$$\delta_{k, \max} = 0,15915 \left( \frac{m_2}{m_0} \right)^{1/2} . \quad (14)$$

Математична залежність, представлена на рис.1, була апроксимована наступною формулою:

$$\delta_k = 0,787 \left( \frac{m_2}{m_0} \right)^{1/2} K^{0,733} \exp \left[ - (K + 0,633)^{1,028} \right] . \quad (15)$$

Формула (15) отримана в результаті розрахунків за програмою Appr\_K [1]

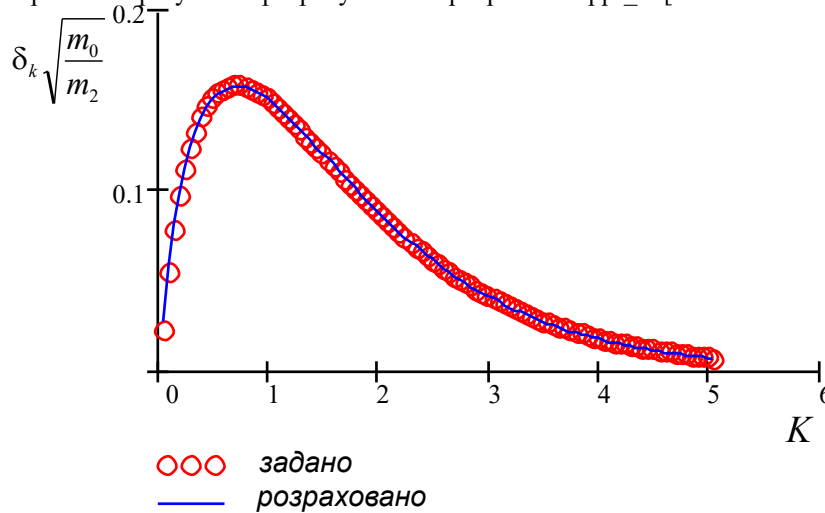


Рис.2. Співставлення заданих та розрахованих значень щільності каналів

На рис.2 проведений аналіз точності заданих (експериментальних) і розрахованих (теоретичних) значень щільності каналів контакту поршневих ущільнень. Під розрахованими потрібно розуміти визначені за формулою (12).

Оскільки задані та розраховані значення майже практично збігаються, то для того, щоб оцінити похибку, на рис.3 представлена залежність різниці заданих та розрахованих значень щільності каналів (вона позначена як  $\delta$ ) від комплексу умов контактування.

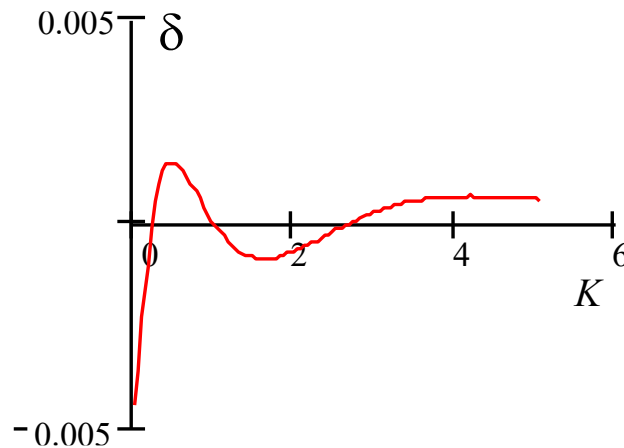


Рис.3. Оцінка похибки, яка виникає при аналізі точності розрахунку щільності каналів контакту поршневих ущільнень

Питома площа поверхні стику, що омивається робочим середовищем, тобто відношення площі поверхні, що омивається середовищем до номінальної площі контакту, розраховується наступним чином:

$$S_K = S_{K,1} + S_{K,2} , \quad (16)$$

де  $S_{K,1}$ ,  $S_{K,2}$  - питомі площі поверхні контактуючих тіл, що омиваються середовищем.

Питома площа гладкої поверхні, що омивається середовищем, рівна:



$$S_{K,1} = 1 - \eta, \quad (17)$$

де  $\eta$  - відносна фактична площа контакту.

Якщо враховуючи до уваги, що розподіл нахилів  $z'$  ділянок шорсткої поверхні, що вступили в контакт, такий же, як і для всієї поверхні, то питома площа шорсткої поверхні, що омивається робочим середовищем, має бути:

$$S_{K,2} = (1 - \eta)S, \quad (18)$$

де  $S$  - питома площа шорсткої поверхні.

Потім отримуємо формулу

$$S_K = (1 - \eta)(1 + S). \quad (19)$$

Враховуючи [3], отримаємо:

$$S_K = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(-\frac{u}{\sqrt{2}}\right)(1 + S), \quad (20)$$

де  $u$  - ефективний рівень деформації.

Назвемо зведеною площею поверхні стику, що омивається середовищем, наступне відношення

$$\tilde{S}_K = S_K / (1 + S). \quad (21)$$

На основі формули (20) отримаємо:

$$\tilde{S}_K = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(-\frac{u}{\sqrt{2}}\right). \quad (22)$$

В той час, як питома площа шорсткої поверхні залежить виключно від спектрального моменту другого порядку, зведена площа поверхні стику, що омивається середовищем, залежить виключно від комплексу умов контактування. Питома площа ж поверхні стику, що омивається середовищем, в відповідності з формулою (20) залежить від обох названих чинників.

За допомогою програми Veruehrung було розраховано зв'язок зведеної площі поверхні стику, що омивається середовищем, з комплексом умов контактування. Отримані результати можна побачити на рис. 4.

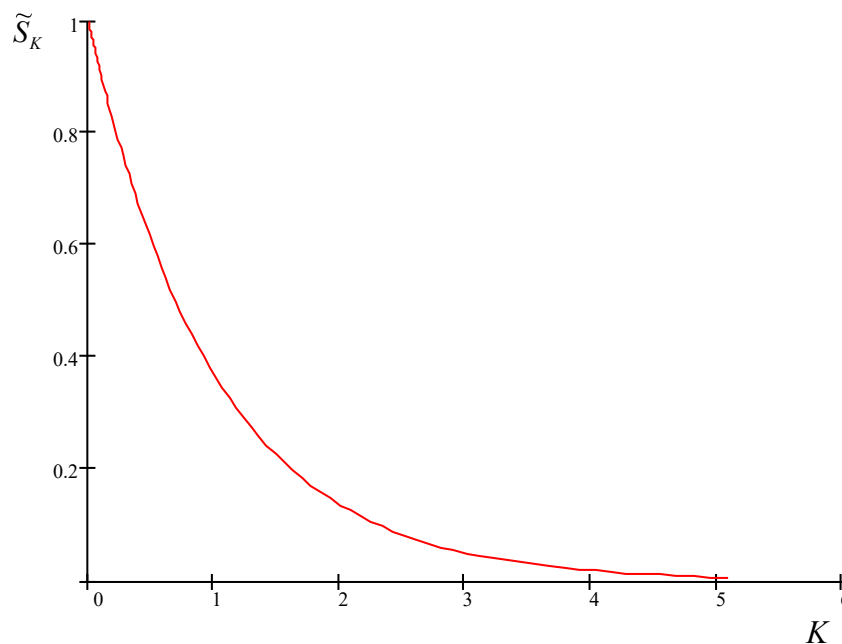


Рис. 4. Залежність питомої площі поверхні стику, що омивається робочим (газовим) середовищем, від комплексу умов контактування

Залежність, представлена на рис. 4, була апроксимована формулою:

$$\tilde{S}_K = \exp(-0,547K^{0,196}) . \tag{23}$$

Формула (23) отримана в результаті розрахунків за програмою Appr\_Sk [1]. Вона якісно і вірно описує поведінку зведеної площі поверхні стику, що омивається середовищем, при зміні номінального навантаження

На рис. 5 проведений аналіз точності заданих (експериментальних) і розрахованих (теоретичних) значень зведеної площі поверхні стику, що омивається середовищем. Під розрахованими значеннями треба розуміти визначені за формулою (23).

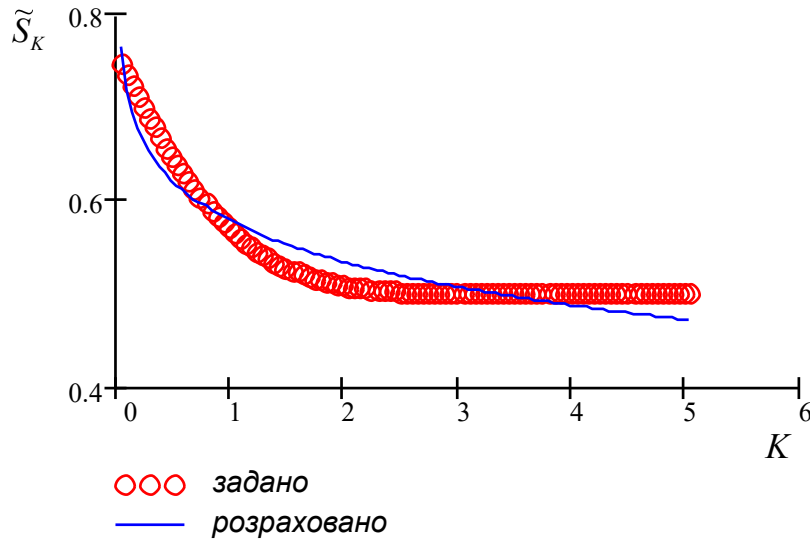


Рис. 5. Співставлення заданих та розрахованих значень зведеної площі поверхні стику, що омивається робочим середовищем

Для того, щоб оцінити похибку, на рис.6 представлена залежність різниці заданих та розрахованих значень зведеної площі поверхні стику, що омивається середовищем, (вона позначена як  $\delta$ ) та процентної розбіжності заданих та розрахованих значень (позначена як  $\Delta$ ) від комплексу умов контактування.

Для питомої площі поверхні стику, що омивається середовищем, отримуємо наступну розрахункову формулу:

$$S_K = \left[ 2 + 10,45 \left( \frac{Ra}{S_m} \right)^{1,643} \right] \exp(-0,547K^{0,196}) . \tag{24}$$

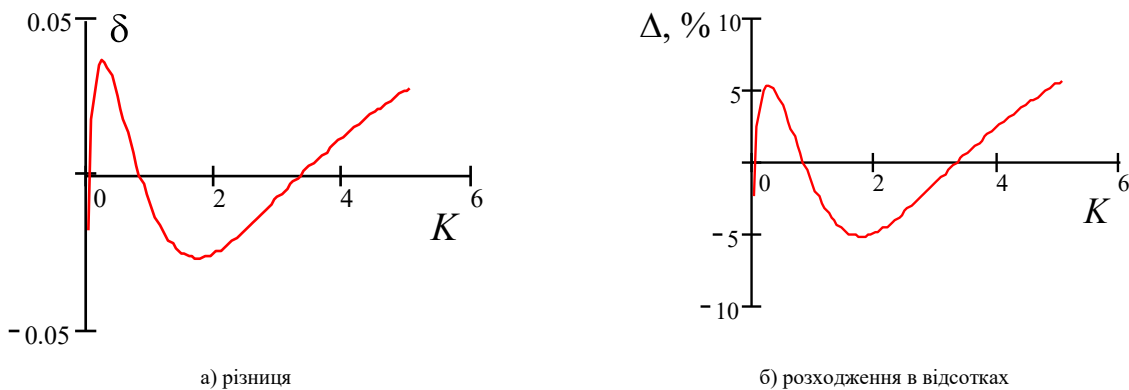


Рис.6. Оцінка похибки, яка виникає при аналізі точності розрахунку зведеної площі поверхні стику, що омивається середовищем

Згідно результатів відповідна похибка зведеної площі поверхні стику, що омивається середовищем, згідно розрахунків, представлених на рис. 4.6, не перевищує 5,5%. Таким чином, значення, розраховані за точною та розрахунковими формулами питомої площі поверхні стику, що омивається середовищем, різнитимуться не більше, ніж на 6,1%.

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

Із використанням моделювання шорстких спряжених поверхонь поршневих ущільнень стохастичним полем було розроблені методи розрахунку щільності каналів та питомої площі поверхні стику, що омивається робочим середовищем, беззмасувальних поршневих ущільнень. Було проведено аналіз точності створених методів розрахунку щільності каналів та зведеної площі поверхні стику, що омивається робочим середовищем, беззмасувальних поршневих ущільнень.

Для визначення щільності каналів виведена точна формула

$$\delta_k = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{m_2}{m_0} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right),$$

де  $m_0, m_2$  - спектральні моменти;

$u$  - ефективний рівень деформації.

На основі точної формули отримана розрахункова інженерна формула:

$$\delta_k = 0,787 \left( \frac{m_2}{m_0} \right)^{1/2} K^{0,733} \exp\left[-(K + 0,633)^{1,028}\right].$$

Значення, розраховані за точною та розрахунковою формулою щільності каналів різняться не більше, ніж на 0,45 відсотків.

Виведена точна формула питомої площі поверхні стику, що омивається середовищем:

$$S_K = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(-\frac{u}{\sqrt{2}}\right) (1 + S),$$

де  $S$  - питома площа шорсткої поверхні.

Досліджена залежність зведеної площі поверхні стику, що омивається середовищем, від комплексу умов контактування. Зведеною площею поверхні стику, що омивається середовищем, названо відношення  $\tilde{S}_K = S_K / (1 + S)$ .

$$S_K = \left[ 2 + 10,45 \left( \frac{Ra}{S_m} \right)^{1,643} \right] \exp(-0,547K^{0,196}).$$

Значення, розраховані за точною та розрахунковою формулою питомої площі поверхні стику, що омивається середовищем, різняться не більше, ніж на 6,1%.

**Література**

1. Тимошук О.Г. Розробка методів розрахунку та експериментального дослідження герметичності беззмасувальних циліндро-поршневих ущільнень: Дис. ... канд. техн. наук. - Хмельницький, 2003. - 386 с.
2. Evaluation of accuracy of the method of calculation of the effective level of deformation of contacting surfaces of cylinder-piston seals, Tymoshchuk O. Actual problems of modern science. Monograph: edited by Matiukh S., Skyba M., Musial J., Polishchuk O. – Bydgoszcz University of Science and Technology, Poland, KhNU – 2021. – p. 425-431.
3. Семенюк Н.Ф., Сиренко Г.А. Описание топографии анизотропных шероховатых поверхностей трения с помощью модели случайного поля. Полная кривизна, главные кривизны и отношение главных кривизн в вершинах микронеровностей. Удельная площадь гауссовской поверхности и удельный объем зазора // Трение и износ. - 1980. - № 5. - С. 815 - 823.

**References**

1. Tymoshchuk O. Development of methods for calculation and experimental study of the tightness of non-lubricating cylinder-piston seals: Dis. ... Cand. tech. Science. - Khmelnytsky, 2003. - 386 p.
2. Evaluation of accuracy of the method of calculation of the effective level of deformation of contacting surfaces of cylinder-piston seals, Tymoshchuk O. Actual problems of modern science. Monograph: edited by Matiukh S., Skyba M., Musial J., Polishchuk O. – Bydgoszcz University of Science and Technology, Poland, KhNU – 2021. – p. 425-431.
3. Semeniyuk N.F., Sirenko G.A. Description of the topography of anisotropic rough friction surfaces using a random field model. Total curvature, principal curvatures, and ratio of principal curvatures at the vertices of microroughnesses. Specific area of the Gaussian surface and the specific volume of the gap // Friction and wear. - 1980. - № 5. - P. 815 - 823.

Валентин БАГАЦЬКИЙ

Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова НАНУ України  
[Bagatskiy@nas.gov.ua](mailto:Bagatskiy@nas.gov.ua)

Максим ОБЕРТЮХ

Вінницький національний технічний університет

Сергій ЗАХАРЧЕНКО

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3977-2908>

## ВИСОКОПРОДУКТИВНІ АЦП КОМБІНОВАНОГО ВРІВНОВАЖЕННЯ

У теперішній час аналого-цифрові перетворювачі використовуються в обчислювальних і керуючих системах, що значно поширилися в епоху цифрової революції. Підвищення точності, швидкодії, енергоефективності, надійності аналого-цифрових перетворювачів є надзвичайно важливим. Одними з найбільш класичних типів аналого-цифрових перетворювачів є АЦП послідовного наближення та слідувального типу. Час перетворення АЦП слідувального типу є змінним і визначається різницею між двома відліками вхідної напруги. Тому комбінування слідувального підходу та методу послідовного наближення в разі різких стрибків вхідного сигналу дозволяє значно покращити характеристики перетворення. Також значні переваги має використання надлишкових систем числення для ваг розрядів АЦП, що дозволяє значно підвищити лінійність характеристики перетворення. Розглянуто методи побудови АЦП, працюючих за принципом послідовного наближення та аналого-цифрових перетворювачів, алгоритм роботи яких є слідувальним. Запропоновано метод побудови АЦП комбінованого типу, який поєднує слідувальний алгоритм перетворення та алгоритм послідовного наближення, що дозволяє покращити характеристику перетворення АЦП. Доведено доцільність використання в АЦП комбінованого типу надлишкових позиційних систем числення. Проаналізовано властивість надлишкових позиційних систем числення (НПСЧ), що притаманна їм за умови відхилення реальних ваг розрядів від їхніх теоретичних значень, – забезпечувати відсутність "розривів" у перетворювальній характеристиці, а також здатність виконувати процедуру самокалібрування ваг розрядів АЦП, тим самим значно покращуючи лінійність перетворювальної характеристики. Вказано, що навіть за подовження розрядної сітки для АЦП, побудованих на базі надлишкових позиційних систем числення, не відбувається зменшення їх швидкодії.

Ключові слова: комбіноване врівноваження, вагова надлишковість, АЦП.

Valentine BAHATSKYI

V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the National Academy of Sciences of Ukraine

Maxim OBERTYUKH

Vinnytsia National Technical University

Serhii ZAKHARCHENKO

Vinnytsia National Technical University

## HIGHLY-PRODUCTIVE ADC WITH COMBINED BALANCING

Today analog-to-digital converters are used in computing and control systems which have greatly expanded in the era of the digital revolution. Increasing the accuracy, speed, energy efficiency, and reliability of analog-to-digital converters is extremely important. One of the most classic types of analog-to-digital converters is the sequential approximation and tracking type ADCs. The conversion time of the tracking type ADC is variable and is determined by the difference between the two readings of the input voltage. Therefore, combining the tracking approach and the method of successive approximation in the case of sharp jumps in the input signal allows you to significantly improve the conversion characteristic. Also the use of redundant counting systems for the weights of the ADC digits has significant advantages, which makes it possible to significantly increase the linearity of the conversion characteristic. The methods of construction of ADCs working on the principle of successive approximation and analog-digital converters whose operation algorithm is tracking are considered. A method of constructing a combined type ADC is proposed, which combines a follow-up conversion algorithm and a sequential approximation algorithm, which allows to improve the characteristics of ADC conversion. The expediency of using a combined type of redundant positional counting systems in ADCs has been proven. The analyzed property of redundant positional counting systems, which is inherent in them when the real weights of the digits deviate from their theoretical values, ensures the absence of "gaps" in the conversion characteristic, as well as the ability to perform the procedure of self-calibration of the weights of the ADC digits, thereby significantly improving the linearity of the conversion characteristic. It is indicated that even with the lengthening of the bit grid for ADCs built on the basis of redundant positional counting systems, their performance does not decrease.

Key words: combined balancing, weight redundancy, ADC.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

Аналого-цифрові перетворювачі та цифроаналогові перетворювачі утворюють клас перетворювачів форми інформації, вони використовуються в різних сферах людської діяльності. До характеристик перетворювачів форми інформації висуваються серйозні вимоги – основні це точність і швидкодія. Залежно від потрібної швидкодії і точності використовуються різні підходи щодо побудови аналого-цифрових та цифроаналогових перетворювачів. Також визначену нішу посідають дослідження, пов'язані з вирішенням проблем комплексного підвищення як точності, так і швидкодії шляхом уведення в пристрої, що проєктуються, надлишковості у формі надлишкових позиційних систем числення.

### Аналіз досліджень та публікацій

АЦП слідкувального типу мають джерелами статичних та динамічних похибок відхилення параметрів аналогових елементів від своїх номінальних значень (параметрів ЦАП, підсилювачів, буферів тощо). Це пов'язано з впливом та зміною параметрів навколишнього середовища, старінням елементів та вузлів ЦАП, обмеженнями та недосконалістю технології виготовлення тощо [1–3]. Час перетворення АЦП цього типу є змінним і визначається різницею між двома відліками вхідної напруги. Це означає, що АЦП даного типу придатні до роботи з постійними чи повільно змінюваними напругами, які під час перетворення змінюються не більше, ніж на значення кванта перетворення. Тому комбінування слідкувального перетворення з перетворенням методом послідовного наближення в разі різких стрибків вхідного сигналу, дозволяє значно покращити характеристику перетворення. В теперішній час в АЦП широко використовують різноманітні методи калібрування та коригування (у тому числі для підвищення лінійності характеристики перетворення) [4-6]. Відомо, що побудова багаторозрядних АЦП (в тому числі слідкувального типу) із використанням принципів вагової надлишковості та використанні самокалібрування дозволяє значно підвищити точність такого перетворювача. Тому забезпечення підвищеної швидкодії та більш широких функціональних можливостей за рахунок використання АЦП комбінованого типу, а також точності за рахунок застосування вагової надлишковості є важливою та актуальною задачею.

### Формулювання цілей статті

**Метою роботи є:** створення висопродуктивного цифроаналогового перетворювача з ваговою надлишковістю на неточних компонентах комбінованого типу.

### Постановка завдання

1. Проаналізувати існуючі методи побудови аналого-цифрових перетворювачів послідовного наближення та слідкувального типу.
2. Запропонувати методи побудови та алгоритм функціонування аналого-цифрового перетворювача комбінованого типу.
3. Проаналізувати методи використання надлишковості в аналого-цифрових перетворювачах комбінованого типу.

### Виклад основного матеріалу

Базова схема АЦП слідкувального типу зображена на рис. 1 а).

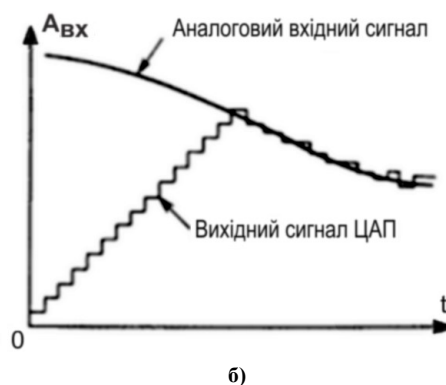
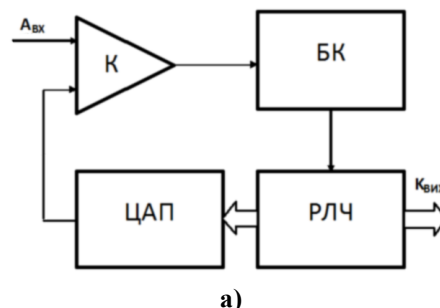


Рис. 1. АЦП слідкувального типу: а) схема АЦП слідкувального типу, б) характеристика перетворення АЦП слідкувального типу

Вона містить реверсивний лічильник (РЛЧ), код якого є вихідним кодом АЦП і також надходить на допоміжний ЦАП. Вхідний сигнал порівнюється з сигналом який формується на допоміжному ЦАП на компараторі (К). Сигнал з виходу компаратора надходить в блок керування (БК), який керує напрямом лічби реверсивного лічильника, таким чином, що код на лічильнику постійно збільшується чи зменшується так, щоб досягти якнайменшої різниці сигналу із допоміжного ЦАП та вхідного сигналу. Коли різниця сигналів на вході та виході допоміжного ЦАП стає меншою, ніж молодший значущий розряд, код лічильника можна зчитувати як вихідний цифровий сигнал АЦП. АЦП цього типу мають високу роздільну здатність, але час

перетворення залежить від вхідного сигналу, вони добре відслідковують сигнал, що не дуже швидко змінюється. Максимальний час перетворення дорівнює:

$$T_{max} = \frac{2^n}{f_c}, \tag{1}$$

де  $n$  – розрядність АЦП,  $f_c$  – частота тактового генератора лічильника.

На рис. 1 б) зображена типова характеристика перетворення АЦП слідкувального типу. АЦП слідкувального типу зазвичай є добрим вибором для оцифрування сигналів навколишнього світу, так як більшість сигналів у фізичних системах змінюються відносно плавно.

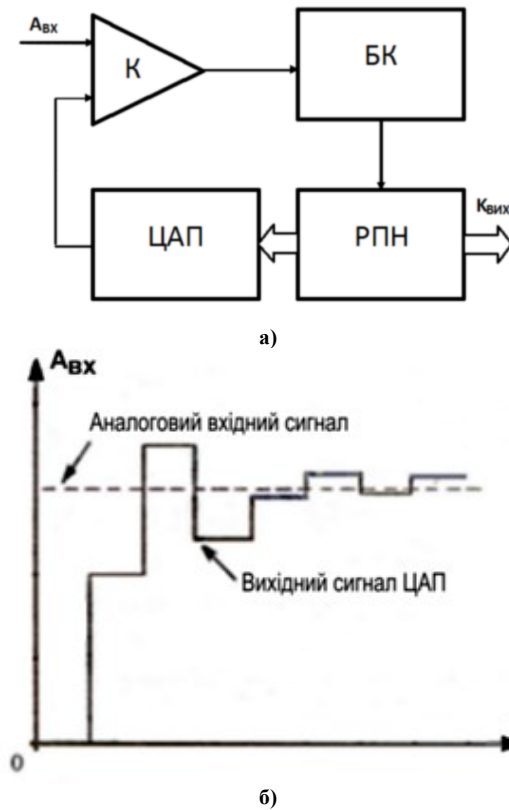


Рис. 2. АЦП послідовного наближення: а) схема АЦП послідовного наближення, б) характеристика перетворення АЦП послідовного наближення

Базову схему АЦП слідкувального типу зображено на рис. 2 а), і в загальному вигляді вона подібна до попередньої схеми АЦП слідкувального типу.

АЦП послідовного наближення або АЦП з порозрядним врівноваженням містить компаратор (К), допоміжний ЦАП та регістр послідовного наближення (РПН), код якого є вихідним кодом АЦП і також надходить на допоміжний ЦАП. АЦП перетворює аналоговий сигнал на цифровий за  $n$  кроків, де  $n$  – розрядність АЦП. На кожному кроці визначається по одному біту шуканого цифрового значення, починаючи від старшого значущого розряду і закінчуючи молодшим. Послідовність дій щодо визначення чергового біта полягає в такому. На допоміжному ЦАП виставляється аналогове значення, утворене з бітів, які вже визначені на попередніх кроках; біт, який має бути визначений на цьому кроці, виставляється в 1, молодші біти встановлені в 0. Отримане на допоміжному ЦАП значення порівнюється з вхідним аналоговим значенням. Якщо значення вхідного сигналу більше значення на допоміжному ЦАП, то біт, що визначається, отримує значення 1, в іншому випадку 0. Таким чином, визначення підсумкового цифрового значення нагадує двійковий пошук. На рис. 2 б) зображена типова характеристика перетворення АЦП послідовного наближення. АЦП послідовного наближення мають високу швидкість і роздільну здатність.

Запропоновано реалізувати АЦП який би міг виконувати обидва вищезазначені методи аналого-цифрового врівноваження залежно від потреби. Загальна структура схеми буде подібною до вищеповисаних схем АЦП слідкувального типу та послідовного врівноваження, алгоритм його роботи зображено на рис. 3 та полягає у такому.

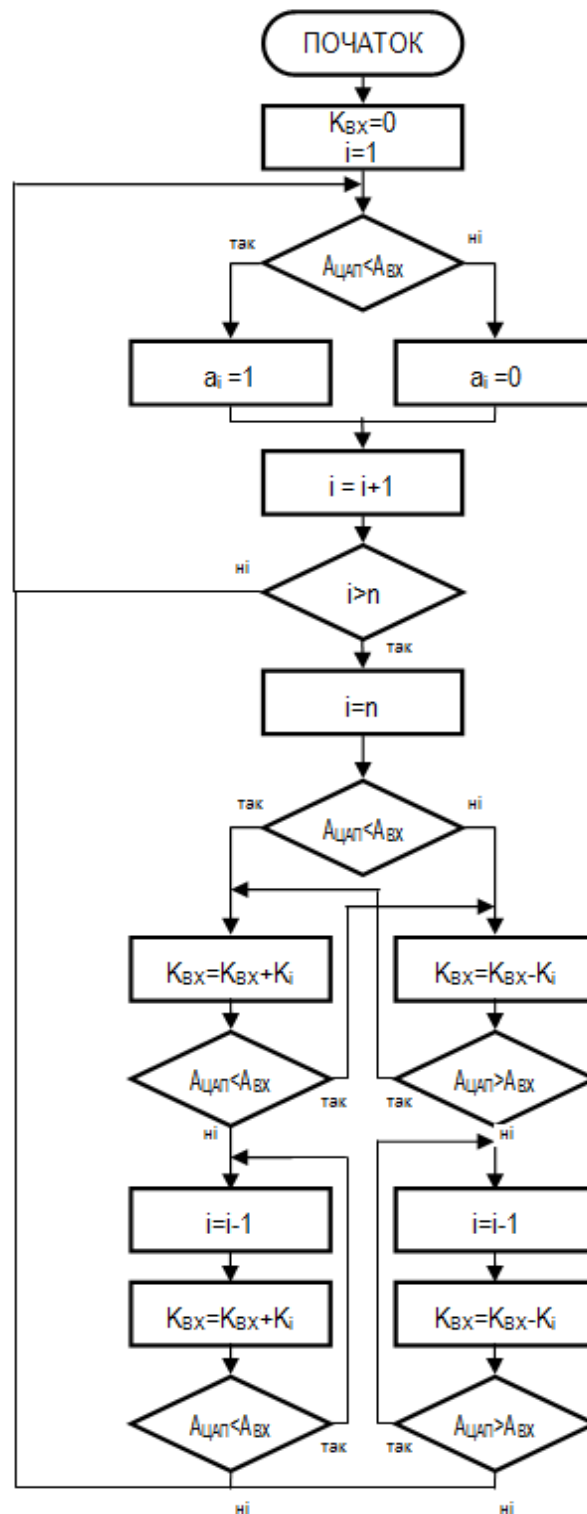


Рис. 3. Алгоритм роботи АЦП комбінованого врівноваження

На початковому етапі АЦП реалізує алгоритм послідовного наближення, чим досягається швидке початкове перетворення та перехід у робочий режим. Після його завершення система переходить до реалізації алгоритму стеження за вхідним сигналом, причому реверсивний лічильник збільшує або зменшує своє значення на одиницю молодшого розряду ( $n$ ) значення. Якщо в режимі спостереження протягом кількох тактів не відбувається зміна сигналу на виході компаратора (вхідний сигнал змінюється занадто швидко), то реверсивний лічильник починає збільшувати або зменшувати своє значення на одиницю більш старшого розряду ( $n-1$ ), якщо знову протягом декількох тактів (1-3) не відбувається зміна сигналу на виході компаратора, то реверсивний лічильник починає збільшувати або зменшувати своє значення на одиницю ще старшого розряду ( $n-2$ ) і т. п., поки не відбудеться зміна сигналу на виході компаратора, після чого АЦП переходить до реалізації алгоритму послідовного наближення, після завершення якого повертається в режим слідкування.

Подібний алгоритм дозволяє аналого-цифровому перетворювачу швидко входити в робочий стан на початку роботи та швидко повертатися в робочий стан при стрибках вхідного сигналу. Побудова АЦП комбінованого типу дозволяє покращити характеристику перетворення.

У Вінницькому національному технічному університеті в науковій школі Азарова О. Д. широко досліджуються методи використання вагової надлишковості при АЦ- та ЦА-перетворенні [4-8]. У НПСЧ використовується основа системи числення  $1 < \alpha < 2$ , а ваги розрядів визначаються виразом:

$$Q_i = q \cdot \alpha^i, \tag{2}$$

де  $q$  – вага молодшого розряду.

Будь-яке дійсне число може бути зображене в НПСЧ таким чином:

$$X = \sum_{i=0}^n a_i \cdot q \cdot \alpha^i, \tag{3}$$

де  $a_i = \overline{0, 1}$  – двійковий  $i$ -ий біт  $n$ -розрядного результату перетворення.

Поняття вагова надлишковість асоціюється в першу чергу з наявністю надлишкового співвідношення між вагами розрядів. Основною ознакою цього є перевищення суми ваг молодших розрядів над сусіднім старшим, тобто:

$$\sum_{j=0}^{i-1} Q_j > Q_i. \tag{4}$$

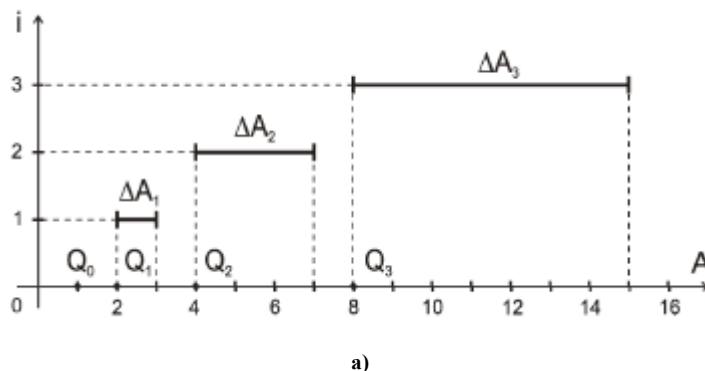
Головна перевага НПСЧ, при використанні в аналого-цифровому перетворенні складається у відсутності "розривів" у характеристиці перетворення, що виникають при відхиленні реальних ваг розрядів від їхніх розрахункових значень, рис. 4. Для АЦП, що використовують «двійкові» ваги розрядів ці відхилення не повинні перевищувати половини молодшого розряду. Для АЦП на основі НПСЧ відносна похибка ваг розряду може становити десятків процентів, і пропусків кодів не буде.

Як видно з викладеного, у САЦП на основі НПСЧ надлишковість виявляється тільки у співвідношенні між вагами розрядів ЦАП. Проте, теоретично обґрунтована, підтверджена результатами моделювання й практично перевірена в численних розробках [5, 6] здатність САЦП істотно коригувати вихідні похибки ЦАП. Причому, самокалібрування може бути проведено в будь-який момент часу роботи САЦП, наприклад, за умови змінення температури навколишнього середовища.

Число розрядів  $n_\alpha$ , задіяних у надлишковому ЦАП, природно, більше ніж у двійковому  $n_2$  й визначається зі співвідношення:

$$\alpha^{n_\alpha} = 2^{n_2} \Rightarrow n_\alpha = n_2 = n_2 \cdot \log_\alpha 2. \tag{5}$$

Так, для побудови АЦП 16-ти розрядної точності ( $n_2=16$ ) при  $\alpha=1,618$  потрібен ЦАП на  $n_\alpha=24$  розряду коду "золотої пропорції". Незважаючи на збільшення розрядної сітки, швидкодія АЦП на основі НПСЧ не зменшується, а навпаки, може бути істотно збільшена. Зазначений ефект виникає внаслідок витрати частини надмірності ваг розрядів на автокомпенсацію динамічних похибок із сигналу, що компенсує [5, 6].





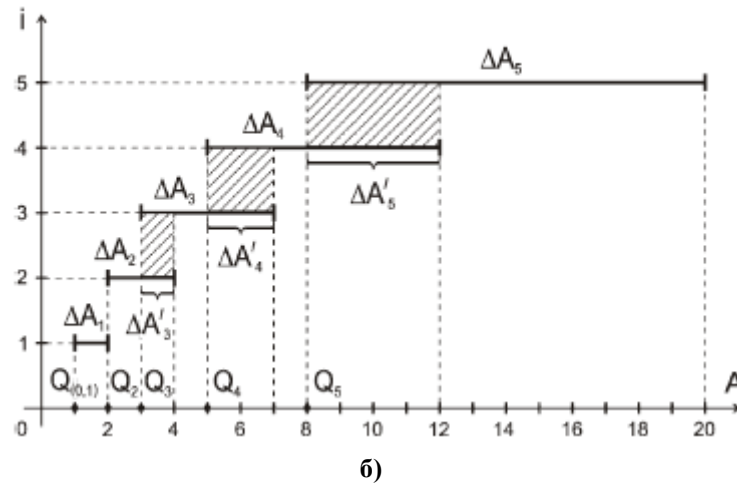


Рис. 4. Характеристики перетворення АЦП для різних систем числення: а) двійкова  $\alpha=2$ ; б) надлишкова  $\alpha=1,6$

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

1. Проаналізовано недоліки та переваги існуючих методів побудови аналого-цифрових перетворювачів послідовного наближення та слідувального типу, що уможливило їх конструктивне використання шляхом створення АЦП комбінованого типу, що має підвищену продуктивність.

2. Запропоновано метод побудови та алгоритм функціонування аналого-цифрового перетворювача комбінованого типу.

3. Проаналізовано методи використання надлишковості в аналого-цифрових перетворювачах комбінованого типу, що дозволяє покращити лінійність характеристики перетворення.

### Література

1. Alan B. Grebene, Bipolar and MOS analog integrated circuit design – Wiley-Interscience, 2002. – 894 p.
2. W. Kester, Data Conversion Handbook. – USA: Newnes, 2005. – 953 p.
3. Eugene R. Hnatek, A User's Handbook of Digital to Analogue and Analogue to Digital Converters Hardcover. – John Wiley & Sons Inc, 1976. – 488 p.
4. Stakhov AP. Algorithmic Measurement Theory: a General Approach to Number Systems and Computer Arithmetic // The International journal "Control Systems and Computers". – № 4–5. – 1994. – Рр. 10 – 31.
5. Азаров О. Д. Аналого-цифрове порозрядне перетворення на основі надлишкових систем числення з ваговою надлишковістю : монографія. – УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010. – 232 с.
6. Азаров О. Д. Аналого-цифрові пристрої систем, що самокоригуються, для вимірювань і оброблення низькочастотних сигналів : монографія / О.Д. Азаров, Л.В. Крупельницький. – УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 167 с.
7. A. D. Azarov, Selection of the calculus system base for ADC and DAC with weight redundancy / A. D. Azarov, S. A. Kyrylashchuk, S. V. Bogomolov, O. Y. Stakhov, A. Kotyra, and O. Mamyrbayev // Proceedings of SPIE 0277-786X. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry and High-Energy Physics Experiments, – 2019. – vol. 11176, Nov., pp. 1809 - 1815, doi:10.1117/12.2537197.
8. Азаров О. Д., АЦП порозряднослідувального врівноваження з ваговою надлишковістю / О. Д. Азаров, О. І. Черняк, та О. Я. Стахов // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – В. ВНТУ, 2020. – № 3(49). – С.37-44. – DOI:10.31649/1999-9941-2020-49-3-37-44.

### References

1. Alan B. Grebene Bipolar and MOS analog integrated circuit design – Wiley-Interscience 2002. – 894 p.
2. W. Kester, Data Conversion Handbook. –USA:, Newnes, – 2005. – 953 p.
3. Hnatek Yu.R. Spravochnik po cifroanalogovym i analogocifrovym preobrazovatelyam: Per. s angl./ Pod red. Yu.A. Ryuzhina. – М.: Radio i svyaz, 1982. – 552 s., il.
4. Stakhov A.P. Vvedenie v algoritmicheskuyu teoriyu izmereniya. –М., "Sov. Radio", 1977, – 288 s.
5. Azarov O. D. Analoho-tsyfrove porozriadne peretvorennia na osnovi nadlyshkovykh system chyslennia z vahovoiu nadlyshkovistiu : monohrafiia. – UNIVERSUM-Vinnitsia, 2010. – 232 s.
6. Azarov O. D. Analoho-tsyfrovi prystroi sistem, shcho samokoryhuiutsia, dia vymiriuvan i obrobliannia nyzkochastotnykh syhnaliv : monohrafiia / O.D. Azarov, L.V. Krupelnitskyi. – UNIVERSUM-Vinnitsia, 2005. – 167 s.
7. A. D. Azarov, Selection of the calculus system base for ADC and DAC with weight redundancy / A. D. Azarov, S. A. Kyrylashchuk, S. V. Bogomolov, O. Y. Stakhov, A. Kotyra, and O. Mamyrbayev // Proceedings of SPIE 0277-786X. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry and High-Energy Physics Experiments, – 2019. – vol. 11176, Nov., pp. 1809 - 1815, doi:10.1117/12.2537197.
8. Azarov O. D., ATSP porozriadnoslidkuvalnogo vrvnovazhennia z vahovoiu nadlyshkovistiu / O. D. Azarov, O. I. Cherniak, ta O. Ya. Stakhov // Informatsiini tekhnologii ta kompiuterna inzheneriia. – V. VNTU, 2020. – № 3(49). – S.37-44. – DOI:10.31649/1999-9941-2020-49-3-37-44.

[https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6\(2\)-138-146](https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6(2)-138-146)

УДК: 621.317.77

Дмитро КВАШУК

Національний авіаційний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4591-8881>

[dmytro.kvashuk@npp.nau.edu.ua](mailto:dmytro.kvashuk@npp.nau.edu.ua)

Олеся ЯЩУК

Національний авіаційний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3137-9562>

[olesia.yashchuk@npp.nau.edu.ua](mailto:olesia.yashchuk@npp.nau.edu.ua)

## АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ОБЕРТАЛЬНОГО МОМЕНТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕПРЯМИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ

У статті досліджуються алгоритми визначення обертальних параметрів електродвигунів з використанням непрямих методів вимірювання. Проведено аналіз характеристик електродвигунів за їх за енергетичними даними. Визначено можливості вимірювання на основі функціональної залежності обертального моменту від потужності електродвигуна та швидкості обертання його валу. Досліджено характеристики складових потужності та наведено результати їх моделювання. Здійснено аналіз методів визначення кутової швидкості та кутового прискорення валу електродвигуна та досліджено роль цих параметрів під час визначення обертального моменту. Запропоновано двоканальну інформаційно-вимірювальну систему мережевого типу, яка дозволяє здійснювати збір даних, та їх візуалізацію, де один канал використовується для вимірювання потужності, інший для вимірювання швидкості обертання валу.

Ключові слова: обертальний момент, кутова швидкість, електродвигун, вимірювальна система, дані, методи вимірювання, сенсори.

Dmytro KVASHUK, Olesia YASHCHUK

National Aviation University

## ALGORITHM FOR DETERMINING THE TORQUE OF ELECTRIC MOTORS USING INDIRECT MEASUREMENT METHODS

Indirect torque measurement methods can be performed in a variety of ways, depending on the specific situation and available tools. One such way is to measure the displacement, or speed of rotation of the shaft and use this information to calculate the moment using the moment of inertia equation. For this, it is necessary to know the moment of inertia and the angular acceleration, which can be measured using a gyroscope or accelerometer. Another way is to measure the voltage and current in the electrical circuit connecting the motor and the power source by determining the power of the electric motor.

However, indirect methods of measuring torques of electric motors are based on the measurement of other physical parameters that correlate with torque, such as current, voltage, rotation frequency, etc. These methods are often used because of their cost-effectiveness and ease of implementation, but they have some drawbacks. In particular: indirect methods are usually less accurate than direct methods because they depend on mathematical models and correlations between different parameters, which may be imprecise or incomplete; parameters that are measured by indirect methods may be influenced by external factors, which may affect the accuracy of measurements; calibration of devices is usually carried out in laboratory conditions, so the results may not reflect real operating conditions; the mathematical models used to determine the torque may be non-linear. This can lead to errors in measurements, especially at high or low torque values; indirect methods do not provide direct feedback about the real torque, which can lead to delays in process regulation and control. This can be critical for some applications where fast and accurate torque control is essential; indirect methods may be less efficient or unsuitable for some types of electric motors or applications. For example, when using high-frequency or multiphase motors, indirect methods may not provide sufficient accuracy or stability of measurements.

The article examines algorithms for determining the rotational parameters of electric motors using indirect measurement methods. An analysis of the characteristics of electric motors according to their energy data was carried out. The measurement possibilities are determined based on the functional dependence of the torque on the power of the electric motor and the speed of rotation of its shaft. The characteristics of the power components are studied and the results of their simulation are given. An analysis of the methods of determining the angular velocity and angular acceleration of the electric motor shaft was carried out, and the role of these parameters in the determination of the torque was investigated. A two-channel network-type information and measurement system is proposed, which allows data collection and their visualization, where one channel is used to measure power, the other to measure shaft rotation speed.

Key words: torque, angular velocity, electric motor, measurement system, data, measurement methods, sensors.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

Непрямі методи вимірювання обертального моменту можуть здійснюватися різними способами, залежно від конкретної ситуації та доступних інструментів.

Один з таких способів - це вимірювання переміщення, або швидкості обертання валу і використання цієї інформації для розрахунку моменту за допомогою рівняння моменту інерції. Для цього необхідно знати момент інерції та кутове прискорення, яке може бути виміряне за допомогою гіроскопа, або акселерометра. Інший спосіб - це вимірювання напруги та струму в електричному ланцюзі, що з'єднує двигун і джерело живлення шляхом визначення потужності електродвигуна.

Разом з тим, непрямі методи вимірювання обертальних моментів електродвигунів базуються на вимірюванні інших фізичних параметрів, які корелюють з обертальним моментом, такі як струм, напруга, частота обертання, тощо. Ці методи часто використовуються через їхню економічність та зручність

реалізації, але вони мають деякі недоліки. Зокрема: непрямі методи зазвичай менш точні, ніж прямі, оскільки вони залежать від математичних моделей та кореляцій між різними параметрами, які можуть бути неточними або неповними; параметри, які вимірюються непрямими методами, можуть бути під впливом зовнішніх факторів, що може вплинути на точність вимірювань; калібрування приладів, зазвичай проводиться в лабораторних умовах, тому результати можуть не відображати реальних умов експлуатації; математичні моделі, які використовуються для визначення обертового моменту, можуть бути нелінійними. Це може призвести до помилок у вимірюваннях, особливо при високих, або низьких значеннях моменту; непрямі методи не дають безпосереднього зворотного зв'язку про реальний обертовий момент, що може призвести до затримок у регуляції та контролі процесу. Це може бути критичним для деяких застосувань, де швидкий та точний контроль обертового моменту є важливим; непрямі методи можуть бути менш ефективними, або непридатними для деяких типів електродвигунів, або застосувань. Наприклад, при використанні високочастотних або багатофазних двигунів, непрямі методи можуть не забезпечити достатню точність, або стабільність вимірювань.

Тому, з метою вдосконалення непрямих методів вимірювання обертових моментів електродвигунів необхідно враховувати не визначені параметри та шляхи їх компенсації прогнозними значеннями. Для цього ефективними є, як методи статистичних досліджень, так і методи машинного навчання із використанням нечіткої логіки та нейронних мереж.

### Аналіз досліджень та публікацій

Переважає більшість досліджень, які пов'язані із вимірюваннями обертових параметрів електродвигунів, зокрема вимірюванням кутової швидкості, кутового прискорення, моменту сили, частково враховують непрямі методи [1, 2, 3, 4, 5]. Основні параметри, що дозволяють визначити момент, це потужність та швидкість обертання валу:

$$M = F(P, \nu) = \frac{\Delta P}{\Delta \nu} k, \quad (1)$$

де  $P$  – потужність;  $\nu$  – швидкість обертання ротора,  $k$  – коефіцієнт передачі вимірювального каналу.

В даному випадку застосовують два вимірювальні канали: канал вимірювання потужності електродвигуна  $P$  і канал вимірювання швидкості обертання валу  $\nu$ .

Для отримання інформації про потужність електродвигуна доцільно перемножувати вихідні величини пристроїв знімання інформації споживаного струму та напруги електроприводу, щоб виключити фазні похибки вимірювання первинної мережі. Оскільки пристрої знімання інформації характеризуються інерційними властивостями, їх динамічні залежності визначаються рівняннями виду [6]:

$$\begin{aligned} T_1 \frac{dU_1'}{dt} + U_1' &= KU(t) \\ T_2 \frac{dU_1''}{dt} + U_1'' &= KI(t) \end{aligned}, \quad (2)$$

де  $T_1$  – постійна часу датчика струму;  $U_1'$  – вихідна величина перетворювача струму;  $U_1''$  – вихідна величина перетворювача напруги;  $T_2$  – постійна часу датчика напруги;  $K$  – коефіцієнт перетворення датчиків.

За умов, що передатні функції обох сенсорів рівні між собою:

$$W_I(P) = \frac{K}{T_2 P + 1}, \quad W_U(P) = \frac{K}{T_1 P + 1} \quad \text{та враховуючи, що згідно закону Ома: } P = UI, \text{ передатну}$$

функцію даної вимірювальної структури можна представити наступним чином:

$$W_{BC}(\rho) = W_I(\rho) \cdot W_U(\rho) = \frac{K}{(T_1 \rho + 1)(T_2 \rho + 1)} = \frac{K}{T_1 T_2 \rho^2 + (T_1 + T_2) \rho + 1}, \quad (3)$$

тоді рівняння динаміки вимірювання каналу потужності буде мати наступний вигляд:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 U_1}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dU_1}{dt} + U_1 = K^2 \rho, \quad (4)$$

$$\text{де } U_1(t) = U_1'(t) + U_1''(t).$$

Швидкість обертання валу, можна представити наступним виразом:

$$T_3 \frac{dU_2}{dt} + U_2 = Kw(t), \tag{5}$$

де  $U_2 = U_2' - U_2''$  - вихідний параметр для вимірювання швидкості обертання валу;  $T_3$  - постійна часу даного параметру.

Тоді вираз (1) буде мати наступний вигляд:

$$M = F(P, \nu) = \frac{\Delta P}{\Delta \nu} k = \frac{U_1(t)}{U_2(t)}, \tag{6}$$

Для створення алгоритму непрямих вимірювань обертальних моментів електродвигунів, можна скласти наступну систему рівнянь:

$$\begin{aligned} T_1 dU_1' + U_1' &= KU(t), \\ T_2 \frac{dU_1''}{dt} + U_2'' &= KI(t), \\ U_1(t) &= U_1'(t) - U_1''(t), \\ T_3 \frac{dU_2}{dt} + U_2 &= Kw(t), \\ U_2 &= U_2'(t) - U_2''(t), \\ M(t) &= \frac{U_1(t)}{U_2(t)}. \end{aligned} \tag{7}$$

враховуючи те, що праві частини рівнянь визначаються вихідними параметрами перетворювачів швидкості, напруги та струму, зазначену систему рівнянь можна записати у вигляді кінцевих різниць:

$$\begin{aligned} T_1 \frac{U_{i+1}' - U_i'}{\tau} + U_i' &= K_i \rho_i, \\ T_2 \frac{V_{i+1}' - V_i'}{\tau} + V_i' &= K \rho_i, \end{aligned} \tag{8}$$

за умов, якщо:  $U = U_1', V = U_1''$ .

$$\begin{aligned} U_{i+1}' + \frac{1}{T_1}(\tau - 1)U_i' &= \frac{\tau}{T_1} K \rho_i, \\ V_{i+1}' + \frac{1}{T_2}(\tau - 1)V_i' &= \frac{\tau}{T_2} K \rho_i n, \end{aligned} \tag{9}$$

$$U_1(t_1) = U_1' - U_1''.$$

В такому випадку, для кожного кроку дискретизації, можна записати такі вирази:

$$i = 0 \left\{ \begin{aligned} U_1' &= \frac{1}{T_1}(1 - \tau)U_0'' + \frac{\tau}{T_1} K \rho_0 \\ U_1'' &= \frac{1}{T_2}(1 - \tau)U_0'' + \frac{\tau}{T_2} K \rho_0 \end{aligned} \right., \tag{10}$$

$$i = 1 \left\{ \begin{aligned} U_2' &= \frac{1}{T_1}(\tau - 1)U_1' + \frac{\tau}{T_1} K \rho_1 \\ U_2'' &= \frac{1}{T_2}(\tau - 1)U_1'' + \frac{\tau}{T_2} K \rho_1 \end{aligned} \right., \tag{11}$$

$$i = n \left\{ \begin{aligned} U'_n &= \frac{1}{T_1}(\tau - 1)U'_{n-1} + \frac{\tau}{T_1}K\rho_{n-1} \\ U''_n &= \frac{1}{T_2}(\tau - 1)U''_{n-1} + \frac{\tau}{T_2}K\rho_{n-1} \end{aligned} \right. , \tag{12}$$

$$U_1(t_1) = U'_1 - U''_1; U_2(t_1) = U'_2 - U''_2. \tag{13}$$

де  $\tau$  - період дискретизації (в часі);  $T_1, T_2$  - постійні часу;  $K$  - коефіцієнти передачі;  $U$  - нормуючий коефіцієнт каналу виміру напруги;  $i$  - нормуючий коефіцієнт каналу вимірювання струму;  $\rho$  - нормуючий коефіцієнт каналу вимірювання потужності.

Виходячи із зазначеного та виразів (2-6) вимірювання непрямым способом обертового моменту на валу силового приводу реалізовано завдяки перетворенню зусиль накладених на вал електродвигуна у пропорційний таким зусиллям вихідний сигнал  $M = \frac{\Delta P}{n}k$ , слід врахувати момент інерції та кутове прискорення:

$$M(t) = J \frac{d\omega}{dt}, \tag{15}$$

де  $n$  - швидкість обертання валу;  $k$  - коефіцієнт передачі вимірювального каналу?  $J$  - момент інерції;  $\omega$  - кутова швидкість.

В роботі [7] представлено функціональну схему управління моментом електричного двигуна на основі досліджених параметрів потужності та кутової швидкості (рис. 1)

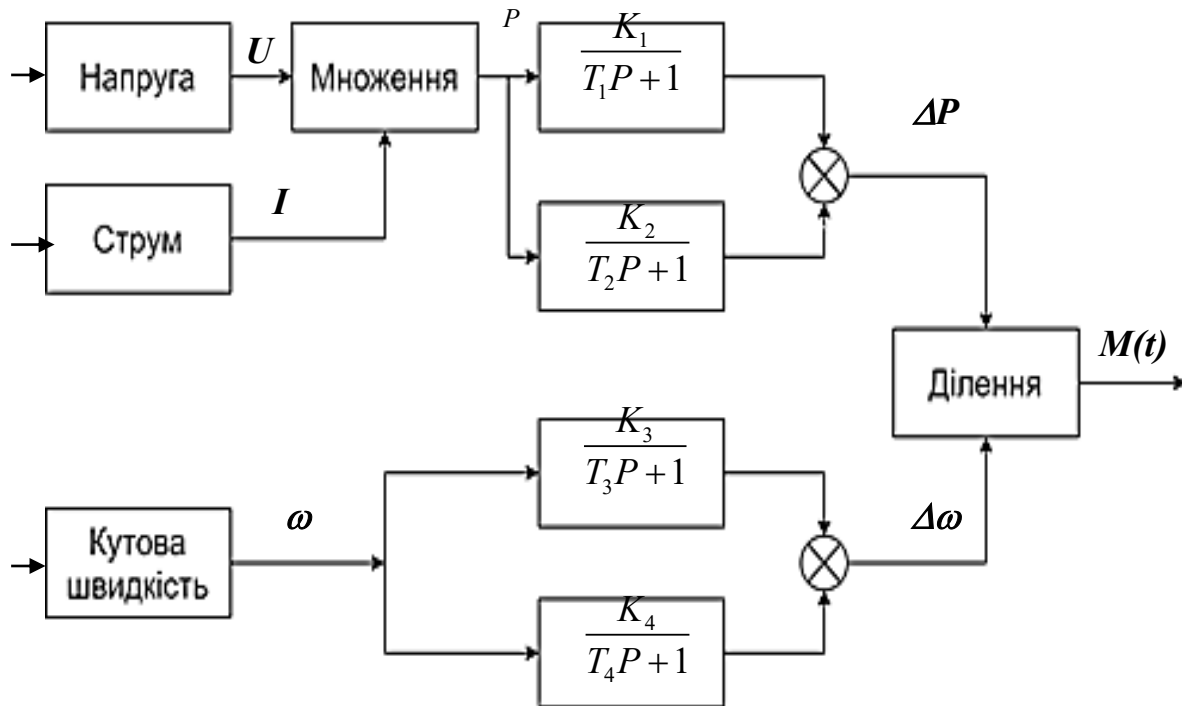


Рис. 1 Управління обертовим моментом електродвигуна на основі контролю потужності та кутової швидкості, [7]

Слід звернути увагу на нелінійність вимірювального каналу, яка може виникати під час кутового прискорення, що пов'язана із пружністю валу, в залежності від температури та механічної напруги. Тому, кутове прискорення можна розглядати, як параметр що характеризує зміну кутової швидкості валу електродвигуна протягом певного проміжку часу. Воно вимірюється у радіанах на секунду в квадраті ( $\text{рад}/\text{с}^2$ ) та відіграє важливу роль у розрахунку та контролі динамічних характеристик електродвигуна, таких як прискорення, гальмування та реверсування (рис. 2).

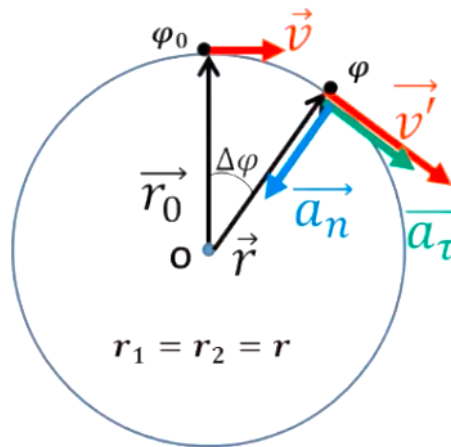


Рис. 2 Кутове прискорення. Графічна характеристика [3]

Так, зміна кутової швидкості може бути представлена як:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}, \quad \varepsilon = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t}, \quad [\varepsilon] = \frac{\text{рад}}{\text{с}^2} = \text{с}^{-2}. \quad (16)$$

та може використовуватися для розрахунку кутового прискорення при наявності дискретних значень кутової швидкості та часу. Може бути представлено, як похідна кутової швидкості по часу, що використовується для визначення кутового прискорення у випадку неперервних функцій кутової швидкості та часу.

Зв'язок кутового прискорення з  $a_\tau$  і  $a_n$  згідно рис. 2, може бути описаний наступними виразами:

$$\begin{aligned} a_\tau &= \frac{\Delta v}{\Delta t}, \text{ при } t \rightarrow 0, \\ a_\tau &= \varepsilon r, \\ a_\tau &= \frac{\Delta(\omega r)}{\Delta t} = \frac{r \Delta \omega}{\Delta t} = \varepsilon r, \\ a_n &= \frac{v^2}{r} = \frac{(\omega r)^2}{r} = \omega^2 r \\ \text{Якщо } \omega_0 &= 0 \rightarrow a_n = \varepsilon^2 t^2 r. \end{aligned} \quad (17)$$

де:  $a_\tau$  - тангенціальне прискорення;  $a_n$  - нормальне прискорення;  $\varepsilon$  - кутове прискорення.

Додавши в структуру вимірювального каналу спосіб вимірювання кутового прискорення в залежності від ряду факторів, можна значною мірою зменшити інструментальну похибку.

Кутове прискорення залежить від ряду факторів, зокрема:

- від моменту сили, який діє на обертальний об'єкт. За другим законом Ньютона для обертального руху, момент сили дорівнює добутку моменту інерції на кутове прискорення. Таким чином, при застосуванні більшого моменту сили до об'єкта, його кутове прискорення збільшується. Момент інерції залежить від маси валу та його розподілу відносно осі обертання. Чим більший момент інерції, тим менше кутове прискорення при однаковому моменті сили;

- від зовнішніх сил, таких як сила тертя та аеродинамічний опір, що можуть впливати на кутове прискорення. Вони можуть сповільнювати, або прискорювати обертальний рух валу в залежності від їхнього напрямку та величини;

- від характеристик двигуна, таких як швидкість та конструкція двигуна. Двигуни з більшим моментом можуть забезпечити більше кутове прискорення;

- від режиму контролю. Контролери, такі як PID-регулятори, можуть використовуватися для регулювання кутового прискорення на основі вхідних даних від датчиків та поточного стану системи. Вони можуть автоматично змінювати кутове прискорення, щоб досягти заданої швидкості, або позиції, а також для компенсації зовнішніх сил та опорів.

### Формулювання цілей статті

Метою статті є дослідження непрямих методів вимірювання обертальних моментів електродвигунів для визначення шляхів побудови інформаційно-вимірювальної системи та розробки алгоритму вимірювання навантаження на вал з урахуванням напруги, струму, кутової швидкості та окремих параметрів, що характеризують кутове присвоєння.

### Виклад основного матеріалу

Функція перетворення вимірювального каналу для перетворювача обертального моменту електродвигуна має наступний вигляд [8]:

$$W_y(S) = \frac{I_{\text{я}}(S)}{U_y(S)} = \frac{k_I S}{(T_m T_e S^2 + T_m S + 1)}, \quad (18)$$

де:  $T_m = \frac{J R_{\text{я}}}{C_w C_e}$  - механічна постійна часу двигуна;  $T_e = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}$  - електротехнічна постійна часу

роботи двигуна;  $k_I = \frac{J}{C_w C_e}$  - коефіцієнт передачі по струму;  $I_{\text{я}}$  - струм в якірному ланцюгу ЕД;  $R_{\text{я}}$  - опір якірному ланцюгу, що рівний сумі опору якірних обмоток ЕД та вхідного опору підсилювача, Ом;  $L_{\text{я}}$  - сума індуктивностей якірному ланцюгу двигуна та вихідного ланцюга підсилювача, Гн;  $J$  - момент інерції якоря, Нм<sup>2</sup>;  $C_e$  - коефіцієнт моменту сили, Н·м;  $C_w$  - швидкості, В·с/рад;  $s$  - оператор Лапласа;  $U_y$  - напруга.

Враховуючи окремі дестабілізуючі фактори, зокрема вібрацію та нелінійність вимірювального каналу, крива розгону, з урахуванням моменту інерції може бути описана наступним чином (рис. 3):

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} = T_m - T_l, \quad (19)$$

де:

$J$  - момент інерції ротора;  $\frac{d^2 \theta}{dt^2}$  - кутове прискорення ротора;  $B$  - коефіцієнт тертя підшипників;

$\frac{d\theta}{dt}$  - кутова швидкість ротора;  $T_m$  - момент електродвигуна;  $T_l$  - момент навантаження на вісь ротора.

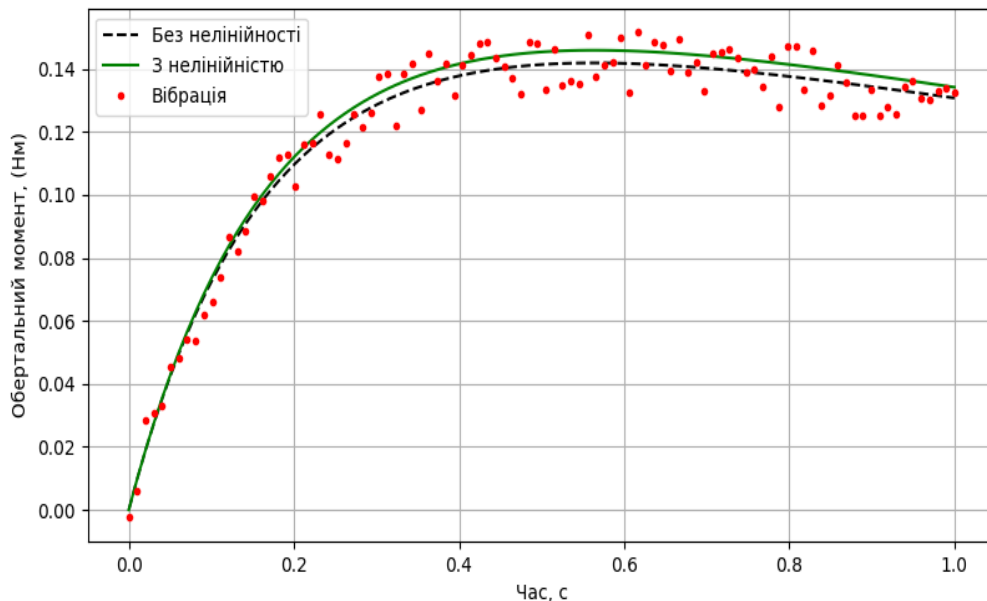


Рис. 3. Моделювання розгону електричного двигуна з урахуванням дестабілізуючих факторів

Момент електродвигуна  $T_m$  залежить від струму якоря  $I_a$  та коефіцієнта моменту  $K_m$  :

$$T_m = K_m I_a, \quad (20)$$

Струм якоря  $I_a$  можна виразити через напругу на якорі  $U_a$  та опір якоря, а також роторну напругу  $R_a$  :

$$I_a = \frac{U_a - E_r}{R_a}, \quad (21)$$

Роторна напруга  $E_r$  залежить від кутової швидкості ротора та коефіцієнта роторної напруги  $K_e$  :

$$E_r = K_e \frac{d\theta}{dt}, \quad (22)$$

Після підстановки рівнянь (20), (21) та (22) в рівняння (19) отримаємо кінцеве рівняння розгону електродвигуна:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} = K_m \left( \frac{U_a - K_e \frac{d\theta}{dt}}{R_a} \right) - T_l, \quad (23)$$

Це рівняння можна розв'язати аналітично, або чисельно для різних сценаріїв розгону, враховуючи характеристики електродвигуна та умови навантаження.

Для чисельного розв'язання рівняння (23) можна скористатися методами чисельного інтегрування, такими як метод Ейлера, Рунге-Кутта та інші. У залежності від сценарію розгону та характеристик електродвигуна, параметри моменту навантаження  $T_l$  можуть бути заданими функціями часу, або кутової швидкості.

Для спрощення моделі можна припустити, що момент навантаження на вісь ротора  $T_l$  є постійним або пропорційним кутовій швидкості ротора:

- Константний момент навантаження:  $T_l = T_{l0}$ ;
- Момент навантаження, пропорційний кутовій швидкості:  $T_l = K_l \frac{d\theta}{dt}$ .

У цих випадках рівняння (23) можна записати як:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} = K_m \left( \frac{U_a - K_e \frac{d\theta}{dt}}{R_a} \right) - T_{l0}, \quad (24)$$

або:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} = K_m \left( \frac{U_a - K_e \frac{d\theta}{dt}}{R_a} \right) - K_l \frac{d\theta}{dt}. \quad (25)$$

Розв'язавши одне з цих рівнянь для заданих параметрів електродвигуна, можна отримати криву розгону, яка відображає динаміку зміни кутової швидкості та кута повороту ротора відносно часу.

Визначивши параметри струму, напруги, потужності, кутового прискорення та кутової швидкості, отримані дані можна обчислити за наступним алгоритмом (рис. 5), що дозволить визначити обертальний



момент використовуючи вирази (10-13), (15), (18), (19-15), згідно запропонованого алгоритму на етапі аналізу результатів вимірювання.

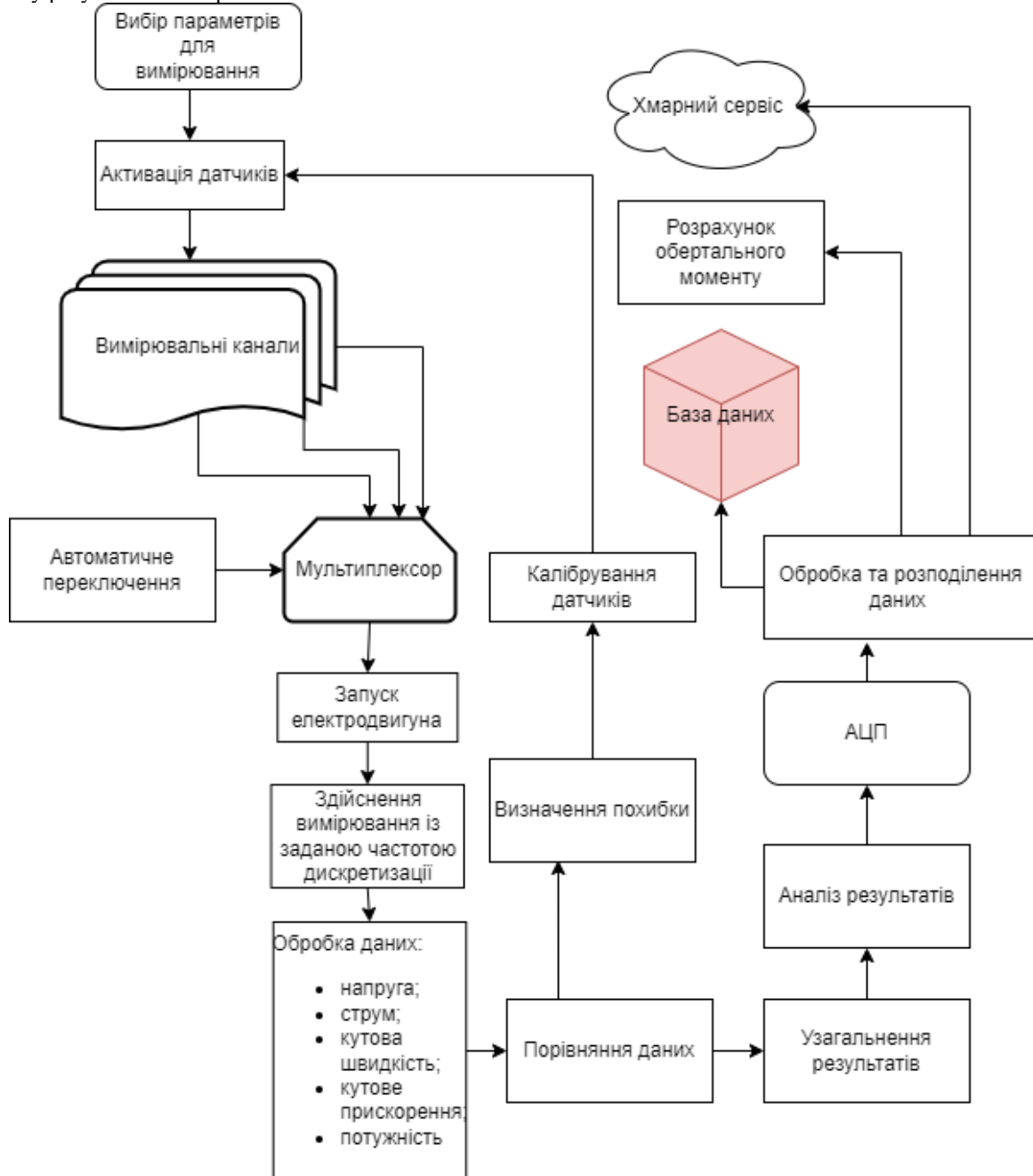


Рис. 5 Алгоритм обробки даних

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

Запропонований алгоритм непрямих вимірювань обертальних моментів електродвигунів побудований на підставі залежності між потужністю, напругою, струмом та кутовою швидкістю, доповнений додатковим параметром кутового прискорення, дозволить поліпшити аналіз та контроль роботи електродвигунів, краще оцінити динаміку руху, відстежувати аномалії у роботі, вказувати на пошкодження, поліпшити регулювання швидкості та обертового моменту, краще оцінити енергоефективність та визначення оптимальних режимів роботи, оцінити взаємодію двигуна з іншими елементами системи. Таким чином врахування цього параметра може допомогти вирішити поточні технічні виклики та сприяти розвитку нових технологій у галузі електромеханіки.

### Література

1. R.J.O. de Waal, A. Bekker, P.S. Heyns, Indirect load case estimation for propeller-ice moments from shaft line torque measurements, Cold Regions Science and Technology, Volume 151, 2018, Pages 237-248, ISSN 0165-232X, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.03.016>.

2. C. Wang, W.P. Xiong, X. Chang, L.Y. Ye, X. Li, Analysis of variable working conditions for propeller-ice interaction, *Ocean Engineering*, Volume 156, 2018, Pages 277-293, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.02.026>.

3. Електропривод: Підручник / Ю. М. Лавріненко, О. С. Марченко, П. І. Савченко, О. К. Синявський, Д. Г. Войтюк, В. П. Лисенко; За ред. Ю. М. Лавріненка. Видавництво «Ліра-К». — К., 2009. — 504 с.

4. Електропривід сільськогосподарських машин, агрегатів та потоків ліній: Підручник/ С.Л. Жулай, Б.В. Зайцев, Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко, Д.Г. Войтюк; За ред. С.Л. Жулая. — К.: Вища освіта, 2001. — 288 с.

5. Sebastian Schorr, Matthias Möller, Jörg Heib, Dirk Bähre, Quality Prediction of Drilled and Reamed Bores Based on Torque Measurements and the Machine Learning Method of Random Forest, *Procedia Manufacturing*, Volume 48, 2020, Pages 894-901, ISSN 2351-9789, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.127>.

6. Перминов В. Б., Балахнов Д. А., Лихачев В. Н., Норицын А. Д. Динамические методы измерения крутящих моментов. / Приборы и системы управления. № 12, 2002

7. Анализ вариационной структуры динамического измерителя градиента крутящего момента / Б.А. Перминов, В.Б. Перминов, З.Х. Ягубов, А.Е. Лапин // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2015. – № 8. – С. 15–17.

8. Ilic-Spong, M., Miller, T. J., MacMinn, S. R., & Thorp, J. S. (1987). Instantaneous torque control of electric motor drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, (1), 55-61.

#### References

1. R.J.O. de Waal, A. Bekker, P.S. Heyns, Indirect load case estimation for propeller-ice moments from shaft line torque measurements, *Cold Regions Science and Technology*, Volume 151, 2018, Pages 237-248,

2. ISSN 0165-232X, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.03.016>.

3. C. Wang, W.P. Xiong, X. Chang, L.Y. Ye, X. Li, Analysis of variable working conditions for propeller-ice interaction, *Ocean Engineering*, Volume 156, 2018, Pages 277-293, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.02.026>.

4. Електропривод: Підручник [Electric drive: Textbook] / Ю. М. Лавріненко, О. С. Марченко, П. І. Савченко, О. К. Синявський, Д. Г. Войтюк, В. П. Лисенко; За ред. Ю. М. Лавріненка. Видавництво «Ліра-К». — К., 2009. — 504 с.

5. Електропривід сільськогосподарських машин, агрегатів та потоків ліній: Підручник [Electric drive of agricultural machines, aggregates and flow lines: Textbook] / С.Л. Жулай, Б.В. Зайцев, Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко, Д.Г. Войтюк; За ред. С.Л. Жулая. — К.: Вища освіта, 2001. — 288 с.

6. Perminov V. B., Balakhnov D. A., Likhachev V. N., Noritsyn A. D. Dinamicheskiye metody izmereniya krutyashchikh momentov [Dynamic methods for measuring torques] / Pribory i sistemy upravleniya. № 12, 2002

7. Analiz variatsionnoy struktury dinamicheskogo izmeritelya gradiyenta krutyashchego momenta [Analysis of the variational structure of a dynamic torque gradient meter] / B.A. Perminov, V.B. Perminov, Z.KH. Yagubov, A.Ye. Lapin // Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more. – М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2015. – № 8. – С. 15–17.

8. Ilic-Spong, M., Miller, T. J., MacMinn, S. R., & Thorp, J. S. (1987). Instantaneous torque control of electric motor drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, (1), 55-61.

Марія ЯКИМЧУК

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-8131-9739>e-mail: [umcmasha@gmail.com](mailto:umcmasha@gmail.com)

Володимир ДУБОВИЙ

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0440-3643>

## ІНФОРМАЦІЙНИЙ АСПЕКТ КООРДИНАЦІЇ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

Виробничі системи з багатозональними технологічними об'єктами разом із засобами управління технологічними процесами належать до класу кібер-фізичних систем. Поєднання трьох аспектів: наявність фізичних взаємодій у розподіленому технологічному об'єкті, наявність складних сценаріїв локального управління, які залежать від параметрів стану області об'єкта, децентралізація та наявність глобальних критеріїв зумовили новий клас завдань – просторово-часову координацію систем з безперервними технологічними об'єктами та логічним управлінням. Мета дослідження - підвищення ефективності децентралізованої координації за рахунок оптимізації інформаційних потоків та структури підсистем координації. Розглянуто зв'язок кількості інформації щодо стану виробничих процесів з невизначеністю координації пов'язаних операцій. Оцінено дисперсію стану елемента об'єкта з використанням просторово-часового спектру стану. Перевірка адекватності оцінок інформаційних потоків та його залежність від параметрів системи виконувалася з допомогою експериментів на імітаційній моделі на платформі Scilab. Отримані в результаті статистичної обробки даних імітаційних експериментів значення інформаційних потоків за мірою Шеннона відрізнялися від розрахункових в межах 18%. Враховуючи пакетну передачу даних це не впливає на загальну оцінку необхідної пропускної спроможності системи передачі даних. Запропонований підхід до оцінювання інформаційних потоків у системі децентралізованої координації може бути використаний для вибору параметрів системи передачі даних, а також для оптимізації структури і інформаційних потоків системи координації.

Ключові слова: децентралізована координація, інформація, невизначеність параметрів.

Mariia YUKHIMCHUK, Volodymyr DUBOVOI

Vinnytsia National Technical University

## INFORMATION ASPECT OF COORDINATION OF PRODUCTION PROCESSES

Production systems with multi-zone technological facilities together with technological process management tools belong to the class of cyber-physical systems. The combination of three aspects: the presence of physical interactions in a distributed technological object, the presence of complex local control scenarios that depend on the state parameters of the object area, decentralization and the presence of global criteria led to a new class of tasks - spatio-temporal coordination of systems with continuous technological objects and logical management. The purpose of the research is to increase the effectiveness of decentralized coordination due to the optimization of information flows and the structure of coordination subsystems. The relationship between the amount of information regarding the state of production processes and the uncertainty of coordination of related operations is considered. The dispersion of the state of the object element was estimated using the spatio-temporal spectrum of the state. Checking the adequacy of information flow estimates and its dependence on system parameters was performed using experiments on a simulation model on the Scilab platform. The values of information flows obtained as a result of statistical processing of data from simulation experiments according to Shannon's measure differed from the calculated values by 18%. Considering packet data transmission, this does not affect the overall estimate of the required bandwidth of the data transmission system. The proposed approach to the assessment of information flows in the system of decentralized coordination can be used to select the parameters of the data transmission system, as well as to optimize the structure and information flows of the coordination system.

Keywords: decentralized coordination, information, parameter uncertainty.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

Виробничі системи з багатозональними технологічними об'єктами разом із засобами управління технологічними процесами належать до класу кібер-фізичних систем. Поєднання трьох аспектів: наявність фізичних взаємодій у розподіленому технологічному об'єкті, наявність складних сценаріїв локального управління, які залежать від параметрів стану області об'єкта, децентралізація та наявність глобальних критеріїв зумовили новий клас завдань – просторово-часову координацію систем з безперервними технологічними об'єктами та логічним управлінням.

Важливим і досить поширеним підкласом є системи з безперервними розподіленими об'єктами управління – розподілені кібер-фізичні системи (РКФС). Під безперервністю об'єктів ми розумітимемо наявність фізичної взаємодії між елементами (зонами, областями) об'єкта на енергетичному та матеріальному рівні. Більшість досліджень, крім спрямованих на вимірювання [1], під час планування роботи РКФС не враховують фізичні взаємодії.

Особливістю децентралізованих РКФС з багатозональними об'єктами є значна невизначеність параметрів взаємодії зон внаслідок випадкових впливів, неповнозв'язності системи та відсутність у окремої підсистеми повної інформації про стан інших підсистем, що знаходяться у безпосередньому зв'язку.

Моделюванню випадкових впливів на компоненти РКФС [2] приділялося мало уваги. Зокрема, важливим завданням у процесі розробки РКФС є оптимізація параметрів протоколів передачі даних між

підсистемами. У системах IoT знайшли застосування протоколи LoRaWAN, IPv6, 6LoWPAN, Bluetooth Low Energy (BLE), ZigBee, Wi-Fi та Z-Wave та інші. Для децентралізованих РКФС виробничого призначення найбільш перспективними є LoRaWAN [3] для великих технологічних об'єктів, наприклад, сільськогосподарських, та ZigBee для об'єктів розміром до 100 метрів. Перевагою цих мереж є можливість створення шлюзів та комірчастої структури зв'язків, яка притаманна децентралізованим системам.

З розвитком та широким застосуванням IoT у автоматизації розподілених технологічних об'єктів та застосуванням хмарних технологій для накопичення та обробки інформації, значну актуальність набуває завдання дослідження та оптимізації інформаційних потоків у РКФС з урахуванням техніко-економічних характеристик інформаційної компоненти кібер-фізичної системи та завдань просторово-часової координації. У нашому дослідженні ми розглядаємо вплив фізичних та інформаційних процесів на вибір параметрів протоколу LoRaWAN.

Проте у зазначених роботах не розглядаються конструктивні моделі зв'язку між показниками і структурою систем координації і величинами інформаційних потоків, необхідних для здійснення координації, хоча у роботах з теорії активних систем [4] і приділяється увага зв'язку структури ієрархічних систем і інформаційними потоками.

Враховуючи переваги децентралізованої координації, сформулюємо мету дослідження як підвищення ефективності децентралізованої координації за рахунок оптимізації інформаційних потоків та структури підсистем координації.

Розглянемо РКФС з одновимірним технологічним об'єктом і ситуаційно-логічним керуванням технологічним процесом. Вибір одновимірного об'єкта не порушує загальності дослідження, проте спрощує його схематичне зображення. Модель архітектури системи зображено на рис.1. Система складається з об'єкта, розділеного на керовані елементи KE, локальних систем керування ЛСК і координаторів К, які узгоджують задані параметри ЛСК. Кожна LCS містить регулятор R, ситуаційний аналізатор SA і логічний контролер LC, який містить сценарії досягнення бажаного результату [5]. На рис. 1 ці сценарії утворюють ситуаційний граф переходів між станами елемента SE залежно від результату аналізу ситуації. Координатори взаємодіють один з одним за децентралізованим принципом, тобто безпосередньо, без координаторів верхнього рівня. Кожен координатор в процесі розв'язання задачі координації використовує інформацію про стан і цільову функцію елементів, які його оточують (елементів свого кластеру), відповідно до принципу ближньої дії [6].

Складемо матрицю кластерів – топологічну матрицю координації  $\Omega_G = [\omega_0, \dots, \omega_i, \dots, \omega_m]^T$ , де  $\omega_i$  - вектор елементів  $i$ -го кластера, причому елементам в кластері  $i$ -го елемента відповідає 1, а іншим – 0.

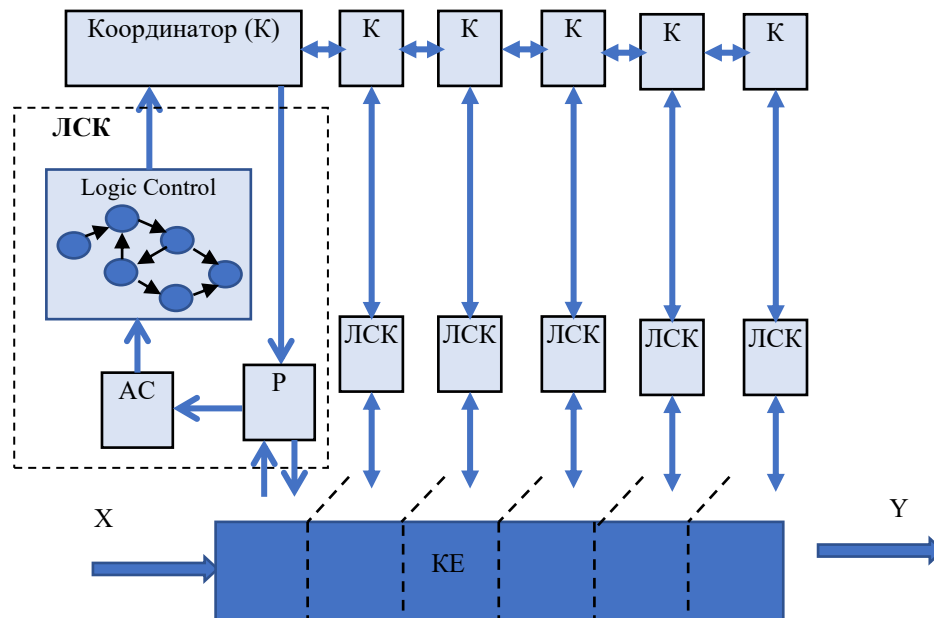


Рис.1. РКФС з одновимірним технологічним об'єктом і ситуаційно-логічним керуванням технологічним процесом

Зв'язок фізичної і інформаційної взаємодій здійснюється через процедури вимірювання і регулювання стану елементів:

- взаємодія [елемент об'єкта KE → регулятор P] (модель вимірювання)

$$\tilde{V}_i = V_i + \delta \tag{1}$$

де  $\delta$  - випадкова похибка вимірювання;

- взаємодія [регулятор P → елемент об'єкта KE] (модель керування)

$$\mathbf{P}_{0i,j} = A_{i,j}(\mathbf{V}_{0i}, \mathbf{V}_i, u), \quad (2)$$

де  $\mathbf{V}_{0i}$  - параметр координації (бажаний стан);  $u$  - випадковий вплив зовнішнього середовища.

Інформаційна взаємодія складається з наступних окремих взаємодій: [регулятор P → ситуаційний аналізатор СА], [ситуаційний аналізатор СА → логічний контролер LC], [логічний контролер LC → координатор К], [координатор  $i$ -го елемента ↔ координатори сусідніх елементів], [координатор К → регулятор P]. Розглянемо інформаційну взаємодію підсистем розподіленої системи. Вона забезпечується двома типами інформаційних потоків: інформаційний потік рішень (команд, керуючих сигналів) та інформаційний потік даних (контрольної інформації, значень параметрів стану тощо).

Охарактеризуємо задачі координації параметрами  $\{\mathbf{V}, \mathbf{\Lambda}, \mathbf{F}, u, \mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Q}, \mathbf{V}_0, \mathbf{T}\}$ :

$\mathbf{V}$  - вектор стану елементів;

$\mathbf{\Lambda}$  - вектор параметрів зв'язку;

$\mathbf{F}$  - вектор бажаних станів елементів;

$u$  - стан оточуючого середовища;

$\mathbf{X}, \mathbf{Y}$  - вектори матеріальних потоків між підсистемами ( $\mathbf{X}$  - вхідні,  $\mathbf{Y}$  - вихідні);

$\mathbf{Q}$  - якісні характеристики матеріальних потоків;

$\mathbf{V}_0$  - вектор параметрів координації;

$\mathbf{T}$  - час виконання операцій підсистемами об'єкта.

Інформаційна взаємодія [регулятор P → ситуаційний аналізатор СА] полягає у передачі даних вимірювання вектора стану елемента об'єкта до ситуаційного аналізатора.

Інформаційна взаємодія [ситуаційний аналізатор СА → логічний контролер LC] полягає у передачі до логічного контролера LC результатів класифікації ситуації на основі вектора  $\tilde{\mathbf{V}}_i$  Ситуації, у яких здійснюється управління, утворюють множину  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ . Елемент об'єкта перебуває у ситуації  $s_{ik}$ , якщо його вектор стану лежить усередині гіперкубу ситуації:  $\forall v_j \in [v_{kj \min}, v_{kj \max}]$ . Оскільки вектор вимірювань містить випадкову похибку, класифікація виконується на основі умовних ймовірностей ситуацій. Якщо виміри параметрів ситуацій незалежні, компоненти вектора оцінок належності стану елемента об'єкта до заданого гіперкубу

$$\tilde{q}_{S_k} = \prod_{j=1}^m \left[ \int_{v_{kj \min}}^{v_{kj \max}} G(\delta_{v_j}, \tilde{v}_j, \sigma_{v_j}) d\delta_{v_j} \right] \quad (3)$$

### Оцінка невизначеності системи на основі векторно-матричної моделі

У процесі узгодження центральний елемент кожного кластера отримує інформацію про стан та параметри інших елементів кластера. Оцінимо інтенсивність такого обміну інформацією.

Кожен кластер характеризується вектором параметрів  $\{\mathbf{V}_\varepsilon, \mathbf{\Lambda}_\varepsilon, \mathbf{F}_\varepsilon, u, \mathbf{X}_\varepsilon, \mathbf{V}_{0\varepsilon}\}$ , що вимірюються або задаються з певним ступенем невизначеності.

Діапазони параметрів є константами, що визначаються особливостями РКФС. Середні квадратичні похибки визначаються на основі похибок вимірювання станів елементів  $\mathbf{V}$ , сировини  $\mathbf{X}$  та середовища  $u$ , похибок завдання вихідних даних  $\mathbf{F}_\varepsilon$ . З матричної моделі РКФС [7] знаходимо:

$$\mathbf{V}_o = \mathbf{W}_0^{-1} \left[ \mathbf{V} (\mathbf{1} - \mathbf{W}\mathbf{\Lambda}\mathbf{1} - \mathbf{W}\mathbf{\Lambda}\mathbf{\Omega}\mathbf{1}^{-1}) - \mathbf{W}_u (u\mathbf{1} - \mathbf{V}) + \mathbf{W}_x \mu \mathbf{X} \right], \quad (4)$$

де  $\mathbf{W}_0$ ,  $\mathbf{W}$ ,  $\mathbf{W}_u$ ,  $\mathbf{W}_x$  - передатні функції зони об'єкта, регулятора, ЛСК по зовнішньому збуренню, ЛСК по входу сировини відповідно.

Тоді середня квадратична похибка координації

$$\sigma_{V_o} = \mathbf{W}_0^{-1} \left[ \sigma_V (\mathbf{1} - \mathbf{W}\mathbf{\Lambda}\mathbf{1} - \mathbf{W}\mathbf{\Lambda}\mathbf{\Omega}\mathbf{1}^{-1}) - \mathbf{W}_u (\sigma_u \mathbf{1} - \mathbf{V}) + \mathbf{W}_x \mu \sigma_X \right] \quad (5)$$

Для оцінювання  $\sigma_v$  розглянемо динамічні процеси у розподіленому об'єкті з ресурсним управлінням як взаємодію трьох полів:

- Поле параметрів об'єкта  $v(\mathbf{Z}, t)$ , де  $v$  - стан елемента об'єкта;  $\mathbf{Z} = \{z_k\}$  - вектор координат елементів;

- Поле керуючих впливів  $\mathbf{p}_0(\mathbf{Z}, t)$ ;

- Поле збурень  $\mathbf{u}(\mathbf{Z}, t)$ .

Невизначеність стану елемента зумовлена такими факторами:

- Невизначеність впливу зовнішнього середовища  $\mathbf{u}$ ;

- Невизначеність стану оточуючих елементів, які впливають на елемент, що розглядається

$\mathbf{V}_\varepsilon$ ;

- Невизначеність параметрів середовища розповсюдження впливу  $\mathbf{\Lambda}$ ;

- Невизначеність виробничої програми  $\mathbf{X}$  і питомих витрат  $\mathbf{M}$ .

Вплив зовнішнього середовища і оточуючих елементів здійснюється через потік ресурсу. Дисперсія стану елемента

$$\sigma_v^2(\mathbf{Z}_i, \tau) = \sigma_{v(\mathbf{Z}_i, 0)}^2 + \sigma_{r(\mathbf{Z}_i, \tau)}^2 - 2R_{v\mathbf{Z}_i, 0r\mathbf{Z}_i, \tau}, \quad (6)$$

де  $\sigma_{v(\mathbf{Z}_i, 0)}^2$  - дисперсія стану елемента в початковий момент;  $\sigma_v^2(\mathbf{Z}_i, \tau)$  - дисперсія стану через проміжок часу  $\tau$ ;  $\sigma_{r(\mathbf{Z}_i, \tau)}^2$  - дисперсія кількості ресурсу за проміжок часу  $\tau$ ;  $R_{v\mathbf{Z}_i, 0r\mathbf{Z}_i, \tau}$  - кореляційна функція стану елемента і кількості ресурсу.

Оцінимо дисперсію стану елемента об'єкта з використанням просторово-часового спектру стану елементів об'єкта [8]. В лінійних об'єктах спектральні щільності потужності адитивні з урахуванням взаємної кореляції. Отже, баланс спектральних щільностей ресурсу елемента

$$\left\{ \begin{aligned} G_{p_0v_0}(\omega, \Psi) &= G_{v_0v_0}(\omega, \Psi) \cdot W_{v_0p_0}(\omega) \\ G_{rr}(\omega, \Psi) &= G_{p_0v_0}(\omega, \Psi) + G_{uu}(\omega, \Psi) + G_{xx}(\omega, \Psi) + \sum_{k \in \varepsilon} G_{p_k p_k} + \\ &+ 2G_{p_0u}(\omega, \Psi) + 2G_{p_0x}(\omega, \Psi) + 2 \sum_{k \in \varepsilon} G_{p_0 p_k}(\omega, \Psi) - \\ &- 2G_{ux}(\omega, \Psi) + 2 \sum_{f \in \varepsilon} G_{up_k}(\omega, \Psi) - 2 \sum_{f \in \varepsilon} G_{p_k x}(\omega, \Psi) \\ G_{vv}(\omega, \Psi) &= G_{rr}(\omega, \Psi) \cdot \left(\frac{1}{T\omega}\right)^2 \\ G_{p_k p_k}(\omega, \Psi) &= \int_0^\infty \left\{ \iiint_{\Omega} [R_{p_k p_k}(\tau, \mathbf{Z}) e^{-j\Psi\mathbf{Z}}] e^{-j\omega\tau} d\mathbf{Z} \right\} d\tau \end{aligned} \right. \quad (7)$$

де  $G_{rr}$  - авто-спектральна щільність потужності загального вхідного ресурсу;  $G_{p_0p_0}$  - авто-спектральна щільність потужності керівного впливу (зовнішнього ресурсу);  $G_{uu}$  - авто-спектральна щільність потужності збурень;  $G_{vv}$  - авто-спектральна щільність потужності стану (накопичений ресурс);  $G_{xx}$  - авто-спектральна щільність потужності використання та/або розсіювання ресурсу;  $G_{p_k p_k}$  - авто-спектральна щільність вхідного ресурсу з урахуванням розповсюдження;  $G_{ux}$  - взаємна спектральна щільність потужності збурення і сировини;  $\omega$  - часова кругова частота;  $\Psi$  - вектор просторових кругових частот;  $j$  - комплексна одиниця.

Вплив зовнішнього середовища і витрати сировини на виробництво можна вважати незалежними, отже  $G_{ux} = 0$ .

Взаємна спектральна щільність потужності керівного впливу і вхідного ресурсу, який надходить від сусідніх елементів  $G_{p_0 p_k}$  визначається алгоритмом і параметрами координатора і ЛСК. У найпростішому випадку координатор розраховує вплив

$$v_0 = \left( \mu x - \sum_{k \in \varepsilon} p_{ki} - |W_u| u \right) \cdot |W_{v_0 p_0}^{-1}|, \quad (8)$$

де  $|W_u| = \left| \frac{W_0}{1 + W_0 W_{LCS}} \right|$  - коефіцієнт ослаблення впливу зовнішнього середовища впливом ЛСК

(Рис. 2), після чого розв'язує задачу оптимізації. Наявність в алгоритмі розрахунку великої кількості факторів, що впливають на результат, приводить до зменшення взаємної парної кореляції, отже можемо вважати  $G_{v_0 p_{ki}} \approx 0$ . Аналогічно  $G_{p_{ki} x} \approx 0$  і  $G_{u p_{ki}} \approx 0$ .

Оскільки оптимальне значення вхідного ресурсу задається координатором, який враховує вплив зовнішнього середовища і ЛСК, для знаходження  $G_{v_0 u}$  домножимо (8) на  $v_0$ , усереднюємо і перетворюємо за Фур'є. Отримуємо

$$G_{v_0 v_0}(\omega, \mathbf{Z}_i) = \left[ \mu G_{v_0 x}(\omega, \mathbf{Z}_i) - |W_u| G_{v_0 u}(\omega, \mathbf{Z}_i) \right] \cdot W_{v_0 p_0}^{-1}(\omega) \quad (9)$$

звідки

$$G_{v_0 u}(\omega, \mathbf{Z}_i) = \frac{\mu}{|W_u|} G_{v_0 x}(\omega, \mathbf{Z}_i) - \frac{W_{v_0 p_0}(\omega)}{|W_u|} G_{v_0 v_0}(\omega, \mathbf{Z}_i) \quad (10)$$

Для визначення  $G_{p_0 x}$  будемо виходити з гіпотези, що чим більший збурюючий вплив сусідніх елементів і оточуючого середовища, тим більше відхиляється значення  $p_0$  від номінального  $v_0$ . Очевидно, при  $\forall \mathbf{Z} v(\mathbf{Z}) = v_0 = u$  потоки перетікання ресурсу будуть відсутні. Для отримання часової залежності  $R_{p_0 x}(\tau, \mathbf{Z}_i)$  розглянемо структурну схему локальної координації (рис.2)

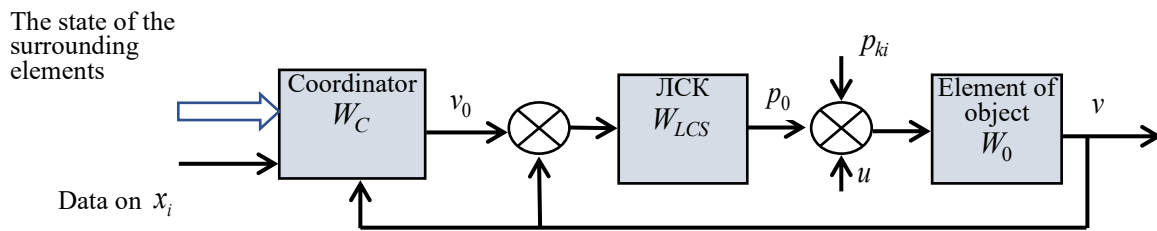


Рис. 2. Схема локальної координації

Передатна функція  $x_0 \xrightarrow{W} v_0$

$$W_{x_0 \rightarrow v_0}(p) = \frac{W_C}{1 + W_C \frac{W_{LCS} W_0}{1 + W_{LCS} W_0}} = \frac{W_C (1 + W_{LCS} W_0)}{1 + W_{LCS} W_0 + W_C W_{LCS} W_0}$$

Вважатимемо координатор і ЛСК аперіодичними елементами з сталими часу відповідно  $T_C$  і  $T_{LCS}$ . Отримуємо

$$W_{x_0 \rightarrow v_0}(p) = \frac{\frac{1}{1 + T_C p} \left( 1 + \frac{1}{1 + T_{LCS} p} \cdot \frac{1}{T_0 p} \right)}{1 + \frac{1}{1 + T_{LCS} p} \cdot \frac{1}{T_0 p} + \frac{1}{1 + T_C p} \cdot \frac{1}{1 + T_{LCS} p} \cdot \frac{1}{T_0 p}} = \frac{T_{LCS} p T_0 p + T_0 p + 1}{(1 + T_C p)(1 + T_{LCS} p) T_0 p + (1 + T_C p) + 1}$$

звідки частотна передатна функція

$$W_{x_0 \rightarrow v_0}(j\omega) = \frac{1 - T_{LCS} T_0 \omega^2 + T_0 j\omega}{(1 + T_C j\omega)(1 + T_{LCS} j\omega) T_0 j\omega + (1 + T_C j\omega) + 1} \quad (11)$$

Тоді спектральні щільності потужності пов'язані співвідношенням

$$G_{p_0x}(\omega, \mathbf{Z}_i) = G_{xx}(\omega, \mathbf{Z}_i) \cdot W_{x_0 \rightarrow p_0}(j\omega) = G_{xx}(\omega, \mathbf{Z}_i) \cdot \frac{1 - T_{LCS}T_0\omega^2 + T_0j\omega}{(1 + T_Cj\omega)(1 + T_{LCS}j\omega)T_0j\omega + (1 + T_Cj\omega) + 1} \quad (12)$$

Просторова складова спектральних щільностей визначається геометричними характеристиками розподіленого об'єкта і розташуванням точок прикладення впливу.

Вплив зовнішнього збурення можна вважати білим шумом у часі, амплітуда якого максимальна на границях об'єкта і експоненціально спадає при віддаленні від границь. Розкладаємо модель розповсюдження впливу [9] за Фур'є по вектору координат  $\mathbf{Z}$  і отримуємо

$$G_{uu}(\omega, \Psi) = \int_{\Omega} \left[ \iiint_{\Omega} G_{uu}(\omega, \mathbf{Z}_{\Omega}) e^{-\frac{|\mathbf{Z}_{\Omega} - \mathbf{Z}|}{4\lambda\tau}} d\mathbf{Z}_{\Omega} \right] e^{-j\Psi\mathbf{Z}} d\mathbf{Z} \quad (13)$$

де  $G_{uu}(\omega, \mathbf{Z}_{\Omega})$  - спектр зовнішнього шуму на поверхні розподіленого об'єкта;  $\Omega$  - поверхня об'єкта. У загальному випадку довільної форми об'єкта інтеграл по поверхні можливо взяти тільки у числовому вигляді.

Аналогічно просторова спектральна щільність, зумовлена керуючими впливами,

$$G_{v_0v_0}(\omega, \Psi) = \int_0^{\infty} \left[ \sum_j G_{v_0v_0}(\omega, \mathbf{Z}_j) \cdot e^{-\frac{|\mathbf{Z}_j - \mathbf{Z}|}{4\lambda\tau}} \right] e^{-j\Psi\mathbf{Z}} d\mathbf{Z} \quad (14)$$

де  $\mathbf{Z}_j$  - вектор координат  $j$ -ї точки прикладання керівного впливу.

У стаціонарному режимі використання розподіленого об'єкта виробниче завдання не змінюється у просторі і часі, отже

$$G_{xx}(\omega, \Psi) = G_{xx}(\omega = 0, \Psi = 0) = x\delta[\omega = 0]\delta[\Psi = 0].$$

де  $\delta[\ ]$  - дельта-функція Дірака.

Знайдемо просторово-часову кореляційну функцію ресурсу. На основі теореми Вінера-Хінчина запишемо

$$R_{vv}(\tau, \Psi) = 2 \int_0^{\infty} G_{vv}(\omega, \Psi) \cdot e^{i\omega\tau} d\omega \quad (15)$$

Оцінимо кількість інформації щодо параметрів елементів кластера. Якщо середні квадратичні похибки параметрів відповідно  $(\sigma_{V_{\varepsilon}}, \sigma_{\Lambda_{\varepsilon}}, \sigma_{F_{\varepsilon}}, \sigma_u, \sigma_{X_{\varepsilon}}, \sigma_{Y_{\varepsilon}}, \sigma_{Q_{\varepsilon}}, \sigma_{V_{0\varepsilon}}, \sigma_{T_{\varepsilon}})$ , то за нормального розподілу похибок, нехтуючи кореляцією між параметрами, знаходимо залишкову ентропію стану елемента  $O_i$ :

$$\begin{aligned} H_{O_i} &= \log(\sigma_{v_i} \sqrt{2\pi e}) + \log(\sigma_{\lambda_i} \sqrt{2\pi e}) + \log(\sigma_{F_i} \sqrt{2\pi e}) + \log(\sigma_u \sqrt{2\pi e}) + \\ &+ \log(\sigma_{x_i} \sqrt{2\pi e}) + \log(\sigma_{y_i} \sqrt{2\pi e}) + \log(\sigma_{q_i} \sqrt{2\pi e}) + \log(\sigma_{v_{0i}} \sqrt{2\pi e}) + \log(\sigma_{T_i} \sqrt{2\pi e}) = \\ &= \log \left[ (2\pi e)^{\frac{9}{2}} \right] + \log(\sigma_{v_i} \cdot \sigma_{\lambda_i} \cdot \sigma_{F_i} \cdot \sigma_u \cdot \sigma_{x_i} \cdot \sigma_{y_i} \cdot \sigma_{q_i} \cdot \sigma_{v_{0i}} \cdot \sigma_{T_i}) \end{aligned}$$

Апріорна ентропія значень параметрів елемента:

$$H_{O_i}^{(0)} = \log(D_{v_i} \cdot D_{\lambda_i} \cdot D_{F_i} \cdot D_u \cdot D_{x_i} \cdot D_{y_i} \cdot D_{q_i} \cdot D_{v_{0i}} \cdot D_{T_i}), \quad (16)$$

де  $D$  - діапазон значень параметра.



Тоді кількість інформації щодо одного елемента:

$$I_{O_i} = H_{O_i}^{(o)} - H_{O_i} = \log \left( \frac{D_{V_i} D_{\lambda_i} D_{F_i} D_u D_{X_i} D_{Y_i} D_{q_i} D_{V_{0i}} D_{T_i}}{\sigma_{V_i} \sigma_{\lambda_i} \sigma_{F_i} \sigma_u \sigma_{X_i} \sigma_{Y_i} \sigma_{q_i} \sigma_{V_{0i}} \sigma_{T_i}} \right) - C, \quad (17)$$

де  $C$  - константа, яка залежить від типу розподілу ймовірності похибки і кількості параметрів. Для нормального розподілу  $C = \frac{9}{2} \log(2\pi e)$ .

Інформація щодо елементів кластера  $\mathbf{K}_\varepsilon$

$$I_{\mathbf{K}_\varepsilon} = \sum_{\forall O_i \in \mathbf{K}_\varepsilon} I_{O_i} = \log \left( \frac{D_{V_\varepsilon} D_{\Lambda_\varepsilon} D_{F_\varepsilon} D_u D_{X_\varepsilon} D_{Y_\varepsilon} D_{Q_\varepsilon} D_{V_{0\varepsilon}} D_{T_\varepsilon}}{\sigma_{V_\varepsilon} \sigma_{\Lambda_\varepsilon} \sigma_{F_\varepsilon} \sigma_u \sigma_{X_\varepsilon} \sigma_{Y_\varepsilon} \sigma_{Q_\varepsilon} \sigma_{V_{0\varepsilon}} \sigma_{T_\varepsilon}} \right) - C \quad (18)$$

Проте слід враховувати, що між параметрами елементів існує статистичний зв'язок, отже за умови використання оптимального статистичного оцінювання необхідна для координації кількість інформації дещо менша. Ентропія системи випадкових величин

$$H = \ln \left[ (2\pi e)^{\frac{m}{2}} \sqrt{|R|} \right],$$

де  $|R|$  - визначник коваріаційної матриці розміром  $[m \times m]$ . Відповідно необхідна кількість інформації

$$I_{\mathbf{K}_\varepsilon} = \log \left( \frac{\sqrt{|R_{V_\varepsilon, \Lambda_\varepsilon, F_\varepsilon, u, X_\varepsilon, Y_\varepsilon, Q_\varepsilon, V_{0\varepsilon}, T_\varepsilon}|}}{\prod_{\xi \in \{V_\varepsilon, \Lambda_\varepsilon, F_\varepsilon, u, X_\varepsilon, Y_\varepsilon, Q_\varepsilon, V_{0\varepsilon}, T_\varepsilon\}} \sigma_\xi} \right),$$

де  $\xi \in \{V_\varepsilon, \Lambda_\varepsilon, F_\varepsilon, u, X_\varepsilon, Y_\varepsilon, Q_\varepsilon, V_{0\varepsilon}, T_\varepsilon\}$  означає перебір усіх компонент кожного вектора множини параметрів.

Перевірка адекватності оцінок інформаційних потоків та його залежність від параметрів системи виконувалася з допомогою експериментів на імітаційній моделі. Для цього було розроблено бібліотеку моделей типових блоків РКФС на платформі Scilab.

Результати моделювання процесу керування станом РТО, наведені на рис. 3, показують, що просторовий розподіл ресурсу є сумою експоненціально спадних функцій з модами в точках прикладання впливу.

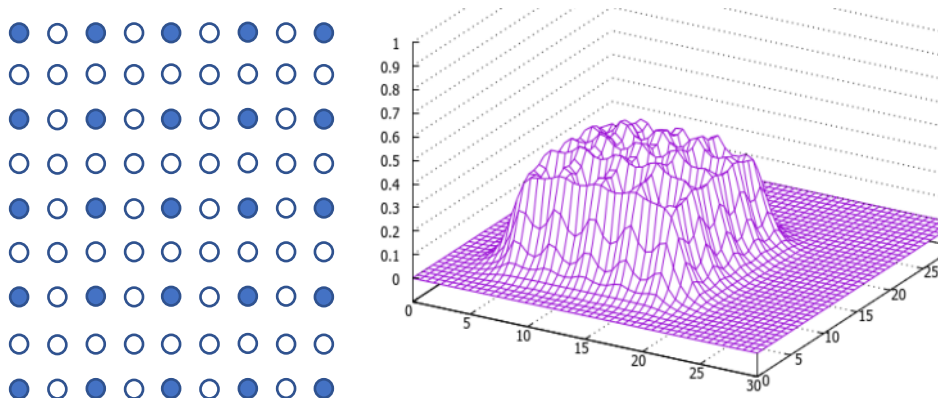


Рис. 3. Результат моделювання усталеного розподілу стану елементів РКФС для двовимірного об'єкта 5x5 елементів: ○ - некерований елемент; ● - керований елемент.

Генерування випадкових впливів  $u$  та  $X$  здійснювалося за нормальним розподілом ймовірностей, а заданого стану  $F$  - за рівномірним розподілом. Отримані в результаті статистичної обробки даних імітаційних експериментів значення інформаційних потоків за мірою Шеннона відрізнялися від розрахункових в межах 18%. Враховуючи пакетну передачу даних системи LoRaWAN, це не впливає на загальну оцінку необхідної пропускної спроможності системи передачі даних. Отже, запропонований підхід

до оцінювання інформаційних потоків у системі децентралізованої координації може бути використаний для вибору параметрів системи передачі даних.

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

Врахування просторово-часової кореляції параметрів дозволяє зменшити інформаційний потік, скоротити час передачі даних та загальний час координації. Але це вимагає ускладнення програмного забезпечення координаторів відновлення даних з урахуванням статистичних залежностей. З іншого боку, статистичну залежність при збереженні надлишковості можна використовувати для підвищення достовірності даних в умовах невизначеності.

Результати дослідження можуть бути використані для оптимізації структури і інформаційних потоків системи координації. У цьому контексті доцільно дослідити вплив структури системи координації на втрати.

### Література

1. Zhang, F., Szwaykowska, K., Wolf, W., and Mooney, V. 2008. Task scheduling for control oriented requirements for cyber-physical systems. In Real-Time Systems Symposium, 2008. 47–56.
2. Gill, C. D. and Niehaus, D. 2006. Towards system software platforms for cyber-physical systems, Position Paper. In NSF Cyber-Physical Systems Workshop.
3. LoRaWAN™ Specification, N.Sornin (Semtech), M.Luis (Semtech), T.Eirich (IBM), T.Kramp (IBM), O.Hersent (Actility), V1 .0, 2015
4. Burkov V., Novikov D. (2009). *Active systems theory (history of development)*. Problemy Upravleniya, 3. 29-35.
5. Volodymyr Dubovoi, Mariya Yukhymchuk Energy Efficiency of Smart Control Based on Situational Models
6. В. М. Дубовой, М. С. Юхимчук. Децентралізоване координаційне керування розподіленими кібер-фізичними системами з неперервними об'єктами : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2022. 230 с.
7. A Framework for Analyzing Spectrum Characteristics in Large Spatio-temporal Scales. Yijing Zeng, Varun Chandrasekaran, Suman Banerjee, Domenico Giustiniano (2019) Association for Computing Machinery. ACM ISBN 978-1-4503-6169-9/19/10. <https://doi.org/10.1145/3300061.3345450>
8. Dubovoi V., Sembrat D. and Yukhymchuk M.. Optimal Decomposition of Control of Distributed Cyber-physical System. *11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*. 2021. P. 601–605, doi: 10.1109/IDAACS53288.2021.9661007

### References

1. Zhang, F., Szwaykowska, K., Wolf, W., and Mooney, V. 2008. Task scheduling for control oriented requirements for cyber-physical systems. In Real-Time Systems Symposium, 2008. 47–56.
2. Gill, C. D. and Niehaus, D. 2006. Towards system software platforms for cyber-physical systems, Position Paper. In NSF Cyber-Physical Systems Workshop.
3. LoRaWAN™ Specification, N.Sornin (Semtech), M.Luis (Semtech), T.Eirich (IBM), T.Kramp (IBM), O.Hersent (Actility), V1 .0, 2015
4. Burkov V., Novikov D. (2009). *Active systems theory (history of development)*. Problemy Upravleniya, 3. 29-35.
5. Volodymyr Dubovoi, Mariya Yukhymchuk Energy Efficiency of Smart Control Based on Situational Models
6. V. M. Dubovoi, M. S. Yukhymchuk. *Detsentralizovane koordynatsiine keruvannia rozpodilenyi kiber-fizychny systemamy z neperervnyimi ob'ektamy : monohrafiia*. Vinnytsia : VNTU, 2022. 230 c.
7. A Framework for Analyzing Spectrum Characteristics in Large Spatio-temporal Scales. Yijing Zeng, Varun Chandrasekaran, Suman Banerjee, Domenico Giustiniano (2019) Association for Computing Machinery. ACM ISBN 978-1-4503-6169-9/19/10. <https://doi.org/10.1145/3300061.3345450>
8. Dubovoi V., Sembrat D. and Yukhymchuk M.. Optimal Decomposition of Control of Distributed Cyber-physical System. *11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*. 2021. R. 601–605, doi: 10.1109/IDAACS53288.2021.9661007

---

За зміст повідомлень редакція відповідальності не несе

**Повні вимоги до оформлення рукопису**  
**[http://journals.khnu.km.ua/vestnik/?page\\_id=37](http://journals.khnu.km.ua/vestnik/?page_id=37)**

**Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету,  
протокол № 6 від 22.06.2022 р.**

Підп. до друку 29.12.2022 р. Ум.друк.арк. 13,1 Обл.-вид.арк. 26,05  
Формат 30x42/4, папір офсетний. Друк різнографією.  
Наклад 100, зам. № \_\_\_\_\_

---

Тиражування здійснено з оригінал-макету, виготовленого  
редакцією журналу “Вісник Хмельницького національного університету”  
редакційно-видавничим центром Хмельницького національного університету  
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1. тел (0382) 72-83-63