

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТАВРІЙСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

*Журнал заснований у 1918 році*

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ  
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

**Серія: Технічні науки**

**Том 34 (73) № 6 2023**



Видавничий дім  
«Гельветика»  
2023

## **Головний редактор:**

**Кисельов Володимир Борисович** – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського.

## **Члени редакційної колегії:**

**Медведєв Микола Георгійович** (відповідальний секретар) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

**Бронін Сергій Вадимович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем та технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка;

**Домніч Володимир Іванович** – кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

**Дехтяр Анатолій Соломонович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри архітектурних конструкцій Національної академії образотворчого мистецтва і архітектури;

**Дичко Аліна Олегівна** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри геоінженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**Дубко Валерій Олексійович** – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри вищої математики Київського національного університету технологій та дизайну;

**Єремєєв Ігор Семенович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

**Лисенко Олександр Іванович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**Огородник Станіслав Станіславович** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

**Сегай Олександр Михайлович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

**Чумаченко Сергій Миколайович** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри інформаційних систем Національного університету харчових технологій;

**Цомко Олена** – доктор філософії по спеціальності «Безпека і управління інформацією», відділення комп'ютерної інженерії, Інститут Міжнародної освіти, Університет Донгсо, Республіка Корея.

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

**Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet  
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського  
(протокол № 6 від 27.12.2023 року)**

Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки» зареєстровано Міністерством юстиції України (Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого ЗМІ серія КВ № 22895-12795Р від 11.08.2017 року)

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») з технічних наук (спеціальності: 144. Теплоенергетика, 161. Хімічні технології та інженерія, 172. Телекомунікації та радіотехніка) відповідно до Наказу МОН України від 17.03.2020 № 409 (додаток 1), 121. Інженерія програмного забезпечення, 123. Комп'ютерна інженерія, 126. Інформаційні системи та технології, 151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 275. Транспортні технології (за видами) відповідно до Наказу МОН України від 02.07.2020 № 886 (додаток 4)

Журнал включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus International (Республіка Польща)

Сторінка журналу: [www.tech.vernadskyjournals.in.ua](http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua)

**ISSN 2663-5941 (Print)**

**ISSN 2663-595X (Online)**

© Таврійський національний університет ім. В.І. Вернадського, 2023

## ЗМІСТ

### ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

<b>Petryk V.O., Trubachev S.I., Kolodezhnyi V.A.</b> STUDY OF THE CONTACT ZONE IN WIRE POTENTIOMETERS.....	1
<b>Petryk V.O., Trubachev S.I., Kolodezhnyi V.A.</b> DETERMINING THE FORCE OF IMPACT OF THE BRUSH ON THE COIL IN WIREWIRE POTENTIOMETERS .....	7

### РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

<b>Burkovskiy Ya.Yu., Zinkovsky Yu.F.</b> DIGITAL POTENTIOMETER-CONTROLLED PROGRAMMABLE INSTRUMENTATION AMPLIFIER.....	12
<b>Демиденко О.А., Лебедев Д.Ю.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ГОЛОСОВОЇ АКТИВНОСТІ В СИСТЕМАХ З НИЗЬКИМ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ.....	19
<b>Сайко В.Г., Наритник Т.М., Криволапов Я.В., Криволапов Г.Я.</b> СПОСІБ РОЗВАНТАЖЕННЯ ТРАФІКУ ДЛЯ ІНТЕГРОВАНОЇ АРХІТЕКТУРИ МЕРЕЖІ НА БАЗІ НИЗЬКООРБІТАЛЬНОЇ СУПУТНИКОВОЇ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ ТА БПЛА.....	24
<b>Semenov A.O., Pinaiev V.O., Khloba A.A., Shurkhal M.Yu., Olkhovych V.M.</b> MULTIBAND GRAPHIC EQUALIZER BASED ON AMPLIFYING STAGES WITH THE INCLUSION OF A BANDPASS FILTER IN THE FEEDBACK LOOP.....	31
<b>Сушин І.О., Буткевич Г.Ю.</b> МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЗВ'ЯЗНОСТІ ВУЗЛІВ БЕЗДРОТОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ ПРИ УМОВІ ВИКОРИСТАННЯ БАГАТОРІВНЕВОЇ МЕРЕЖІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ АЕРОПЛАТФОРМ.....	39

### ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

<b>Антощук С.Г., Іванова О.М.</b> ПІДХІД ДО ЗБІЛЬШЕННЯ ОБСЯГУ ПРИХОВАНОГО ЗБЕРІГАННЯ КОНТРОЛЬНИХ ДАНИХ, ПРИЗНАЧЕНИХ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ FPGA-КОМПОНЕНТІВ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ.....	47
<b>Varyshych L.M.</b> OVERVIEW OF MIXED STRATEGIES IN STACKELBERG EVOLUTIONARY GAME THEORY APPROACH OF POPULATION CONTROL-CASE OF POPULATION GROWTH CONTROL.....	54
<b>Бешлей М.І., Пастух В.А., Бешлей Г.В., Андрушак В.С., Климаш М.М.</b> РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ МОБІЛЬНОЇ СИСТЕМИ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ ТА ГОЛОСОВОГО УПРАВЛІННЯ ДЛЯ ЛЮДЕЙ З ВАДАМИ ЗОРУ.....	62
<b>Haitan O.M., Kurylekh A.S., Havrylko D.D.</b> GENDER-SENSITIVE ANALYSIS OF THE STATE OF THE IT INDUSTRY IN UKRAINE.....	71
<b>Гладка О.М., Карпович І.М., Сех О.Б.</b> ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА БУДІВЕЛЬНОГО МАГАЗИНУ.....	78
<b>Довбиш І.О., Муравйов О.В.</b> ЗАЛЕЖНІСТЬ АЛГОРИТМУ ВИБОРУ ЛІДЕРА РОЮ ВІД РІВНЯ АВТОНОМНОСТІ БПЛА.....	84
<b>Заболотний О.В., Ходєєв А.А.</b> СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ГОМОГЕННОСТІ ВОДНО-ПАЛИВНОЇ ЕМУЛЬСІЇ.....	91
<b>Котенко М.М., Вакалюк Т.А.</b> ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ВЗАЄМОДІЇ МІКРОСЕРВІСНИХ КОМПОНЕНТІВ.....	98
<b>Лісовець С.М.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОКОЛИВАНЬ В КОНТУРІ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМ ПРИВОДОМ ПРОМИСЛОВОГО МАНІПУЛЯЦІЙНОГО РОБОТА ПО ПОЛОЖЕННЮ.....	107
<b>Макарова Л.М., Латанська Л.О.</b> ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ НЕЛІНІЙНИХ РЕГРЕСІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗМІРУ ВЕБ-ЗАСТОСУНКІВ, ЩО СТВОРЮЮТЬСЯ МОВОЮ PYTHON З ВИКОРИСТАННЯМ DJANGO REST FRAMEWORK.....	112

<b>Олещенко Л.М., Трушина Д.В.</b> ПРОГРАМНИЙ МЕТОД ПРОГНОЗУВАННЯ ВАРТОСТІ НЕРУХОМОСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ТА РЕГРЕСІЙНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ.....	118
<b>Петросян А.Р.</b> ОРГАНІЗАЦІЯ ТЕСТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БОРТОВОГО КОМП'ЮТЕРА БЕЗПІЛОТНОГО ПОВІТРЯНОГО СУДНА.....	127
<b>Пилипенко Ю.М., Куприсенко П.Д., Кисельов В.Б.</b> КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА ВИРОЩУВАННЯ РОСЛИН В БЕЗҐРУНТОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ.....	132
<b>Рувінська В.М., Тройніна А.С.</b> ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ (МЕТОДИКА) РОЗРОБКИ НАВЧАЛЬНИХ КОМБІНАТОРНИХ ІГОР: ПЕРШІ КРОКИ.....	140
<b>Sukhaniuk I.S., Potarova K.R., Nalyvaichuk M.V., Vovk L.B.</b> TEXT SUMMARIZATION BASED ON TOPICRANK METHOD AND TEXT-TO-TEXT TRANSFORMER NEURAL NETWORK.....	147
<b>Темчур В.С., Баган Т.Г.</b> МЕТОДИ ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ.....	155
<b>Yue Zheng, Robotko S.P., Chenjian Dong, Jianjun Wang, Ravliuk V.V., Topalov A.M.</b> CLOUD-BASED GPS SIGNAL PROCESSING OF THE DRONE USING RASPBERRY PI AND PIXHAWK 6C FLIGHT CONTROLLER.....	163
<b>Chumachenko S.M., Popel V.A.</b> UZASADNIENIE NAUKOWE METOD WYKORZYSTYWANIA BEZZAŁOGOWYCH KOMPLEKSÓW LOTNICZYCH W ZAPOBIEGANIU SYTUACJI AWARYJNEJ.....	169
<b>ЕНЕРГЕТИКА</b>	
<b>Безродний М.К., Тесленко О.І., Притула Н.О., Дерій В.О., Сліжевський К.Д.</b> ТЕХНІЧНІ БАР'ЄРИ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕПЛОНАСОСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У СИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ.....	175
<b>Волощук В.А., Некрашевич О.В., Богза М.С., Гікало П.В.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОНАСОСНОЇ УСТАНОВКИ ТИПУ «ВОДА-ВОДА».....	184
<b>ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ</b>	
<b>Кривошеєва В.С., Федоскіна С.В., Кириленко М.І., Майзеліс А.О.</b> УМОВИ СПІВОСАДЖЕННЯ CU, NI I ZN В ПОЛІЛІГАНДНИХ ЕЛЕКТРОЛІТАХ.....	193
<b>Спасьонова Л.М., Суббота І.С., Готорук А.Є.</b> ВИКОРИСТАННЯ ЗОЛОШЛАКОВИХ ВІДХОДІВ ТЕПЛОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БУДІВЕЛЬНОЇ КЕРАМІКИ.....	199
<b>ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ</b>	
<b>Силка І.М., Кривчик М.А., Магияшук О.В., Ющенко Н.М., Павлюченко О.С.</b> СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ БЕЗПЕЧНОСТІ ТА ЯКОСТІ ПРИГОТУВАННЯ СОУСІВ-ДРЕСІНГІВ У ЗАКЛАДАХ РЕСТОРАННОГО ГОСПОДАРСТВА.....	209
<b>ТРАНСПОРТ</b>	
<b>Боровик С.С., Кравченко О.А., Стеба А.А.</b> ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЕКСПОРТНОГО ВАНТАЖОПОТОКУ ФЕРОСПЛАВІВ З УКРАЇНИ МОРСЬКИМ ТРАНСПОРТОМ.....	215
<b>Грушевська Т.М., Стрелко О.Г., Бердниченко Ю.А., Карпенко А.А., Солтис І.В.</b> СВІТОВИЙ ДОСВІД ОРГАНІЗАЦІЇ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ.....	220
<b>Даки О.А., Войченко Т.О., Штрибець В.В., Маннапова О.В., Рященко О.І.</b> АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗУ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПОШКОДЖЕНЬ ПІДШИПНИКІВ ВАЛОПРИВОДУ СУДНОВОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ.....	225

<b>Дакі О.А., Войченко Т.О., Штрибець В.В., Рященко О.І.</b> МЕТОД КОНТРОЛЮ ДВОХВАЛЬНОГО ПРОПУЛЬСИВНОГО КОМПЛЕКСУ ШВИДКІСНИХ СУДЕН З ЧАСТКОВО ЗАНУРЕНИМИ ГВИНТАМИ.....	232
<b>Доля К.В., Доля О.Є.</b> СИСТЕМНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ МАРШРУТІВ.....	238
<b>Кириллова В.Ю., Кириллова О.В.</b> ОСНОВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ТРЕНДИ У СФЕРІ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ У ДІЯЛЬНОСТІ ТРАНСПОРТНО-ЕКСПЕДИТОРСЬКИХ КОМПАНІЙ.....	244
<b>Мельник О.М.</b> ОСНОВНІ КОНЦЕПЦІЇ БЕЗПЕЧНОЇ ОБРОБКИ ТА ТРАНСПОРТУВАННЯ ПАЛУБНИХ ВАНТАЖІВ.....	251
<b>Mukovska D.</b> RESULTS OF SIMULATION STUDIES OF THE TRANSPORT AND PRODUCTION SYSTEM OF WASTE RECYCLING IN THE CONDITIONS OF A METALLURGICAL ENTERPRISE.....	258
<b>Петренко О.І.</b> КОНТРЕЙЛЕРНІ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВАНТАЖІВ ЯК НАПРЯМ РОЗВИТКУ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ З УРАХУВАННЯМ СУЧАСНИХ РЕАЛІЙ.....	263
<b>Petrov LM., Kishianus I.V., Verpivskiy S.M., Malinovskiy O.A., Nikishyn V.A., Sheluhin S.V.</b> CONSTRUCTION POSSIBILITIES WITH VARIABLE UNDERCARRIAGE GEOMETRY.....	270
<b>Пліта Л.Л., Іваненко В.М., Федунів В.М., Трофименко І.В.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИЗНАЧЕННЯ ЦІЛІСНОСТІ СУЧАСНИХ ІНТЕГРОВАНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ.....	275
<b>Пліта Л.Л., Трофименко І.В., Шевченко А.П., Іваненко В.М.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОЕФІЦІЄНТА ПРОНИКНОСТІ РЕФРИЖЕРАТОРНОГО ВАНТАЖУ В РАЗІ ЗАТОПЛЕННЯ ВІДСІКУ СУДНА.....	282
<b>Стрелко О.Г., Грушевська Т.М., Бердниченко Ю.А., Римша О.Ю.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ ПАСАЖИРОПОТОКІВ У ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНОМУ ВУЗЛІ.....	289
<b>Фоменко Г.Р.</b> ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ РОЗВИТКУ СУСПІЛЬНОГО ПРОСТОРУ У МІСТАХ.....	294
<b>Чимшир В.І., Тірон-Воробйова Н.Б., Шик Е., Малий В.С.</b> КОНЦЕПТУАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО ЗНЕЗАРАЖЕННЯ БАЛАСТУ ТА ЙОГО ЗАЛИШКІВ ІЗ ШЛАМОВИХ ЦИСТЕРН МОРСЬКИХ СУДЕН.....	299
<b>БУДІВНИЦТВО</b>	
<b>Чичуліна К.В., Щур-Дунець О.І., Щур-Дунець О.І.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАДІЙНОСТІ ЖОРСТКИХ ВУЗЛІВ РАМНИХ КАРКАСІВ .....	308
<b>ГЕОДЕЗІЯ</b>	
<b>Гунько І.С.</b> ДОСВІД ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ GOOGLE EARTH ДЛЯ ПОБУДОВИ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ СИТУАЦІЇ.....	312
<b>ЕЛЕКТРОНІКА</b>	
<b>Арсенюк Д.О., Зіньковський Ю.Ф.</b> МОДЕЛЬ БЕЗМОСТОВОГО КОРЕКТОРА КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ КОНФІГУРАЦІЇ “ТОТЕМ РОЛЕ” З ВИКОРИСТАННЯМ ШИРОКОЗОННИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ.....	317
<b>Лук’янюк С.В.</b> СТРАТЕГІЇ ВІДНОВЛЮВАННЯ ВИРОБНИЦТВА У ЕЛЕКТРОННІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ.....	323
<b>ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....</b>	331

# CONTENTS

## INDUSTRIAL ENGINEERING

**Petryk V.O., Trubachev S.I., Kolodezhnyi V.A.**

STUDY OF THE CONTACT ZONE IN WIRE POTENTIOMETERS.....1

**Petryk V.O., Trubachev S.I., Kolodezhnyi V.A.**

DETERMINING THE FORCE OF IMPACT OF THE BRUSH ON THE COIL  
IN WIREWIRE POTENTIOMETERS .....7

## RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

**Burkovskiy Ya. Yu., Zinkovsky Yu.F.**

DIGITAL POTENTIOMETER-CONTROLLED PROGRAMMABLE  
INSTRUMENTATION AMPLIFIER.....12

**Demydenko O.A., Lebedev D.Yu.**

VOICE ACTIVITY DETECTION IN LOW-POWER SYSTEMS.....19

**Saiko V.G., Narytnyk T.M., Kryvolapov Ya.V., Kryvolapov H.Ya.**

TRAFFIC OFFLOADING METHOD FOR INTEGRATED NETWORK ARCHITECTURE  
BASED ON LOW-ORBIT SATELLITE COMMUNICATION SYSTEM AND UAV.....24

**Semenov A.O., Pinaiev B.O., Khloba A.A., Shurkhal M.Yu., Olkhovych V.M.**

MULTIBAND GRAPHIC EQUALIZER BASED ON AMPLIFYING STAGES  
WITH THE INCLUSION OF A BANDPASS FILTER IN THE FEEDBACK LOOP.....31

**Sushyn I.O., Butkevych H.Yu.**

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE CONNECTIVITY OF WIRELESS SENSOR NETWORK  
NODES WHEN USING A MULTILEVEL NETWORK  
OF TELECOMMUNICATION AEROPLATFORMS.....39

## INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

**Antoschuk S.H., Ivanova O.M.**

APPROACH TO INCREASING THE VOLUME OF HIDDEN STORAGE OF CONTROL DATA  
FOR MONITORING FPGA COMPONENTS OF COMPUTER SYSTEMS.....47

**Baryshych L.M.**

OVERVIEW OF MIXED STRATEGIES IN STACKELBERG EVOLUTIONARY GAME THEORY  
APPROACH OF POPULATION CONTROL-CASE OF POPULATION GROWTH CONTROL.....54

**Beshley M.I., Pastukh V.A., Beshley H.V., Andrushchak V.S., Klymash M.M.**

DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT MOBILE SYSTEM OF COMPUTER VISION  
AND VOICE CONTROL FOR VISUAL IMPAIRED PEOPLE.....62

**Haitan O.M., Kurylekh A.S., Havrylko D.D.**

GENDER-SENSITIVE ANALYSIS OF THE STATE OF THE IT INDUSTRY IN UKRAINE.....71

**Hladka O.M., Karpovich I.M., Sekh O.B.**

INFORMATION SYSTEM OF THE BUILDING STORE.....78

**Dovbysh I.O., Muraviov O.V.**

THE SWARM LEADER ELECTION ALGORITHM DEPENDENCE  
OF THE UAVS AUTONOMY LEVEL .....84

**Zabolotnyi O.V., Khodieiev A.A.**

WATER-FUEL EMULSION HOMOGENEITY CONTROL SYSTEM.....91

**Kotenko M.M., Vakaliuk T.A.**

THEORETICAL ANALYSIS OF MICROSERVICE COMPONENTS INTERACTION PRINCIPLES...98

**Lisovets S.M.**

RESEARCH OF AUTO-OSCILLATIONS IN THE CONTROL CIRCUIT  
OF THE ELECTROMECHANICAL DRIVE OF THE INDUSTRIAL MANIPULATION ROBOT  
BY POSITION.....107

**Makarova L.M., Latanska L.O.**

COMPARATIVE ANALYSIS OF NONLINEAR REGRESSION MODELS TO PREDICT THE SIZE  
OF WEB APPLICATIONS CREATED IN PYTHON USING THE DJANGO REST FRAMEWORK.....112

<b>Oleshchenko L.M., Trushyna D.V.</b> PREDICTIVE SOFTWARE METHOD FOR REAL ESTATE VALUATION USING MACHINE LEARNING AND REGRESSION ANALYSIS.....	118
<b>Petrosian A.R.</b> ORGANIZATION OF TESTING THE SOFTWARE OF THE ON-BOARD COMPUTER OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE.....	127
<b>Pylypenko Yu.M., Kupryienko P.D., Kyselov V.B.</b> COMPUTER INTEGRATED SYSTEM GROWING OF PLANTS IN A SOILLESS ENVIRONMENT...	132
<b>Ruvinska V.M., Troynina A.S.</b> INFORMATION TECHNOLOGY FOR THE DEVELOPMENT OF TRAINING COMBINATOR GAMES: FIRST STEPS.....	140
<b>Sukhaniuk I.S., Potapova K.R., Nalyvaichuk M.V., Vovk L.B.</b> TEXT SUMMARIZATION BASED ON TOPICRANK METHOD AND TEXT-TO-TEXT TRANSFORMER NEURAL NETWORK.....	147
<b>Temchur V.S., Bahan T.H.</b> PREDICTIVE MAINTENANCE TECHNIQUES USING DEEP LEARNING ALGORITHMS.....	155
<b>Yue Zheng, Robotko S.P., Chenjian Dong, Jianjun Wang, Ravliuk V.V., Topalov A.M.</b> CLOUD-BASED GPS SIGNAL PROCESSING OF THE DRONE USING RASPBERRY PI AND PIXHAWK 6C FLIGHT CONTROLLER.....	163
<b>Chumachenko S.M., Popel V.A.</b> SCIENTIFIC JUSTIFICATION OF THE METHODS OF USING UNMANNED COMPLEXES FOR PREVENTING EMERGENCY SITUATIONS.....	169
 <b>POWER ENGINEERING</b>	
<b>Bezrodny M.K., Teslenko O.I., Prytula N.O., Derii V.O., Slizhevskiy K.D.</b> TECHNICAL BARRIERS TO IMPLEMENTATION OF HEAT PUMPS TECHNOLOGY IN CENTRALIZED HEAT SUPPLY SYSTEMS .....	175
<b>Voloshchuk V.A., Nekrashevych O.V., Bohza M.S., Hikalo P.V.</b> DYNAMIC CHARACTERISTICS OF AN AIR-SOURCE HEAT-PUMP SYSTEM.....	184
 <b>CHEMICAL TECHNOLOGY</b>	
<b>Kryvosheieva V.S., Fedoskina S.V., Kyrlyenko M.I., Maizelis A.O.</b> CONDITIONS OF CU, NI AND ZN CODEPOSITIONATION IN POLYLIGAND ELECTROLYTES.....	193
<b>Spasonova L.M., Subbota I.S., Hotoruk A.Ye.</b> USE OF ASH SLAG TYPES OF THERMAL POWER PLANTS FOR THE PRODUCTION OF BUILDING CERAMICS.....	199
 <b>TECHNOLOGY OF FOOD PROCESSING AND CONSUMER GOODS INDUSTRY</b>	
<b>Sylka I.M., Kryvchyk M.A., Matyiashchuk O.V., Yushchenko N.M., Pavliuchenko O.S.</b> SAFETY AND QUALITY MONITORING SYSTEM OF PREPARATION OF SAUCES-DRESSINGS IN RESTAURANT ESTABLISHMENTS.....	209
 <b>TRANSPORT</b>	
<b>Borovyk S.S., Kravchenko O.A., Steba A.A.</b> PROBLEMS AND PROSPECTS OF THE DEVELOPMENT OF THE EXPORT FREIGHT FLOW OF FERRO-ALLOYS FROM UKRAINE BY MARINE TRANSPORT.....	215
<b>Hrushevska T.M., Strelko O.H., Berdnychenko Yu.A., Karpenko A.A., Soltys I.V.</b> WORLD EXPERIENCE IN ORGANIZING PASSENGER TRANSPORTATION IN RAILWAY TRANSPORT.....	220
<b>Daki O.A., Voichenko T.O., Shtrybets V.V., Mannapova O.V., Riashchenko O.I.</b> ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF USING WAVELET ANALYSIS TO IDENTIFY DAMAGE TO SHAFT DRIVE BEARINGS OF A SHIP'S POWER PLANT.....	225

<b>Daki O.A., Voichenko T.O., Shtrybets V.V., Riashchenko O.I.</b> METHOD FOR CONTROLLING THE TWIN-SHAFT PROPULSION COMPLEX OF HIGH-SPEED VESSELS WITH PARTIALLY SUBMERGED PROPELLERS.....	232
<b>Dolia K.V., Dolia O.Ye.</b> SYSTEMATIC MODELING OF THE FUNCTIONALITY OF ROUTES.....	238
<b>Kyrylova V.Yu., Kyrylova O.V.</b> MAIN TECHNOLOGICAL TRENDS IN THE SPHERE OF INFORMATION SECURE DELIVERY SYSTEMS IN THE ACTIVITY OF TRANSPORT AND FORWARDING COMPANIES.....	244
<b>Melnyk O.M.</b> CORE CONCEPTS OF SAFE HANDLING AND TRANSPORTATION OF ON-DECK CARGO.....	251
<b>Mukovska D.</b> RESULTS OF SIMULATION STUDIES OF THE TRANSPORT AND PRODUCTION SYSTEM OF WASTE RECYCLING IN THE CONDITIONS OF A METALLURGICAL ENTERPRISE.....	258
<b>Petrenko O.I.</b> CONTRAILER CARGO TRANSPORTATION AS A DIRECTION FOR THE DEVELOPMENT OF THE TRANSPORT SYSTEM OF UKRAINE TAKEN INTO CONSIDERATION OF MODERN REALITIES.....	263
<b>Petrov L.M., Kishianus I.V., Verpivskiy S.M., Malinovskiy O.A., Nikishyn V.A., Sheluhin S.V.</b> CONSTRUCTION POSSIBILITIES WITH VARIABLE UNDERCARRIAGE GEOMETRY.....	270
<b>Plita L.L., Ivanenko V.M., Fedunov V.M., Trofymenko I.V.</b> STUDYING THE PECULIARITIES OF DETERMINING THE INTEGRITY OF MODERN INTEGRATED NAVIGATION SYSTEMS.....	275
<b>Plita L.L., Trofymenko I.V., Shevchenko A.P., Ivanenko V.M.</b> STUDY OF THE INFLUENCE OF THE PERMEABILITY COEFFICIENT OF REFRIGERATED CARGO IN CASE OF FLOODING OF THE SHIP'S COMPARTMENT.....	282
<b>Strelko O.H., Hrushevska T.M., Berdnychenko Yu.A., Rymsha O.Yu.</b> RESEARCH ON THE PATTERNS OF PASSENGER FLOW FORMATION IN A TRANSPORT INTERCHANGE HUB.....	289
<b>Fomenko H.R.</b> FEATURES OF FORMING THE DEVELOPMENT OF PUBLIC SPACE IN CITIES.....	294
<b>Chymshyr V.I., Tiron-Vorobiova N.B., Šik E., Malyy V.S.</b> CONCEPTUAL APPROACHES TO DECONTAMINATION OF BALLAST AND ITS RESIDUES FROM SLUDGE TANKS OF SEA VESSELS.....	299
<b>CONSTRUCTION</b>	
<b>Chichulina K.V., Shchur-Dunets O.I., Shchur-Dunets O.I.</b> STUDY OF RELIABILITY PARAMETERS OF RIGID NODES OF FRAME FRAMES.....	308
<b>GEODESY</b>	
<b>Hunko I.S.</b> EXPERIENCE OF USING GEOINFORMATION SYSTEM GOOGLE EARTH FOR DIGITAL SITUATION MODELING.....	312
<b>ELECTRONICS</b>	
<b>Arseniuk D.O., Zinkovsky Yu.F.</b> MODEL OF BRIDGELESS TOTEM POLE POWER FACTOR CORRECTOR USING WIDEBAND SEMICONDUCTOR DEVICES.....	317
<b>Lukyanuk S.V.</b> STRATEGIES FOR RENEWABLE PRODUCTION IN THE ELECTRONICS INDUSTRY.....	323
<b>INFORMATION ABOUT AUTHORS.....</b>	331



# ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

UDC 539.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/01>**Petryk V.O.**National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**Trubachev S.I.**National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**Kolodezhnyi V.A.**National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

## STUDY OF THE CONTACT ZONE IN WIRE POTENTIOMETERS

*The main topic of the article is the study of the behavior of contact resistance as the PdW-20–AuCu-800 pair wears out. The studies were carried out on 17 PTP-type potentiometers of the same nominal value – 1 k $\Omega$  with different contact forces – from 0.3 g to 5.0 g. The devices were installed on test stands. The running track of each potentiometer is regularly cleaned using the waterjet method. Each potentiometer has 12 conductivity control points assigned every 10 thousand running cycles (one cycle – forward and reverse stroke of the brush) at a speed of  $V=26$  cycles/min. Tests were carried out up to 70 thousand cycles. The search for 12 control points was carried out using an optical dividing head. Based on the results of the study, the main dependence of the contact resistance on the number of cycles for each contact force was constructed. Analysis of the obtained dependencies shows a continuous process of destruction and restoration of the oxide film (secondary structures) for all contact forces. Confirmation was received for a pair: winding – nichrome, brush – ZIM-800. Of all the contact forces, the optimal values have been established – these are 4 g and 5 g. With these forces, the devices worked 70 thousand cycles without interrupting the conduction process. In addition, the dependence of the resistance of the oxide film on the contact force was constructed. The double amplitude of the oscillation of the contact resistance at a certain force was taken as the value of the film resistance. This gave us the opportunity to abandon R. Holm's method for determining the resistance of the oxide film. The constructed dependence of the contact resistance on the contact force according to the analytical expression and practical results of the study shows the identity of the curves, and most importantly, in the region of the optimal contact force (4 g) a bend in the dependence is visible, indicating the presence of a separating lubricating layer of oxide in the contact zone a film that creates a long-term service life of the device, and at the level of a tunnel conductivity film that maintains reliable conductivity of the contact pair. Further, after 70 thousand mileage cycles, the study of the wear of optimal contact pairs 4 g and 5 g was accompanied only by conductivity monitoring on a noise level-monitoring installation. This is the first attempt to create equipment for dynamic monitoring of the conductivity of low-current sliding contacts (LSC). The production of more advanced equipment that makes it possible to record the number of contact resistance values of a certain level in magnitude and duration will make it possible, using probabilistic characteristics, to arrange all contact pairs existing in operation in a row with their operational parameters and create an LSC information directory. The development of the research results obtained is the creation of a new type of LSC, where the technology for creating the old potentiometer of the PTP type has been changed. The research results gave good results. The presence of a high-resistance winding fastening agent (instead of epoxy resin) with low capillary forces will make it possible to create a new type of PTP with much higher performance.*

**Key words:** contact force, contact resistance, wear, oxide film, wirewound potentiometers.

**Formulation of the problem.** Potentiometers are widely used in various automation systems, in computers and servo drive systems. For the most part, they serve to convert linear and angular movements into corresponding voltage values and are used as voltage dividers. In computers, these converters are used to perform various mathematical operations.

Wire-wound potentiometers, which are most widespread, are divided into single-rotating and multi-rotating. The law of change in the resistance of potentiometers can be set in three ways: using a shaped frame, using a winding with variable pitch and electrical shunting of individual sections of the winding.

There are two ways to arrange potentiometers in a structure [3, 8]:

- potentiometers used in radio equipment and computer technology are a separate device with a large number of parts placed in a housing with an external contact group;

- potentiometers used in gyroscopic devices, in precision mechanics devices, as a rule, consist of two main structural elements: a resistor (frame with winding) and a movable contact group (motor). The resistor element and the motor are mounted in different blocks and are joined only during the overall assembly of the product itself. The common elements in both groups are resistors and motors. The reliability, accuracy of function reproduction and the entire operation of the potentiometer depend on them.

**Analysis of recent research and publications.** Analysis of studies shows that the appearance of contact failures is observed after the sensor has worked out part of its service life [4, 7]. This indicates that in the contact zone there is a significant increase in contact resistance  $R_f$ . Therefore, the goal of the work was to study the change in  $R_f$  as the contact pair wears out. As the pair wears out, the contact resistance changes its value – it increases, then, after a certain period of time, it decreases. This leads to the conclusion that the oxide film grows in the contact zone, matures, as it were, and then collapses, while the contact resistance decreases. With increasing contact force, vibrations occur with a smaller amplitude, and with optimal contact force, the pair works with an oxide film, but of such a thickness that it easily breaks through the tunnel effect.

Similar studies on changes in contact resistance were carried out and presented in works [1, 2, 7].

**Task statement.** The purpose of this study is to study how the contact resistance in the contact zone changes as the contact pair wears out.

**Outline of the main material of the study.** Research was carried out for a contact pair PdW-20–AuCu-800.

The study used the same type of wirewound potentiometers of the same rating with different contact forces  $P = 0.3 \text{ g} - 2 \text{ pcs.}$ ,  $P = 0.9 \text{ g} - 2 \text{ pcs.}$ ,  $P = 1.5 \text{ g} - 3 \text{ pcs.}$ ,  $P = 2.1 \text{ g} - 3 \text{ pcs.}$ ,  $P = 2.7 \text{ g} - 3 \text{ pcs.}$ ,  $P = 4.0 \text{ g} - 3 \text{ pcs.}$ ,  $P = 5.0 \text{ g} - 3 \text{ pcs.}$

Each contact surface was processed according to a regulated waterjet method (Fig. 1).



Fig. 1. View of the contact surface treated with waterjet

To implement the research program, we used: running stands, on which the reciprocating movement of the brush in a circle is ensured (Fig. 2), a specially equipped stand with an ODC (optical dividing head), on which, after the run, a potentiometer is installed and set the zero position is fixed, and then to measure  $R_f$ , according to the program, the ODG rotates the potentiometer axis to the required angle.

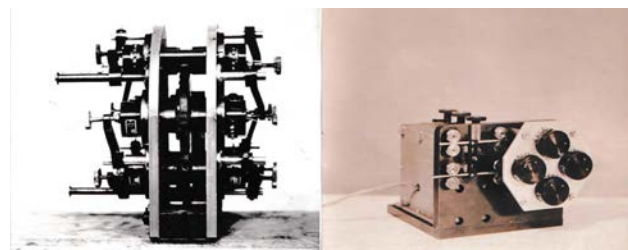


Fig. 2. Running stand

On each of the named potentiometers, 12 points were assigned on the treadmill, where after every 10 thousand cycles the contact resistance was measured, according to a well-known scheme and measurement technique [6].

Control points: from the zero point – 10 degrees, and then every 30 degrees, i.e.: 40; 70; 100; 130; 160; 190; 220; 250; 280; 310; 340 degrees. To find these points, after every ten-thousandth run, the potentiometer was removed from the testing stand, installed on a stand with an ODG, set to “0”, and then all control points were set.

Tests were carried out up to 70 thousand cycles.

The speed of movement of the brush along the resistance winding is selected  $V = 26 \text{ cycles/min.}$

From the family of obtained dependencies  $R_f = f(P)$ , curves of changes in contact resistance as the pair wears out were constructed from the average values for different values of the contact force.

As a result of the experiment, it was established that with an increase in contact force, the contact resistance decreases, however, at all contact pressures under study, there is an oscillation (“breathing”) of the measured value of the contact resistance with a certain period. The obtained dependencies are shown in Fig. 3.

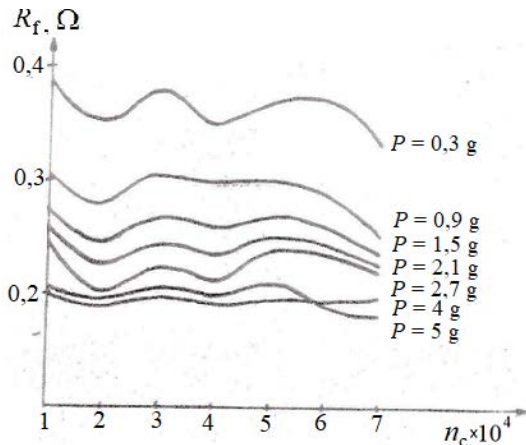


Fig. 3. Change in contact resistance as the pair wears out PdW-20–AuCu-800

Analysis of the fluctuation (“breathing”) of contact resistance leads to the following conclusion. As the current-collecting brush slides along the resistance winding, complex physical and chemical processes occurring in the contact zone contribute to the intensive formation and growth of an oxide film, as evidenced by an increase in contact resistance.

After a certain period of time, the film “ripens” and acquires a set of properties, as a result of which it is destroyed by the brush, and the contact resistance drops.

The amount of resistance drop depends on the contact force. As the contact force increases, the vibration level and amplitude decrease. Thus, the “breathing” of the measured value indicates a constant process of destruction and restoration of secondary structures in the contact zone. Consequently, the double amplitude of the contact resistance fluctuation characterizes the destroyed layer of the oxide film of such a thickness, the resistance of which is equal to the double amplitude.

To confirm this phenomenon, the same experiment was carried out, where a nichrome winding was taken as a contact pair, and the contact brush material was taken as before – AuCu-800. Nichrome was used because its main disadvantage is a stable oxide film that prevents reliable contact.

The dependence  $R_f = f(n_c)$  was plotted for one contact force  $P = 2.5$  g and is shown in Fig. 4.

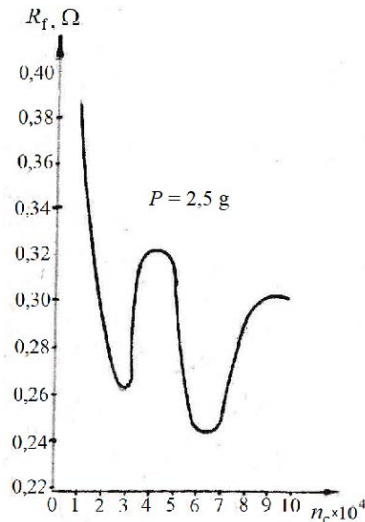


Fig. 4. Change in contact resistance as a pair of nichrome wears out–AuCu-800

Our judgments about the vibration (“breathing”) of the oxide film were confirmed. As can be seen from the dependence, the level of oscillation, its amplitude and period differ from the previously studied contact pair.

Thus, it was found that the fluctuation of the measured value occurs due to the destruction and growth of the oxide film.

Obviously, the parameters for changing the contact resistance as the contact pair wears out will be different for different pairs.

Based on our research, we determined the dependence of the change in the resistance of the oxide film on the contact force (Fig. 5 and 6) [1].

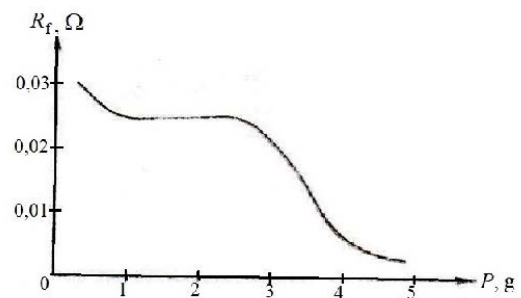


Fig. 5. Dependence of oxide film resistance on contact force

In this case, the double amplitude of the oscillation of the contact resistance at a certain force was taken as the resistance value of the oxide film.

This gave us the opportunity to abandon the existing method of R. Holm [4], which has the complexity of analytical calculations and the absence

in the literature of the values of a number of parameters included in the calculation formulas.

The resulting graphical dependence practically does not give large errors relative to the actual value of the resistance of the oxide film, since although after its destruction a small layer of film remained, it did not affect the conductivity of the contact pairs, but served as a separating layer.

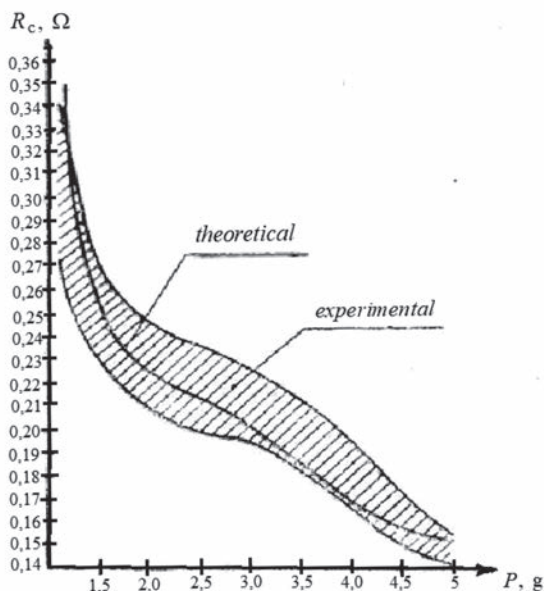


Fig. 6. Dependence of contact resistance on contact force

However, the dependence we obtained can be considered approximate, since all measurements were made statically, in laboratory conditions. The values of the previously indicated parameters in dynamics, when the brush moves along the winding of a high-resistance wire, will be more accurate. Unfortunately, these studies have not yet been carried out.

Analysis of the dependencies presented in Fig. 5 and 6, makes it possible to recommend contact forces of 4 g and 5 g as optimal for a given contact pair, since after a run of 70 thousand cycles these sensors did not disturb the process of current conduction, compared to other potentiometers, which tested for wear. With these contact forces, the potentiometers were left for further mileage, followed by checking, every 10 thousand mileage, for loss of contact.

What should be understood by the concept of loss of contact?

Low-current sliding contacts operate under friction conditions, in which activation of the contact surface, excited by dynamic loading, can be realized either due to frictional oxidation with an increase in the oxide film – then a violation of the contact

will occur, or due to more intense destruction of secondary structures leading to the process of seizure of contacting surfaces due to nose – this is the nature of failures of low-current sliding contacts.

Thus, failure should be understood as exceeding established limits in amplitude, duration of these values and frequency of occurrence of these limits of contact resistance.

The introduction of such criteria for the failure of low-current sliding contacts facilitates the development of equipment for recording failures.

Often, when measuring the number of failures at increased speeds of movement of the current-collecting brush, it is more convenient and no less important to measure not the number of failures, but their duration, which is more important for control systems.

To register failures in potentiometers, we established the following parameter, which we took as a threshold, the excess of which was considered a failure – this is contact resistance  $R_f = 60 \Omega$ .

We recorded this value using the NLC-1 installation (noise level control). Registration was carried out when the brush moved along the potentiometer winding. We called the change in contact resistance when the brush moves noise.

The experiments carried out to identify the optimal contact force for the pair under study lead to the conclusion that the most optimal contact forces for the PdW-20–AuCu-800 pair are 4 g and 5 g. Further running of the potentiometers (6 pieces) with these forces of the contact brushes showed that after running 110 thousand cycles at a contact force of 5 g, the process of setting the rubbing surfaces was observed, during which the contact resistance dropped almost to zero and the stability of its values was disrupted. This picture was observed in all three potentiometers with a mileage difference of two to three thousand cycles.

The optimal contact force for this pair should be considered  $P = 4 \text{ g}$ . With it, the process of friction and wear is steady and has the property of self-regulation, in which the rate of destruction of oxide films is equal to the rate of their formation, i.e.  $V_{fd} = V_{fr}$ . This equilibrium occurs at a minimum thickness of the oxide film, which serves as a separating, lubricating layer that prevents the process of surface setting and does not interfere with the conduction process.

Conducted studies on the wear of contact pairs and their conductivity reveal requirements for eliminating deficiencies for wirewound potentiometers.

We consider the main disadvantage to be any mechanical impact on the contact track. It is accompanied, to a greater or lesser extent, by plastic deformation, which means increased activation of the metal to the environment, which is realized by intense

saturation with oxygen and its release into the contact zone with the formation of oxide films that interfere with the process of current conduction.

**Conclusions.** Analyzing this phenomenon, the conclusion suggests itself about the creation of a potentiometer with a modified technology of its component parts. We have partially traveled this path and obtained good results.

1. The toroidal frame, made slightly barrel-shaped, is not completely dried. It is dried until the moment when high-resistance wire can be wound on it.

2. Winding is carried out with high-resistance bare wire. Winding is carried out with preload, of course, within the limits of elastic deformations. Winding is carried out on machines with a certain pitch, guaranteeing a gap between the turns, and, consequently, with the absence of interturn closure. Checking the resistance of the wire, wound and in the form of a straight wire, confirms this.

3. The wire, wound with pretension after about two weeks, presses the track on the frame with incomplete polymerization under it.

4. Drying the frame with the wire until the frame coating is completely polymerized. The wire was not further secured to the frame, as usual, with heated epoxy resin.

5. Next – according to the usual assembly technology until the contact track is prepared.

6. The contact path was washed only with gasoline.

7. The contact group is installed with an optimal force of 4 g.

Such potentiometers were manufactured. Their studies were carried out for maximum service life with testing of contact reliability. When backed up with two brushes, the potentiometers went through  $2 \cdot 10^6$  cycles. This is several times greater than the resource established by the technical specifications.

These devices have not been tested according to the program: vibration, shock, cold, heat, etc. Obviously, to be completely sure of passing the tests, it is necessary to additionally fasten the coils. Epoxy resin in the form in which it is used is not suitable, since, having significant capillary properties, it will close the treadmill, and this will lead to an unnecessary operation – stripping.

#### Bibliography:

1. Petryk V. O., Trubachev S. I., Kolodezhnyi V. A. Research of contact resistance in heat-resistant precision potentiometers. *Вчені зап. Таврійського нац. ун-ту*. 2023. Т. 34 (73). № 2. ч. 1. С. 14–17. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/03>
2. Петрик В. О., Трубачев С. І., О.М. Алексейчук О. М. Динаміка електричної ковзної контактної групи керуючої апаратури. *Інформаційні системи, механіка та керування*. 2009. Вип. 3. С. 79-87
3. Румбешта В. О. Основи технології складання приладів : підручник. Київ : ІСДО. 1993. 303 с.
4. Безвесільна О. М., Тимчик Г. С. Технологічні вимірювання та прилади. Перетворюючі пристрої приладів : підручник. Житомир : ЖДТУ. 2012. 812 с.
5. Денисюк В. О., Цирульник С. М. Мікропроцесорні системи управління : навч. посіб. Вінниця : ВНАУ. 2021. 204 с.
6. Панікарський О. С., Воробйов Д. О. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка. Харків : ХНАДУ. 2009. 152 с.
7. Jeremy Blum. Exploring Arduino: Tools and Techniques for Engineering Wizardry. 2019. 512 p.
8. Проектування мікропроцесорних систем керування : навч. посіб. / Козбур Р. І., Марущак П. О., Медвідь В. Р., Савків В. Б., Пісцью В. П.. Тернопіль : ТНТУ. 2022. 324 с
9. Матвієнко М. П., Розен В. П. Комп'ютерна схемотехніка : навч. посіб. Київ : Ліра. 2020. 192 с.
10. Новацький А. О. Імпульсна та цифрова електроніка : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ». 2014. 385 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/12372>

#### Петрик В.О., Трубачев С.І., Колодежний В.А. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗОНИ КОНТАКТУВАННЯ У ДРОТЯНИХ ПОТЕНЦІОМЕТРАХ

*Основна тема статті – це вивчення поведінки контактної опору в міру зносу пари ПДВ-20–ЗлМ-800. Дослідження проводилися на 17 потенціометрах типу ПТП одного номіналу – 1 кОм з різним контактним зусиллям – від 0,3 г до 5,0 г. Прилади були встановлені на прогонних стендах. Бігова доріжка кожного потенціометра захищена регламентно гідроабразивним методом. На кожному потенціометрі призначено 12 точок контролю провідності через кожні 10 тисяч циклів пробігу (один цикл – прямий і зворотний хід щітки) при швидкості  $V = 26$  цикл/хв. Випробування проводили до 70 тисяч циклів. Знаходження 12 точок контролю здійснювали за допомогою оптичної ділильної головки. За отриманими результатами дослідження побудована основна залежність контактної опору від числа циклів для кожного контактної опору зусилля. Аналіз отриманих залежностей показує безперервний процес руйнування та відновлення окисної плівки (вторинних структур) для всіх контактних*

зусиль. Підтвердження отримано для пари: обмотка – ніхром, щітка – ЗлМ-800. З усіх контактних зусиль встановлені оптимальні значення – це 4 г і 5 г. За цих зусиль прилади відпрацювали 70 тисяч циклів, не перериваючи провідності. Крім того, побудована залежність опору окисної плівки від контактного зусилля. За величину опору плівки брали подвійну амплітуду коливання контактного опору при певному зусиллі. Це дало нам можливість відмовитися від методики Р. Хольма щодо визначення опору окисної плівки. Побудована залежність контактного опору від контактного зусилля за аналітичним виразом і практичними результатами дослідження показує ідентичність кривих, а головне, в районі оптимального контактного зусилля (4 г) видно вигин залежності, що вказує на наявність в зоні контактування роздільного змащувального шару окисної плівки, що створює довговічну службу приладу, причому на рівні плівки тунельної провідності, що підтримує надійну провідність контактної пари. Надалі, після 70 тисяч циклів пробігу, дослідження зносу оптимальних контактних пар 4 г і 5 г супроводжувалося лише контролем провідності на установці, що контролює рівень шуму. Це перша спроба створення апаратури динамічного контролю провідності слаботочних ковзаючих контактів (СКК). Виготовлення більш досконалої апаратури, що дозволяє фіксувати кількість значень контактного опору певного рівня за величиною і тривалістю, дасть можливість, використовуючи ймовірнісні характеристики, розставити всі існуючі в експлуатації контактні пари в ряд зі своїми експлуатаційними параметрами і створити інформаційний цінний довідник СКК. Розвитком отриманих результатів досліджень є створення нового типу СКК, де змінена технологія створення старого потенціометра типу ПТП. Результати досліджень дали непогані результати. Наявність скріплювальної речовини високоомної обмотки (замість епоксидної смоли) з малими капілярними силами дозволить створити новий тип ПТП з набагато вищими показниками.

**Ключові слова:** контактне зусилля, контактний опір, знос, оксидна плівка, дротяні потенціометри.

UDC 539.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/02>**Petryk V.O.**National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**Trubachev S.I.**National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**Kolodezhnyi V.A.**National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**DETERMINING THE FORCE OF IMPACT OF THE BRUSH ON THE COIL IN WIREWIRE POTENTIOMETERS**

The research carried out by the authors established that a force of 4 g is required for a reliable contact of the PdW-20–AuCu-800 pair. At the same time, a dynamic equilibrium of the processes of creation and destruction of the oxide film at the level of the film of tunnel current conductivity is achieved. These are adhesive films that were studied by the English scientists Flom and Savage. They established that the thickness of such films at the level of  $S \approx 10^{-6}$  cm. For accurate installation of the conductive film for different contact pairs, it is necessary to have dependencies between contact force and contact resistance, and this dependence clearly shows the zone of optimal forces, as we have shown previously. The contact surface of the contact pair has roughness, and therefore the value of the contact resistance, although to a small extent, will be variable. Making a blow on such a surface imposes instability of the conduction process, which is dangerous for reliable contacting. The impact process itself, and even worse, its repetition at practically the same points, can cause plastic deformations at the contact points, which are accompanied by an intense connection with oxygen, which causes a change in the dynamic value of the contact resistance. This will lead to a loss of contact. The most dangerous thing is that for different contact pairs this value can be variable in amplitude and time. This is undesirable for control systems. Taking into account what has been said, the following must be taken into account: by solving the problem of determining the impact force of a contact brush on a winding strand, simple engineering formulas are obtained, which make it possible to select the design parameters of the contact pair at the stage of sensor design using graphic dependencies to ensure more reliable steam operation. The already mentioned graphical dependencies allow you to establish the contact force, which guarantees reliable operation of the pair.

**Key words:** impact force, contact force, reliable contact, speed of brush movement, wire potentiometer.

**Formulation of the problem.** For more effective contact in potentiometers, it is necessary to conduct research on the formation of an adhesive film and on the establishment of contact force in the brush-winding pair. These studies make it possible to increase the reliability and durability of contact in wirewound potentiometers.

**Analysis of recent research and publications.** Adhesive films were studied by English scientists Flom and Savage [7, 12]. It has been established that the contact force that occurs during the operation of potentiometers has a significant influence on contacting [8, 10]. The methodology and some results of studying contact in wirewound potentiometers are presented in [1, 2, 8]. Due to the complexity of conducting experiments, research in this direction is

insufficient. The authors also did not find engineering mechanical dependencies that would allow a quick theoretical study of the influence of various contact parameters on the contact force.

**Task statement.** The goal of the work is to obtain engineering mechanical dependencies to determine the contact force in wirewound potentiometers, and also to study the influence of various contact parameters on the specified force.

**Outline of the main material of the study.** Precision wire potentiometric sensors belong to low-current sliding contacts, in which processes caused by friction and wear of contact surfaces prevail over others, even over the phenomena of current flow. In this regard, it is of interest to determine the force of impact of the brush on the coil at the moment

of its transition from coil to coil, which introduces significant changes in the contact process.

To determine the impact force, we find the deflection of the center of ring A (Fig. 1) relative to its highest position:

when lifting the ring:

$$\delta_r = R + r - \sqrt{(R + r)^2 - \left(r + \frac{a}{2} - S\right)^2},$$

when lowering the ring:

$$\delta_l = R + r - \sqrt{(R + r)^2 - \left(S - r - \frac{a}{2}\right)^2},$$

where  $R$  – is the radius of the slip ring,

$r$  – winding wire radius,

$a$  – winding gap,

$S$  – arc coordinate of the slip ring center.

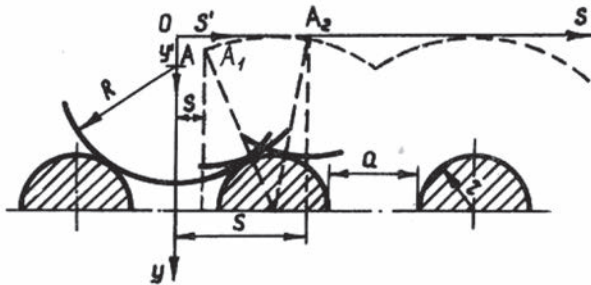


Fig. 1. Movement of the contact brush along the resistance winding

Then the speed of the center of the slip ring (projection of the speed of the center of the slip ring onto the y-axis)

when it rises:

$$V_r = \frac{d\delta_r}{dt} = \frac{-2\left(r + \frac{a}{2} - S\right)\left(-\frac{dS}{dt}\right)}{-2\sqrt{(R + r)^2 - \left(r + \frac{a}{2} - S\right)^2}} = \frac{\left(S - r - \frac{a}{2}\right)\left(\frac{dS}{dt}\right)}{\sqrt{(R + r)^2 - \left(r + \frac{a}{2} - S\right)^2}},$$

when lowering:

$$V_l = \frac{d\delta_l}{dt} = \frac{\left(S - r - \frac{a}{2}\right)\left(\frac{dS}{dt}\right)}{\sqrt{(R + r)^2 - \left(-r - \frac{a}{2} + S\right)^2}}.$$

Slip ring center speed at the beginning of the climb ( $S = 0$ ):

$$V_{l,r} = \frac{d\delta_r}{dt} = -\frac{\left(r + \frac{a}{2}\right)\left(\frac{dS}{dt}\right)_t}{\sqrt{(R + r)^2 - \left(r + \frac{a}{2}\right)^2}}, \quad (1)$$

at the end of lowering ( $S = a + 2r$ ):

$$V_{e,l} = \frac{d\delta_l}{dt} = \frac{\left(r + \frac{a}{2}\right)\left(\frac{dS}{dt}\right)_t}{\sqrt{(R + r)^2 - \left(r + \frac{a}{2}\right)^2}}.$$

Speed jump during transition from descent to ascent

$$\Delta V = V_{l,r} - V_{e,l} = \frac{-2\left(r + \frac{a}{2}\right)\left(\frac{dS}{dt}\right)_t}{\sqrt{(R + r)^2 - \left(r + \frac{a}{2}\right)^2}},$$

where  $\left(\frac{dS}{dt}\right)_t$  – value  $\left(\frac{dS}{dt}\right)$  at the moment of transition.

Change in the projection of the momentum of the slip ring onto the y-axis during one collision with the resistance winding

$$m_{\Delta V} = -\frac{2\left(r + \frac{a}{2}\right)\left(\frac{dS}{dt}\right)_t}{\sqrt{(R + r)^2 - \left(r + \frac{a}{2}\right)^2}} m_{gv},$$

where  $m_{gv}$  – mass of the ring reduced to the point of contact.

Projection onto the y-axis of the impulses of all external forces acting on the contact ring during one collision with the resistance winding,

$$N_y = \frac{-2\left(r + \frac{a}{2}\right)\left(\frac{dS}{dt}\right)_t}{\sqrt{(R + r)^2 - \left(r + \frac{a}{2}\right)^2}} m_{gv}. \quad (2)$$

Neglecting friction, we assume that the impulse of the impact force (Fig. 2), with which the resistance winding acts on the slip ring during the collision with it, is equal to

$$N = -\frac{N_y}{\cos \alpha}. \quad (3)$$

Taking into account dependence (2) and Fig. 2

$$\cos \alpha = \frac{\sqrt{(R + r)^2 - \left(r + \frac{a}{2}\right)^2}}{(R + r)}.$$

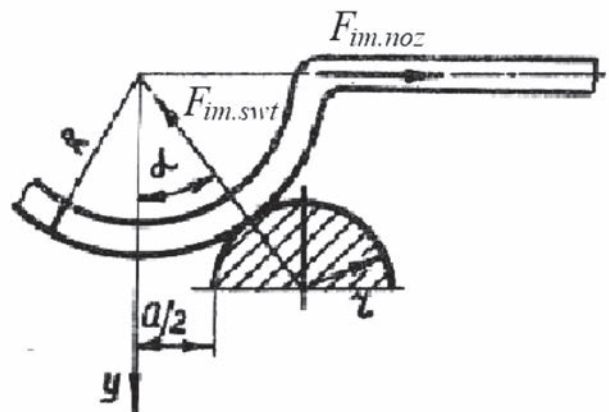


Fig. 2. Direction of impact reaction



Then expression (3) will take the form

$$N = \frac{2(R+r)\left(r + \frac{a}{2}\right)\left(\frac{dS}{dt}\right)_t m_{gv}}{(R+r)^2 - \left(r + \frac{a}{2}\right)^2} \quad (4)$$

The speed  $V$  is determined from equation (4):

$$\vec{V} = \vec{V}_v + \vec{V}_h, \quad (5)$$

where  $\vec{V}_v$  – component of the slip ring velocity, parallel to the axis of rotation of the carrier and determined by dependence (1),

$\vec{V}_h$  – component of the slip ring velocity perpendicular to the axis of rotation of the carrier, the projection of which to the direction S is equal to

$$V_h = \left(\frac{dS}{dt}\right)_t \quad (6)$$

Based on (1), (5) and (6), the slip ring velocity component normal to the winding surface is equal to

$$V_1 = V_v \sqrt{\frac{(R+r)^2 - \left(r + \frac{a}{2}\right)^2}{(R+r)^2}} + V_h \frac{\left(r + \frac{a}{2}\right)}{(R+r)}$$

or

$$V_1 = 2 \left(\frac{dS}{dt}\right)_t \frac{\left(r + \frac{a}{2}\right)}{(R+r)}$$

The time of collision of the slip ring with the resistance winding is determined by this component and can be estimated using the formula [3]

$$T = 2,977 \frac{M^{\frac{2}{5}} K^{\frac{3}{5}}}{V_0^{\frac{1}{5}}},$$

where

$$M = \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2},$$

$$K = \sqrt[3]{\frac{9}{16R_w} \left( \frac{1 - v_0^2}{E_0} + \frac{1 - v^2}{E} \right)^2}.$$

Here  $M_1$  and  $M_2$  – masses of colliding balls 1 and 2,  $K$  – coefficient taking into account the materials of colliding balls,

$E_0$  и  $E$  – elastic moduli of the brush and winding material, respectively,

$v_0$  и  $v$  – Poisson's ratios of the brush and winding material, respectively,

$R_w$  – radius of the wire from which the brush is made.

At  $M_1 = m_{gv}$ ,  $M_2 = \infty$  and  $V_0 = V_1$  brush impact time with winding

$$T = 2,977 \frac{m_{gv}^{\frac{2}{5}} K^{\frac{3}{5}}}{\left[ 2 \frac{r+a}{R+r} \left(\frac{dS}{dt}\right)_t \right]^{\frac{1}{5}}}. \quad (7)$$

Then the average value of the impact force of the slip ring on the resistance winding can be represented by the expression

$$F = \frac{N}{T} = \frac{\frac{2(R+r)\left(r + \frac{a}{2}\right)\left(\frac{dS}{dt}\right)_t m_{gv}}{(R+r)^2 - \left(r + \frac{a}{2}\right)^2}}{2,977 \frac{m_{gv}^{\frac{2}{5}} K^{\frac{3}{5}}}{\left[ 2 \frac{r+a}{R+r} \left(\frac{dS}{dt}\right)_t \right]^{\frac{1}{5}}}}. \quad (8)$$

Impact force divided by actual contact area  $A_r$ , allows you to determine the stresses acting in the contact zone and, as a result, elastic or plastic deformations. Plastic deformations in the contact zone are accompanied by intense absorption of oxygen with the formation of an oxide film, causing catastrophic failures.

The study of expressions (8) and (7) makes it possible to trace the influence of operating parameters and mating surfaces on the impact force, namely:

- how does the impact force depend on the ratio of the radius of curvature of the contact part of the brush to the radius of the wound wire ( $R/r$ ) at a constant winding pitch (Fig. 3);

- how does the resistor winding pitch affect the impact force at different brush speeds;

- how does the speed of movement of the brush affect the force of impact (Fig. 4);

- how does the impact time vary depending on the speed of movement of the brush (Fig. 5).

Analysis of the dependencies shows that the impact force depends on the speed almost linearly, and at the maximum operating speed of the potentiometers equal to 300 mm/s, an impact force of about  $0,9 \cdot 10^{-5}$  N develops. Obviously, this value significantly affects the contacting process and the wear of contact pairs.

The magnitude of the impact force is added to the contact pressure at the moment of impact, resulting in deformation and hardening of the contact surface.

The effect of the ratio of the radius of curvature of the contact brush to the radius of the wound wire on the impact force is shown in Fig. 3. This dependence shows that more favorable conditions for pair operation occur with a minimum thickness of the wound wire, that is, with  $R/r = 22,5$ .

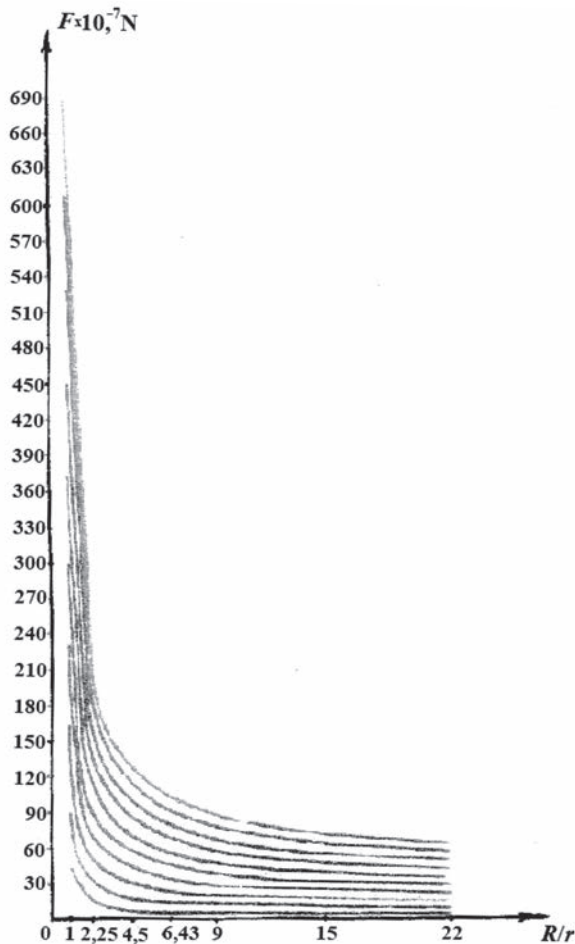


Fig. 3. Dependence of impact force on ratio  $R/r$

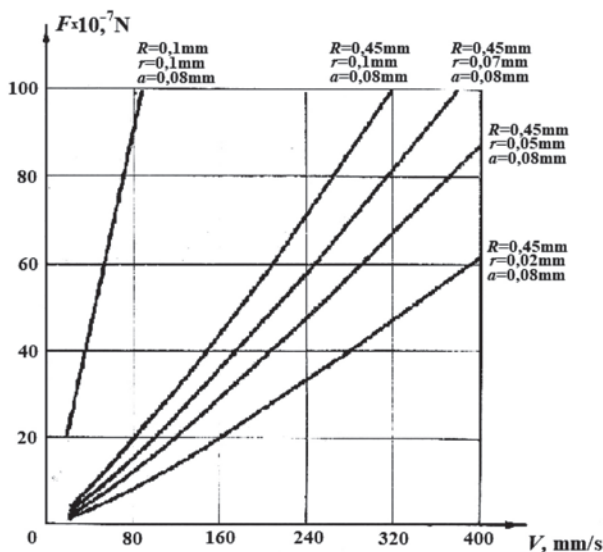


Fig. 4. Dependence of impact force on the speed of movement of the contact brush

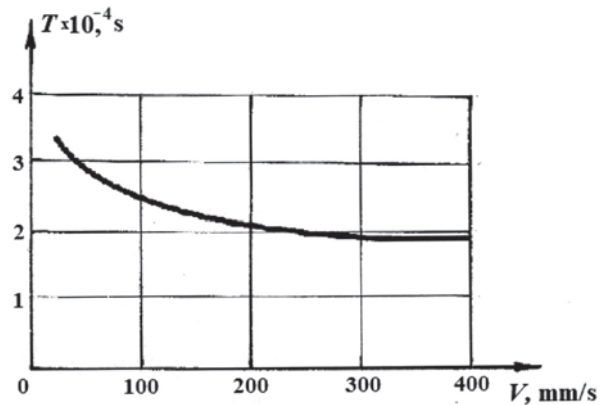


Fig. 5. Dependence of impact time on the speed of movement of the contact brush

At  $R/r = 1$ , the impact force reaches  $7 \cdot 10^{-5}$  N. With increasing  $R/r$ , the impact force drops sharply, even at  $V = 400$  mm/s it is only  $0.6 \cdot 10^{-5}$  N. This is confirmed by practice, since at  $R/r = 4,5$  the operating life of the device is designed for 50000 cycles, and at  $R/r = 22,5$  ( $r = 0,02$  mm) it is 25000 cycles [7].

The graphical dependence presented in Fig. 4 indicates the influence of the speed of movement of the contact brush on the impact force at different ratios  $R/r$ .

The curve corresponding to the case of  $R/r = 0.1$  clearly shows that even at minimum speed the impact force reaches a significant value.

**Conclusions.** The presence of impact force complicates the contact process. It causes a distribution of stresses and strains in the contact zone, as evidenced by different hardnesses on the contact surface.

The impact force contributes to the formation of an additional easily moving surface layer and, as a result, increased wear.

To reduce the impact and create more favorable conditions for the movement of the brushes, an additional technological operation is introduced – running in the contact surface with a ball and lapping the treadmill on micron sandpaper (for low-resistance potentiometers) [6].

1. By solving the problem of determining the force of impact of the brush on the coil, fairly simple engineering formulas were obtained that allow, at the design stage of the device, using graphical dependencies, to select the design parameters of the pair such that they guarantee that the brush does not bounce off the contact surface and provide more favorable working conditions couples.

2. The given graphical dependencies determine the minimum required contact force to guarantee reliable mechanical contact between the pairs.

3. The main parameters influencing the process of mechanical contact of a pair are: the ratio of the radius of curvature of the brush to the radius of the wound wire, contact force, rigidity of the contact brush and the speed of its movement.

**Bibliography:**

1. Petryk V. O., Trubachev S. I., Kolodezhnyi V. A. Research of contact resistance in heat-resistant precision potentiometers. *Вчені зап. Таврійського нац. ун-ту*. 2023. Т. 34 (73). № 2. ч. 1. С. 14–17.  
DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/03>
2. Петрик В. О., Трубачев С. І., Алексейчук О. М. Динаміка електричної ковзної контактної групи керуючої апаратури. *Інформаційні системи, механіка та керування*. 2009. Вип. 3. С. 79–87.
3. Павловський М. А. Теоретична механіка : підручник. Київ : Техніка. 2002. 512 с
4. Штанько П. К., Шевченко В. Г., Дзюба Л. Ф., Пасіка В. Р., Поляков О. М. Теоретична механіка : навч. посіб. Запоріжжя: ЗНТУ. 2013. 376 с. <http://eir.zntu.edu.ua/handle/123456789/6529>
5. Жорняк Л. Б., Антонова М. В., Василевський В. В. Електричні апарати автоматики та керування. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка». 2022. 414 с.
6. Румбешта В. О. Основи технології складання приладів : підручник. Київ : ІСДО. 1993. 303 с.
7. Безвесільна О. М. Елементи і пристрої автоматики та систем управління. Перетворюючі пристрої приладів та комп'ютеризованих систем : підручник. Житомир : ЖДТУ, 2008. 704 с.
8. Безвесільна О. М., Тимчик Г. С. Технологічні вимірювання та прилади. Перетворюючі пристрої приладів : підручник. Житомир : ЖДТУ. 2012. 812 с.
9. Денисюк В. О., Цирульник С. М. Мікропроцесорні системи управління: навч. посіб. Вінниця : ВНАУ. 2021. 204 с.
10. Панікарський О. С., Воробйов Д. О. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка. Харків : ХНАДУ. 2009. 152 с.
11. Новацький А. О. Імпульсна та цифрова електроніка : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ». 2014. 385 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/12372>
12. Jeremy Blum. *Exploring Arduino: Tools and Techniques for Engineering Wizard-ry*. 2019. 512 p.

**Петрик В.О., Трубачев С.І., Колодежний В.А. ВИЗНАЧЕННЯ СИЛИ УДАРУ ЩІТКИ ПО ВІТКУ У ДРОТЯНИХ ПОТЕНЦІОМЕТРАХ**

*Проведені авторами дослідження встановили, що для надійного контакту пари ПдВ-20–ЗлМ-800 необхідне зусилля 4 г. При цьому досягається динамічна рівновага процесів створення і руйнування окисної плівки на рівні плівки тунельної провідності току. Це адгезійні плівки, які досліджувались англійськими вченими Фломом і Савіджем. Ними встановлено, що товщина таких плівок на рівні  $S \approx 10^{-6}$  см. Для точного встановлення плівки провідності для різних контактних пар необхідно мати залежності між контактним зусиллям і контактним опором, і по цій залежності наглядно видно зону оптимальних зусиль, як це показано нами попередньо. Поверхня дотику контактної пари має шорсткість, а тому і значення контактного опору, хоча і в незначній мірі, але буде змінним. Здійснення удару по такій поверхні накладає нестабільність процесу провідності, що небезпечно для надійного контактування. Сам процес удару, а ще гірше його повторність в тих же практично точках, може визвати в точках контакту пластичні деформації, які супроводжуються інтенсивним з'єднанням з киснем, що визиває зміну динамічного значення контактного опору. Це приведе до розриву контакту. Самим небезпечним є те, що для різних контактних пар ця величина може бути змінною за амплітудою і часом. Для систем управління це небажано. Враховуючи сказане, необхідно враховувати наступне: розв'язанням задачі з визначення сили удару контактної щітки по вітку обмотки отримані прості інженерні формули, які дають можливість ще на стадії проектування датчика за допомогою графічних залежностей підібрати конструктивні параметри контактної пари такими, які забезпечать більш надійну роботу пари. Уже названі графічні залежності дозволяють встановити контактне зусилля, що гарантує надійну роботу пари.*

**Ключові слова:** сила удару, контактне зусилля, надійне контактування, швидкість переміщення щітки, дротяний потенціометр.

## РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

UDC 621.317.32

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/03>

**Burkovskiy Ya. Yu.**

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

**Zinkovsky Yu. F.**

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

### DIGITAL POTENTIOMETER-CONTROLLED PROGRAMMABLE INSTRUMENTATION AMPLIFIER

*The subject matter of the article concerns the schematic designs of instrumentation amplifiers with programmable gains, specifically tailored for digital processing and mixed-signal, measuring instruments, and data analysis systems. The central goal is to design a circuit that efficiently integrates the advantages of existing programmable instrumentation amplifiers, while also offering the capability to adjust the gain through a digital I2C/SPI interface. The research tasks comprised the analysis of current implementations of instrumentation amplifiers with programmable gains, focusing on their inherent strengths and limitations. This analysis was further extended to describe the operational principle of the proposed amplifier, emphasizing the role of the digital potentiometer in setting the gain. The development of a calculation methodology specific to this amplifier and computer simulations of the proposed design were also undertaken to compare its performance against traditional fixed-gain amplifiers. The methods employed in this research incorporated comparative analysis, computer simulations of the proposed schematic solutions, and the formulation of mathematical models for the electronic components used. As per the results, a novel circuit solution was proposed for a compact programmable instrumentation amplifier, which is based on a differential amplifier with a fixed gain, augmented by a programmable digital potentiometer. This proposed solution was evaluated against existing solutions, and calculation method was introduced to calculate the specific parameters of such an amplifier. In conclusions, elements of the calculation method for the programmable amplifier were delineated, facilitating estimations of permissible input voltage levels and discreteness of gain adjustments. The proposed circuit solution exhibits several advantages, such as compactness, adaptability, an extensive gain range, and the ability for automatic gain error calibration. However, a notable limitation is the potential reduction in the common-mode rejection ratio at higher frequencies, attributed to the parasitic capacitance at the gain adjustment input pins.*

**Key words:** instrumentation amplifier; programmable amplifier; digital potentiometer; data collection systems, Inter-Integrated Circuit (I2C), Serial Peripheral Interface (SPI), programmable gain.

**Introduction and Problem Statement.** In the rapidly evolving field of electronic systems, the accurate and efficient digital processing of analog signals has emerged as a critical requirement. Such a need arises from the frequently encountered challenge where the inherent level of analog signals is insufficient for leveraging the full range of the analog-to-digital converter (ADC). This inadequacy can lead to sub-optimal data acquisition, especially when the input signals are of paramount importance. Specifically, in scenarios characterized by feeble signals amidst high interference, instrumentation amplifiers are frequently employed [1]. Their merits, ranging from the simultaneous setting of the necessary gain and offset to their substantial attenuation of common-mode

noise and their ease of implementation, make them indispensable in various electronic systems. Nevertheless, a recurring and significant challenge with these amplifiers, particularly in systems demanding wide dynamic ranges, is their inherent fixed gain structure. The voltage at the output of the instrumentation amplifier is defined as:

$$V_{out} = G \cdot (V_p - V_n) + V_{ref} \quad (1)$$

Where  $G$  represents the predetermined gain,  $V_p$  is the voltage measured at the non-inverting input,  $V_n$  denotes the voltage at the inverting input, and  $V_{ref}$  stands for the bias voltage.

Addressing this limitation, this paper presents a new approach towards the design of programmable

instrumentation amplifiers. By combining the benefits of existing programmable instrumentation amplifiers, the proposed design further pioneers the incorporation of a digital interface, specifically the I2C/SPI, to provide a much-desired capability: the adjustment of amplifier gain via digital interface. Such feature can be used in many fields, like environmental sensors pre-processing [2], radiometric measurements [3], etc. To establish the foundation of this research, a comprehensive analysis of the current landscape of programmable gain instrumentation amplifiers was conducted, analyzing their strengths and potential areas of improvement.

One prevalent method for constructing programmable gain amplifiers (PGAs) involves utilizing electromechanical relays. These components, directed by the measurement module, implements the connection of gain-setting resistors (R1-R4) with predetermined values to the integrated instrumentation amplifier (Fig. 1).

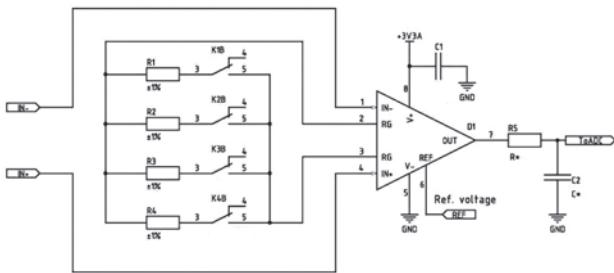


Fig. 1. Variable gain instrumentation amplifier with gain control based on electromechanical relays

This approach offers several benefits, including a minimal impact on the amplifier’s frequency response, precise gain configuration, straightforward implementation, and a versatile and scalable system [4]. Consequently, this technique is used in the analog front-end modules of precision measurement apparatuses, particularly in scenarios where larger sizes, higher implementation costs, and susceptibility to mechanical stress do not pose considerable drawbacks.

However, it is important to note the limitations of this system, such as a restricted range of attainable gain values, necessitating an individual relay for each distinct gain. A possible substitute for the electromechanical relay is the employment of multi-channel analog switches [5] (Fig. 2).

While these switches offer numerous advantages, including rapid switching capabilities, compactness, and robustness against mechanical disturbances, they also introduce certain imperfections. Notable among these are the considerable non-linear resistance intrinsic to the switches, their larger footprint

relative to digital potentiometers, and elevated output capacitance in switches with minimal resistance (ranging from several to hundreds of picofarads). The latter detrimentally impacts the common-mode noise rejection ratio (CMRR), besides the relatively high expense for switches with favorable specifications [6]. Furthermore, the challenge of establishing additional gain values persists, given that most analog switch producers manufacture units with a ceiling of 4–8 channels, occasionally failing to meet the requisite quantity of gain variations.

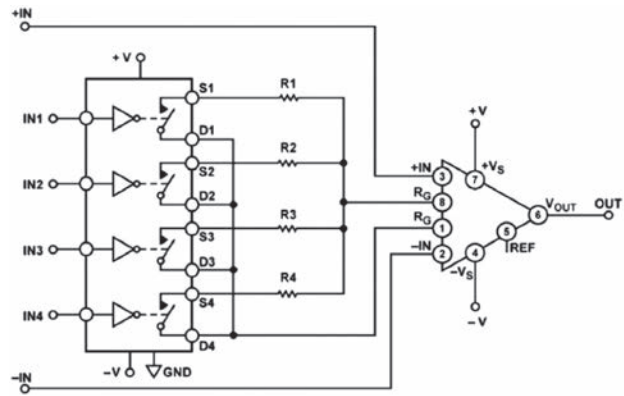


Fig. 2. Variable gain instrumentation amplifier with gain control based on analog switch

In this context, it is also pertinent to note the AD825x and AD8231 series of integrated programmable instrumentation amplifiers, developed by Analog Devices [7]. Although these amplifiers largely circumvent the deficiencies, they impose constraints on engineers by precluding the custom selection of essential gain values and intrinsic parameters of the instrumentation amplifier. This lack of flexibility could be a limiting factor in certain specialized or nuanced applications.

However, the recent advancements in the programmable-gain amplifiers domain have been driven by the need for low-power consumption, high bandwidth, and precise gain control.

#### Analysis of recent research and publications.

Park et al. (2023) conducted research on decibel-linear PGAs and presented a new design using the complementary current-switching approach. This innovative design offers a more expansive bandwidth and a significant gain control capability, and it efficiently reduces DC power usage. Utilizing a 65-nm CMOS process, their PGA demonstrated a dB-linear gain control range of 59.7 dB in 1-dB increments, consuming only 0.6 mW of DC power [8].

In the automotive sector, ultrasonic sensor systems have gained traction, necessitating specialized PGAs. Addressing this need, Kang et al. (2023) pro-

posed a PGA that adeptly removes DC offset and out-of-band noise through band-pass filtering. Their design intricately combines a low-noise amplifier (LNA), a variable gain amplifier (VGA), an RC low-pass filter (LPF), and a voltage buffer. Notably, the PGA's voltage gain can be fine-tuned from 56 dB to 110 dB within the ultrasonic signal band spanning from 30 kHz to 70 kHz [9].

Shifting focus to CMOS technology, Germano et al. (2023) presented a dynamic residue amplifier in 65 nm CMOS, tailored for a 2-stage SAR-pipelined ADC. Their design stands out for its programmable gain, achieved by varying both the common-mode current and the amplification time window. Post-layout simulations across different conditions revealed a configurable gain with a power consumption range between 39-61  $\mu$ W [10].

Kledrowetz et al. (2023) made research in the domain of EMG sensor signal processing, introducing an analog front-end powered by a mere 1 V. Their design, realized using the 28 nm fully depleted silicon on insulator (FDSOI) technology, comprises an input instrumentation amplifier (INA) and a PGA, both in a fully differential topology. This circuit achieves a commendable common-mode rejection ratio (CMRR) of 105.5 dB [11].

Lastly, in the field of wearable ECG sensors Kumar and Balanethiram (2023) proposed an Analog Front End (AFE) that is DC coupled, integrating an FDDA-based Instrumentation Amplifier (IA) and a PGA with an AC coupled input stage. This design is particularly noteworthy for its high gain of 76dB and a CMRR of around 127dB, making it adept at detecting ECG signals in the range of 1-2 millivolt peak to peak [12].

However, a critical examination of these advancements reveals a common thread that poses a significant limitation: each of these innovative PGAs relies heavily on CMOS technology for their implementation. Such features allowed researchers to achieve the micro-scale dimensions and the low power consumption inherent in CMOS-based designs. While these characteristics are advantageous in certain applications, they present a considerable barrier when these PGAs are considered for environments that require or favor discrete component implementation.

The constraint lies in the infeasibility of directly translating these sophisticated, complicated, miniaturized CMOS designs into the macro-scale world of discrete components. Discrete implementation, with its own set of advantages, including lower initial expenses, ease of debugging and implementation, modification upon required tasks, and unique educational value, is virtually sidelined by the cur-

rent research trajectory focused predominantly on CMOS technology. This gap in research inclusivity underscores the need for a paradigm shift, prompting a move towards designs that embrace the versatility and accessibility of discrete components.

**Task statement.** The research tasks comprised the analysis of current implementations of instrumentation amplifiers with programmable gains, focusing on their inherent strengths and limitations. This analysis was further extended to describe the operational principle of the proposed amplifier with a digital potentiometer-controlled gain. The development of a calculation methodology specific to this amplifier and computer simulations of the proposed design also will be undertaken to compare its performance against traditional fixed-gain amplifiers. Performance testing will primarily be executed through computer simulations, which will allow us to compare our new design with traditional fixed-gain amplifiers. These simulations are crucial for validating our design and making necessary adjustments to enhance its performance.

**Outline of the main material of the study.** In our goal of modeling a programmable differential amplifier, the first step is the calculation of the circuit's maximum and minimum potential gains. This is achieved using the equation (2):

$$1 + \frac{49400}{R_{ab}} < G < 1 + \frac{49400}{R_{awmin}} \\ 2 < G < 1412 \quad (2)$$

where  $R_{ab}$  denotes the maximum resistance the digital potentiometer can offer, which is 50 kOhm in the current context.  $R_{awmin}$  corresponds to the resistance of the potentiometer's middle terminal, essentially setting the minimum resistance for the digital potentiometer. For the models AD5272 / AD5274, this resistance approximates to 35 Ohm. The constant 49400 references the internal gain-set resistor intrinsic to the AD8226 amplifier. It is pertinent to note that the maximum and minimum gain values are also constrained by the specifications of the instrumentation amplifier. Specifically, for the AD8226, the permissible gain should be between 1 and 1000. Given that we are employing the AD5272BRMZ-50-RL7 potentiometer, the gain range extends from a minimum of 2 to a maximum limited by the amplifier, 1000. Consequently, incorporating a digital potentiometer effectively taps into most of the accessible gain range delivered by the instrumentation amplifier.

$$G \leq 1 + \frac{148.2}{V_m} \quad (3)$$

Equation (3) clarifies the relationship between permissible gain and the differential voltage at the

input. This equation was derived by substituting  $R_{ab}$  with  $V_{in}/3mA$ , where  $3mA$  denotes the maximum current, the digital potentiometer can handle.

$$G \leq 1 + \frac{49400}{D \cdot \frac{R_{ab}}{2^N}} \quad (4)$$

Equation (4) showcases the interdependence of gain on the binary code set in the digital potentiometer. Here,  $D$  represents the binary code fed into the potentiometer,  $R_{ab}$  symbolizes the potentiometer's nominal resistance, and  $N$  stands for the potentiometer's resolution, which is 10-bit in the present context.

Fig. 3 illustrates the correlation between the peak permissible gain and the input voltage. The amplifier's input differential voltage has an upper limit set by the AD5272BRMZ's peak taper current (3mA).

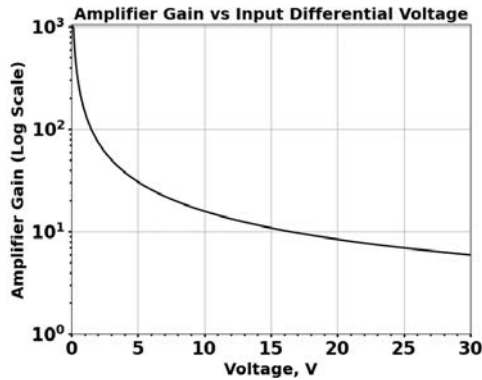


Fig. 3. Dependence of the maximum allowable gain over the input differential voltage

The graphical representation in Fig. 4 emphasizes that the amplifier, within high gain parameters, proffers a diminished granularity in gain adjustment (yielding larger gain intervals). Conversely, in lower gain ranges, the resolution increases. This characteristic is inherently advantageous in practical scenarios, facilitating precision gain adjustment where it's most requisitioned.

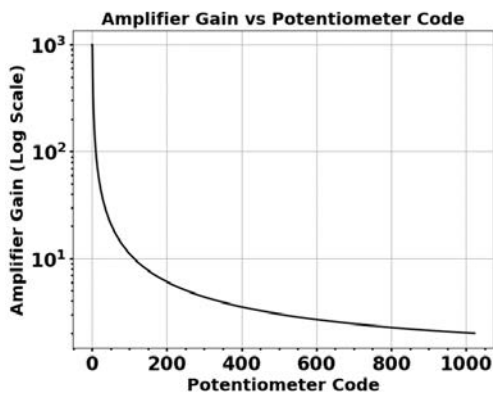


Fig. 4. Dependence of the gain over the binary code specified in the potentiometer

Fig. 5 represents the common mode noise rejection ratio (CMRR) of the amplifier versus the input frequency, comparing both a digital potentiometer (DigiPOT) and a conventional discrete resistor setup. This data was procured using SPICE simulations. A minor dip in the CMRR of the amplifier with a potentiometer at elevated frequencies is attributable to the intrinsic parasitic capacitance present at the gain inputs. Nonetheless, it's vital to underscore that combining analog and digital modules in a single circuit configuration is a prevalent endeavor. Adhering to generally accepted circuit design and routing rules ensures that performance degradation remains negligible [13].

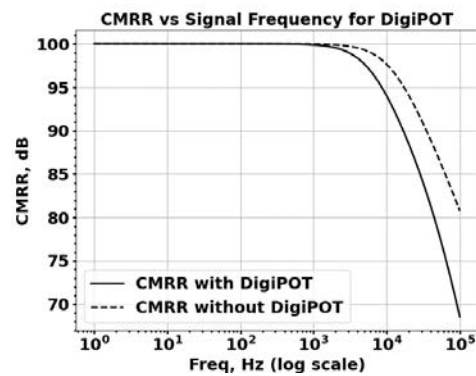


Fig. 5. Dependence of the common mode noise rejection ratio over the frequency of the input signal

Fig. 6 illustrates the proposed amplifier design, developed with a focus on optimizing the Bill of Materials (BOM) for cost-effectiveness, ensuring versatility, and facilitating seamless integration with the Analog-to-Digital Converters (ADCs) inherent in various microcontrollers.

The operational sequence commences with the differential input signal being applied to the IN+ and IN- terminals. This signal is subsequently subjected to an RF interference suppression stage and an input protection mechanism, important for protecting the amplifier's inputs. It is critical that the passive components' values are selected aligning with the operational demands of the specific electronic application to ensure signal integrity and reliability.

After the input conditioning, the signal is routed to the differential amplifier, designated as D2 in the schematic. Here, gain setup is accomplished through the integration of a programmable digital potentiometer D1, providing control over the amplification, while ensuring optimal signal-to-noise ratio (SNR) and minimal harmonic distortion.

In the core amplification stage, the AD8226 instrumentation amplifier from Analog Devices is used

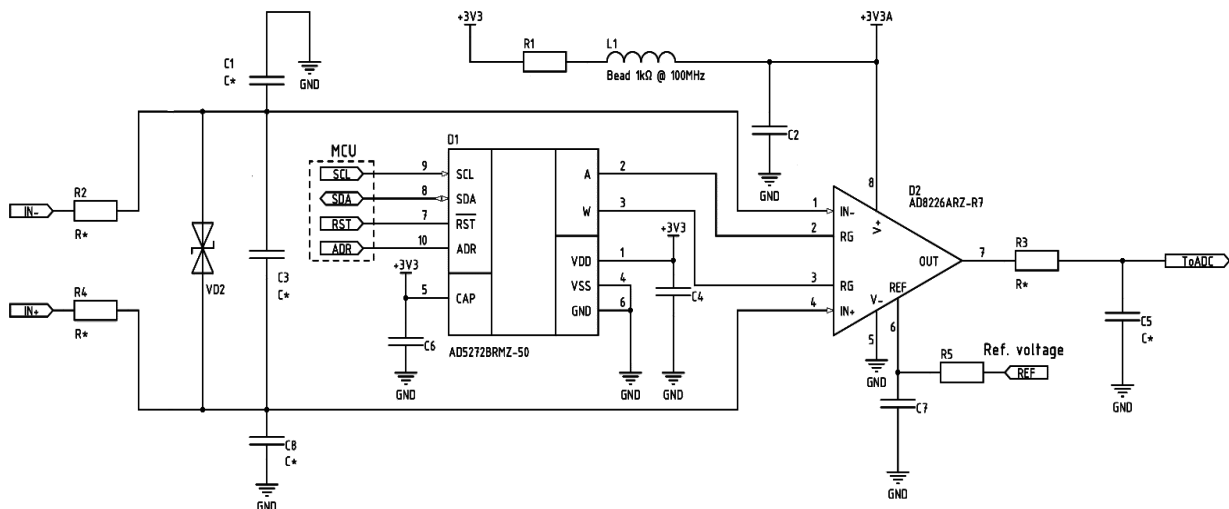


Fig. 6. Dependence of the common mode noise rejection ratio over the frequency of the input signal

[14]. To mitigate power supply noise – detrimental to the low-level signal integrity – a decoupling network comprising R1-L1-C2 is implemented. This configuration decisively isolates the digital circuitry from the analog domain, substantially reducing parasitic interference and ensuring optimal power delivery to the critical operational stages.

Utilizing the AD5272 digital potentiometer from Analog Devices [15], the design achieves up to 1024 distinct resistance configurations, broadening the dynamic range and allowing for accurate signal scaling. The biasing filter (R5-C7), provides the reference voltage to the amplifier’s REF input, ensuring stable operation across varying environmental conditions and operational demands.

This reference voltage, crucial for accurate signal processing, can be derived from a buffered resistor divider network or a microcontroller-integrated Digital-to-Analog Converter (DAC), enhancing system versatility and adaptive biasing capabilities. This approach facilitates real-time, software-driven offset calibration, optimizing measurement accuracy and system responsiveness.

In the final signal conditioning stage, the amplified output undergoes a low-pass filter (R3-C5), attenuating high-frequency signal artifacts and ensuring spectral purity before ADC interfacing. The signal is then sent to the microcontroller’s ADC module for high-resolution digital conversion, enabling digital signal processing techniques or subsequent routing to external analytic instrumentation. This design yields a system characterized by its precision, configurability, and seamless integration into broader electronic architectures.

**Conclusions.** In this study, we presented a novel approach to design programmable differential amplifiers. A thorough evaluation of the merits and demerits of this methodology was undertaken.

The salient features of the introduced differential amplifier encompass its compact footprint, customizable parameters, extensive gain variability, potential for automated gain error calibration, affordability, and straightforwardness in both fabrication and integration. On the flip side, certain limitations were observed. These include a minor dip in the Common Mode Rejection Ratio (CMRR) of the instrumentation amplifier at higher frequencies, attributable to the inherent parasitic capacitance at the gain setting inputs [16]. Additionally, the bandwidth is restricted by the characteristics of the digital potentiometer.

Throughout this research, we delineated computational techniques tailored for our suggested programmable instrumentation amplifier. These computations facilitate estimations of permissible input voltage thresholds and the discreteness of gain adjustments.

The proposed circuit design allows the development of compact, low-power, robust mixed-signal devices, biomedical instruments, systems dedicated to quantifying physical parameters, systems for collecting novel design facilitates a broad gain range controlled digitally, introducing substantial improvements in adaptability and precision for various applications. While the model exhibits enhanced functionality, particularly in automated gain calibration and error reduction, it encounters constraints in high-frequency common-mode rejection ratio (CMRR) due to inherent parasitic capacitance. Nonetheless, the proposed PIA stands as an important advancement, offering notable benefits for digital processing systems, biomedical instrumentation, and diverse measurement devices requiring dynamic and accurate signal amplification. Future research should investigate methods to mitigate the high-frequency limitations to further solidify the proposed PIA’s applicability in more complex or high-frequency reliant systems.



**Bibliography:**

1. MT-061: Instrumentation Amplifier (In-Amp) Basics. Wilmington, MA : Analog Devices, 2009. 5 p. URL: <https://www.analog.com/media/en/training-seminars/tutorials/MT-061.pdf> (date of access: 31.10.2023).
2. Oleshchenko L. M., Moshenskyi A. O. Hardware and software system of environmental indicators monitoring and analysis based on ESP8266 controller. Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences. 2023. No. 4. P. 84–90. URL: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.4/14> (date of access: 06.11.2023).
3. Крочак В.І., Яськів В.І. Використання обмеженого пропорційного режиму для підвищення інформативності радіометричних вимірювань за допомогою давача Гейгера-Мюллера. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського, серія «Технічні науки». 2023. Т. 1, № 3. С. 14–19. URL: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.1/03> (date of access: 06.11.2023).
4. MT-072: Precision Variable Gain Amplifiers (VGAs). Wilmington, MA : Analog Devices, 2009. 10 p. URL: <https://www.analog.com/media/en/training-seminars/tutorials/MT-072.pdf> (date of access: 31.10.2023).
5. Fortunado K. Programmable Gain Instrumentation Amplifiers: Finding One that Works for You. Analog Dialogue. 2018. Vol. 52, no. 4. P. 48–53. URL: <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-52/number-4/volume52-number4.pdf> (date of access: 31.10.2023).
6. CN-0146: Low Cost Programmable Gain Instrumentation Amplifier Circuit Using the ADG1611 Quad SPST Switch and AD620 Instrumentation Amplifier. Wilmington, MA: Analog Devices, 2010. 3 p. URL: <https://www.analog.com/media/en/reference-design-documentation/reference-designs/CN0146.pdf> (date of access: 31.10.2023).
7. 10 MHz, 20 V/μs, G = 1, 10, 100, 1000 iCMOS Programmable Gain Instrumentation Amplifier. Analog Devices. URL: <http://www.analog.com/AD8253> (date of access: 31.10.2023).
8. Park G.-H., Kim J. H., Park C. S. Low-Power Decibel-Linear Programmable-Gain Amplifier With Complementary Current-Switching Technique. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2023. P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.1109/tcsi.2023.3241432> (date of access: 31.10.2023).
9. A 56-to-110 dB Gain Programmable Gain Amplifier with Second-Order Band Pass Filter for Ultrasonic Sensor Systems / J. Kang et al. 2023 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC), Singapore, 5–8 February 2023. 2023. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.1109/iceic57457.2023.10049884> (date of access: 31.10.2023).
10. Germano M., Bocco Á. F., Reyes B. T. A Programmable Gain Dynamic Residue Amplifier in 65nm CMOS. 2023 Argentine Conference on Electronics (CAE), Cordoba, 9–10 March 2023. 2023. P. 52–56. URL: <https://doi.org/10.1109/cae56623.2023.10087007> (date of access: 31.10.2023).
11. A Fully Differential Analog Front-End for Signal Processing from EMG Sensor in 28 nm FDSOI Technology / V. Kledrowetz et al. Sensors. 2023. Vol. 23, no. 7. P. 3422–3442. URL: <https://doi.org/10.3390/s23073422> (date of access: 31.10.2023).
12. Kumar A., Balanethiram S. DC-Coupled Fully Differential Difference Amplifier-Based Analog Front-End Design for Wearable ECG Sensors. 2023 International Conference on Signal Processing, Computation, Electronics, Power and Telecommunication (IconSCEPT), Karaikal, India, 25–26 May 2023. 2023. P. 1–6. URL: <https://doi.org/10.1109/iconcept57958.2023.10170665> (date of access: 31.10.2023).
13. Belous A., Saladukha V. High-Speed Digital System Design: Art, Science and Experience. Springer International Publishing AG, 2020. 1553 p.
14. AD8226 Wide Supply Range, Rail-to-Rail Output Instrumentation Amplifier. Analog Devices. URL: <https://www.analog.com/en/products/ad8226.html> (date of access: 31.10.2023).
15. AD5272 1024-/256-Position, 1% Resistor Tolerance Error, I2C Interface and 50-TP Memory Digital Rheostat. Analog Devices. URL: <https://www.analog.com/en/products/ad5272.html> (date of access: 31.10.2023).
16. Kitchin C., Counts L. A Designer's Guide to Instrumentation Amplifiers. 3rd ed. Norwood, MA: Analog Devices, 2006. 130 p. URL: <https://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/designers-guide-instrument-amps-complete.pdf> (date of access: 31.10.2023).

**Бурковський Я.Ю., Зінковський Ю.Ф. ПРОГРАМОВАНИЙ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИЙ ПІДСИЛЮВАЧ З ВСТАНОВЛЕННЯМ ПОСИЛЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ЦИФРОВОГО ПОТЕНЦІОМЕТРА**

*Предметом вивчення в статті є схемотехнічні рішення інструментальних підсилювачів з програмованим коефіцієнтом підсилення (programmable gain instrumentation amplifiers) для вирішення прикладних завдань в системах цифрової обробки аналогових сигналів, біомедичної апаратури, вимірювальних приладах, аналізі даних з аналогових датчиків і т.д. Метою є розробка схемотехнічної реалізації програмованого інструментального підсилювача, що об'єднує переваги вже відомих рішень з*

можливістю завдання необхідного значення посилення по цифровому інтерфейсу I2C / SPI. Задачі: провести аналіз існуючих реалізацій інструментальних підсилювачів з програмованим коефіцієнтом підсилення з урахуванням їх переваг і недоліків; описати принцип роботи запропонованої реалізації програмованого інструментального підсилювача з цифровим потенціометром в якості елемента, що задає значення посилення; створення деяких елементів методики розрахунку подібного підсилювача; проведення комп'ютерного моделювання запропонованого рішення і порівняння отриманих результатів з такими у реалізації інструментального підсилювача з фіксованим коефіцієнтом посилення. Використовуваними методами є: порівняльний аналіз як метод дослідження, комп'ютерне моделювання схемотехнічних рішень, математичне моделювання. Отримані наступні результати. В ході роботи було запропоновано нове схемотехнічне рішення малогабаритного програмованого інструментального підсилювача, проведено його порівняння з уже існуючими реалізаціями, запропонована методика розрахунку параметрів такого інструментального підсилювача, а також показані результати комп'ютерного моделювання. Проведено оцінку переваг і недоліків. Проведений аналіз запропонованої реалізації програмованого інструментального підсилювача дозволяє зробити висновки, що до переваг можна віднести малі розміри готового рішення, можливість зміни під необхідні параметри, максимально можливий діапазон регулювання посилення, можливість автоматичного калібрування похибки установки посилення, невисоку вартість реалізації (в порівнянні з іншими, представленими в статті методами) і відносну простоту реалізації. До недоліків можна віднести деяке зниження коефіцієнта подавлення синфазної завади інструментального підсилювача на високих частотах через паразитні ємності на входах установки посилення.

**Ключові слова:** інструментальний підсилювач, програмований підсилювач, цифровий потенціометр, системи збору даних, Inter-Integrated Circuit (I2C), Serial Peripheral Interface (SPI), програмоване посилення.

УДК 520.6.05

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/04>**Демиденко О.А.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Лебедев Д.Ю.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ГОЛОСОВОЇ АКТИВНОСТІ В СИСТЕМАХ З НИЗЬКИМ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ

В даній роботі наведено опис сучасних рішень та методів для дослідження голосової активності, які використовуються в автономних системах з низьким енергоспоживанням. Голосова активність в системах з низьким енергоспоживанням є динамічним полем досліджень, де вчені та розробники постійно працюють над вдосконаленням алгоритмів, апаратно-програмних рішень та методів передачі даних. Вона визначається балансом між точністю розпізнавання та обробкою команд і збереженням енергії для максимально довгого функціонування пристроїв на обмежених джерелах живлення. Ці особливості роблять цю область досліджень важливою для розвитку енергоефективних та мобільних технологічних рішень. У даній роботі проаналізовані вже існуючі методи та рішення, що активно використовуються у реальних системах такі, як приховані моделі Маркова, рекурентній нейронні мережі, згорткові нейронні мережі. Розглянуті переваги та недоліки методів виявлення голосової активності, детально описано кожен з них. В роботі розглядаються ключові аспекти виявлення та обробки голосової активності у зазначених системах, а також пропонуються підходи до підвищення ефективності роботи алгоритмів детектування голосової активності при обмежених енергетичних ресурсах.

На основі проведеного аналізу, запропоновані оптимальні технічні рішення та розроблена блок-схема для даних рішень, яка дозволить оптимізацію процесів у майбутньому при дослідженні голосової активності, створено детальний опис системи

Обґрунтовано розширення функціональних можливостей системи розпізнавання голосової активності та сформовані напрями для їх подальшого вдосконалення. Розробка систем вимагає поєднання передових технологій у сферах обробки сигналів, машинного навчання, оптимізації алгоритмів та використання енергоефективних компонентів оскільки вони є ключовим фактором роботи у багатьох секторах, особливо у сферах де точна та швидка передача даних є необхідністю, тому дослідження відкривають шлях до нових можливостей та глобальних змін у багатьох галузях життєдіяльності людей, де обмеження є визначим фактором.

**Ключові слова:** голосова активність, системи з низьким енергоспоживанням, дослідження голосової активності, нейронна мережа, штучний інтелект.

**Постановка проблеми.** У сучасному світі голосова активність стає все більш важливою складовою інтерфейсів для взаємодії з технічними пристроями та системами. Проте, існуючі системи часто стикаються із проблемами, пов'язаними із високим енергоспоживанням, що впливає на їхню ефективність та придатність до використання в умовах обмеженого живлення. Для вирішення цих проблем необхідно ретельно вивчати та оптимізувати голосові системи з фокусом на низькому енергоспоживанні.

Однією з ключових проблем є точність розпізнавання мови при обмежених обчислювальних потужностях та обмежених ресурсах енергії. Тра-

диційні алгоритми розпізнавання мови можуть бути вимогливими до обчислень, що призводить до підвищеного споживання енергії. Отже, існує потреба в розробці та оптимізації алгоритмів, спроможних працювати на пристроях з обмеженим живленням, забезпечуючи при цьому надійну та швидку реакцію на голосові команди.

Ще однією проблемою є розробка низькоенергетичних апаратних засобів для обробки голосового сигналу. Стандартні методи є об'ємними та неоптимізованими під потреби пристроїв з обмеженим живленням. Необхідно дослідження нових технологій та методів, що дозволять знизити витрати енергії при обробці голосового сигналу,

забезпечуючи при цьому високу якість розпізнавання.

Крім того, ефективність голосових систем в умовах обмеженого живлення є критичною для їхнього успішного впровадження. Розуміння та управління енергоспоживанням, а також розробка стратегій для підтримання працездатності систем при обмежених ресурсах, є важливими аспектами дослідження.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У світі існують різні технології дослідження голосової активності.

Спершу варто зазначити, системи що використовують сучасні алгоритми штучного інтелекту, наприклад як зазначено у [1]. Використання штучного інтелекту який може бути покладений у дослідженнях, є використання глибокого навчання для оптимізації голосових інтерфейсів та алгоритмів розпізнавання мови з точки зору енергоефективності. Також можуть бути проведені дослідження щодо розробки нових технологій апаратного забезпечення, таких як енергоефективні мікросхеми та датчики, придатних для використання в голосових системах на пристроях з обмеженим живленням. Також подібна концепція була розглянута у роботі [2], де також для дослідження голосової активності була використана навчена нейронна мережа.

Розгляд даної роботи є дуже актуальним, оскільки більшість сучасних систем працюють з використанням штучного інтелекту. Хоча для дослідження активності можуть бути використані інші методи, такі як: енергетичний, де перевіряється рівень «енергії» аудіосигналу для визначення наявності мовлення. Тут загалом використаний підхід, заснований на пороговому значенні, коли «енергія» сигналу порівнюється з попередньо визначеним пороговим значенням. Якщо «енергія» перевищує поріг, сегмент класифікується як мова. Або, наприклад, статистичні методи суть яких полягає у тому, щоб відрізнити мовні сегменти від немовних. У цих методах зазвичай використовуються такі методи, як швидкість перетину нуля, короточасні спектральні характеристики та оцінка висоти тону.

Аналіз більшості останніх робіт вказав на те, що найбільш оптимальний та простий метод для детектування голосової активності є метод машинного навчання, оскільки алгоритми використовують контрольовані або неконтрольовані підходи до навчання моделей, які можуть класифікувати мовні та немовні сегменти. Ці моделі навчаються на анотованих наборах даних і можуть фіксувати складні моделі та зв'язки в аудіосигналі.

**Постановка технічного завдання.** На основі проведеного аналізу визначено параметри, що будуть покращуватися:

1. Розробити систему, яка буде детектувати голосову активність та буде використовувати оптимальні методи детектування з огляду на енергоспоживання.

2. Проаналізувати систему на правильність роботи, створити зручну та сучасну нейромережу, яка буде мати простий інтерфейс та зручні параметри досліджень.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Проаналізувавши частину наявних рішень пропонується детальний огляд та порівняння наявних та найбільш актуальних методів. Спершу варто розглянути метод з використанням нейронної мережі. Суть алгоритмів у тому, що вони включають полегшені моделі. Ці алгоритми вивчають анотовані навчальні дані для класифікації мовних і немовленнєвих сегментів. Можуть бути використані такі моделі, як Gaussian Mixture Models (GMM), Hidden Markov Models (HMM) або легкі архітектури нейронних мереж, такі як згорткові нейронні мережі (CNN) або рекурентні нейронні мережі (RNN).

Розглянемо приховані моделі Маркова, оскільки це є однією з найпоширеніших моделей.

Існує два підходи до використання виявлення мовлення та паузи моделі. Перший базується на роздільному навчанні моделі і наступне тестування – підхід з виявленням адаптації. Після навчання не зміняться її параметри та модель буде нечутливою до змін середовища – підхід виявлення без адаптації.

В обох процедурах ми повинні вирішити, який тип Маркової моделі використовувати. Було обрано неперервні моделі із 3-станами. Важлива також обробка сигналу - для кожного кадру ми розраховували кепстральні коефіцієнти. Використовуються дві моделі: мовчання і модель мовлення. Це найпростіший варіант виявлення голосової активності з використанням моделей Маркова, які хоч і не дуже використовуються у сьогоденні, проте є актуальними.

Алгоритм без адаптації. Складається з наступних кроків:

1. Ініціалізація
2. Навчання. Моделі навчаються за допомогою вручну позначених даних.
3. Критеріальна функція. Після навчання на навчальному комплексі переходимо до тестування.
4. Розрахунок.

5. Виявлення сегментів з тишею та мовленням. Також наведена блок-схема самого алгоритму на рисунку 1.

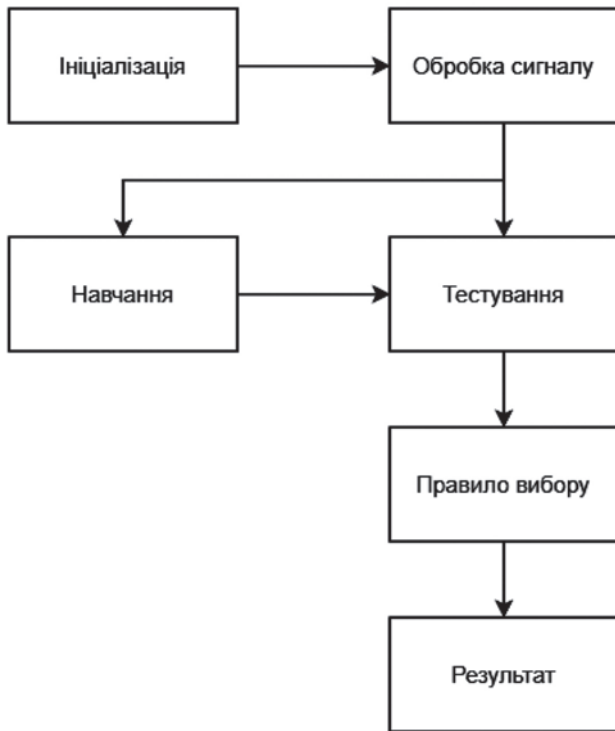


Рис. 1. Алгоритм роботи детектора голосової активності без адаптації

Алгоритм роботи детектора з адаптацією:

1. Ініціалізація. Задається випадковим чином початкові моделі мовчазної і мовної моделей.
2. Навчання.
3. Оновлення мовчазної моделі. Приспускається, що на тестовому наборі сигналів є мовчання на початку кожного сигналу. Оновлюється модель використовуючи ці початкові кадри.
4. Критерії адаптації.
5. Розрахунок порогу значень для вибірки.
6. Оновлення моделі.
7. Виявлення сегментів з тишею та мовленням.
8. Подальша обробка. Оскільки вивід виявленого мовлення зазвичай містить неправильні рішення через коливання фону шумових характеристик, можемо згладити результат за допомогою медіанної фільтрації.

Також наведена блок-схема самого алгоритму на рисунку 2.

Також варто зазначити про методи з використанням згорткових та рекурентних мереж.

Останнім часом активно досліджуються алгоритми розпізнавання мови на основі повністю нейронних рекурентних мереж. Рекурентна нейронна мережа наскрізно навчається за допо-

могою коннекціоністської часової класифікації для безпосереднього перетворення вхідного мовлення в символи. Вона також використовується для моделювання мови яка демонструє набагато кращі можливості, ніж триграмові статистичні алгоритми. Нейронні мережі вимагають багато операцій множення та додавання, проте вони є найбільш розповсюдженими та оптимальним з точки зору сьогоденних задач та їх умов реалізації.

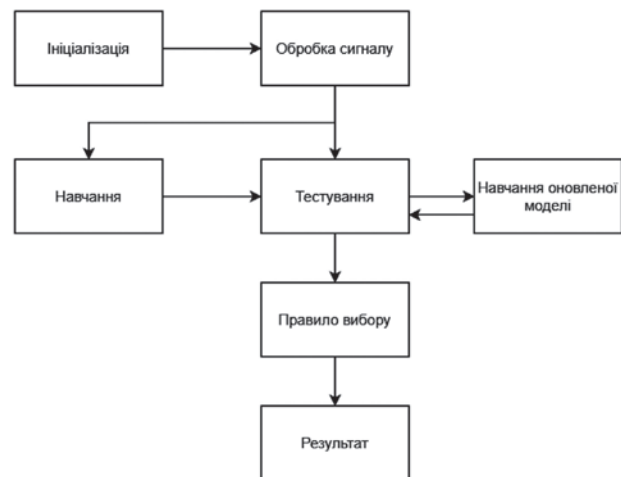


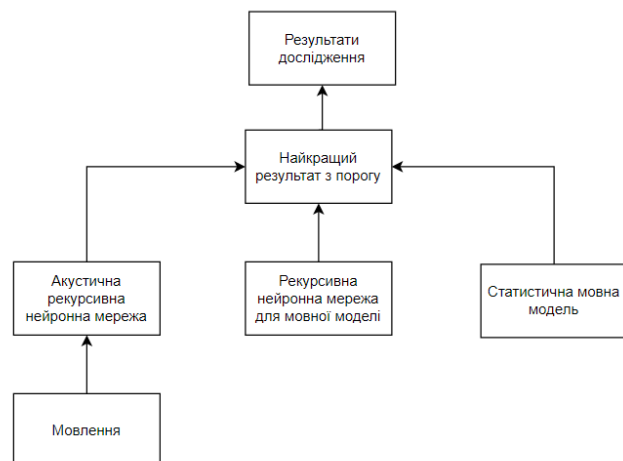
Рис. 2. Схема детектора голосової активності з адаптацією

ваги для повністю зв'язаних шарів або рекурентних нейронних мереж використовуються лише один раз при отриманні, тому їх звернення до них мають дуже низьку часову локальність. Існують спроби зменшити розмір параметрів за рахунок спроби зменшити розмір параметрів шляхом квантування.

Алгоритм розпізнавання мови, реалізований у цій роботі складається з рекурсивної нейронної мережі для акустичного моделювання, рекурсивної нейронної мережі для моделювання мови на рівні символів та статистичного моделювання на рівні слів. Використовується алгоритм і генерує ймовірності символів, аналізуючи кожен кадр вхідного мовлення. Мережа виводить ймовірності наступних символів, тоді як статистична мережа показує ймовірності наступних слів. Інформація, отримана з цих трьох модулів, інтегрується для пошуку найкращої гіпотези за допомогою алгоритму пошуку.

Акустична модель має глибоку мережеву структуру і наскрізно навчається за допомогою онлайн-алгоритму. Хоча деякі нещодавні наскрізні алгоритми розпізнавання мови на основі рекурсивної нейронної мережі розпізнавання мови використовують двонаправлену структуру для покращення продуктивності розпізнавання.

На рисунку 3 наведена схема алгоритму описана вище.



**Рис. 3. Алгоритм роботи на основі нейронних мереж**

Для прикладку порівняння розглянемо алгоритм виявлення голосової активності на основі енергії спектру

1. Скомпонування аудіо. Розділення вхідного сигналу на кадри. Загальна тривалість кадру знаходиться в діапазоні від 10 до 30 мілісекунд.
2. Обчислення енергії. Обчислення енергії кожного кадру. Енергію кадру можна обчислити шляхом підсумовування квадратів значень звукових зразків у цьому кадрі.
3. Встановлення значення порогу. Визначення порогового значення, щоб відрізнити мову від

мовчання. Цей поріг можна встановити на основі характеристик звукового сигналу та рівня шуму.

4. Виявлення мови. Порівняння енергії кожного кадру з порогом. Якщо енергія кадру перевищує порогове значення, то мовлення, якщо ні – мовчання.

У підсумку можна сказати, що метод енергії є простим, зручним та легким для використання у базових додатках, проте метод з використанням нейронних мереж є більш складним, але дозволяє використати більшу адаптивність, продуктивність, особливо у складних умовах експерименту, проте для вірного результату дослідження потрібні навчальні дані та обчислювальні ресурси. Вибір між цими методами часто залежить від конкретних вимог програми та наявних ресурсів. У багатьох випадках гібридний підхід, що поєднує сильні сторони обох методів, може бути корисним.

**Висновки.** Проведено аналіз наявних рішень для дослідження голосової активності в ході якого встановлено, що не існує єдиного рішення, що наразі вирішує всі проблеми дослідження голосової активності.

Наведені приклади систем демонструють вирішення для конкретних випадків. На основі порівняльного аналізу визначені основні параметри, якими системи різняться. Напрямоком подальших досліджень є реалізація системи голосової активності у системах з низьким енергоспоживанням та її оптимізація, враховуючи вже наведені дані та певні умови для конкретних вимог системи.

#### Список літератури:

1. Всесвітня організація охорони здоров'я (2021). Deafness and hearing loss. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/deafness-and-hearing-loss>
2. K. Hwang and W. Sung, "Single stream parallelization of generalized LSTM-like RNNs on a GPU," in IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2015
3. K. Hwang and W. Sung, "Sequence to sequence training of ctc-rnns with partial windowing," in International Conference on Machine Learning (ICML), 2016
4. F. Vesperini, P. Vecchiotti, E. Principi, S. Squartini, and F. Piazza, "Deep neural networks for multi-room voice activity detection: Advancements and comparative evaluation," in 2016 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). IEEE, 2016
5. G. Gelly and J.-L. Gauvain, "Optimization of RNN-based speech activity detection," IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, vol. 26, no. 3, 2018
6. B. Liu, Z. Wang, S. Guo, H. Yu, Y. Gong, J. Yang, and L. Shi, "An energy-efficient voice activity detector using deep neural networks and approximate computing," Microelectronics Journal, 2019
7. Minjae Lee, Kyuyeon Hwang, Jinhwan Park, "FPGA-based Low-power Speech Recognition with Recurrent Neural Networks", 2016 IEEE International Workshop on Signal Processing Systems
8. T. N. Sainath, O. Vinyals, A. Senior, and H. Sak, "Convolutional, long short-term memory, fully connected deep neural networks," in Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech Signal Process. (ICASSP), Apr. 2015

#### **Demydenko O.A., Lebedev D.Yu. VOICE ACTIVITY DETECTION IN LOW-POWER SYSTEMS**

*This article will provide a description of modern solutions and methods for voice activity research. Voice activity in low-power systems is a dynamic field of research, where scientists and developers are constantly working on improving algorithms, hardware and software solutions, and data transmission methods. It is*

*determined by the balance between the accuracy of command recognition and processing and energy conservation for the longest operation of devices on limited power sources. These features make this area of research important for the development of energy-efficient and mobile technological solutions. The text of the work analyzes already existing methods and solutions that are actively used in real systems, such as hidden Markov models, recurrent neural networks, convolutional neural networks. Advantages and disadvantages of voice activity detection methods are considered, each of them is described in detail. The paper examines the key aspects of voice activity detection and processing in these systems, as well as offers approaches to increase the effectiveness of voice activity detection algorithms with limited resources.*

*On the basis of the conducted analysis, optimal technical solutions were proposed and a block diagram was developed for these solutions, which will allow optimization of processes in the future in the study of voice activity, a detailed description of the system was created*

*The expansion of the functional capabilities of the voice activity recognition system is substantiated and directions for their further improvement are formed. The development of systems requires a combination of advanced technologies in the fields of signal processing, machine learning, optimization of algorithms and the use of energy-efficient components, as they are a key factor in the operation of many sectors, especially in areas where accurate and fast data transmission is a necessity, so research opens the way to new opportunities and global changes in certain industries where restrictions are a determining factor.*

**Key words:** *voice activity, low-power systems, voice activity research, neural network, artificial intelligence.*

**Сайко В.Г.**

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

**Наритник Т.М.**

Інститут електроніки та зв'язку Української академії наук

**Криволапов Я.В.**

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

**Криволапов Г.Я.**

Київський університет імені Бориса Грінченка

## СПОСІБ РОЗВАНТАЖЕННЯ ТРАФІКУ ДЛЯ ІНТЕГРОВАНОЇ АРХІТЕКТУРИ МЕРЕЖІ НА БАЗІ НИЗЬКООРБІТАЛЬНОЇ СУПУТНИКОВОЇ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ ТА БПЛА

*Концепція Інтернету речей та тактильного Інтернету відіграли ключову роль у формуванні нового вигляду комунікаційних мереж та послуг, що надаються мережею. Перша сприяла появі мереж високої та надвисокої щільності, а друга – мережевої комунікації з ультра малими затримками. Все це разом вимагало інтегрованого використання ресурсів усіх видів мереж та перетворили мережу зв'язку з однорідних на неоднорідні. У зв'язку з цим на етапі формування мереж шостого покоління 6G з'явилася нова концепція розвитку комунікаційних мереж, яка базується на розумінні необхідності інтеграції не лише різних технологій в рамках певних мереж, але й інтеграції комунікаційних мереж в одну мережу. Ця концепція називається інтегрованими мережами Космос – Повітря – Земля – Море SAGSIN (Space-Air-Ground-Sea) [1].*

*Метою даної роботи є дослідження проблем створення мереж на основі спільного використання технологій БПЛА, систем низькоорбітального супутникового зв'язку на основі розподіленого супутника та граничних обчислень для забезпечення вимог до якості обслуговування в мережах зв'язку п'ятого покоління. Для вирішення такої задачі в роботі запропоновано спосіб вивантаження трафіку з наземної мережі на БПЛА, який відрізняється від відомих тим, що вивантаження може бути здійснено як безпосередньо на БПЛА, так і на БПЛА, обладнаний ретранслятором передачі інформації на граничний сервер системи низькоорбітального супутникового зв'язку на основі розподіленого супутника. Застосовано алгоритм вивантаження трафіку для запропонованого способу, заснований на алгоритмі динамічного програмування. Розроблено та реалізовано нейромережевий спосіб проектування затримки при розвантаженні обчислень, на основі використання нейронних мереж, при вивантаженні трафіку з наземної мережі на БПЛА, що має МЕС, і на БПЛА, обладнаний ретранслятором для передачі інформації на граничний сервер системи низькоорбітального супутникового зв'язку на основі розподіленого супутника. В результаті комп'ютерного моделювання показано, що при використанні авторегресійної нейронної мережі з екзогенними входами NARX точність прогнозування мережі складає 88% та 86% відповідно.*

**Ключові слова:** інтегровані мережі БПЛА, системи низькоорбітального супутникового зв'язку з архітектурою розподіленого супутника, мережі зв'язку п'ятого покоління.

**Постановка проблеми.** Розвиток мереж зв'язку нині відбувається у напрямі створення гетерогенних мереж. Починаючи з мереж зв'язку четвертого покоління, стало ясно, що тільки при використанні різноманітних ресурсів різноманітних мережевих технологій можна надати необхідні послуги користувачам мережі з необхідними характеристиками якості обслуговування. У мережах зв'язку п'ятого покоління гетерогенність мережі вже стала однією з основних харак-

теристик, а при подальшому впровадженні мереж зв'язку шостого покоління вже сьогодні з'явилася концепція інтегрованих мереж зв'язку SAGSIN (Space – Air – Ground – Sea Integrated Networks). Поява мереж зв'язку Космос – Повітря – Земля – Море є логічним продовженням розвитку мереж зв'язку всіх останніх поколінь [1].

В останні роки, для втілення даної концепції, безпілотні літальні апарати (БПЛА) стали предметом зростаючого інтересу [2], [3]. Очікується,



що при масовому запуску мереж 5G, БПЛА знайдуть широке застосування. Застосування БПЛА різноманітні, від простого моніторингу довкілля до складних військових систем з високим рівнем безпеки. Розробка мереж та додатків для БПЛА стикається з численними проблемами, основні з яких [4]: планування маршруту або шляху, уникнення зіткнень та керування рухом, фінансові витрати та безпека, передача даних та використання енергії, затримки та сумісність з існуючими системами та мережами зв'язку. Деякі з цих проблем пов'язані з обмеженими можливостями БПЛА, особливо мікро дронів, які потребуються для багатьох завдань.

Програми, які вимагають інтенсивних обчислень, таких як обробка зображень або відео, потребують значних ресурсів обробки та енергії, що може впливати на роботу системи БПЛА в реальному часі та тривалість її роботи, навіть призводити до блокування завдань. Щоб подовжити тривалість служби БПЛА та подолати обмеження батареї, потрібно розумно використовувати енергетичні ресурси. Один із способів підвищення ефективності додатків та зменшення споживання енергії – це перенесення обчислень на інші пристрої у мережі БПЛА, які мають вільні ресурси. Ці пристрої можуть розташовуватися як у повітряному сегменті, так і на землі. Для передачі даних БПЛА є два можливі методи: передача даних з повітря або з землі. БПЛА може передавати свої обчислення найближчим БПЛА з вільними ресурсами для обчислень [5], або передавати обчислення на наземні станції, які підключені до хмарних серверів [6].

Останні технології, які будуть використовуватися в 5G, можуть допомогти в розгортанні мереж БПЛА [7]. Ці технології базуються на мобільних граничних обчисленнях (MEC), програмованій мережевій конфігурації (SDN) та віртуалізації мережеских функцій (NFV). MEC надає можливість проведення хмарних обчислень на межі мережі радіодоступу (RAN) на відстані одного кроку від кінцевого користувача та, таким чином, зменшує затримку обчислень. Розгортання MEC дозволяє БПЛА ефективно передавати свої обчислення на граничні сервери хмар. Сервери MEC обробляють передані обчислення та повертають результати на відповідний БПЛА через відповідне з'єднання. Крім того, через те, що сервери MEC розташовані недалеко від БПЛА, забезпечується більша ефективність у плані затримок для переданих завдань.

Однак до цього часу мало було проведено досліджень спільного використання вказаних

вище технологій для вирішення проблем обслуговування гетерогенного трафіку мереж зв'язку п'ятого покоління. Складність цієї проблеми визначається суттєвою новизною архітектурних та системних рішень при побудові інтегрованих мереж зв'язку, в яких для забезпечення якості обслуговування використовуються різні нові технології, що функціонують ще й у різних середовищах простору. Усе це загалом і визначило мету та завдання даної роботи.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вдослідженні [8] представлена архітектура мережі для безпілотних літальних апаратів (БПЛА), яка спеціалізується на додатках, пов'язаних з природними катастрофами. Ця платформа передає отримані дані, наприклад, відеоматеріали, на віддалений хмарний модуль. У системі використовується принцип клієнт-сервер, де клієнтська частина розташована на БПЛА, а серверна частина розміщується в віддаленому хмарі. Клієнт відповідає за отримання відеоданих, планування даних за допомогою контекстно-залежного планувальника відео та передачу даних. Сервер отримує передані дані і забезпечує обчислювальні ресурси, необхідні для обробки отриманих даних. Основним обмеженням цієї платформи є затримка, оскільки дані передаються у віддалену хмару, а не в ближчу до БПЛА граничну хмару.

В [9] автори презентували чотири різновиди використання БПЛА, які підтримуються хмарними та граничними обчисленнями. Основна увага в дослідженні приділяється способам взаємодії БПЛА з заземленими пристроями, зокрема з різноманітними обчислювальними пристроями. Автори провели дослідження щодо використання БПЛА зі структурою MEC, спрямованого на зменшення обсягу трафіку. Головним аспектом роботи є використання БПЛА для підтримки великих мереж сенсорів та густонаселених мереж Інтернету речей (IoT). Крім цього, дослідження в [9] зосереджується на структурі для конкретного застосування.

В роботі [10] був розроблений алгоритм, який використовує програмовану мережеву конфігурацію (SDN) для підтримки обчислювальних ресурсів БПЛА, які перебувають над певною географічною областю та підключені до однієї базової станції. Контролер SDN використовує алгоритм, який визначає оптимальний хмарний сервер з наявними ресурсами для обробки завдань, що передаються. У системі присутні різні типи хмарних серверів: граничні, розподілені та віддалені сервери.

**Метою** даної роботи є дослідження проблем створення мереж на основі спільного використання технологій БПЛА, систем низькоорбітального супутникового зв'язку на основі розподіленого супутника та граничних обчислень для забезпечення вимог до якості обслуговування в мережах зв'язку п'ятого покоління. Зазначена мета досягається шляхом вирішення у роботі наступного завдання: розробка способу вивантаження трафіку з наземної мережі на БПЛА за умови, що вивантаження може бути здійснено як безпосередньо на БПЛА, так і на БПЛА, обладнаний ретранслятором для передачі інформації на граничний сервер системи низькоорбітального супутникового зв'язку на основі розподіленого супутника [11–14].

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

**Системна модель розвантаження обчислень**

Запропонована системна модель включає набір вузлів IoT (наземні сенсори), які розподілені для прикладу на розумній фермі і генерують дані, необхідні для обробки. Крім того, системна модель включає дві групи БПЛА, одна з яких обладнана сервером граничних обчислень, а інша ретранслятором. Крім того, віддалений кореневий супутник системи низькоорбітального супутникового зв'язку на основі розподіленого супутника (НОССРС) також має граничний сервер, як показано на рис. 1.

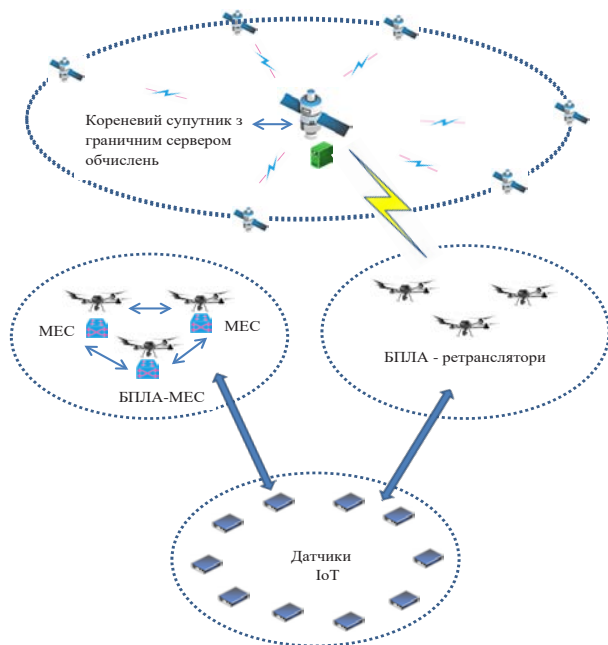


Рис. 1. Системна модель інтегрованої мережі

Дані будуть оброблятися за допомогою граничного обчислювального сервера UAV-MEC, що літає, або віддалено – на центральному граничному сервері кореневого супутника НОССРС.

Перший сценарій – це літаюча мобільна гранична обчислювальна система, як МЕС при цьому використовується БПЛА, куди дані будуть вивантажуватися від вузлів IoT (на найближчий БПЛА-МЕС), який оснащений обчислювальними ресурсами. При цьому він має можливість зберігання, обробки та аналізу даних.

Другий сценарій являє собою віддалену обчислювальну систему, де БПЛА як ретранслятор використовується для передачі даних від вузлів IoT на центральний граничний сервер кореневого супутника безпроводовим каналом, як це показано на рис. 1.

Вузли IoT у цьому випадку генерують  $N$  незалежних завдань обчислень, які необхідно обробити. Для виконання цих завдань дані будуть вивантажені та оброблені або на БПЛА-МЕС, коли рішення про розвантаження двійкових обчислень  $\beta_i$  дорівнює «1», або віддалено на центральний граничний сервер кореневого супутника шляхом передачі завдань через БПЛА-ретранслятор, коли рішення про розвантаження бінарних обчислень  $\beta_i$  дорівнює «0»:

$$\beta_i = \begin{cases} 1 & \text{на UAV - МЕС} \\ 0 & \text{на граничному сервері НОССРС} \end{cases} \quad (1)$$

**Математична модель**

Модель розвантаження обчислень має наступні особливості. Вузли IoT (наземні датчики) мають  $N$  незалежних обчислювальних завдань, що вимагають виконання. Кортеж  $\{Q_i, W_i, R_i\}$  представляє завдання, необхідне кожній обчислювальній задачі  $i$ , де  $Q_i$  – розмір даних, які необхідні для передачі,  $W_i$  – загальна кількість циклів ЦП,  $R_i$  – крайній термін, необхідний для вирішення завдання  $i$ , який потрібно виконати.

**Обчислення на БПЛА.** У разі обчислень на БПЛА, коли обчислювальна задача  $i$  вивантажується та обробляється в UAV-MEC, вузли IoT (наземні датчики) шукають БПЛА-МЕС, щоб перевірити наявність ресурсів для виконання завдання чи ні. Затримка передачі обчислювальної задачі  $i$  від вузла IoT (наземні датчики) до БПЛА-МЕС може бути виражена як:

$$T_1 = \frac{Q_i}{V_{i1}}, \quad (2)$$

де  $V_{i1}$  – максимальна швидкість висхідної лінії, а тривалість обробки обчислень для задачі  $i$  на UAV-MEC може бути знайдена з наступного виразу:

$$T_2 = \frac{W_i}{Y_i}, \quad (3)$$

де  $Y_i$  – обчислювальні можливості UAV-MEC. Загальна тривалість обробки на UAV-MEC визначається як:

$$T_z = T_1 + T_2. \quad (4)$$

Граничні хмарні обчислення на віддаленому сервері НОССРС. У разі граничних обчислень на віддаленому сервері НОССРС, коли обчислювальна задача  $i$  вузлів IoT буде передаватися на граничний сервер кореневого супутника НОССРС через БПЛА-ретранслятор та буде оброблятися, затримку передачі від БПЛА-ретранслятора на граничний сервер НОССРС обчислювального завдання  $i$  вузла IoT можна виразити як:

$$T_3 = \frac{Q_i}{V_{i2}}, \quad (5)$$

де  $V_{i2}$  – максимальна швидкість висхідної лінії від БПЛА до граничного сервера кореневого супутника НОССРС.

Затримка передачі обчислювальної задачі від вузла IoT до граничного сервера НОССРС може бути виражена як:

$$T_4 = \frac{W_i}{Y_o}, \quad (6)$$

де  $Y_o$  – обчислювальні можливості граничного хмарного сервера НОССРС. Нарешті, загальна тривалість передачі інформації для граничного сервера НОССРС та тривалості обробки складе на основі підсумовування (2), (5) та (6):

$$T_{z1} = T_1 + T_3 + T_4, \quad (7)$$

Загальну тривалість з урахуванням використання літаючого сегмента можна визначити так:

$$T_{z2} = \beta_i T_2 + (1 - \beta_i) T_{z1} \quad (8)$$

Проблема розвантаження обчислень формулюється у вигляді наступного завдання оптимізації з обмеженнями:

$$\min \sum_{i=1}^N T_{z2} \quad (9)$$

$$T_{z2} \leq T_{const} \quad O_1$$

$$\beta_i \in \{0,1\} \quad O_2$$

Метою цього дослідження є мінімізація виваженої суми затримок шляхом оптимального розподілу вивантаження завдань. Обмеження  $O_1$  є верхні межі за витратами часу. Обмеження  $O_2$  є гарантією того, що ухвалені рішення про розвантаження є бінарними значеннями.

#### Алгоритм розвантаження

Алгоритм вивантаження для літаючих обчислень у цій роботі заснований на основі алгоритму динамічного програмування, що використовує відстань Хеммінга, як критерій для завершення своєї роботи [15]. Алгоритм забезпечує інклюзивний процес пошуку рішень оптимального розвантаження для літального обчислювального

комплексу. Моделювання було зроблено з використанням пакету програм Matlab. Вихідні дані для моделювання наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

#### Параметри моделювання

Параметри	Значення
Число задач $N$	20
Об'єм даних $Q_i$	10-40 MB
СРУ цикли $W_i$	2000 Cycle/s
Тривалість $T_{const}$	0,004 s
Швидкість передачі даних $V_{i1}, V_{i2}$	2-10 Mbps
Частота процесора UAV-МЕС $V_i$	400 MHz
Частота процесора сервера граничних обчислень ( $V_0$ )	5 GHz

#### Прогнозування затримки при розвантаженні обчислень із використанням нейронної мережі

Моделювання затримки при розвантаженні обчислень проводилося з використанням пакету моделювання Matlab R2020a із застосуванням нейронної мережі NARX. Точність прогнозування оцінювалася з використанням трьох алгоритмів навчання нейронної мережі: Levenberg Marquardt, Bayesian Regularization, Scaled Conjugate Gradient, з точки зору використання, а корінь із середньоквадратичної помилки (RMSE) та середня абсолютна помилка у відсотках (MAPE) як міра точності прогнозування. Набори даних були згенеровані моделями при проведенні досліджень за допомогою пакету програм Matlab. Після збору та підготовки набору даних вони були поділений на 70% для навчання, 15% для тестування та 15% для валідації відповідно. Як показали результати моделювання алгоритм навчання нейронної мережі Левенберга-Марквардта із зворотним розповсюдженням має кращу точність прогнозування і з RMSE, і з MAPE як при прогнозуванні.

Для вирішення задачі дослідження була використана нелінійна авторегресійна нейронна мережа з екзогенними входами, де прогноз робиться виходячи з попередніх значень прогнозованої змінної та екзогенних вхідних сигналів. Побудована мережа має один прихований шар із  $N$  нейронами та один вихідний шар із одним нейроном. Прогнозується затримка при розвантаженні обчислень на один крок вперед із використанням попередніх даних значень розміру даних, необхідні передачі, час обробки блоку даних, необхідні передачі, інтенсивність формування затримок при розвантаженні обчислень. Як алгоритм навчання використовується сучасний метод нелінійної оптимізації: алгоритм Левенберга-Маркара.

Варіант 1: при вивантаженні трафіку з наземної мережі на БПЛА, що має МЕС. Входи мережі: X0 – затримка при розвантаженні обчислень; X1 – розмір даних, необхідні передачі; X2 – швидкість передачі даних; X3 – обчислювальні можливості; Вихід мережі: Y – прогнозована затримка при розвантаженні обчислень. Збудована мережа зображена на рис. 2.

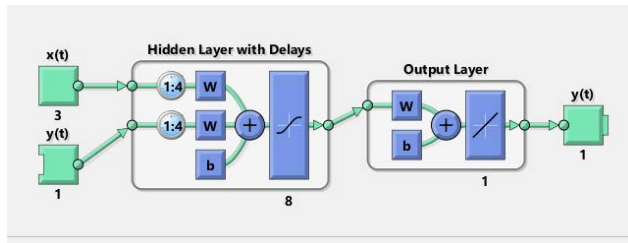


Рис. 2. Нелінійна авторегресійна нейронна мережа з екзогенними входами NARX: Hidden – прихований шар; Output – вихідний шар; 8 – кількість нейронів у шарі

Гістограма помилок виходу мережі показано на рис. 3.

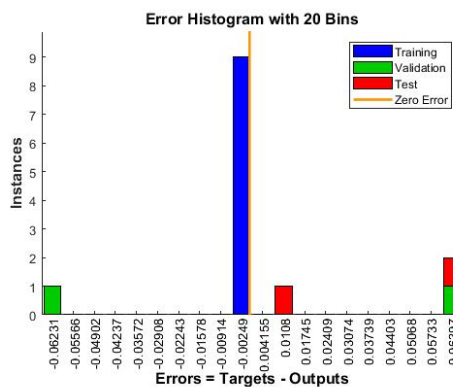


Рис. 3. Гістограма помилок виходу нелінійної авторегресійної мережі з екзогенними входами NARX

Графік результату прогнозу показано на рис. 4.

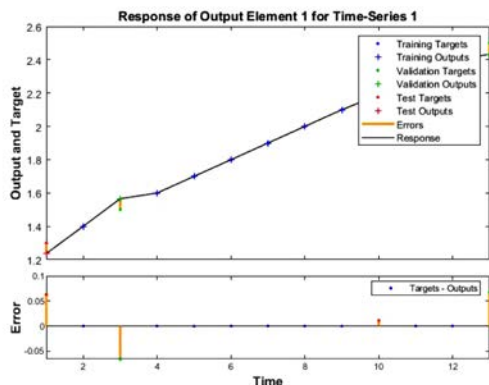


Рис. 4. Графік результату прогнозу нелінійної авторегресійної мережі з екзогенними входами NARX Точність прогнозування мережі становить приблизно 88 %

Варіант 2: при вивантаженні трафіку з наземної мережі на БПЛА, обладнаний ретранслятором для передачі інформації на граничний сервер системи низькоорбітального супутникового зв'язку на основі розподіленого супутника. Входи мережі: X0 – затримка при розвантаженні обчислень; X1 – розмір даних, необхідні передачі; X2 – швидкість передачі даних; Вихід мережі: Y – прогнозована затримка при розвантаженні обчислень. Збудована мережа зображена на рис. 5.

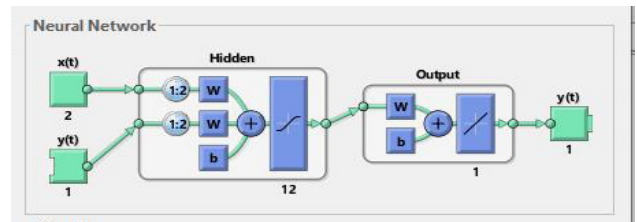


Рис. 5. Нелінійна авторегресійна нейронна мережа з екзогенними входами NARX: Hidden – прихований шар; Output – вихідний шар; 12 – кількість нейронів у шарі

Гістограма помилок виходу мережі показано на рис. 6.

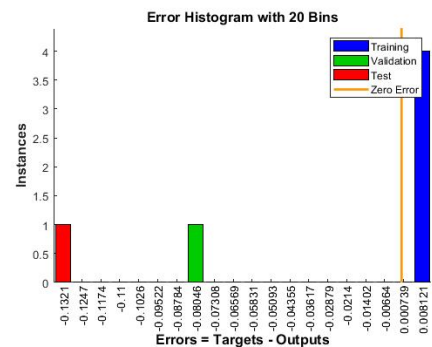


Рис. 6. Гістограма помилок виходу нелінійної авторегресійної мережі з екзогенними входами NARX

Графік результату прогнозу показано на рис. 7.

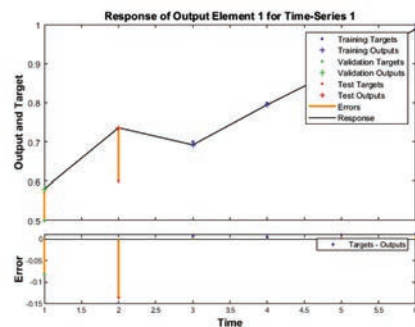


Рис. 7. Графік результату прогнозу нелінійної авторегресійної мережі з екзогенними входами NARX Точність прогнозування мережі становить приблизно 86 %

**Висновки:**

1. Запропоновано спосіб вивантаження трафіку з наземної мережі на БПЛА, який відрізняється від відомих тим, що вивантаження може бути здійснено як безпосередньо на БПЛА, так і на БПЛА, обладнаний ретранслятором передачі інформації на граничний сервер системи низькоорбітального супутникового зв'язку на основі розподіленого супутника. Застосовано алгоритм вивантаження трафіку для запропонованого способу, заснований на алгоритмі динамічного про-

грамування, що використовує відстань Хеммінга як критерій для завершення своєї роботи.

2. Розроблено та реалізовано нейромережевий спосіб проектування затримки при розвантаженні обчислень, на основі використання нейронних мереж, при вивантаженні трафіку з наземної мережі на БПЛА, що має МЕС, і на БПЛА, обладнаний ретранслятором для передачі інформації на граничний сервер системи низькоорбітального супутникового зв'язку на основі розподіленого супутника.

**Список літератури:**

1. Cui. Y. and all. Space-Air-Ground-Integrated Network (SAGIN) for 6G Requirements, Architectures and Challenges. *China Telecommunications*. 2022. v.19. issue 2. pp.90-108.
2. Сайко В.Г., Одарченко Р.С., Абакумова А.О., Наритник Т.М., Наконечний В.С., Домрачев В.М., Толопа С.В., Заблоцький В.Ю., Баховський П.Ф. Мережі мобільного зв'язку нового покоління 4G/5G/6G: монографія. Київ: ТОВ «Про формат», 2021. 200 с.
3. Sliwa, M. Patchou, C. Wietfeld. Lightweight simulation of hybrid aerial- and ground-based vehicular communication networks. *IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall)*. 2019. pp.1 – 7.
4. H. Shakhatreh et al. Unmanned aerial vehicles: A survey on civil applications and key research challenges. 2018. URL: [arxiv.org/abs/1805.00881](https://arxiv.org/abs/1805.00881) (Дата звернення 26.06.2023).
5. E. Ahmed et al. Bringing computation closer toward the user network: Is edge computing the solution?. *IEEE Commun. Mag.* 2017. Nov. vol. 55. № 11. P. 138 – 144.
6. W. Khawaja, I. Guvenc, D. Matolak, U.C. Fiebig, N. Schneckenberger. A survey of air-to-ground propagation channel modeling for unmanned aerial vehicles. 2018. URL: <https://arxiv.org/abs/1801.01656> (Дата звернення 26.06.2023).
7. R. Valentino, W.S. Jung, Y.B. Ko. Opportunistic computational offloading system for clusters of drones. *Proc. 20th Int. Conf. Adv. Commun. Technol.* 2018. Feb. P. 303 – 306.
8. C. Luo, J. Nightingale, E. Asemota, C. Grecos. A UAV-cloud system for disaster sensing applications. *Proc. IEEE 81st Veh. Technol. Conf. (VTC Spring)*. 2015. May. P. 1 – 5.
9. Z. Zhou, J. Feng, L. Tan, Y. He, and J. Gong. An air-ground integration approach for mobile edge computing in IoT. *IEEE Commun. Mag.* 2018. Aug. vol. 56. № 8. P. 40 – 47.
10. R.M. Shukla, S. Sengupta, A. N. Patra. Software-defined network based resource allocation in distributed servers for unmanned aerial vehicles. *Proc. IEEE 8th Annu. Comput. Commun. Workshop Conf. (CCWC)*. 2018. Jan. P. 796 – 802.
11. Патент України на корисну модель 142478 Україна. Система низькоорбітального супутникового зв'язку із міжсупутниковими каналами зв'язку терагерцового діапазону. МПК 2019.01 Н 04 В 7/185. № u201911325; заявл. 21.11.2019; опубл. 10.06.2020, Бюл. № 11.
12. Saiko, V., Nakonechnyi, V., Narytnyk, T., Brailovskyi, M., Lukova-Chuiko, N. Terahertz Range Interconnecting Line for LEO-System. *Proceedings – 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2020*. Lviv, 2020. pp. 425–429.
13. Сайко В.Г., Наритник Т.М. Модель забезпечення функціонування інтегрованої інфраструктури на базі літаючої мережі БПЛА. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. серія: технічні науки*. 2023. том 34 (73). № 4. С.5-11.
14. Saiko, V., Nakonechnyi, V., Narytnyk, T., Brailovskyi, M., Toliupa, S. Increasing Noise Immunity between LEO Satellite Radio Channels -- *Proceedings – 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2020*. Lviv, 2020, pp.. 442–446
15. Shahzad H., Szymanski T.H. A dynamic programming offloading algorithm for mobile cloud computing. *Proceedings of the Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, CCECE*. Vancouver, Canada. 2016. 15–18 May IEEE. DOI:10.1109/CCECE.2016.7726790

**Saiko V.G., Narytnyk T.M., Kryvolapov Ya.V., Kryvolapov H.Ya. TRAFFIC OFFLOADING METHOD FOR INTEGRATED NETWORK ARCHITECTURE BASED ON LOW-ORBIT SATELLITE COMMUNICATION SYSTEM AND UAV**

*The concept of the Internet of Things (IoT) and the Tactile Internet have played a key role in shaping the new landscape of communication networks and services provided by these networks. The former contributed to the emergence of high and ultra-high-density networks, while the latter focused on network communication with ultra-low latency. Together, these developments required the integrated use of resources from various network types and transformed the communication network from homogeneous to heterogeneous.*

Consequently, during the development of 6G networks, a new concept for communication network evolution emerged, based on the understanding of the need for integration not only of different technologies within specific networks but also the integration of communication networks into a unified network. This concept is known as Space-Air-Ground-Earth Integrated Networks (SAGSIN) [1]. The goal of this work is to investigate the challenges of creating networks based on shared technologies of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), low-orbit satellite communication systems using distributed satellites, and edge computing to meet the quality of service requirements in fifth-generation communication networks. To address this challenge, this paper proposes a traffic offloading method from the terrestrial network to UAVs. What sets this method apart from known approaches is that the offloading can be done either directly to the UAVs or to UAVs equipped with a relay for transmitting information to the edge server of the low-orbit satellite communication system based on distributed satellites. An offloading traffic algorithm for the proposed method is employed, based on dynamic programming. Furthermore, a neural network-based approach is designed and implemented to project delay when offloading computations from the terrestrial network to UAVs with Mobile Edge Servers (MES) and UAVs equipped with a relay for transmitting information to the edge server of the low-orbit satellite communication system based on distributed satellites. Through computer simulations, it is demonstrated that the use of the Nonlinear AutoRegressive with eXogenous inputs (NARX) neural network results in a prediction accuracy of 88% and 86%, respectively.

**Key words:** Integrated UAV networks, low-orbit satellite communication systems with distributed satellite architecture, fifth-generation communication networks.

UDC 621.372.544

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/06>**Semenov A.O.**

Vinnytsia National Technical University

**Pinaiev B.O.**

Vinnytsia National Technical University

**Khloba A.A.**

Vinnytsia National Technical University

**Shurkhal M.Yu.**

Vinnytsia National Technical University

**Olkhovych V.M.**

Vinnytsia National Technical University

## MULTIBAND GRAPHIC EQUALIZER BASED ON AMPLIFYING STAGES WITH THE INCLUSION OF A BANDPASS FILTER IN THE FEEDBACK LOOP

*In this paper, we calculated the elements of an equalizer based on an operational amplifier with a filter included in the feedback loop based on fundamental works in this area. The number of bands was chosen to be eight, with a tone control range of +15 dB. The buffer stage, the summing stage, and the parameters of their elements were also selected. The model was built in the Multisim program, and computer simulations were performed to obtain the amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of each link and the equalizer as a whole. The 560 Hz link was considered separately at the minimum and maximum potentiometer positions (20 k $\Omega$ ), and a Bode analysis was performed, which clearly shows the shortcomings of this circuit, namely the uneven adjustment range in the direction of signal attenuation. It is advisable to use high-quality capacitors with good parameter stability (in terms of capacitance and temperature). If electrolytic (oxide) capacitors are used in series, they should be connected in opposite order (plus to plus or minus to minus).*

*Operational amplifiers (op amps) can be used in any way suitable for high-end audio equipment. Here, the main attention should be paid to low noise levels and the high value of the input voltage rise rate. Power to the op-amp should be supplied from a stabilized, bipolar power supply. The voltage and current of the power supply depend on the specific type of chips used; we use TL084CN op amps with a bipolar supply voltage of 12 V. The equalizer has the name "graphic" because the slider controls used in it (instead of knobs) show the frequency response of the output signal by their position. You can control the entire frequency range by applying several bandpass filters, constructively assembled in one case. Each of these filters will be tuned to a specific frequency. Typically, the individual filters are placed (spaced) either an octave, half an octave, or a third of an octave apart so that when they are all in the gain state (or all in the attenuation state), the frequency response is equal. Movements usually have a (mark) that makes it easy to determine the center position.*

**Key words:** equalizer, amplifier, filter, spectrogram, signal summing, bandpass, feedback loop, Q-factor.

**Formulation of the problem.** Equalizers are deservedly popular among sound reproduction enthusiasts. Only these devices make it possible to significantly change the quality of an acoustic sound signal and thereby correct some "imperfections" in the signal source – amplifier – speaker path, taking into account the individual perception of a particular listener [1]. By adjusting the equalizer's transmission coefficient at selected frequency intervals of the audio signal, you can

achieve improved sound reproduction even for mid-level devices, including monaural designs [2]. There is interference and resonance in every room – as a result, some frequencies of the acoustic range sound louder, and others quieter than planned. The characteristics and even the location of the loudspeakers are also important. The described eight-band simple equalizer allows you to correct these shortcomings and obtain acceptable sound processing characteristics in a certain range.

**Analysis of recent research and publications.** In the 1930s, John Volkman used an equalizer to change the sound of cinema sound systems and introduced equalization into sound reinforcement systems. In 1967, he developed the first set of passive 1/3-octave filters called Acousta-Voice, which marked the beginning of a new era of modern equalization. The next 20 years can be characterized by an incredible rise in the development of equalizers: a wide variety of these devices were created using microcircuits and other digital technologies. The first equalizer similar to modern ones was invented by Peter Bexendahl [3]. The research of filters to create better equalizers is ongoing, for example, in [4], the development of a graphic equalizer based on interpolated filters with a finite impulse response (IFIR) is presented, and in [5] the parallel equalizer is improved by using bandpass filters, the interaction of which with two neighboring filters at their center frequency is precisely controlled, it is called a cascade. In addition, there are ways to improve mathematical models, so in [6], the interaction matrix is created with different gains for each bandpass filter, which helps to maintain the maximum approximation error below 1 dB at and between the center frequencies when the gains of neighboring commands are the same.

Although the topic under study is not new, no illustrative calculations of a simple equalizer with summation and the resulting design were found in the form of an article, so the results of the study will be demonstrated below.

**Task statement.** Calculate the active filters of each link and simulate the resulting equalizer circuit based on the addition of band-pass filter signals to obtain the frequency response and frequency response of the device, perform Bode analysis, evaluate the quality of the resulting model, and draw conclusions about such a construction.

**Methods.** To calculate the equalizer based on an operational amplifier with the filter included in the feedback loop, we first set the tone control range in all frequency bands to  $\pm 15$  dB without the mutual influence of the filters on each other, so it will be advisable to include each band-pass filter in a parallel negative voltage feedback loop of the operational amplifier [1]. Figure 1 shows the inclusion of filters in the negative feedback loop of the adder using the example of one filter.

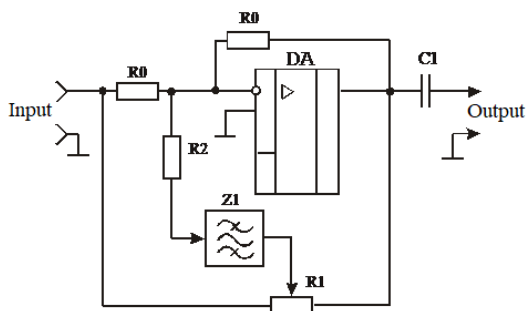


Fig. 1. Scheme of active filter inclusion in the feedback loop of the summing stage

All subsequent calculation methods are derived from [1; 2]. The gain of the active filter at the resonant frequency, provided that the optimal parameters of such a link, as well as the filter itself, are obtained, should be equal to two. If this condition is met, the gain of the circuit at the resonant frequency is equal to (1):

$$K_c = \frac{(2R_0 + R_2 - 2R_0n)}{(2R_0n + R_2)}, \quad (1)$$

where  $K_c$  is the adder's transmission coefficient;  $R_0$  and  $R_2$  are the values of the corresponding resistances;  $n$  is the coefficient characterizing the position of the potentiometer  $R_1$  (in the leftmost position  $n = 0$ , in the rightmost position  $n = 1$ ).

Given the previous expression, the maximum (2) and minimum (3) adder gains are equal:

$$K_{c \max} = \frac{(2R_0 + R_2)}{R_2}; \quad (2)$$

$$K_{c \min} = \frac{R_2}{(2R_0 + R_2)}. \quad (3)$$

When choosing the recommended values [2] of the resistors, note that the input resistance of the filter (Figure 1) will be equal to the resistance  $R_2$  and will be 5.1 k $\Omega$ . Then, by selecting the resistor  $R_0$ , we will achieve the required control factor. Then  $R_0 = 13$  k $\Omega$ . The dynamic range is determined by (4):

$$D_p = \frac{K_{c \max}}{K_{c \min}} = \frac{(2 \cdot 13 + 5,1)}{5,1} / \frac{5,1}{(2 \cdot 13 + 5,1)} = 37,18(\text{times}) \approx 31,4(\text{dB}). \quad (4)$$

The capacitance  $C_1$  (Figure 1) is calculated as follows (5), so that it introduces distortion at lower frequencies of 1.5 dB at a resistance of 600 Ohms:

$$C_1 = \frac{1}{2\pi \cdot R_2 \cdot F_i \cdot \sqrt{M_i^2 - 1}} = \frac{1}{6,28 \cdot 50 \cdot 600 \cdot \sqrt{1,18^2 - 1}} = 8,26 \text{ (uF)}. \quad (5)$$

Let's calculate the required number of bands in the case of an octave equalizer. The step factor for the octave filter is equal to (6), and it is also known that for the octave filter (7):

$$K = \left( \frac{f_{\max}}{f_{\min}} \right)^{1/N}; \quad (6)$$

$$K = 2^{1/M} = 2, \quad (7)$$

where  $N$  is the number of control bands, and  $M$  is the number of bands per octave ( $M=2$  according to the above). Then, taking into account expression (7) and going to expression (5), we have (8):

$$N = \frac{\lg \left( \frac{f_{\max}}{f_{\min}} \right)}{\lg K} = \frac{\lg 250}{\lg 2} = 7,9 \approx 8 \text{ (bands)}. \quad (8)$$

Let's calculate the values of the central or so-called average frequencies of the filters using formula (9) and put them in Table 1:

$$F_{0i} = \left[ F_{\max}^{\frac{2i-1}{2N}} \right] \left[ F_{\min}^{\frac{2(N-i)+1}{2N}} \right] \text{ (Hz)}, \quad (9)$$



where  $F_{0i}$  is the average frequency of the  $i$ -th band;  $F_{\min}$ ,  $F_{\max}$  are the upper and lower limit frequencies, selected within 50 Hz – 12.5 kHz, respectively;  $N$  is the number of frequency bands.

The  $Q$ -factor at the maximum rise or fall of the frequency response is selected from condition (10):

$$Q = \frac{\sqrt{k}}{k-1} = \frac{\sqrt{2}}{2-1} = 1,41, \quad (10)$$

where  $k$  is the step coefficient of the filter.

It is easy to verify the correctness of the calculation of the average filter frequencies, which was carried out according to expression (9) since the obtained values of neighboring frequencies differ by a factor of two, which indeed corresponds to  $k=2$ .

The application of active RC filters, especially when used as active elements of operational amplifiers, is suitable for the above-calculated parameters. The simplest example of such a filter is a filter based on a low- $Q$  bandpass filter, the schematic diagram of which is shown in Figure 2 [2]:

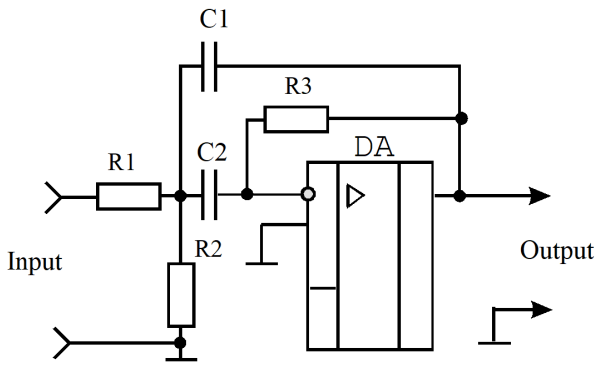


Fig. 2. Schematic of a low-pass bandpass RC filter on an operational amplifier

Although this filter belongs to the class of low- $Q$  filters, it allows you to achieve a  $Q$  factor of two, which is higher than the required calculated value.

Let's calculate the equalizer filters, knowing their resonant frequencies (from Table 1). The initial data is the same for all filters:  $Q = 1.4$ ; gain at the resonant frequency:  $K_p = 2$ ; the value of the resistor  $R_3$ , the same for all filters, is chosen arbitrarily and is assumed to be 15 k $\Omega$  [2]; resistor  $R_1$  is calculated by the formula (11):

$$R_1 = \frac{Q \cdot R_3}{2 \cdot K_p} = \frac{1,4 \cdot 15000}{2 \cdot 2} = 5250 \text{ (}\Omega\text{)}. \quad (11)$$

The values of the resistor  $R_2$  and capacitors are calculated by the following expressions (12) and (13):

$$R_{2i} = \frac{1}{(2 \cdot Q - 1) \cdot 2\pi \cdot F_{0i} \cdot C_{1i}}; \quad (12)$$

$$C_{1i} = C_{2i} = \frac{2 \cdot Q}{2\pi \cdot F_{0i} \cdot R_3}. \quad (13)$$

Table 1

The values obtained after the calculations

Filter	1	2	3	4	5	6	7	8
$F_{0i}$ , Hz	71	141	281	560	1116	2226	4439	8852
$C$ , uF	0,5	0,22	0,1	0,056	0,033	0,015	0,0068	0,0033
$R_2$ , k $\Omega$	3,48	4,02	4,42	4,42	3,32	3,74	4,12	4,22

The buffer stage should be an op-amp inverter on an op-amp. Initial data: Gain:  $K = 1$  (0 dB); Nonlinear distortion in the lowest frequency region:  $M_1 = 1.18$  (1.5 dB); Higher frequencies:  $M_h = 1.41$  (3 dB); Input impedance:  $R_{in} = 10$  k $\Omega$ ; Operating frequency band: 50 Hz – 12 kHz; Bipolar power supply:  $\pm 12$ B.

Considering the initial data, the buffer cascade will be performed according to the scheme shown in Figure 3 [1].

In this scheme, its input resistance is determined by the resistor  $R_1$ , so you can take  $R_1 = R_{in} = R_1 = 10$  k $\Omega$ .

The value of the capacitor  $C_1$  will be calculated taking into account the nonlinear distortion in the lower frequency region (14) and the higher frequencies of  $C_2$  (15):

$$C_1 = \frac{1}{2\pi \cdot F_{\min} \cdot R_{in} \cdot \sqrt{M_1^2 - 1}} = \frac{1}{6,18 \cdot 50 \cdot 10^4 \cdot \sqrt{1,18^2 - 1}} = 0,5084 \text{ (uF)}. \quad (14)$$

$$C_2 = \frac{\sqrt{M_h^2 - 1}}{2\pi \cdot F_{\max} \cdot R_2} = \frac{\sqrt{1,41^2 - 1}}{6,18 \cdot 12,5 \cdot 10^7} = 1261,1 \text{ (pF)}. \quad (15)$$

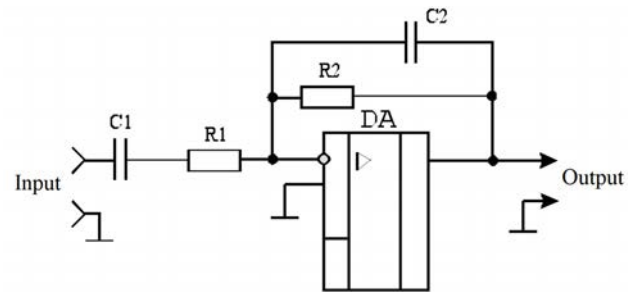


Fig. 3. Schematic diagram of the buffer cascade

Let's build a modeling circuit based on frequency-dependent feedback, which is realized using filters (Figure 4). For the task, we will use the TL084CN op-amp. To take the frequency response and frequency response, the corresponding device will be connected to the output and input points of the filters.

To see if all the filters on the frequency axis have the same  $Q$ -factor and the correct location of the center frequencies, we represent them in the same coordinate system (Figure 5) for the frequency response similarly (Figure 6).

The overall frequency response and phase response of the equalizer will be as shown in Figure 7. To find out the depth of adjustment relative to the average level, we set the minimum and maximum

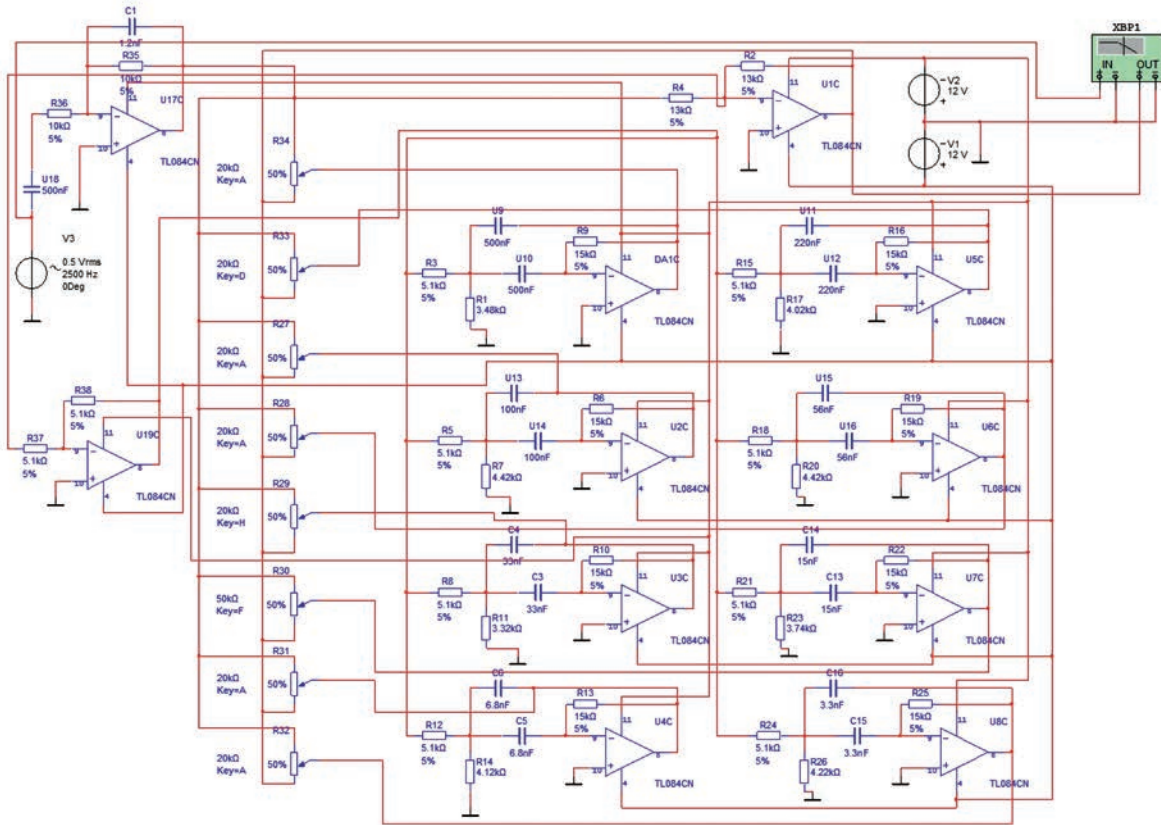


Fig. 4. Scheme prepared for modeling

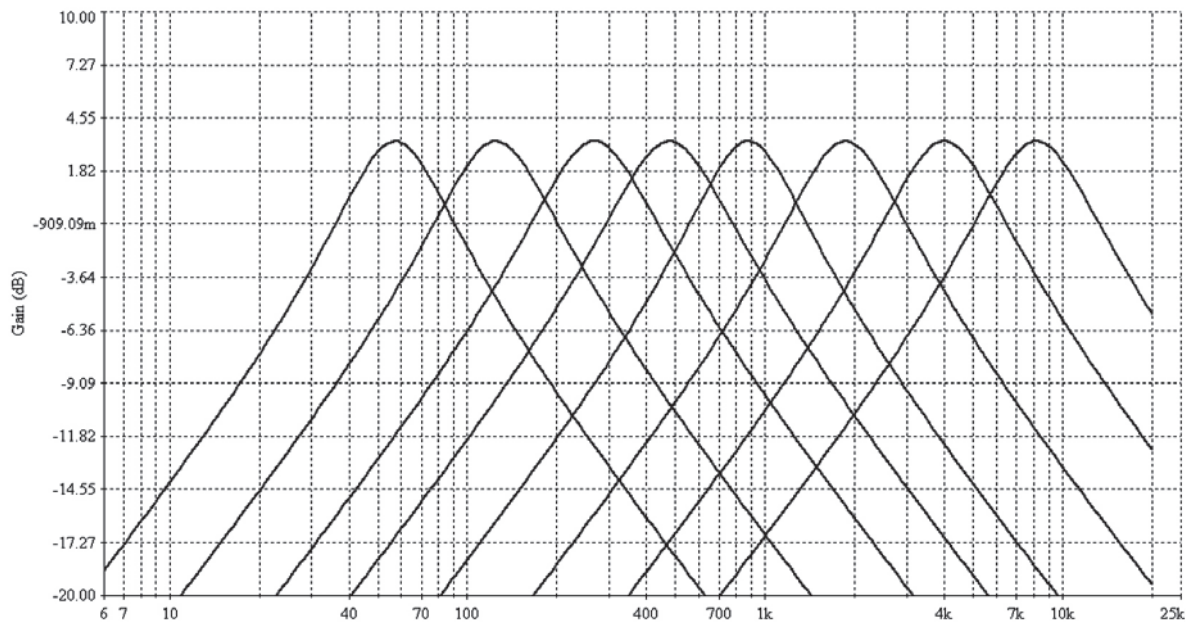


Fig. 5. Frequency response of all equalizer filters

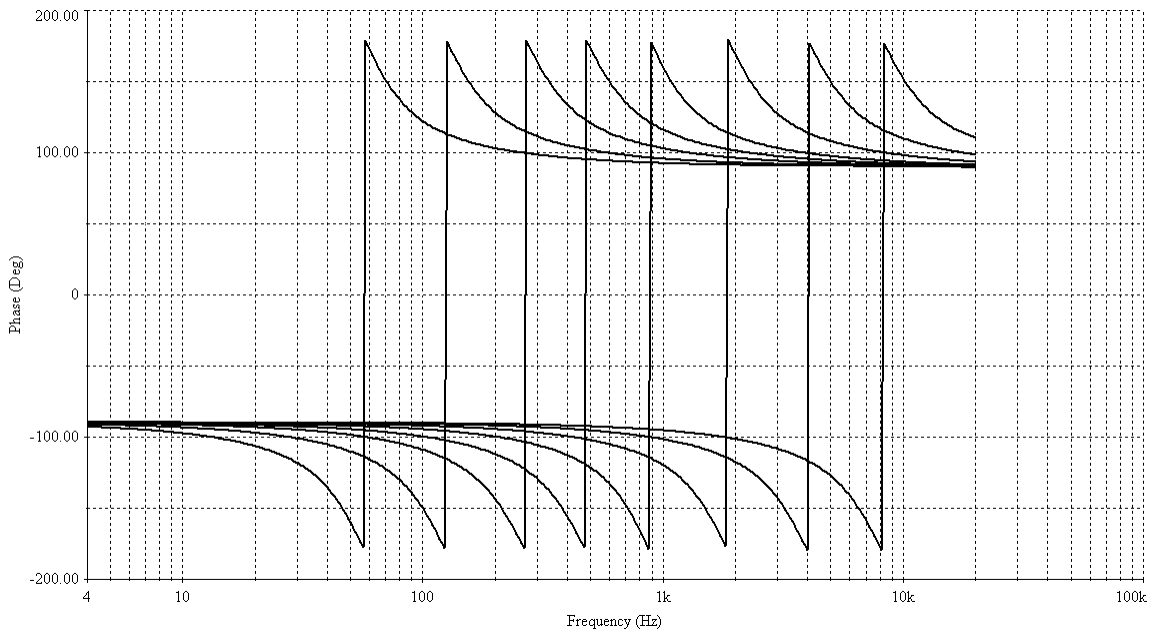
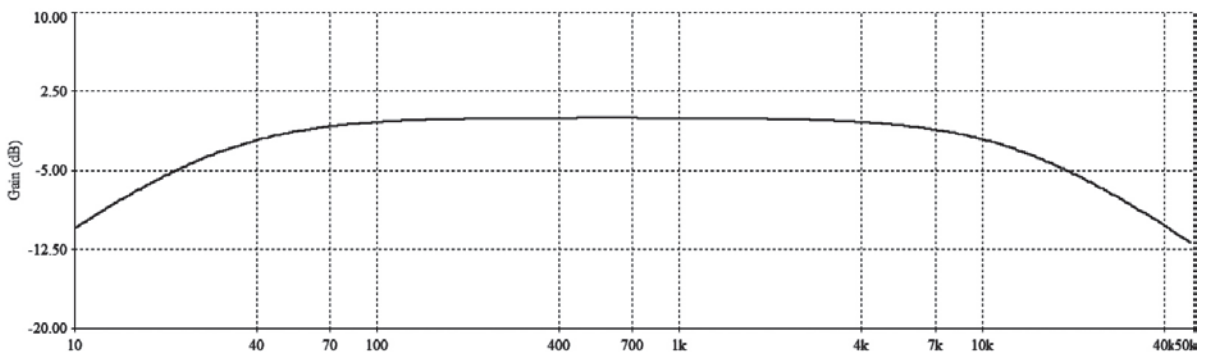
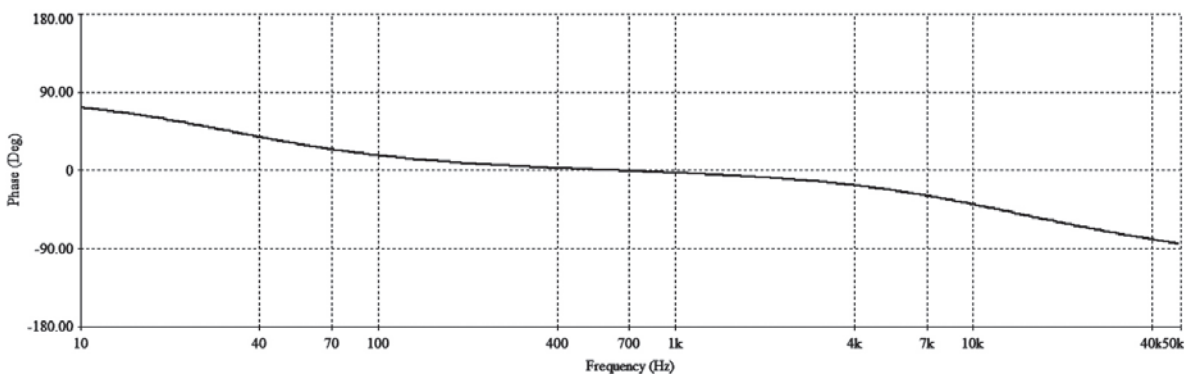


Fig. 6. Phase response of all equalizer filters



a)



b)

Fig. 7. Overall frequency (a) and phase response (b) of the equalizer

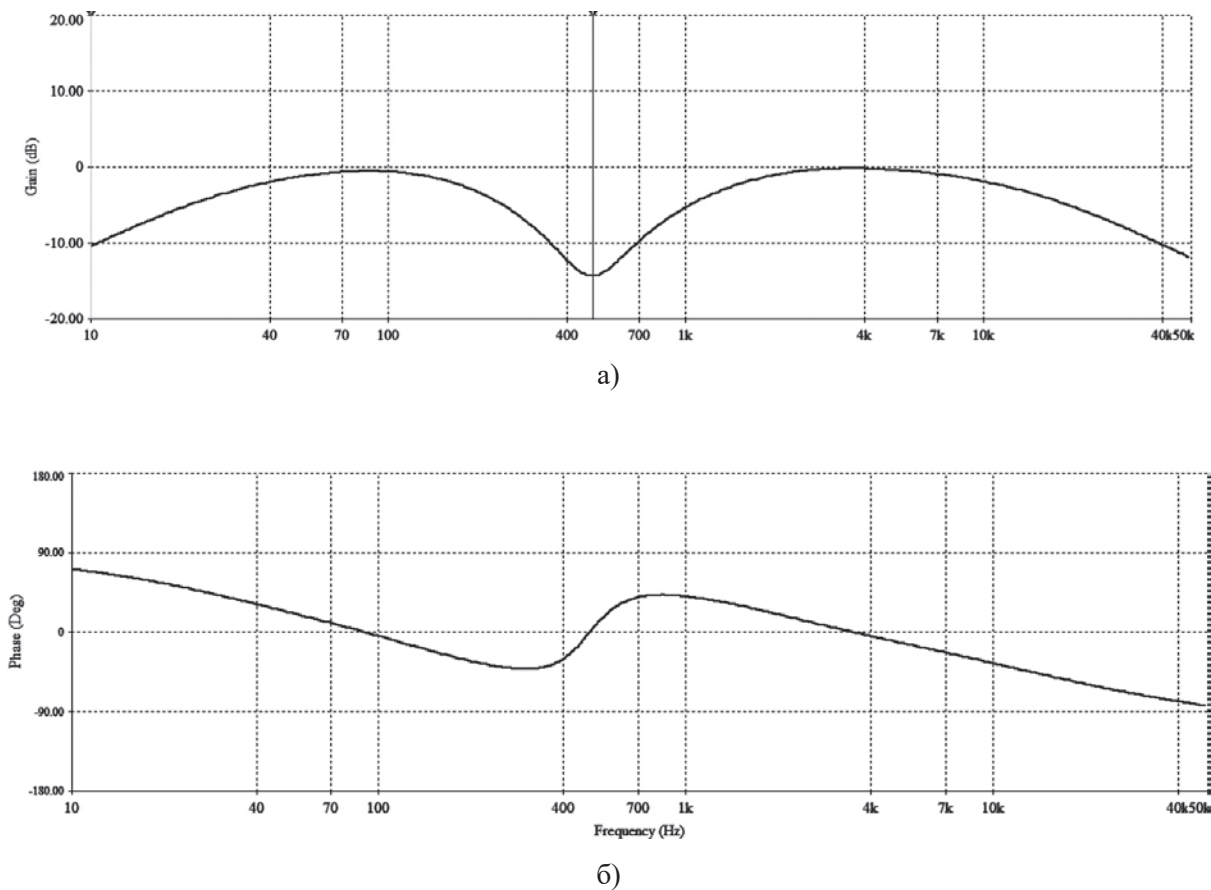


Fig. 8. Frequency response phase response of the equalizer at the minimum position of the slider of one of the circuits (560 Hz)

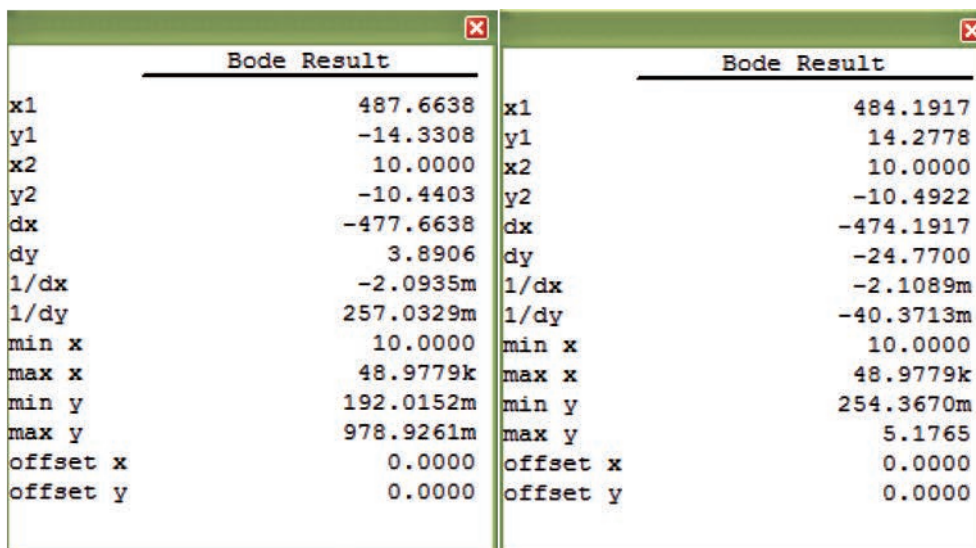
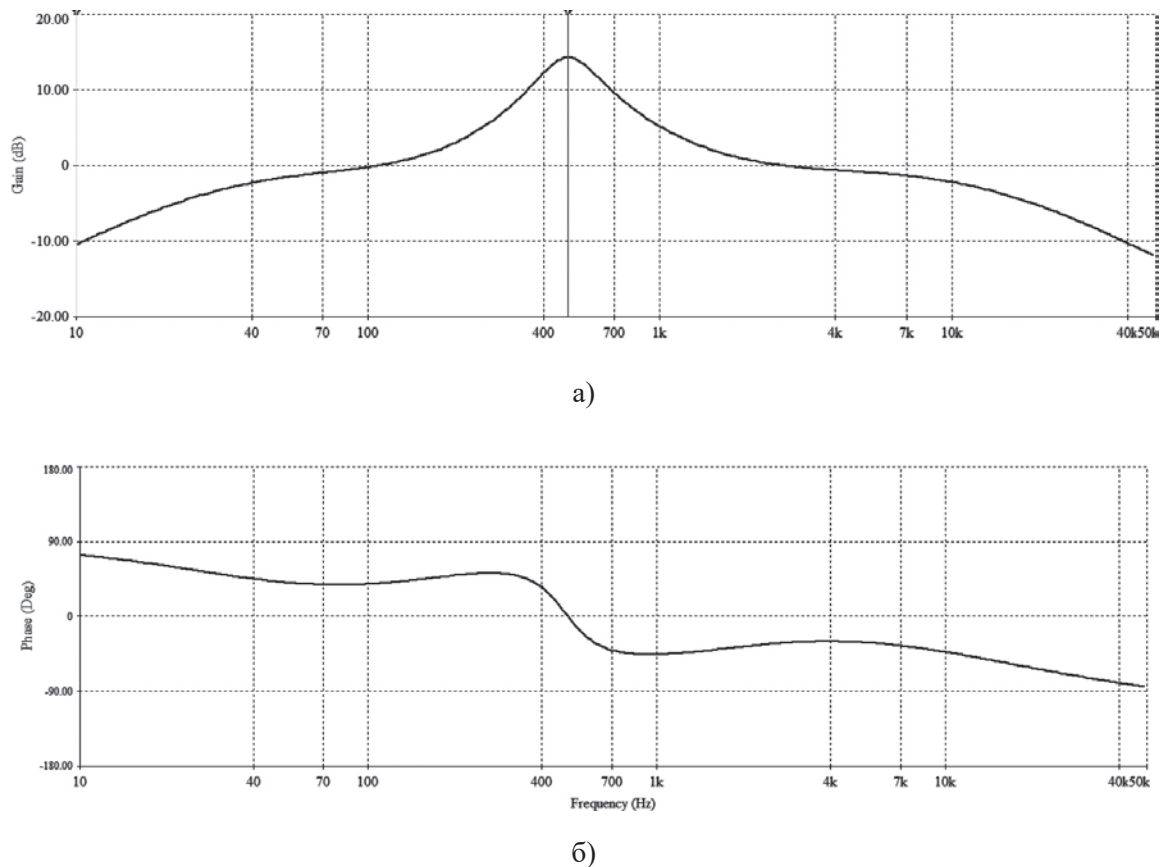


Fig. 9. Resulting values at the minimum (a) and maximum (b) slider positions



**Fig. 10. Frequency response and phase response of the equalizer at the maximum position of the slider of one of the circuits (560 Hz)**

values of the potentiometer of one circuit, the results are shown in Figures 8 (a, b), 9 (a, b), 10 (a, b).

**Conclusions.** The simulation showed that the device does not work exactly according to the calculations. The errors are related to the elements selected from the standard element series, but in general, the filters, buffer stage, and summing stage were designed correctly. The Bode analysis indicates that the signal

attenuation is -24.77 dB, and the gain is only 3.89 dB, which is a disadvantage, so comparing this result with the result obtained when building an equalizer based on an operational amplifier in [7], we can conclude that it is inexpedient to use the proposed circuit, using a gyrator, you can achieve greater quality factor, uniform depth of adjustment and smoother frequency response. Therefore, it is recommended to use gyrator circuits.

#### Bibliography:

1. Self, D. Small Signal Audio Design. Focal Press. 2020. p.784 <https://doi.org/10.4324/9781003031833>
2. National Semiconductor Corporation. Audio/radio Handbook. URL: <http://surl.li/nhxat> (дата звернення 17.11.23)
3. Välimäki, V., & Reiss, J. All About Audio Equalization: Solutions and Frontiers. In Applied Sciences. 2016. Vol. 6, Issue 5, p. 129. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app6050129>
4. Bruschi, V., Nobili, S., Terenzi, A., & Cecchi, S. A Low-Complexity Linear-Phase Graphic Audio Equalizer Based on IFIR Filters. In IEEE Signal Processing Letters. 2021 (Vol. 28, pp. 429–433). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/lsp.2021.3057228>
5. Valimaki, V., & Liski, J. Accurate Cascade Graphic Equalizer. In IEEE Signal Processing Letters. 2017 (Vol. 24, Issue 2, pp. 176–180). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/lsp.2016.2645280>
6. Liski, J., Ramo, J., & Valimaki, V. Graphic Equalizer Design with Symmetric Biquad Filters. IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA). 2019. <https://doi.org/10.1109/waspaa.2019.8937168>
7. Куляс Р.О. Активний багатосмуговий регулятор форми амплітудно-частотної характеристики на операційних підсилювачах. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/24295>

**Семенов А.О., Пінаєв Б.О., Хльоба А.А., Шурхал М.Ю., Ольхович В.М. БАГАТОСМУГОВИЙ ГРАФІЧНИЙ ЕКВАЛАЙЗЕР НА ОСНОВІ ПІДСИЛЮВАЛЬНИХ КАСКАДІВ ІЗ УВІМКНЕННЯМ СМУГОВОГО ФІЛЬТРА В КОЛО ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ**

*У роботі проведено розрахунок елементів еквайзера на основі операційного підсилювача з увімкненням фільтру в коло зворотного зв'язку, ґрунтуючись на фундаментальних роботах в даному напрямку. Кількість смуг була обрана рівною восьми, діапазон регулювання тембру  $\pm 15$  дБ. Також був обраний буферний каскад, сумуючий каскад, параметри їх елементів. Модель була побудована у програмі Multisim, проведено комп'ютерне моделювання для зняття амплітудно-частотної і фазо-частотних характеристик кожної ланки і еквайзера в цілому. Окремо було розглянуто ланку на 560 Гц при мінімальному і максимальному положенні потенціометра (20 кОм), проведено аналіз Боде, на якому наочно видно недоліки даної схеми, а саме нерівномірний діапазон регулювання в сторону послаблення сигналу. Усі конденсатори в схемі бажано застосовувати високоякісні, з хорошою стабільністю параметрів (за ємністю і температурою). У разі послідовного вмикання електролітичних (оксидних) конденсаторів, їх слід вмикати зустрічно (плюс до плюса або мінус до мінуса).*

*Операційні підсилювачі (ОУ) можна застосувати будь-які, що підходять за параметрами для використання в звуковій апаратурі високого класу. Тут основну увагу слід приділити низькому рівню шумів і високому значенню швидкості наростання вхідної напруги. Живлення на ОУ слід подавати від стабілізованого, двополярного джерела живлення. Напруга і струм джерела живлення залежать від конкретного типу застосованих мікросхем, використовуються ОП – TL084CN з двополюсною напругою живлення 12 В. Еквайзер має назву «графічний» тому, що застосовані в ньому движкові регулятори (замість ручок) своїм положенням показують частотну характеристику вихідного сигналу. Можна керувати всім частотним діапазоном шляхом застосування декількох смугових фільтрів, конструктивно зібраних в одному корпусі. Кожен із цих фільтрів буде налаштований на певну частоту. Зазвичай окремі фільтри розміщені (на відстані) або в октаву, або в половину октави, або в третину октави таким чином, щоб коли всі вони перебувають у стані посилення (або всі в стані ослаблення), частотна характеристика була рівна. Движки зазвичай мають (позначку), яка дає змогу легко визначити середнє положення.*

**Ключові слова:** еквайзер, підсилювач, фільтр, спектрограма, підсумовування сигналів, смуга пропускання, зворотний зв'язок, добротність.

УДК 621.391

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/07>**Сушин І.О.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Буткевич Г.Ю.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЗВ'ЯЗНОСТІ ВУЗЛІВ БЕЗДРОТОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ ПРИ УМОВІ ВИКОРИСТАННЯ БАГАТОРІВНЕВОЇ МЕРЕЖІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ АЕРОПЛАТФОРМ

*Світові катаклізми та війни призводять до проблем відсутності зв'язності між вузлами мереж. Це питання стає все актуальнішим кожного дня, що створює багато пропозицій та ідей вирішення даної комплексної задачі. Тому було проаналізовано аспекти, пов'язані з методологією оцінки зв'язності вузлів бездротової сенсорних мереж з використанням телекомунікаційних аероплатформ на базі безпілотних літальних апаратів, кластеризацію бездротових сенсорних мереж. Виконано пошук методологічних підходів до забезпечення зв'язності вузлів бездротової сенсорної мережі в умовах відсутності комунікаційної інфраструктури. Забезпечення зв'язності вузлів БСМ є важливим фактором для отримання необхідної інформації від мережі, але і досі є необхідність в ефективній методиці оцінки зв'язності вузлів бездротових сенсорних мереж при використанні телекомунікаційних аероплатформ на базі безпілотних повітряних апаратів в умовах відсутності комунікаційної інфраструктури. Це створює наукову задачу, яка полягає у вдосконаленні методики оцінки зв'язності вузлів бездротових сенсорних мереж з урахуванням можливості використання мережі не лише телекомунікаційних аероплатформ, а й супутникового. Обґрунтовано та розглянуто основну мету, наукову задачу та предмет дослідження, пов'язані з методологією оцінки зв'язності вузлів бездротових сенсорних мереж з використанням телекомунікаційних аероплатформ на базі безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Представлена методика оцінки зв'язності вузлів бездротової сенсорної мережі (БСМ) із врахуванням можливості використання багаторівневої мережі телекомунікаційних аероплатформ (ТА) в умовах відсутності комунікаційної інфраструктури. А також алгоритм оптимізації взаємодії послідовних рівнів обміну інформацією. Це дасть можливість її використання бути в експертно-моделюючій системі прийняття рішень для керування пошуково-рятувальними роботами.*

**Ключові слова:** БСМ, телекомунікаційна аероплатформа, зв'язність вузлів, багаторівнева мережа, БПЛА.

**Мета дослідження.** Пошук методологічних підходів до забезпечення зв'язності вузлів БСМ, що є необхідною умовою отримання інформації від БСМ в умовах відсутності комунікаційної інфраструктури.

**Наукова задача дослідження.** Вдосконалення методики оцінки зв'язності вузлів бездротових сенсорних мереж із врахуванням можливості використання багаторівневої мережі телекомунікаційних аероплатформ (ТА) в умовах відсутності комунікаційної інфраструктури.

**Об'єкт досліджень.** Процес функціонування БСМ із застосуванням телекомунікаційних аероплатформ на базі БПЛА.

**Предмет досліджень.** Методика оцінки зв'язності вузлів БСМ із врахуванням можливості

використання багаторівневої мережі телекомунікаційних аероплатформ (ТА) в умовах відсутності комунікаційної інфраструктури.

**Постановка проблеми.** Відсутність ефективної методики оцінки зв'язності вузлів бездротових сенсорних мереж (БСМ) при використанні телекомунікаційних аероплатформ на базі безпілотних повітряних апаратів (БПЛА) в умовах відсутності комунікаційної інфраструктури [1].

У зв'язку зі зростанням застосування БСМ та БПЛА в різних галузях, таких як військовий, медичний, екологічний та інші, виникає потреба у забезпеченні надійного та стабільного зв'язку між вузлами таких мереж. Однак, в умовах відсутності комунікаційної інфраструктури, коли

зв'язок здійснюється через телекомунікаційні аероплатформи, виникають складнощі у визначенні оптимальних методів оцінки зв'язності вузлів БСМ [2, 3].

Є наявна необхідність розробки методологічних підходів та вдосконалення методики оцінки зв'язності вузлів БСМ, яка враховуватиме можливість використання багаторівневої мережі телекомунікаційних аероплатформ. Це дозволить забезпечити ефективне використання БПЛА для забезпечення зв'язку в мережі, а також покращити продуктивність, стабільність та надійність комунікаційного процесу між вузлами БСМ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Класифікація методів кластеризації у бездротових сенсорних мережах (БСМ) використовується для розділення вузлів мережі на групи або кластери, які мають спільні характеристики. Кластеризація призначена для оптимізації функціонування БСМ завдяки мінімізації навантаження на мережу, кластеризовані вузли можуть взаємодіяти безпосередньо між собою, уникаючи використання загальних ресурсів мережі. Кластеризовані вузли можуть обмінюватися даними навіть у випадку пошкодження окремих вузлів чи каналів зв'язку та можуть обробляти дані локально, зменшуючи потребу у їх передачі на центральний вузол [5].

Методи кластеризації, що не базуються на інформації про мережу, не використовують характеристики вузлів для їхнього визначення у кластерах. Ці методи розподіляють вузли мережі на кластери, базуючись на їх взаємодії між собою [6].

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Сучасна система моніторингу надзвичайної ситуації складається з БСМ та БПЛА(ів). Ці БПЛА розташовані на різних рівнях над поверхнею землі і мають різний рівень енергетичного та телекомунікаційного забезпечення, а також різні можливості з точки зору дистанційного збору інформації з сенсорів беспроводових сенсорних мереж.

У своїх дослідженнях вчені аналізують проблему підвищення зв'язності мобільних радіомереж шляхом розташування нових або переміщення існуючих безпілотних повітряних апаратів, проте математична модель не враховує відстань передачі даних через повітря [7, 8].

В останній час зростає зацікавленість у методах оцінки параметрів руху безпілотних літальних апаратів, які включені до інфокомунікаційних сенсорних мереж і виконують різкі маневри або постійно змінюють свою траєкторію руху [10, 11, 12].

На першому рівні розташовані сенсори. Сенсорами (тобто датчиками первинної інформації)

можуть бути оснащені механічні пристрої, які розташовуються чи пересуваються по поверхні за допомогою спеціальних пристроїв пересування або разом з людиною, яка є рятувальником чи виконувачем пошукових робіт в зоні надзвичайної ситуації). Мова йде про територію, земну поверхню чи акваторію морів або океанів де телекомунікаційна інфраструктура відсутня через певні катаклізми, природні або техногенні аварії, катастрофи (наприклад, землетрус в Туреччині, Сирії та Іраці, торнадо у США).

Прибуття пошуковців та рятувальників або тільки технічних засобів для виконання відповідних завдань вимагає оперативного покриття великих територій для зв'язку не тільки з оперативним центром рятування, а й з глобальними центрами спостереження за катаклізмами, науковими та медичними центрами, в яких можуть бути надані вказівки або здійснено керування рятувальними діями, здійсненням медичних операцій для рятування життя людей. Тому відсутність телекомунікаційної інфраструктури або неможливість передачі інформації є ключовим моментом задачі пошуку та рятування.

На сьогоднішній день кожна бригада що прибула до місця події має БПЛА гелікоптерного типу (або в деяких випадках літакового). Вони створюють 1-й рівень мережі (тактичний рівень), який забезпечує локальну зв'язність між технічними засобами рятування і пошуку та рятувальниками. Висота розташування від пів кілометра до одиниць кілометрів.

Але щоб передати інформацію на далекі відстані до місць де приймаються загальні (оперативно-стратегічні) рішення необхідний ще один рівень – 2-й (висота якого над земною поверхнею від декількох кілометрів до декількох десятків кілометрів). Він повинен взаємодіяти як з мережею БПЛА гелікоптерного типу (тактичний рівень) так і з системами розташованими на низьких навколосезних орбітах для того, щоб з їх допомогою швидко передавати інформацію до головного центру прийняття рішень. Або безпосередньо передавати інформацію до цього центру.

Також рівні визначаються не тільки просторовим розташуванням, а й оснащенням і можливістю перебування у робочому стані, тобто виконувати інформаційний обмін з іншими рівнями мережі.

Зазвичай БПЛА гелікоптерного типу можуть триматися у повітрі від пів години до декількох годин, а літакового типу можуть триматися від 24 годин до декількох діб (тому що енергетична оснащеність більш висока).



Багаторівневі системи БПЛА, що взаємодіють з БСМ можуть застосовуватися (рисунок 1): При спостереженні за океанічними та морськими акваторіями; При спостереженні за ландшафтами прецизійного землеробства, тваринництва; При спостереженні за природними катастрофами, які, зазвичай, мають регіональний масштаб дії та ще й ускладнюються техногенними аваріями, якщо ці катастрофи відбуваються на ландшафтах агломерацій; При спостереженні за техногенними об'єктами для уникнення можливих техногенних катастроф; При використанні на урбаністичних територіях, де сконцентрована велика кількість людей і техногенних об'єктів.

Таким чином, дана робота пов'язана із можливістю забезпечення інформаційного обміну в умовах відсутності телекомунікаційної інфраструктури, тобто в умовах техногенної або природної катастрофи є актуальною.

В роботі запропонована універсальна методика раціональної взаємодії послідовних рівнів інформаційного обміну між БСМ (на земній поверхні чи в акваторії) з БПЛА (1-го рівня) та БПЛА (1-го рівня) з БПЛА (2-го рівня), що забезпечує оцінку зв'язності та оптимізацію процесу збору даних з БСМ.

Етапи запропонованої методики:

1. Загальна постановка задачі оцінки зв'язності. Першим етапом є аналіз потреб і вимог до забезпечення зв'язності в конкретній системі. Встановлюються основні критерії оцінки, такі як доступність, надійність, пропускну здатність та інші.

2. Аналіз та синтез методів оцінки зв'язності. На цьому етапі проводиться огляд та аналіз наявних методів оцінки зв'язності. Вивчаються різні підходи та техніки, які можуть бути застосовані для оцінки зв'язності в даній системі. На основі цього аналізу можуть бути розроблені нові методи або вдосконалені існуючі з метою поліпшення оцінки зв'язності.

3. Аналіз та вибір апаратних засобів БСМ при умові застосування багаторівневої системи БПЛА. Проводиться оцінка вимог до апаратних засобів безперервної системи моніторингу в разі використання багаторівневої системи безпілотних повітряних апаратів. Визначаються потреби в обладнанні, такому як радіоканали, антени, приймачі, передавачі тощо. Здійснюється вибір апаратних засобів, які найкраще відповідають вимогам системи оцінки зв'язності.

4. Алгоритм оптимізації взаємодії послідовних рівнів інформаційного обміну.

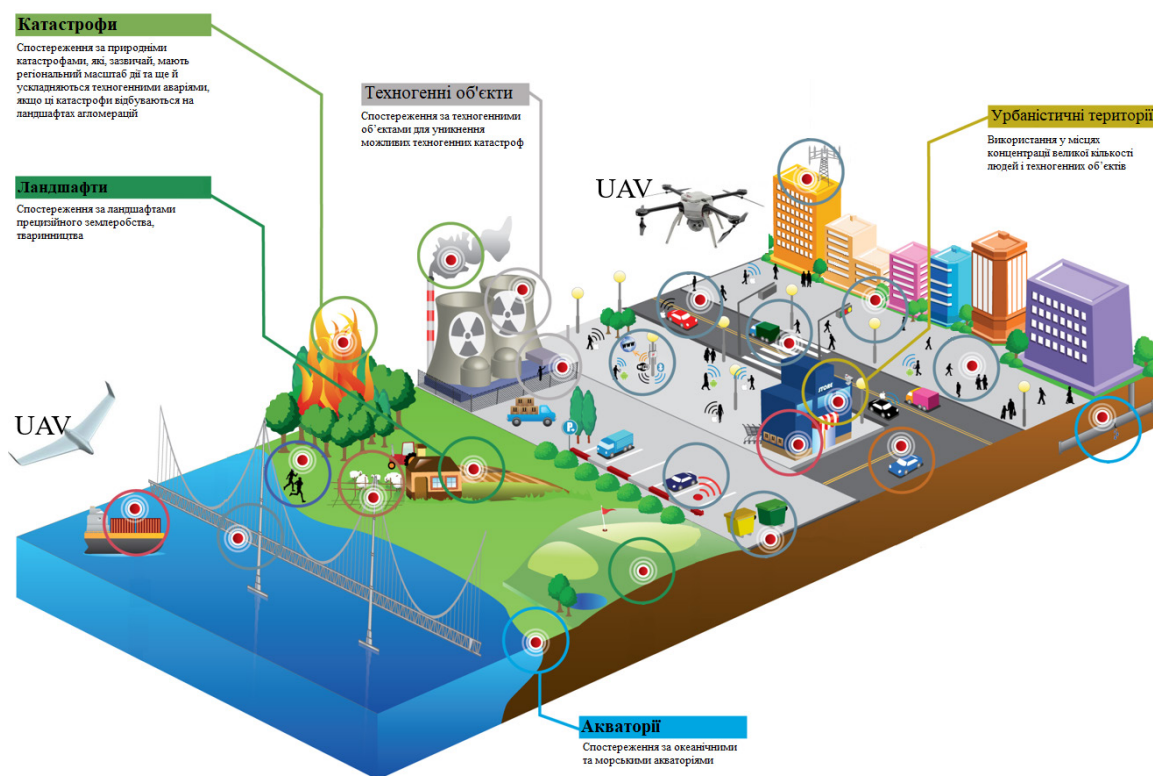


Рис. 1. Сфери застосування багаторівневої мережі телекомунікаційних аероплатформ для забезпечення зв'язності вузлів БСМ [13]

Перейдемо до більш детального викладення етапів методики.

**Загальна постановка задачі оцінки зв'язності вузлів БСМ при умові застосування БПЛА.**

Дано: характеристики вузлів безпроводової сенсорної мережі та телекомунікаційних аероплатформ:

$N$  – кількість стаціонарних та мобільних сенсорних вузлів мережі та координати їх розміщення на місцевості;

$N_{TA}$  – кількість ТА на кожному з рівнів;  $V_{дмі}$  – об'єм даних моніторингу  $i$ -го вузла,  $i=1...N$ ; технічні та телекомунікаційні характеристики наземних сенсорних вузлів, ТА;

кожен вузол мережі має власну систему управління, діє в кооперації з ТА (з іншими вузлами) [14].

Метод збору даних ТА: безпосередньо з вузлів або з головних вузлів кластерів.

Необхідно: визначити кількість та координати точок збору даних, порядок збору даних моніторингу з вузлів БСМ телекомунікаційними аероплатформами та траєкторію їх переміщення (позиціонування), для підтримки зв'язності та оптимізації цільових функцій управління:

1.  $T_{зб} \rightarrow \min$  або  $T_{зб} \leq T_{зб\text{зад}}$  (мінімізація або обмеження часу збору даних) (1)

$T_{зб} = L_m/v$ ;  $L_m = f(n_{кл}, (x, y, h)_{кл}, \text{тоб}_{кл})$ ,  $k=1...nk$ ;

2.  $T_{ф} \rightarrow \max$  або  $T_{ф} \geq T_{ф\text{зад}}$  (максимізація або забезпечення певного часу функціонування БСМ) (2)

Зрозуміло, що в загальній постановці задачі необхідно надати характеристики вузлів БСМ та характеристики телекомунікаційних аероплатформ першого та другого рівнів.

Наприклад, їх кількість, можливості інформаційного обміну, енергетичні характеристики. Потрібно вказати, що являє собою кожен з вузлів та кожна з телекомунікаційних аероплатформ з точки зору об'єкта керування по всім вищезазначеним характеристикам (час роботи, потужності пристроїв що приймають та передають інформацію, направленість цих пристроїв (загальноспрямованої чи вузькоспрямованої дії) ітд).

Також необхідно задати метод збору даних з БСМ, яким будемо користуватися. Наприклад, можемо використовувати кластеризацію і збирати дані з вузлів, а можемо збирати дані з кожного сенсора ітд.

В результаті розв'язання задачі потрібно сказати що повинно бути на виході. Це дані про кількість та точки просторового розташування теле-

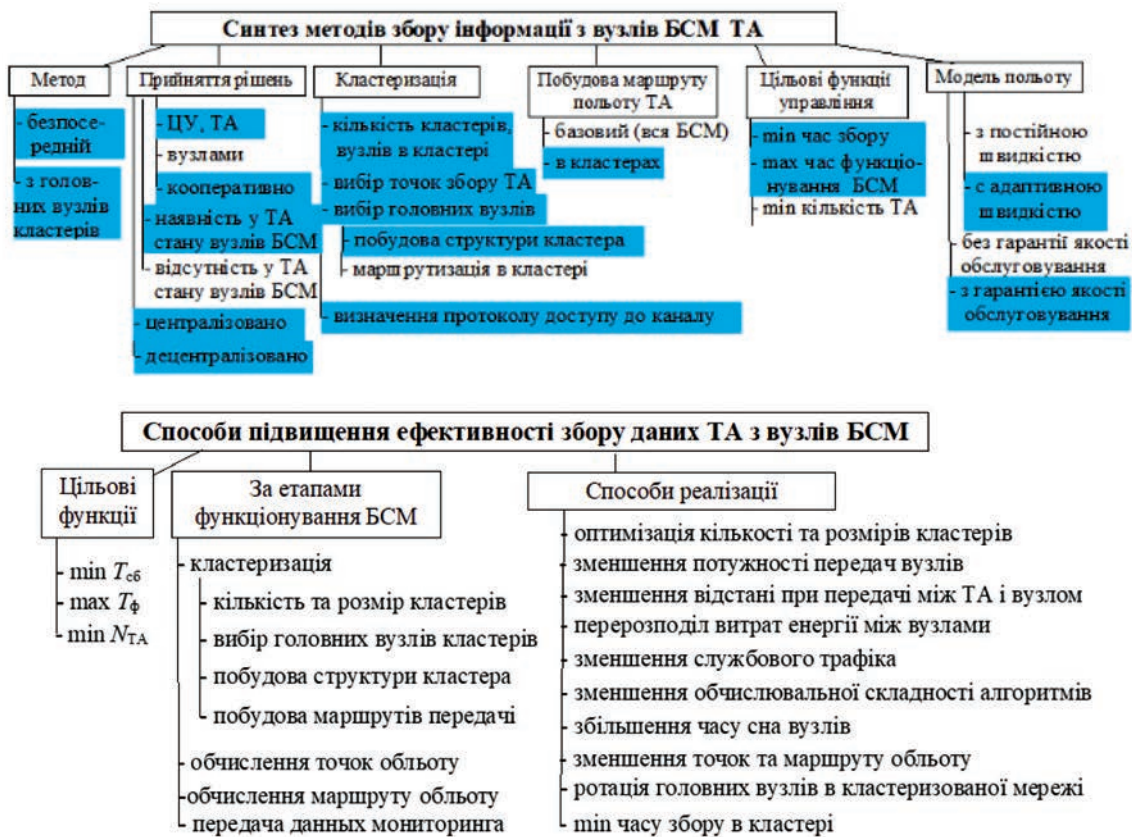


Рис. 2. Аналіз та синтез методів оцінки зв'язності вузлів БСМ при умові застосування БПЛА [11, 15]

комунікаційних аероплатформ 1-го та 2-го рівнів. При цьому це розташування має бути виконано раціонально. Тобто вони мають забезпечувати близькі до мінімальних значень критеріїв, які задаються в процесі побудови такої системи БСМ і багатотрівневого розташування телекомунікаційних аероплатформ або забезпечувати раціональність рішення – критерії не мають бути гіршими ніж задані обмеження для них.

**Наступний етап – це аналіз та синтез методів оцінки зв'язності вузлів БСМ при умові застосування БПЛА** (рис. 2).

У нижній частині вказано складові аналізу, а саме способи підвищення ефективності збору даних з вузлів БСМ. У верхній частині рисунку 2 вказано, яким чином виконується синтез методів.

У виділені синім кольором складові цього синтезу в даному дослідженні були внесені певні вдосконалення по відношенню до вже існуючих напрацювань вище вказаних наукових шкіл [7, 8, 9].

**Далі настає етап аналізу та вибір апаратних засобів для задачі оцінки зв'язності вузлів БСМ при умові застосування БПЛА.**

Щоб зрозуміти, які будуть сенсори і які задачі вони будуть виконувати, потрібно визначитися з тим якими будуть засоби першого рівня, хто ними буде керувати і засоби другого рівня.

Також потрібно зрозуміти, що являють собою вузли на яких буде збиратися первинна інформація в БСМ.

Потрібно побудувати схему розташування цих кластерів. В якості точок (чорних), що позначені рисунку 3, можна розглядати на першому рівні самі сенсори, а на другому рівні це БПЛА гелікоптерного типу (червоні точки). Ці апарати повинні

розташуватися в точках збору інформації. Як було сказано, вони збирають інформацію або з усіх сенсорів зависаючи в цій точці (червоній) або з головного сенсора (яким може бути мобільний наземний вузол).

Якщо розглядається задача взаємодії БПЛА 1-го та 2-го рівнів, то під цими точками (чорними) розуміється БПЛА 1-го рівня, а під іншими точками (червоними) – БПЛА 2-го рівня. Особливості БПЛА 1-го рівня гелікоптерного типу в тому що вони можуть зависнути в точках збору даних, а літакового типу повинні спеціальним чином баражувати поруч з такими точками, щоб забезпечити збір потрібної інформації. Якщо допускається деяке запізнення в отриманні інформації, то не обов'язково в кожній такій точці (червоній) розташовувати відповідний БПЛА. Можливо зменшити їх кількість і забезпечити переміщення або всіх або деяких БПЛА між поруч розташованими кластерами.

**Алгоритм оптимізації взаємодії послідовних рівнів обміну інформацією між БСМ на поверхні землі або в водоймі та БПЛА першого рівня, а також БПЛА першого рівня з БПЛА другого рівня** (див. рис. 4).

Цей алгоритм дозволяє виконати багатокритеріальну оптимізацію побудови інформаційного обміну між послідовними рівнями.

Підкреслимо, що БПЛА гелікоптерного типу переміщуються від точки до точки збору інформації або зависають в цих точках (якщо таких апаратів декілька).

В тому випадку, коли необхідно мінімізувати час збору інформації, то зрозуміло, що потрібно збільшити кількість БПЛА, які збирають цю

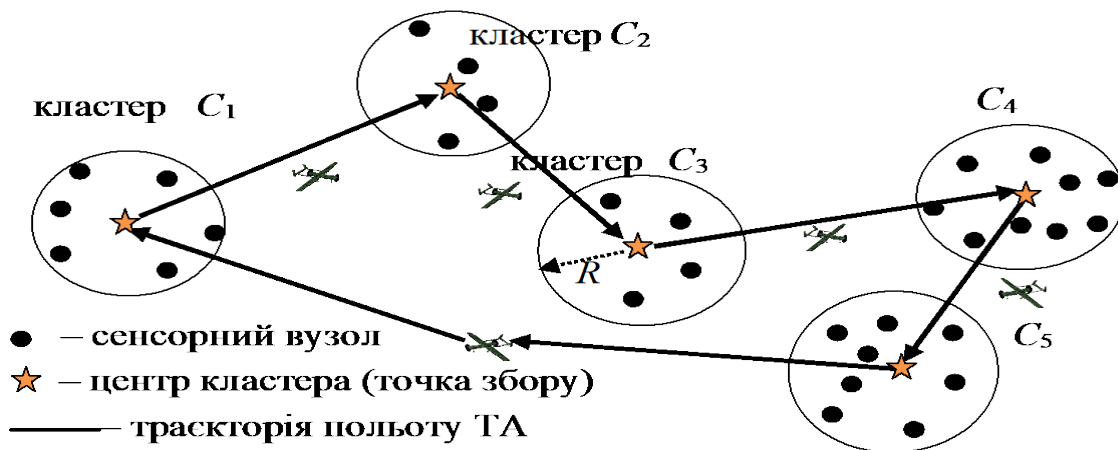


Рис. 3. Приклад маршруту обльоту ТА [9, с. 8]

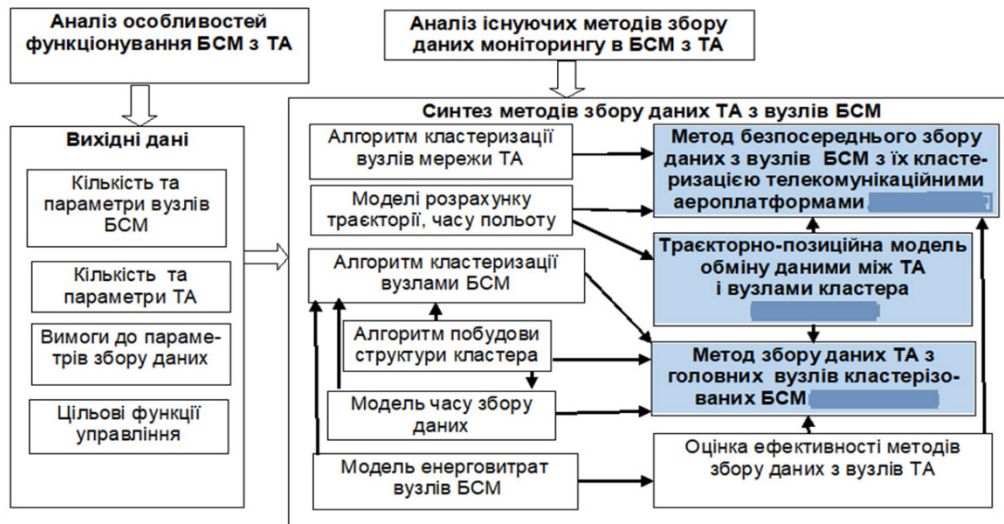


Рис. 4. Алгоритм оптимізації взаємодії послідовних рівнів інформаційного обміну: БСМ-БПЛА (1-й рівень) та БПЛА (1-й рівень)-БПЛА (2-й рівень)

інформацію і далі передають на наступний рівень. Якщо є якийсь час запізнення, що не є критичним, то можна зменшити кількість БПЛА.

Структурна схема алгоритму представлена на рисунку 4 і на ньому виділені ті блоки в яких виконано вдосконалення по відношенню до відомих алгоритмів [9, 11, 13, 15].

*Початковий структурний елемент алгоритму* – це аналіз особливостей функціонування. Далі виконуються стандартні процедури, що стосуються аналізу цих особливостей. А потім вже аналізуються методи збору даних і додаються вдосконалення до цих методів, якщо це потрібно в ситуації, яка склалася в конкретних умовах пошукової операції.

**Висновки.** В статті викладено підхід у пошуку подальших напрямків вдосконалення методичного апарату стовно пошуку найкращих дій щодо використання безпроводових сенсорних мепреж (БСМ) загалом та мобільних сенсорних мереж зокрема, що використовують для підвищення ефективності функціонування в умовах відсутності телекомунікаційної інфраструктури (тобто в умовах надзвичайної ситуації) різномірні телекомунікаційні аероплатформи (гелікоптерного та літакового типів) різнорівневого розташування.

Методика дозволяє забезпечити:

1. Можливість збору даних моніторингу від сенсорних вузлів в умовах відсутності комунікаційної інфраструктури.

2. Оптимізацію цільових функцій управління безпроводною сенсорною мережею при зборі даних з вузлів БСМ за допомогою телекомунікаційних аероплатформ.

3. Універсальність застосування: збір параметрів об'єктів та середовища при техногенних катастрофах, поля бою; моніторинг стану трубопроводів, лісів, полів агрокультур, параметрів навколишнього середовища.

4. Багатокритеріальну оптимізацію: мінімальний часу збору даних моніторингу, максимум часу життя сенсорної безпроводової мережі, мінімальна кількість задіяних ТА.

Результати розрахунків показали, що оптимізація за векторним критерієм із використанням методу ведучого критерію дала покращення за окремими показниками від 5 до 15 %. Критерії, що входили до складу векторного критерію:

1. Кількість БПЛА 1-го та другого рівнів (мінімувалась);
2. Пропускна здатність (максимізувалась);
3. Енергетичні витрати кожного БПЛА 1-го рівня (мінімувались);
4. Час збору інформації (мінімувався).

Наукова новизна полягає у вдосконаленні програми (методики) оцінки зв'язності вузлів БСМ із врахуванням можливості використання багаторівневої мережі телекомунікаційних аероплатформ в умовах відсутності телекомунікаційної інфраструктури.

І головною наковкою відмінністю є розроблена універсальна програма (методика) організації раціональної взаємодії послідовних рівнів інформаційного обміну між БСМ та БПЛА (1-го рівня) та БПЛА (1-го рівня) та БПЛА (2-го рівня).

Методика може бути використана в експертно-моделюючій системі прийняття рішень для керування пошуково-рятувальними роботами.

## Список літератури:

1. Стрела Т.С., Романюк В.О., Жук О.В., Олексенко В.П. Аналіз методів підвищення та забезпечення якості обслуговування в бездротових сенсорних мережах. Збірник наукових праць ВІТІ № 1. 2018. С. 141–148. URL: [https://www.viti.edu.ua/files/zbk/2018/17\\_1\\_2018.pdf](https://www.viti.edu.ua/files/zbk/2018/17_1_2018.pdf)
2. Nidal J. M. Optimal UAS Assignments and Trajectories for Persistent Surveillance and Data Collection from a Wireless Sensor Network. Fort Belvoir, VA : Defense Technical Information Center, 2015. URL: <https://doi.org/10.21236/ad1003575>
3. Сушин І.О., Лисенко О.І., «Програма оцінки зв'язності вузлів безпроводових епізодичних мереж при умові застосування бпла», Сімнадцята міжнародна науково-технічна конференція «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ», с. 36–41, 18–21 квітня 2023р, ISSN (print) 2663-502X, ISSN (online) 2664-3057. Доступ: <http://conferenc.its.kpi.ua/proc/article/view/278918/273569>
4. Романюк В.А., Стрела Т.С., Класифікація методів кластеризації в безпроводових сенсорних мережах, збірник наукових праць ВІТІ № 3, 2018, с. 79–86. Доступ: [https://www.viti.edu.ua/files/rom/2018/5\\_2018.pdf](https://www.viti.edu.ua/files/rom/2018/5_2018.pdf)
5. Гримуд А., Романюк В. Модель пошуку траєкторії польоту телекомунікаційною аероплатформою для збору даних з вузлів кластеризованої бездротової сенсорної мережі військового призначення. Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень НУОУ імені Івана Черняхівського. 2022. С. 118–128. URL: <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2022-1-74/118-128>
6. Романюк А.В. Цільові функції управління вузлами безпроводних сенсорних мереж для моніторингу об'єктів критичної інфраструктури / А.В. Романюк // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 28 (67), № 2, 2017. С. 49–54.
7. Methodology of the tactical wireless sensor networks control / A. Zhuk et al. 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 20–24 February 2018. 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/tcset.2018.8336374>
8. Романюк А. Методи збору даних з безпроводових сенсорних мереж телекомунікаційними аероплатформами. Автореферат. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 2021. С. 6–11.
9. Hrymud A., Romaniuk V. Modifying a method for direct data collection by a telecommunication aerial platform from nodes of wireless sensor networks. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 4, no. 9(118). P. 15–29. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263559>
10. Chumachenko S., Lysenko O., Novikov V., Furtat O., Furtat S., Sushyn I., Development of the method of support and increase of connectivity wireless networks using UAVs, «CHALLENGES AND THREATS TO CRITICAL INFRASTRUCTURE», Detroit (Michigan, USA), 2023, p. 277-283. ISBN-10/979-8-218-22315-1, Available: <https://conference.cyberspace.org.ua/wp-content/uploads/2023/06/Monograph-09-06-2023.pdf>
11. Oleksandr Lysenko, Olena Tachinina, Valeriy Novikov, Oleksandr Guida, Fedir Kirchu, Ihor Sushyn, «Methodology of Synthesizing Digital Regulators in Precision Electric Drives for Orientation and Stabilization Target Tracking System of Mobile Robot's Directional Sensors», CEUR Workshop Proceedings, 2023, Vol. 3513, pp. 51–63. ISSN 1613-0073. Available: <https://ceur-ws.org/Vol-3513/paper05.pdf>
12. Sova O.Y. Hierarchical model of decision acceptance in intelligent manet control system / O.Y. Sova, V.A. Romanyuk, A.V. Romanyuk, O.I. Lysenko, I.V. Uryadnikova // Milan Rastislav Stefanik, Liptovskiy Mikulas. No 1, Vol. 11, 2016. P. 14 – 20. ISSN 1336-8885 (print). ISSN 2453-7632 (on-line). EBSCO
13. Романюк А.В. Класифікація задач системи управління епізодичної радіомережі на основі телекомунікаційних аероплатформ / А.В. Романюк, С.В. Валуйський, О.І. Лисенко // Міжнародна науково-технічна конференція „Проблеми телекомунікацій” ПТ-2015. Київ. 2015. С. 381–383.
14. Chumachenko S., Lysenko O., Tachinina O., Furtat O., Furtat S., Sushyn I., Method of collecting information on the condition of critical infrastructure objects from wireless sensor network nodes. «CHALLENGES AND THREATS TO CRITICAL INFRASTRUCTURE», Detroit (Michigan, USA), 2023, p. 171–178. ISBN-10/979-8-218-22315-1, Available: <https://conference.cyberspace.org.ua/wp-content/uploads/2023/06/Monograph-09-06-2023.pdf>

**Sushyn I.O., Butkevych H.Yu. METHODOLOGY FOR ASSESSING THE CONNECTIVITY OF WIRELESS SENSOR NETWORK NODES WHEN USING A MULTILEVEL NETWORK OF TELECOMMUNICATION AEROPLATFORMS**

*World cataclysms and wars lead to the problem of lack of connectivity between network nodes. This issue is becoming more and more relevant every day, which creates many proposals and ideas for solving this complex problem. Therefore, we have analysed aspects related to the methodology for assessing the connectivity of wireless sensor network nodes using telecommunication aerial platforms based on unmanned aerial vehicles, and the clustering of wireless sensor networks. A search for methodological approaches to ensuring the*

*connectivity of wireless sensor network nodes in the absence of communication infrastructure is carried out. Ensuring the connectivity of WSN nodes is an important factor in obtaining the necessary information from the network, but there is still a need for an effective methodology for assessing the connectivity of wireless sensor network nodes when using telecommunication air platforms based on unmanned aerial vehicles in the absence of communication infrastructure. This creates a scientific problem, which is to improve the methodology for assessing the connectivity of wireless sensor network nodes, taking into account the possibility of using not only telecommunication airborne networks, but also satellite networks. The main goal, scientific task and subject of research related to the methodology for assessing the connectivity of wireless sensor network nodes using telecommunication airborne platforms based on unmanned aerial vehicles (UAVs) are substantiated and considered. The paper presents a methodology for assessing the connectivity of wireless sensor network (WSN) nodes, taking into account the possibility of using a multi-level network of telecommunication aerial platforms (TA) in the absence of communication infrastructure. As well as an algorithm for optimising the interaction of successive levels of information exchange. This will enable its use in an expert modelling decision-making system for managing search and rescue operations.*

**Key words:** *WSN, telecommunication aeroplatfrom, node connectivity, multilevel network, UAV.*

# ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 004.056.53

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/08>**Антощук С.Г.**

Національний університет «Одеська політехніка»

**Іванова О.М.**

Національний університет «Одеська політехніка»

## ПІДХІД ДО ЗБІЛЬШЕННЯ ОБСЯГУ ПРИХОВАНОВОГО ЗБЕРІГАННЯ КОНТРОЛЬНИХ ДАНИХ, ПРИЗНАЧЕНИХ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ FPGA-КОМПОНЕНТІВ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

Стаття присвячена забезпеченню моніторингу програмного коду мікросхем FPGA. Головна мета моніторингу полягає в захист програмного коду від зловмисних спотворень, а також в контролі поширення програмного коду та легітимність його використання. Для виконання моніторингу використовуються контрольні дані, які зберігаються разом з об'єктом програмного коду та використовуються у процесі моніторингу. Розглянуто основні способи зберігання контрольних даних моніторингу: зберігання у складі об'єкта програмного коду, файлової системи, у віддаленій базі даних. Описано недоліки зазначених способів зберігання.

Як перспективний виділяється стегаграфічний підхід до зберігання контрольних даних моніторингу. У рамках цього підходу контрольні дані вбудовуються у програмний код таким чином, що після вбудовування вони складають із програмним кодом єдине ціле. При цьому зовнішній спостерігач не має можливості відрізнити розряди контрольних даних від розрядів програмного коду. Зазначено, що до мікросхем FPGA стегаграфічний підхід застосовується за рахунок вбудовування додаткових даних у програмні коди блоків LUT, шляхом еквівалентного перетворення їх програмного коду. Однак при такому підході можливе вбудовування у програмний код FPGA відносно невеликого обсягу додаткових даних. У роботі пропонується підхід до збільшення доступного для вбудовування обсягу даних за рахунок використання особливостей арифметичних операцій з плаваючою крапкою, що виконуються на FPGA.

При виконанні таких операцій часто результат має більшу розрядність, ніж операнди. При цьому специфікація операції вимагає приведення формату результату до формату операндів. Для здійснення такого приведення частина розрядів результату відкидається з наступною корекцією, що компенсує це відкидання. Наведено приклад відкидання розрядів та корекції для операції множення чисел з плаваючою крапкою. У роботі пропонується в якості додаткового ресурсу для стегаграфічного вбудовування контрольних даних використовувати блоки LUT, які обчислюють розряди арифметичних операцій, що відкидаються. Пропонується модель стегаграфічного вбудовування контрольних даних програмного коду FPGA з використанням зазначеного інформаційного ресурсу. Виконано експериментальну оцінку додаткового обсягу даних, що вбудовуються, отриманого за рахунок використання запропонованого інформаційного ресурсу. Зроблено висновки щодо ефективності підходу, запропонованого в роботі, для збільшення обсягу контрольних даних, які вбудовуються в програмний код FPGA.

**Ключові слова:** моніторинг програмного коду, мікросхеми FPGA, стегаграфічне вбудовування даних, наближена обробка даних, арифметичні операції з плаваючою крапкою.

**Вступ та постановка проблеми.** Значну частину цифрових компонентів комп'ютерних систем складають програмовані компоненти. Істотною особливістю цих компонентів є те, що їх функціонування може бути змінено розробником на будь-якому етапі життєвого циклу. До таких компонен-

тів відносяться мікропроцесори, мікроконтролери та програмовані логічні інтегральні схеми (ПЛІС). Ні відміну від мікропроцесорів та мікроконтролерів, які мають послідовний принцип виконання програми, мікросхеми ПЛІС можуть змінювати свою структуру під дією програмного коду, ство-

реного розробником [1]. Така можливість зміни структури мікросхеми, відповідно до задачі та паралельна організація мікросхеми, обумовлюють значно більшу продуктивність ПЛІС порівняно, з мікропроцесорами та мікроконтролерами [2].

В предметних областях, задачі яких потребують реалізації програмно-керованих високопродуктивних обчислювальних ресурсів, переважно використовуються програмовані логічні інтегральні схеми, найбільш досконалими представниками яких є мікросхеми FPGA (Field Programmable Gate Array). Здебільшого ці мікросхеми використовуються в таких галузях як телекомунікації, промислові технології та засоби транспорту. Також ці мікросхеми широко застосовані у вирішенні задач обробки даних, що потребують значної продуктивності обчислень [3].

Мікросхеми FPGA мають відмінності як архітектурного, так і безпекового плану, від мікропроцесорів та мікроконтролерів. Крім того, можливість забезпечення високої продуктивності робить FPGA вельми часто використовуваною елементною базою для реалізації комп'ютерних систем критичного застосування [4]. Серед засобів захисту FPGA компонентів від зловмисного втручання особливу роль відіграє оперативний моніторинг стану програмного коду цих компонентів. Моніторинг проводиться за окремими характеристиками (цілісністю, автентичністю, шляхами розповсюдження, легітимністю використання) або комплексно за групою характеристик. При цьому найбільш дієві підходи до організації моніторингу базуються на використанні контрольних даних, які зберігаються разом з програмним кодом або в якості його частини.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для виконання моніторингу програмного коду використовуються контрольні дані, які обчислюються або призначаються визначеним чином. Обчислювальні контрольні дані повинні відповідати наступним вимогам:

1) контрольні дані повинні мати значно менший обсяг, ніж програмний код який контролюється за їх допомогою;

2) незначні зміни програмного коду, який контролюється, повинні приводити до суттєвих змін контрольних даних.

Прикладами обчислювальних контрольних даних є хеш-суми [5] для моніторингу цілісності програмного коду або коди аутентифікації для моніторингу його автентичності.

Атрибутивні контрольні дані, на відміну від обчислюваних, призначаються об'єкту програм-

ного коду. Прикладом атрибутивних контрольних даних є контрольні дані, які застосовуються в контролі розповсюдження програмного коду або в контролі легітимності його використання [6].

На рис. 1 наведено схему виконання моніторингу програмного коду програмованих компонентів на етапі підготовки контрольних даних. На цьому етапі для об'єкта програмного коду формуються контрольні дані. Обчислювані контрольні дані створюються за допомогою відповідних алгоритмів, а атрибутивні контрольні дані призначаються об'єкту програмного коду. Отриманий набір контрольних даних оголошується еталонним і зберігається.

В момент виконання моніторингу програмного коду (рис. 2) обчислювані контрольні дані повторно обчислюються для програмного коду, щодо якого здійснюється моніторинг, а атрибутивні контрольні дані зчитуються з об'єкта програмного коду. Далі цей набір контрольних даних порівнюється з еталонними контрольними даними, які були збережені на етапі підготовки до моніторингу. За результатами порівняння робиться висновок про проходження або не проходження моніторингу певного виду.

Аналіз інцидентів останніх років, пов'язаних зі дестабілізацією роботи технічних об'єктів підвищеного ризику показує, що найзначнішим чинником збоїв в роботі критично важливих комп'ютерних систем є зловмисне втручання в їх функціонування [7]. Одним з найефективніших підходів до протидії втручанню є оперативний моніторинг стану програмного коду цих компонентів. Виконання моніторингу потребує формування контрольних даних в момент підготовки програмного коду моніторингу, та їх зберігання з метою використання під час виконання актів моніторингу. Основним способом обходу моніторингу програмного коду для здійснення втручання є фальсифікація контрольних даних. Найбільш суттєвим фактором, який обумовлює можливість втручання є спосіб зберігання контрольних даних.

В практиці побудови систем контролю програмного коду використовується декілька підходів до зберігання контрольних даних. Один з часто застосовуваних підходів базується на збереженні контрольних даних разом з інформаційним об'єктом програмного коду в файлової системі або пам'яті, чи які базуються на приєднанні контрольних даних до інформаційного об'єкта програмного коду і зберіганні в якості його частина [8]. Цей підхід має наступні недоліки: очевидність факту виконання моніторингу; доступність



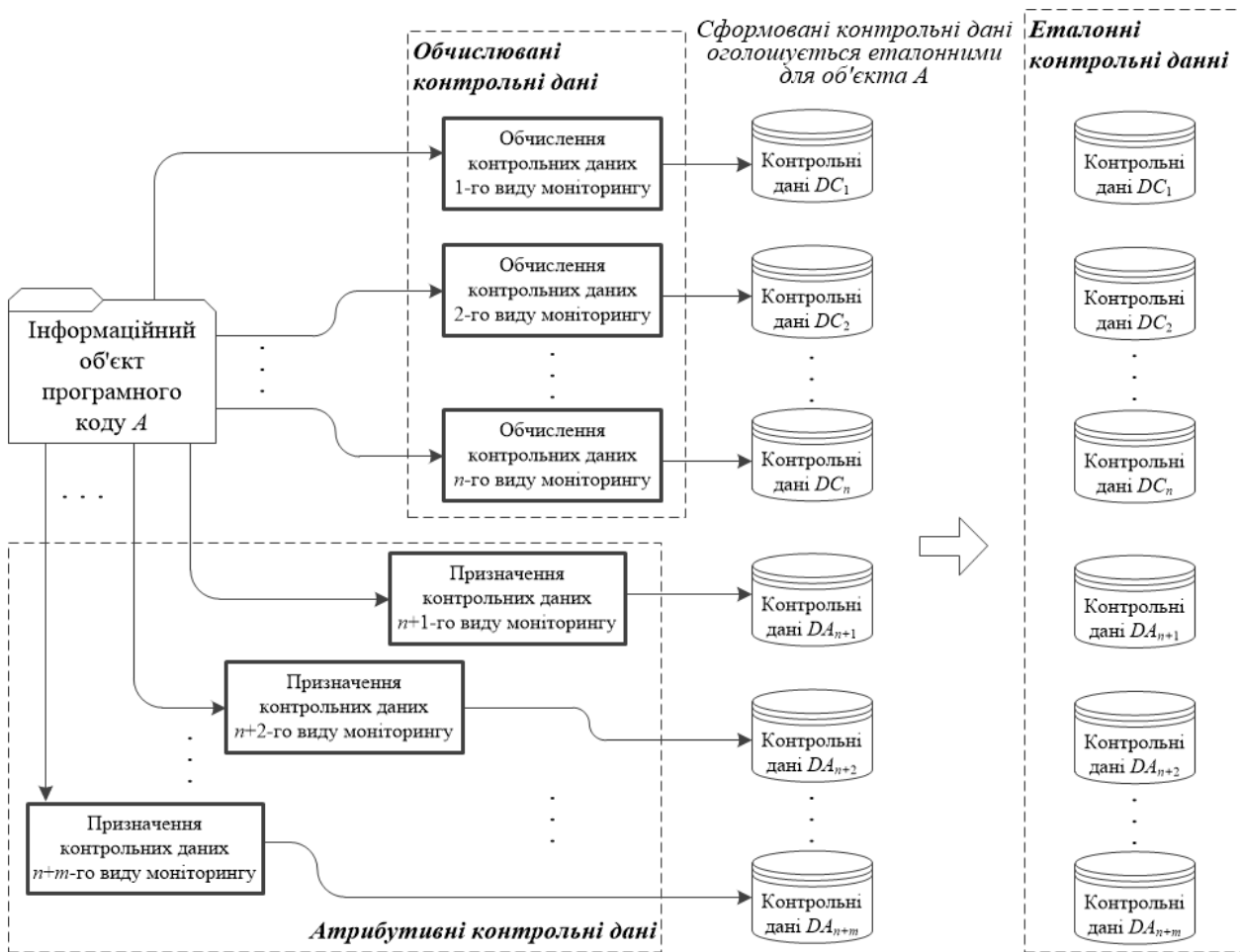


Рис. 1. Підготовка та збереження контрольних даних при виконанні моніторингу програмного коду

еталонних контрольних даних для зчитування, аналізу та можливої фальсифікації.

Також часто використовуються підходи, в межах яких контрольні дані зберігаються в централізованій базі даних та отримуються з неї в момент виконання процедури моніторингу. Ці підходи пов'язані з проблемою організації доступу до бази даних; складністю захисту бази даних від витоків та не зменшують можливість інсайдерського втручання [9].

Один з перспективних підходів до зберігання контрольних даних базується на використанні стеганографічного [10] приховування даних безпосередньо в середовищі об'єкта програмного коду FPGA. Цей підхід має переваги, які полягають у приховуванні контрольних даних та факту виконання моніторингу, а також у забезпеченні утворення єдиного цілого між об'єктом програмного коду та контрольними даними [11]. Однак вони мають і недоліки, що полягають у відносно малому доступному обсязі даних, які можна зберегти в стеганографічний спосіб [12]. Це обмежує обсяг

контрольних даних та кількість видів моніторингу, які можна застосувати до програмного коду.

**Мета статті.** Збільшити обсяг контрольних даних, які можуть бути збереженими в програмному коді FPGA в стеганографічний спосіб за рахунок використання структурної надмірності в арифметичних пристроях у складі FPGA-проектів.

**Виклад основного матеріалу.** Специфікації багатьох операцій наближеною обробки даних вимагають однаковості формату операндів та результату [13–14]. Однак при цьому вельми часто виникає ситуація, при якій результат операції природно має більшу розрядність в порівнянні з розрядністю операндів. У цьому випадку спочатку виконується обчислення повного результату, який потім доводиться до формату операндів шляхом відкидання деякої кількості молодших розрядів з наступним округленням.

Одним з прикладів таких операцій є арифметичні операції над числами з плаваючою крапкою. Числа з плаваючою крапкою містять

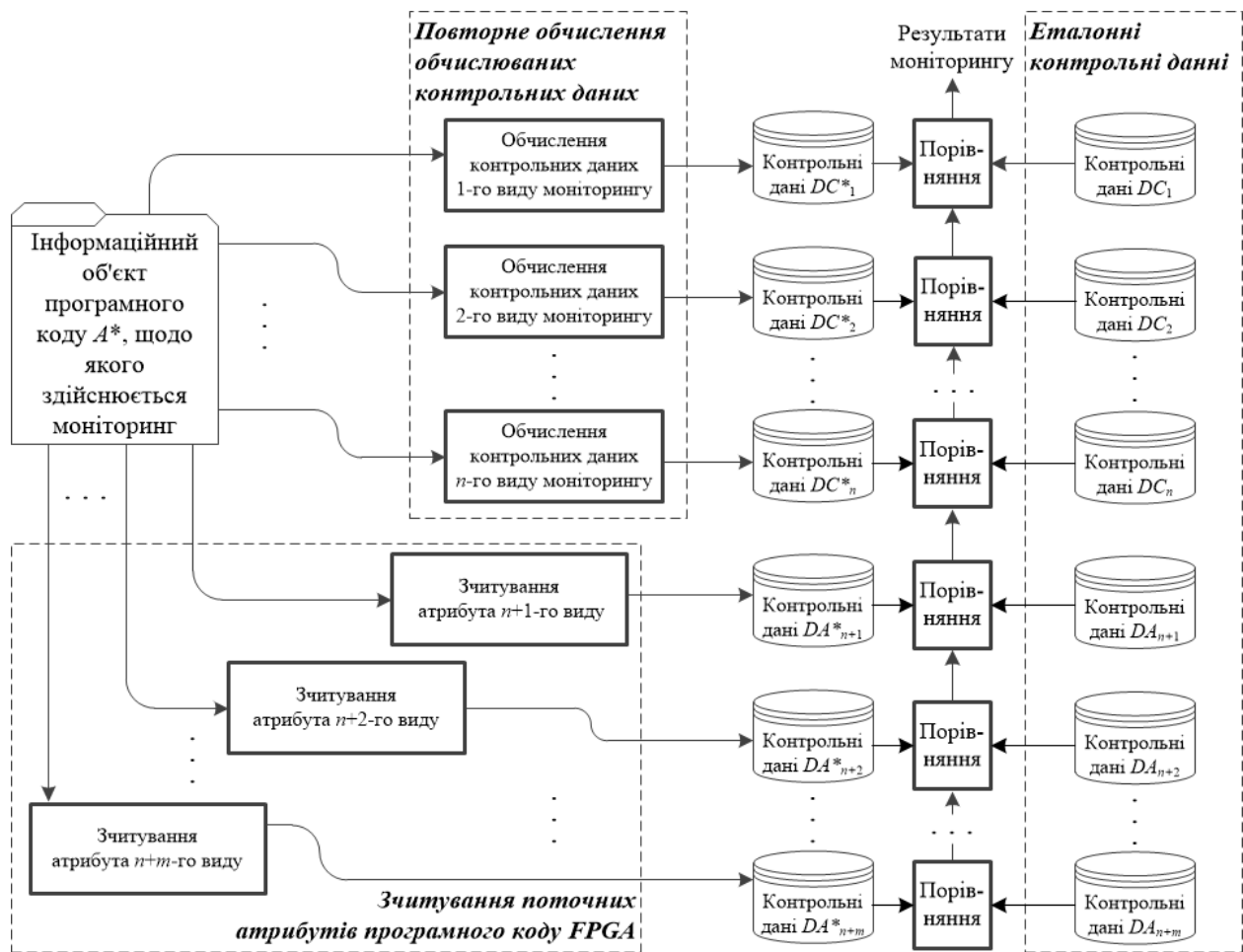


Рис. 2. Використання збережених контрольних даних на етапі здійснення моніторингу програмного коду

в якості основних компонентів мантису та порядок. Порядки при виконанні арифметичних операцій обробляються точно, але мантиси обробляються наближено. При цьому найчастіше специфікація операції вимагає, щоб розрядність мантис результату дорівнювала розрядності мантис операндів.

Наприклад, для отримання результату помноженні чисел з плаваючою крапкою порядки операндів підсумовуються, а мантиси помножуються. Результатом помноження двох двійкових  $n$ -розрядних чисел є  $2n$ -розрядне двійкове число. Результат операції помноження чисел з плаваючою крапкою найчастіше повинен мати розрядність мантиси, що дорівнює розрядності мантиси операндів. Для приведення  $2n$ -розрядного результату помноження мантис до  $n$ -розрядного формату молодші з  $2n$  розрядів відкидаються, а результуючий порядок коректується, щоб компенсувати це відкидання (рис. 3).

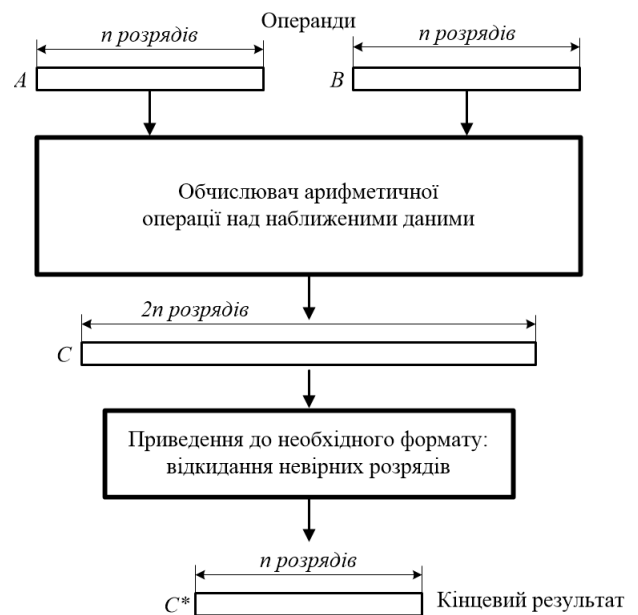


Рис. 3. Приведення розрядності мантис результату до розрядності мантис операндів

Таким чином, при виконанні арифметичних операцій над числами з плаваючою крапкою, у випадку необхідності приведення розрядності мантис результату до розрядності мантис операндів, виконується два крок:

- обчислюється повна версія мантиси;
- розрядність повної версії мантис приводиться до розрядності мантис операндів, шляхом відкидання молодших розрядів.

При виконанні зазначених операцій, множина розрядів результату складається з двох непересічних підмножин: несуттєвих розрядів (що відкидаються) та суттєвих розрядів (що залишаються) в кінцевому результаті операції. Спотворення несуттєвих молодших розрядах результату не впливають на підсумковий результат операції. При реалізації таких арифметичних операцій на FPGA в її структурі можна виділити елементарні обчислювальні блоки LUT, які беруть участь у формуванні тільки несуттєвих розрядів результату. В силу цього програмний код таких блоків може бути модифікований і така модифікація не вплине на результат роботи пристрою.

Наявність множини несуттєвих розрядів, які відкидаються в процесі обчислень та наявність множини елементарних блоків LUT FPGA, які ці розряди обчислюють, робить можливим використання програмного коду таких блоків LUT в якості інформаційного ресурсу для стеганографічного збереження контрольних даних моніторингу програмного коду. Узагальнення виділення та використання зазначеного інформаційного ресурсу представлено у вигляді моделі стеганографічного зберігання контрольних даних в середовищі програмного коду LUT FPGA. Модель, що пропонується являє собою кортеж виду:

$$M_A = \langle A, B, C, C_E, C_{IE}, LUTs, L_E, L_{IE}, L_M \rangle$$

де  $A = \langle a_n, a_{n-1}, \dots, a_1 \rangle$  та  $B = \langle b_n, b_{n-1}, \dots, b_1 \rangle$  –  $n$ -розрядні операнди арифметичної операції;  $C = \langle c_{2n}, c_{2n-1}, \dots, c_{n+1}, c_n, c_{n-1}, \dots, c_1 \rangle$  –  $2n$ -розрядний повний результат;  $C_E$  та  $C_{IE}$  – відповідно суттєві та несуттєві (ті, що відкидаються) розряди результату;  $LUTs$  – множина блоків LUT FPGA, які використовуються для реалізації арифметичної операції;  $L_E$  та  $L_{IE}$  – підмножини блоків LUT, які беруть участь в обчисленні відповідно суттєвих та несуттєвих розрядів результату;  $L_M$  – підмножина блоків LUT, які одночасно беруть участь в обчисленні, як суттєвих, так і несуттєвих розрядів результату.

Співвідношення між розрядами та підмножинами блоків LUT FPGA в межах моделі  $M_A$  графічно показані на рис. 4. Блоки LUT  $L_{OE} = L_{IE} \setminus L_E$ , які беруть участь в обчисленні тільки несуттєвих

розрядів результату в подальшому будуть називатися несуттєвими блоками LUT. Програмні коди цих блоків складають надлишковий ресурс мікросхем FPGA, який виявляється моделлю  $M_A$  та може бути використаний для стеганографічного зберігання контрольних даних.

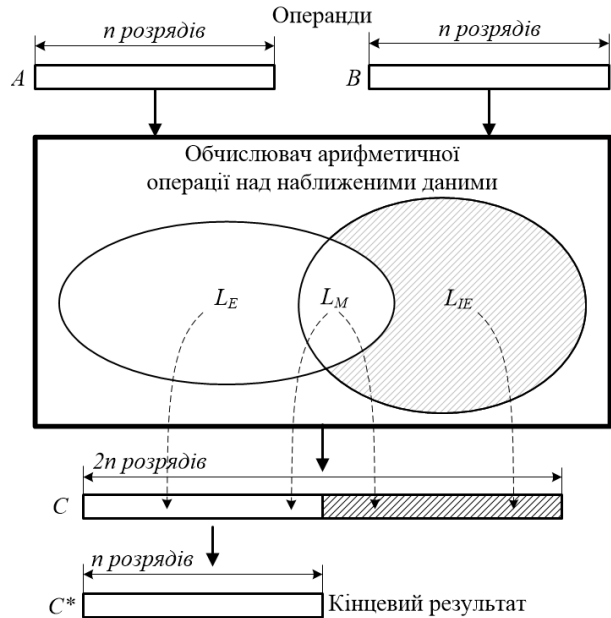


Рис. 4. Множини блоків LUT FPGA, задіяних при обчисленні розрядів, що залишаються та відкидаються

Для оцінки обсягу даних, які можуть бути вбудовані в програмний код блоків LUT FPGA відповідно до моделі  $M_A$  з залученням надмірних ресурсів було проведено експериментальне дослідження. Для здійснення оцінки розроблено програмну модель, яка відтворює схеми арифметичних обчислювачів з наближеними даними в середовищі FPGA. В якості цільової експериментальних схем обрані помножувачі мантис з плаваючою крапкою з розрядністю операндів 4, 6, 8, 12, 16, в якості мікросхеми синтезу використовувалася FPGA Intel Cyclone IV EP4CE15F23A7, синтез здійснювався в середовищі автоматизованого проектування Intel Quartus Prime [15].

Розроблена програмна модель послідовно перебирає значення операндів на вході схеми помножувача. При цьому зберігаються правильний  $2n$ -розрядний результат множення і правильні значення на виходах кожного з блоків LUT схеми. Після цього значення на виходах блоків LUT послідовно інвертуються. При цьому модель виконує аналіз того, на які з бітів результату (ті, що відкидаються або ті, що залишаються) впливає кожне з інвертувань. Блоки LUT, інвертування правильних значень яких, призводило до

спотворення тільки тих розрядів результату, що відкидаються, відносяться до несуттєвих блоків. При цьому використано наступне вирішальне правило віднесення блоків LUT до множини  $L_{IE}$ :

$$\text{if } \max\_error(LUT_i) < 2^n \text{ then } LUT_i \in L_{IE}$$

де  $\max\_error(LUT_i)$  – значення максимальної помилки, поставлене у відповідність блоку  $LUT_i$  – модуль різниці правильного значення результату і значення результату, отриманого при інвертуванні вихідного значення блоку  $LUT_i$ .

В результаті дослідження розробленої програмної моделі визначено, що частка несуттєвих блоків LUT в експериментальних FPGA-проектах складала від 39,3% до 42,5%. Оскільки спотворення програмного коду таких блоків LUT не призводить до спотворення кінцевих результатів обчислень, то ці блоки складають ресурс для стеганографічного вбудовування даних.

**Висновки.** Для прихованого зберігання контрольних даних моніторингу програмного коду мікросхем FPGA зазвичай використовуються методи еквівалентного перетворення програмного коду. Пропонується удосконалити ці методи за рахунок використання додаткового надмірного інформаційного ресурсу. В якості такого ресурсу пропонується застосувати програмні коди блоків LUT FPGA, які призначені для несуттєвих розрядів мантис результату арифметичних операцій з плаваючою крапкою. Оцінено обсяг додаткового ресурсу стеганографічного приховування даних. Зазначений обсяг дозволяє підвищити загальний обсяг контрольних даних моніторингу програмного коду FPGA та збільшити кількість видів моніторингу, що можуть бути реалізовані на основі використання збережених контрольних даних.

#### Список літератури:

1. Ledin J. Architecting High-Performance Embedded Systems: Design and build high-performance real-time digital systems based on FPGAs and custom circuits. Packt Publishing, 2021. 376 p.
2. Amano H. Principles and Structures of FPGAs, Heidelberg: Springer, 2018. 240 p.
3. Waidyasooriya H., Hariyama M., Uchiyama K. Design of FPGA-Based Computing Systems with OpenCL. Switzerland, Cham: Springer, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-68161-0
4. Drozd, O., Kuznetsov M., Martynyuk O., Drozd M.: A method of the hidden faults elimination in FPGA projects for the critical applications. *Proceedings of the IEEE International Conference DESSERT'2018*. Kyiv, Ukraine. pp. 231–234 (2018). doi: 10.1109/DESSERT.2018.8409131.
5. Awad A., Fairhurst M. Information Security. Foundations, technologies and applications. UK, Lon-don: The Institution of Engineering and Technology, 2018. 426 p.
6. Bhunia S., Tehranipoor M. Hardware Security: A Hands-on Learning Approach. USA, Boston: Morgan Kaufmann Publ., 2018. 526 p.
7. Bishop M. Computer Security. 2nd edn. USA, Boston: Addison-Wesley 2018.
8. Stallings W. Cryptography and Network Security: Principles and Practice. 7th edn. United Kingdom, Harlow: Pearson Education Limited, 2017.
9. Bossuet L., Torres L. Foundations of Hardware IP Protection. USA, New-York: Springer, 2018.
10. Shih F. Digital Watermarking and Steganography: Fundamentals and Techniques. 2nd ed. USA, Boca Raton: CRC Press. 2017. 320 p.
11. Ke Y., Liu J., Zhang M., Su T., Yang X. Steganography Security: Principle and Practice. *IEEE Access*. 2018 Vol. 6. P. 73009-73022. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2881680.
12. Fridrich J. Steganography in Digital Media, Cambridge University Press, New York, 2010.
13. Ullah S., Kumar A. Approximate Arithmetic Circuit Architectures for FPGA-based Systems. Springer, 2023. 194 p.
14. Anderson A., Muralidharan S., Gregg D.. Efficient Multibyte Floating Point Data Formats Using Vectorization. *IEEE Transactions on Computers*. 2017. Vol. 66, no. 12. P. 2081–2096. DOI: 10.1109/TC.2017.2716355.
15. Intel Quartus, <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/details/fpga/development-tools/quartus-prime.html>

#### **Antoschuk S.H., Ivanova O.M. APPROACH TO INCREASING THE VOLUME OF HIDDEN STORAGE OF CONTROL DATA FOR MONITORING FPGA COMPONENTS OF COMPUTER SYSTEMS**

*The article is devoted to providing monitoring of the program code of FPGA chips. The main purposes of monitoring are: protection of program code from malicious distortions, control of program code distribution, legitimacy of its use. To perform monitoring uses control data that are stored together with the object of program code and used in the implementation of monitoring. The main ways of storing the monitoring control*

*data are considered: storage as part of the program code object, in the file system, in a remote database. The disadvantages of these storage methods are described.*

*The steganographic approach to the storage of monitoring control data is a promising one. Within the framework of this approach the control data are embedded into the program code in such a way that after embedding they form a single whole with the program code. In this case an external observer has no possibility to distinguish the bits of control data among the bits of the program code. It is noted that in relation to the program code of FPGA chips steganographic approach is applied by embedding additional data in the program codes of LUT units by equivalent transformation of their program code. However, with this approach, it is possible to embed a relatively small amount of additional data into the FPGA program code. This paper proposes an approach to increase the amount of data available for embedding by exploiting the features of floating point arithmetic operations performed on FPGA.*

*When performing operations of this kind, the result is often larger than the operands. In this case, the specification of the operation requires that the format of the result be brought to the format of the operands. In this case, some bits of the result are discarded, followed by a correction that compensates for this discarding. An example of such bit discarding and correction for the operation of multiplication of floating-point numbers is given. The paper proposes to use LUT units that compute the discarded bits of arithmetic operations as an additional resource for steganographic data embedding. We propose a model for steganographic embedding of control data into the FPGA program code using the specified information resource. Experimental estimation of the additional amount of embedded data, which is provided through the use of the proposed information resource. Conclusions are made regarding the effectiveness of the approach proposed in the paper to increase the volume of control data embedded in the program code.*

**Key words:** *program code monitoring, FPGA chips, steganographic data embedding, approximate data processing, floating point arithmetic.*

**Baryshych L.M.**

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

## OVERVIEW OF MIXED STRATEGIES IN STACKELBERG EVOLUTIONARY GAME THEORY APPROACH OF POPULATION CONTROL - CASE OF POPULATION GROWTH CONTROL

*In this paper we will overview current state of population management simulation using Stackelberg game theory as current development of evolutionary games theory. We will look into both population growth and decline strategies, concentrating on fishery management and cancer treatment accordingly. We will analyze differences in Nash and Stackelberg equilibrium and discuss possibility of usage of mixed strategies. We will outline differences in rational manager approach to population minimization and maximization cases for Stackelberg game.*

*Evolutionary game theory provides a mathematical framework for the conceptualization and analysis of biological interactions in which an individual's fitness is contingent upon not only its own traits but also those of others. In this context, the participants are generally not explicitly rational actors; rather, they tend to inherit traits as opposed to actively selecting them.*

*The Stackelberg Evolutionary Game (SEG) theory amalgamates classical and evolutionary game theory to model interactions involving a rational leader and evolving followers within an academic framework. Within this context, the leader's intentions vary; they may seek to sustain the dynamic system, as seen in scenarios such as fisheries management, or alternatively, endeavor to eliminate the system, as observed in cases like pest control. Frequently, a constant aggressive approach assumed by the leader, such as excessive fishing in the context of fisheries management or administering the maximum tolerable dose in cancer treatment, represents a suboptimal strategy. Incorporating ecological dynamics into the analysis typically yields more favorable outcomes for the leader, aligning with Nash equilibria in the realm of game theory [3].*

*Nonetheless, the leader's most advantageous course of action involves proactive consideration of and influence over the eco-evolutionary dynamics, culminating in the attainment of the Stackelberg equilibrium within the game.*

**Key words:** *game theory, evolutionary games, Stackelberg games, mathematical simulation, cancer treatment, population management.*

Formulation of the problem of the problem and its connection with important scientific or practical tasks.

### 1.1. Stackelberg games

The outcomes of evolutionary games are primarily driven by the forces of natural selection, encompassing alterations in population size (ecological dynamics) and the prevalence of heritable traits (evolutionary dynamics). However, this dynamic is not universally applicable to games involving human participants. Firstly, humans exhibit rational decision-making capabilities and possess a diverse array of objectives that extend beyond mere matters of survival [15, 16]. Secondly, the rewards associated with these games can encompass a broad spectrum of tangible and intangible factors, including monetary gains, utility, sensory pleasure, and aesthetic considerations [4].

Notwithstanding the disparities between human-driven games and those within the natural realm, they converge under the umbrella of bio-economic or bio-sociologic games. In these scenarios, human

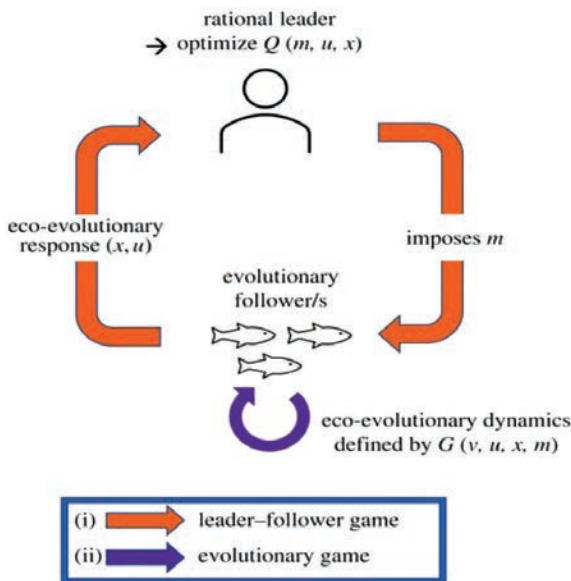
actions exert influence over the eco-evolutionary dynamics of pest species, pathogens, commercially or recreationally exploited species, and species of conservation significance. Historical instances of such interactions can be traced back, as exemplified by an episode involving King James I of Scotland. He was apprised of the diminishing size of cod populations, signifying an early record of the discernible evolutionary changes induced by size-selective fishing practices. These changes encompass alterations in the size at initial reproduction, fecundity, and other life-history traits.

In a parallel vein, a scientist from the United States Department of Agriculture, during the early 1900s, noted the emergence of resistance among various agricultural pests against diverse biocidal agents. The trend persisted, and starting in the 1950s, it was established that different methods of weed control were responsible for shaping crop ecotypes of weeds. These adapted by modifying their seedling phenology in response to manual weeding, adjusting seed size

based on sorting techniques, and synchronizing maturation timing with harvesting schedules.

This phenomenon extends to encompass antibiotic-resistant strains of bacteria [5] and the development of therapy resistance among cancer patients [6]. These instances underscore the fact that the management of evolving species, whether they are considered pests, resources, disease agents, or species under conservation, presents a set of distinctive challenges.

Stackelberg Evolutionary Game (SEG) theory offers a structured approach for the representation and administration of such dynamic and evolving systems [2]. The underlying concept is inherently clear. Individuals, whether occupying roles as managers, stakeholders, or merely engaged citizens, enact actions that exert both direct and indirect influence over the sizes of populations (ecological dynamics) and the evolutionary attributes (evolutionary dynamics) of focal species. These species of interest adhere to the principles of natural selection and evolutionary game theory. As a response to the actions undertaken by the involved parties, alterations transpire within the species' population abundance, along with shifts observed in their evolutionary traits (see Figure 1).



**Fig. 1. Illustration of the Stackelberg evolutionary game. It combines two types of games: (i) the leader–follower (Stackelberg) game between the rational leader and evolutionary followers, and (ii) the evolutionary game between the followers. The evolutionary game is defined by the fitness-generating function  $G(v, u, x, m)$ , which determines the eco-evolutionary dynamics of the followers (§2). In the leader–follower game, the rational leader chooses their strategy  $m$ , with the goal to optimize their objective function  $Q(m, u, x)$  (§3). The Stackelberg strategy of the leader anticipates the eco-evolutionary response  $(x, u)$ , whereas the Nash strategy anticipates the ecological response  $x$  only [1]**

**Leader’s possible strategies.** Managers and stakeholders possess a range of strategic options at their disposal. Initially, they might adopt a reactive stance by basing their actions solely on the prevailing state of the species in terms of its population size and trait attributes. Within this context, actions are undertaken in a manner devoid of forward-thinking considerations regarding potential downstream repercussions. Alternatively, a more ecologically-oriented approach can be taken. This involves striving to ensure the sustainability of a fish stock, for example, albeit with a relative disregard for the evolutionary implications.

In a third scenario, the manager exhibits a proactive approach, envisioning and orchestrating both the ecological and evolutionary ramifications arising from diverse strategies for species management. The first instance characterizes a manager who lacks both ecological and evolutionary insights, while the second exemplifies a manager who is ecologically attuned but overlooks evolutionary aspects. The third scenario epitomizes a manager who is well-versed in both ecological and evolutionary dimensions. This latter situation aligns with the Stackelberg strategy of the leader within the SEG framework.

The three possible strategies of the leader can be formalized as follows:

1. Naive strategy

The leader plays a constant and aggressive maximization or minimization strategy ignoring followers’ ecological and evolutionary dynamics

$$m = m_{max}$$

2. Ecologically enlightened strategy corresponding to the Nash strategy A Nash equilibrium  $(m^N, u^N)$  is defined as a pair of strategies that correspond to best responses of the leader and followers to each other, which is given by an intersection of the curves  $m = m^*(u)$  and  $u = u^*(m)$ . At Nash equilibrium, no player can improve their outcome by unilaterally changing their strategy [1].

$$m^*(u) = \operatorname{argmax}_m Q(m, u, x^*(m, u))$$

Evolutionarily enlightened leader’s strategy corresponding to the Stackelberg strategy With this strategy, the leader anticipates  $u^*(m)$  and  $x^*(m, u^*(m))$  and includes them both into objective  $Q$  before maximizing it with respect to the action  $m$ . It is the following:

$$m^S = \operatorname{argmax}_m Q(m, u^*(m), x^*(m, u^*(m)))$$

**Mixed strategies.** In some cases (see below) leader may change its approach amid the game. It could be forced by the goal change or be related to the starting position. For example, transferring cancer patient that is already being under treatment.

**Power grid case.** The RTP between multiple power retailers and multiple consumers can be formulated as a Stackelberg game. At the same time, an evolutionary game is generated for the residential users while a non-cooperative game is proposed for the producers [7].

The existence of Nash equilibrium (NE) is proved for the non-cooperative game among the power retailers. Therefore, after the evolutionary equilibrium is achieved, we also design a distributed algorithm for the power retailers to obtain Nash Equilibrium, and then the Stackelberg Equilibrium is also reached [7], [8].

### 1.2. Formulation of the goals of the article

1. Analyze current findings in EGT usage for population control
  2. Oversee SEG model for population control
  3. Formulate SEG strategies
  4. Apply strategies to population decline
- Outline of the main research material.

### 1.3. Population decline

Leader in Stackelberg game may as well aim to reduce the population.

**Pests control.** One of the most researched subjects in controlled population decline is pest control. For well over a century, the phenomenon of insect pests developing resistance to pesticides has been widely acknowledged. More recently, practitioners have advocated for the implementation of resistance management plans. These plans encompass judicious employment of pesticides, rotational crop practices, strategically timed application of various pesticides, and designated pesticide-free zones [9]. The framework of Social Evolutionary Game (SEG) theory offers a conceptual structure for precisely targeting the resistance strategies employed by pests in response to the pest manager's control strategies. This, in turn, facilitates the selection of optimal control strategies. The adoption of SEG theory holds the potential to supplant the current ecologically informed utilization of pesticides with strategies informed by evolutionary insights. This shift is anticipated to enhance the efficacy of pest containment efforts [10]. Future research endeavors could be directed towards integrating vector-valued strategies employed by pest managers. These encompass diverse pesticide treatments and alternative strategies.

**Naive strategy** The leader plays a constant and aggressive minimization strategy ignoring followers' ecological and evolutionary dynamics

$$m = m_{min}$$

**Nash strategy.** Nash strategy remains almost the same – we just look for the minimization:

$$m^*(u) = \operatorname{argmin}_m Q(m, u, x^*(m, u))$$

**Stackelberg strategy.** With this strategy, the leader anticipates  $u^*(m)$  and  $x^*(m, u^*(m))$  and includes them both into objective  $Q$  before minimization it with respect to the action  $m$ . Similar to maximization:

$$m^S = \operatorname{argmin}_m Q(m, u^*(m), x^*(m, u^*(m)))$$

**Cancer treatment.** Cancer constitutes a malady characterized by uncontrolled cellular proliferation, stemming from aberrant functionality in genes accountable for the regulation of cellular division. The origins of cancer are profoundly intertwined with the evolutionary history of human beings, and its advancement is propelled by the mechanisms of natural selection. This progression is typified by cancerous cells demonstrating the subsequent three conditions:

1. The presence of heritable variation: Diverse hereditary attributes are discernible amidst distinct cancer cells, primarily attributable to genetic mutations, epigenetic alterations, chromosomal reconfigurations, and other mechanisms affiliated with genetic precariousness.

2. A struggle for existence: The expansion of cancer cell populations encounters impediments due to the competition for finite spatial and material resources.

3. The impact of inheritable diversity on the struggle for survival: Broadly, the likelihood of a cell's survival is contingent upon its individual attributes, as well as those of its counterparts. Cells endowed with attributes that bestow heightened probabilities of survival and proliferation ultimately proliferate more prolifically over time (a phenomenon known as frequency-dependent selection).

This view of cancer, rooted in the Darwinian paradigm, corresponds with the foundational principles of evolutionary game theory (EGT). EGT posits that evolution assesses inheritable traits within an ongoing competition for survival [1].

Within the most general game-theoretic framework applicable to cancer, the capacity of a specific cancer cell phenotype to withstand a particular treatment represents a continuously evolving heritable trait. Subsequently, distinctive cancer cells are differentiated based on the magnitude of this trait, subject to the influences of natural selection.

In this context, we will embrace the Darwinian dynamics approach to expound upon such a scenario, augmenting the initial model proposed by Vincent and Brown to encompass additional dimensions.

To describe how the Stackelberg evolutionary game theory can be useful in improving cancer



treatment, let us consider an Stackelberg evolutionary game of cancer treatment between a physician and a polymorphic populace of cancer cells, consisting of both resistant and sensitive variants. The foundational framework for this game is based on the conceptualization put forth by Pressley et al. [11]. SEG contribution involves an extension of this framework that incorporates intercellular competition within the cancer cell population [12]. This augmentation is expected to confer a heightened degree of realism to the model [13] while concurrently enhancing the stability of eco-evolutionary dynamics [14].

The sensitive and resistant cell populations are denoted as  $x_S$  and  $x_R$ , respectively, and possess distinct resistance traits  $u_S$  and  $u_R$ . The parameter "m" signifies the dosage of a singular drug. Specifically,  $m = 0$  corresponds to an absence of dosage, while  $m = 1$  corresponds to the maximum tolerable dose (MTD).

As established in reference [11], the sensitive cancer cells consistently retain their susceptibility to the drug ( $u_S$  is consistently 0). In contrast, the resistant subpopulation exhibits a resistance trait that evolves in response to the dose "m" of the drug administered by the physician.

The eco-evolutionary dynamics governing the behavior of cancer cells within each subpopulation, denoted as "i R, S," take the form of a simplified instance of equations (2.3) and (2.4). Notably, in this context, a vector "u" is employed instead of the matrix "U." Within this model, the parameter  $\sigma_i$  represents the evolutionary rate of the subpopulations "i ∈ R, S",

with  $\sigma_S = 0$  signifying the speed of evolution for the sensitive population.

The eco-evolutionary dynamics are characterized using the G-function framework, similar to previous treatments.

**Naive strategy.** Straight minimization of cell population

$$m = m_{min}$$

**Nash strategy.** The eco-evolutionary dynamics are formally described utilizing the G-function:

$$G(v, u, x, m) = r(v)(1 - \sum_{j \in \{R, S\}} \alpha_{ij} x_j) - d - m,$$

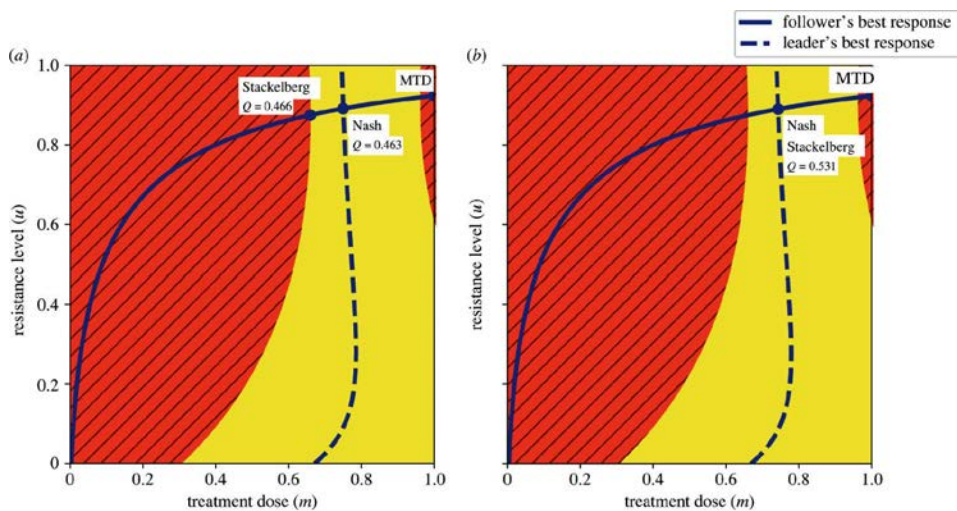
Here, the growth rate, denoted by  $r(v)$ , is expressed as  $r_{max} e^{-gv}$ , incorporating a cost of resistance governed by the parameter  $g$ . The competitive impact of type  $j$  on type  $i$  is defined by  $\alpha_{ij}$ , while  $K$  signifies the carrying capacity, and  $d$  represents the natural death rate. The parameter  $k$  characterizes intrinsic resistance that may exist prior to exposure to a drug, and  $b$  captures the advantage conferred by the evolved resistance trait, resulting in a reduction in therapy efficacy [11].

The assumes that contingent upon the equilibrium population size

$$(x^* = x_S(m, u_S) + x_R(m, u_R))$$

three distinct outcomes are possible:

1. eradication ( $x^* \leq 0$ ), indicative of a successful cure for the cancer;
2. progression ( $x^*$  surpassing a certain proportion of the carrying capacity,  $\delta K$ ), denoting disease advancement;



**Fig. 2. The outcomes of the maximum tolerable dose (MTD), ecologically enlightened (Nash) strategy and evolutionarily enlightened (Stackelberg) strategy of the physician, when playing an SEG against cancer: the yellow and red/cross-hatched areas represent tumour stabilization ( $0 < x^* < \delta K$ ) and progression ( $x^* > \delta K$ ) regions, respectively[?]. (a) The Nash and Stackelberg outcomes differ when  $Q$  defined by (5.3) is an explicit function of  $u$ . (b) The Nash and Stackelberg outcomes coincide when  $c_2 = 0$ . Parameterization:  $\delta = 0.7$ ,  $r_{max} = 0.45$ ,  $g = 0.8$ ,  $K = 10\ 000$ ,  $d = 0.01$ ,  $k = 2$ ,  $b = 10$ ,  $\alpha_{SS} = \alpha_{RR} = 1$ ,  $\alpha_{SR} = 0.1$ ,  $\alpha_{RS} = 0.9$ ,  $\sigma_S = 0$ ,  $\sigma_R = 1$ ,  $Q_{max} = 1$ ; (a)  $c_1 = 0.54$ ,  $c_2 = 0.21$ ,  $c_3 = 0.25$ , (b)  $c_1 = 0.68$ ,  $c_2 = 0$ ,  $c_3 = 0.32$ . [1]**

3. stabilization ( $0 < x^* < \delta K$ ), representing the potential for cancer to be managed as a chronic condition, accompanied by minimal or no side effects stemming from tumor burden [1].

The evolutionary reaction is expressed as  $u = 0$  for the sensitive cancer population, while for the resistant cancer population. This concept is illustrated in Figure 2.

#### Stackelberg strategy

$$Q(m, u_R, x^*) = Q^{max} - c_1(x^* K)^2 - c_2u^2 - c_3m^2$$

Here  $Q^{max}$  represents the upper limit of quality of life, while the coefficients  $c_1$ ,  $c_2$ , and  $c_3$  quantify the degree to which the quality of life diminishes due to factors encompassing tumor burden, the emergence of drug resistance, and the toxicity of the administered drug, respectively. The dynamics of cancer progression under the conventional treatment approach of Maximum Tolerated Dose (MTD), established as the standard of care, are depicted in Figure 2. When the potential for disease stabilization exists, a comparative analysis is conducted between the treatment strategies employed by a physician that are ecologically informed and those that are both ecologically and evolutionarily informed. Figure 2 visually illustrates that, within the selected parameterization, both Nash and Stackelberg equilibrium solutions yield tumor burden stabilization, outperforming the MTD approach, which leads to disease advancement [1].

As illustrated in figure 2a, the evolutionarily enlightened (Stackelberg) strategy corresponds to both a lower treatment dose/toxicity and a lower treatment-induced resistance than the ecologically enlightened (Nash) one. Furthermore, the Stackelberg strategy leads to the best result in terms of patient quality of life, followed by the Nash strategy, while MTD leads to progression.

#### 1.4. Population growth

Fish populations that experience intensive exploitation are anticipated to undergo a gradual reduction in their average body dimensions as time progresses. In this context, we introduce the framework of Stackelberg evolutionary game theory to demonstrate the necessary adaptations in fisheries management practices, aimed at alleviating the potential adverse consequences stemming from these evolutionary shifts. Our analysis revolves around a strategic interplay involving a fisheries manager and a fish population. The former is responsible for regulating the harvesting rate and the mesh size of the nets with the objective of optimizing profits, while the latter undertakes an evolutionary response by adjusting the size at which maturation occurs to maximize overall fitness [2].

Two distinct management strategies employed by a fisheries manager: an ecologically informed approach (Nash) and an approach grounded in evolutionary insights (Stackelberg). The investigation elucidates their respective impacts on fish size and the manager's profit. The Nash equilibrium is achieved at the juncture where the best response curve (ESS) of the fish population intersects with that of the manager (as depicted in Figure 3). At this equilibrium, the fish population attains evolutionary stability, as no individual can enhance its fitness by unilaterally altering its size, while simultaneously maintaining ecological stability, as the expected per capita growth rate for the fish population is null at the point denoted by  $x^*$  [2].

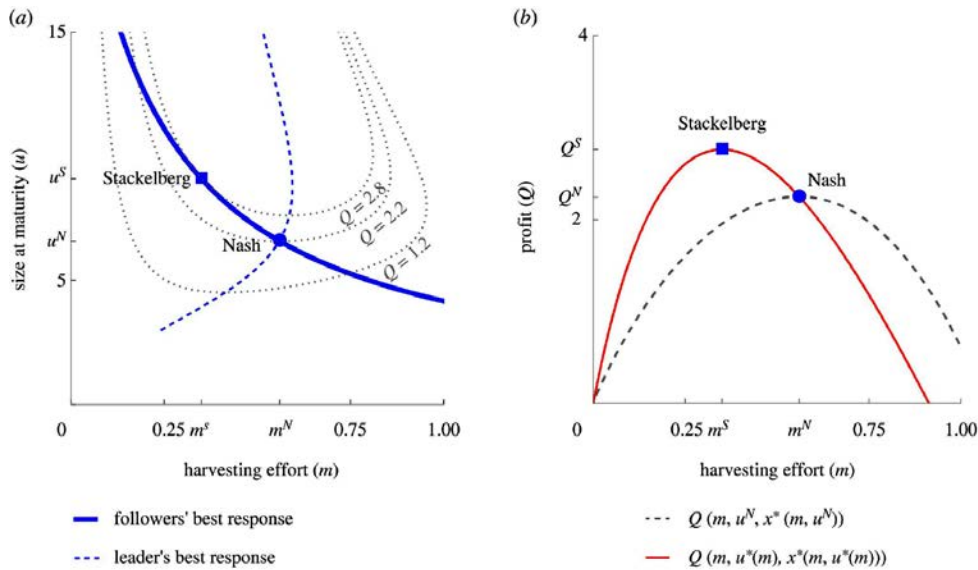
For the manager, this strategy engenders no subsequent regret: given the fish size, there exists no incentive for the manager to modify the harvesting rate (mN). In contrast, the Stackelberg equilibrium does not align with a point on the manager's best response curve; rather, it corresponds to a point situated on the fish population's ESS curve where profit is maximized (as illustrated in Figure 3a) [2].

**Naive strategy.** See Stackelberg games. Naive maximization

**Nash strategy and Stackelberg strategies** In practical terms, the distinction between the two management strategies is rooted in the foundational assumptions they incorporate. The ecologically informed manager acknowledges the influence of harvesting on fish population size, yet regards the mature size of the fish as a constant, thus omitting evolutionary considerations. For the determination of the optimal harvesting rate (mN), this manager takes into account the impacts of  $m$  and  $x^*$ , while optimizing the profit function  $Q$  while holding  $u$  constant (as depicted in Figure 3b).

Conversely, the evolutionarily informed manager anticipates that fish will evolve in response to harvesting. Consequently, this manager integrates both ecological and evolutionary repercussions ( $x^*(m, u^*(m))$  and  $u^*(m)$ ) of harvesting into the profit function  $Q$ . This manager selects the harvesting rate ( $m_s$ ) that maximizes profit with these dual considerations in mind (as depicted in Figure 3b). The profit curve associated with this management approach intersects with the profit curve of the ecologically informed strategy at its zenith (reflecting the Nash equilibrium). This signifies that the Nash equilibrium can be attained by the Stackelberg manager, but not necessarily the reverse [2].

In the broader context of the Nash approach, the manager is inclined to adopt an elevated harvesting



**Fig. 3.** Figure 3a portrays the best response curve (ESS) for the fish population (depicted by the bold solid line) and the corresponding best response curve for the fisheries manager (illustrated by the bold dashed line). The Nash equilibrium materializes at the point where the ESS curve of the fish intersects with the manager’s best response curve. In contrast, the Stackelberg equilibrium lies exclusively on the fish’s ESS curve and does not coincide with the manager’s best response curve. This disparity emerges due to the manager’s best response being determined by optimizing profit over the best response of the followers. Under the Stackelberg framework, the manager adopts a reduced harvesting effort, thereby engendering an increase in fish size. In Figure 3b, the impact of harvesting effort on profit is elucidated for both the ecologically informed strategy (Nash) and the evolutionarily informed strategy (Stackelberg). Within the ecologically informed approach, the manager assumes a fixed size of fish at maturation ( $u = u^N$ ) and, consequently, selects a harvesting rate that maximizes profit while considering this fixed size (as depicted by the grey dotted curve). In contrast, the evolutionarily informed manager operates under the assumption that the size of fish at maturation corresponds to the ESS ( $u^*(m)$ ), and accordingly, selects a harvesting rate that optimizes profit (as indicated by the red curve). Notably, the evolutionarily informed approach yields higher profits at a lower harvesting rate compared to the ecologically informed counterpart [1]

rate, resulting in diminished fish size over time (as demonstrated in Figure 3a). In contrast, under the Stackelberg framework, the manager opts for a reduced harvesting rate, yielding larger fish sizes and greater profit [1].

**Conclusions and future research.**

The existing models suggest that, thus far, the Stackelberg solution tends to yield a more tempered management approach compared to the Nash strategy in relation to parameters such as harvesting effort, pesticide application, or drug therapy. This holds true whether the context is cancer, infectious diseases, or other systems. Progressing from a basic understanding to ecologically informed and subsequently to evolutionarily informed management necessitates an expansion of our knowledge concerning the system at hand.

Effectively anticipating and guiding the eco-evolutionary response of a biological system requires an enhancement of our capabilities in predicting

population size and composition before initiating interventions. To achieve this, advancements are imperative in both the estimation and optimization of model parameters. Achieving accurate estimates mandates an ongoing and continuous surveillance regimen. However, a challenge remains in the domain of identifying, quantifying, and monitoring the evolving strategy distribution within heterogeneous populations. This limitation poses an obstacle to fully realizing a Stackelberg solution.

Nonetheless, strides are being made in this direction, particularly within the realms of pest management and cancer therapies. The advent of methodologies such as liquid biopsies, radiomics, organoids, and xenografts is gradually addressing this technological gap. These emerging techniques hold promise in enabling more comprehensive surveillance and characterization of evolving strategies, potentially pushing the boundaries of achieving a Stackelberg equilibrium [15].

The population minimization game (cancer treatment, for example) is more suitable for applying mixed strategies. In fishery management switch between Nash and Stackelberg equilibrium does not yield significantly better result to overall payoff function.

#### Bibliography:

1. Stein, A., Salvioli, M., Garjani, H., Dubbeldam, J., Viossat, Y., Brown, J. S., Stan'kova', K. (2023). Stackelberg evolutionary game theory: how to manage evolving systems. In Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences (Vol. 378, Issue 1876). The Royal Society. <https://doi.org/10.1098/rstb.2021.0495>
2. Salvioli M, Dubbeldam J, Stan'kova' K, Brown JS (2021) Fisheries management as a Stackelberg Evolutionary Game: Finding an evolutionarily enlightened strategy. PLoS ONE 16(1): e0245255. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245255>
3. Wo'lf, B., te Rietmole, H., Salvioli, M. et al. The Contribution of Evolutionary Game Theory to Understanding and Treating Cancer. Dyn Games Appl 12, 313–342 (2022). <https://doi.org/10.1007/s13235-021-00397-w>
4. Von Neumann J, Morgenstern O. 1944 Theory of games and economic behavior. Princeton, NJ: Princeton University Press.
5. Conlin PL, Chandler JR, Kerr B. 2014 Games of life and death: antibiotic resistance and production through the lens of evolutionary game theory. Curr. Opin Microbiol. 21, 35-44. doi:10.1016/j.mib.2014.09.004
6. Stan'kova' K. 2019 Resistance games. Nat. Ecol. Evol. 3, 336-337. doi:10.1038/s41559-018-0785-y
7. Yeming Dai, Yan Gao, Hongwei Gao, Hongbo Zhu, Real-time pricing scheme based on Stackelberg game in smart grid with multiple power retailers, Neurocomputing, Volume 260, 2017, Pages 149-156, ISSN 0925-2312, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.04.027>
8. Emanuele Crisostomi, Claudio Gallicchio, Alessio Micheli, Marco Raugi, Mauro Tucci, Prediction of the Italian electricity price for smart grid applications, Neurocomputing, Volume 170, 2015, Pages 286-295, ISSN 0925-2312, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.02.089>
9. Consortium R et al. 2013 Heterogeneity of selection and the evolution of resistance. Trends Ecol. Evol. 28, 110-118. doi: 10.1016/j.tree.2012.09.001
10. Brown JS, Stan'kova' K. 2017 Game theory as a conceptual framework for managing insect pests. Curr. Opin. Insect Sci. 21, 26-32. doi:10.1016/j.cois.2017.05.007
11. Pressley M, Salvioli M, Lewis DB, Richards CL, Brown JS, Stan'kova' K. 2021 Evolutionary dynamics of treatment-induced resistance in cancer informs understanding of rapid evolution in natural systems. Front. Ecol. Evol. 9, 681121. doi:10.3389/fevo.2021.681121
12. Salvioli, Monica, et al. "Stackelberg evolutionary games of cancer treatment: Tumor stabilization as an alternative to dynamic treatment protocols." Under review (2021).
13. Freischel AR, Damaghi M, Cunningham JJ, Ibrahim-Hashim A, Gillies RJ, Gatenby RA, Brown JS. 2021 Frequency- dependent interactions determine outcome of competition between two breast cancer cell lines. Sci. Rep. 11, 4908. doi: 10.1038/s41598-021-84406-3
14. Satouri M, Rezaei J, Stan'kova' K. 2021 On stability of the Darwinian dynamics. BioRxiv. doi:10.1101/2021.10.26.465938
15. Verduin M, Hoeben A, De Ruyscher D, Vooijs M. 2021 Patient-derived cancer organoids as predictors of treatment response. Front. Oncol. 11, 820. doi:10.3389/fonc.2021.641980

### **Баришич Л.М. ОГЛЯД ЗМІШАНИХ СТРАТЕГІЙ У ПІДХОДІ ЕВОЛЮЦІЙНОЇ ТЕОРІЇ ІГОР СТАКЕЛЬБЕРГА ДО КОНТРОЛЮ ЗА ЧИСЕЛЬНІСТЮ ПОПУЛЯЦІЙ – ВИПАДОК КОНТРОЛЮ ЗА ЗРОСТАННЯМ ПОПУЛЯЦІЇ**

*У цій статті ми розглянемо сучасний стан моделювання управління популяціями з використанням теорії ігор Стакельберга як сучасного розвитку еволюційної теорії ігор.*

*Ми розглянемо стратегії як зростання, так і скорочення чисельності населення, зосередившись на управлінні рибальством та лікуванні раку відповідно. Ми проаналізуємо відмінності між рівновагою Неша і Стакельберга та обговоримо можливість використання змішаних стратегій. Ми окреслимо відмінності у підходах раціонального менеджера до мінімізації та максимізації популяції у випадку гри Стакельберга.*

*Еволюційна теорія ігор забезпечує математичну основу для концептуалізації та аналізу біологічних взаємодій, в яких пристосованість індивіда залежить не лише від його власних рис, але й від рис інших. У цьому контексті учасники, як правило, не є явно раціональними акторами; скоріше, вони мають тенденцію успадковувати ознаки, а не активно їх відбирати.*

*Теорія еволюційних ігор Стакельберга (SEG) об'єднує класичну та еволюційну теорію ігор для моделювання взаємодії за участю раціонального лідера та послідовників, що еволюціонують, в академічних рамках. У цьому контексті наміри лідера можуть бути різними: він може прагнути підтримувати динамічну систему, як у сценаріях, наприклад, управління рибальством, або, навпаки, намагатися ліквідувати систему, як у випадку боротьби зі шкідниками. Часто постійний агресивний підхід лідера, наприклад, надмірний вилов риби в контексті управління рибальством або введення максимально допустимої дози при лікуванні раку, є субоптимальною стратегією. Включення екологічної динаміки в аналіз, як правило, дає більш сприятливі результати для лідера, що узгоджується з рівновагою Неша в теорії ігор [3].*

*Тим не менш, найбільш вигідний курс дій лідера передбачає проактивний розгляд і вплив на еко-еволюційну динаміку, що призводить до досягнення рівноваги Стакельберга в рамках гри.*

**Ключові слова:** теорія ігор, еволюційні ігри, ігри Стакельберга, математичне моделювання, лікування раку, управління населенням.

**Бешилей М.І.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Пастух В.А.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Бешилей Г.В.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Андрущак В.С.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Климаш М.М.**

Національний університет «Львівська політехніка»

## РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ МОБІЛЬНОЇ СИСТЕМИ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ ТА ГОЛОСОВОГО УПРАВЛІННЯ ДЛЯ ЛЮДЕЙ З ВАДАМИ ЗОРУ

*У статті на основі смартфона розроблено інтелектуальну мобільну систему комп'ютерного зору та голосового управління, спеціально адаптованої для користувачів з вадами зору. Розроблена система працює в режимі реального часу та надає можливість використання як в онлайн, так і в офлайн режимах, розширюючи функціональні можливості сучасних рішень для незрячих та слабозорих осіб. Важливим аспектом є впровадження модуля голосового керування, який використовує комбінацію вбудованих та хмарних API неймережевих моделей, що значно підвищує доступність та ефективність системи. Ми використали передові технології, такі як нейронна мережа MobiNet3 та модель MiDaS 2 Lite для класифікації об'єктів та оцінки глибини зображення. Ми вдосконалили традиційні методи візуального розпізнавання та впровадили ітераційний асинхронний алгоритм обчислення глибини, що забезпечило надзвичайну швидкість системи. Результати тестування підтверджують, що час обробки для нашого ітеративного алгоритму знаходиться в діапазоні від 600 мкс до 2 мс, що є вражаючим покращенням порівняно із традиційними рекурсивними методами. Ми внесли нововведення в систему, включаючи розрахунок коефіцієнтів глибини зображення в обох горизонтальній та вертикальній площинах, що представляє значущий крок удосконалення в порівнянні з попереднім нашим варіантом. Ці зміни сприяють точнішому визначенню просторового оточення системи, поліпшуючи її здатність ефективно уникати перешкод. Крім того, ми впровадили аналіз даних з акселерометра та гіроскопа, що надає важливу інформацію про рух та орієнтацію пристрою. Акселерометр оцінює зміни прискорення, нахилу та обертання, що дозволяє отримати комплексне уявлення про просторову динаміку. Гіроскоп доповнює цей аналіз, надаючи інформацію про кутові зміни в орієнтації пристрою. Ці інтегровані покращення грають вирішальну роль у виконанні функцій, таких як уникнення об'єктів, голосове управління, навігаційна допомога та просторова орієнтація для осіб із вадами зору. Тестування підтвердило, що комбінація голосового управління та розпізнавання зображень дозволяє нашій системі працювати в режимі реального часу та забезпечувати користувачів актуальною інформацією.*

**Ключові слова:** смартфон, навігаційна допомога, комп'ютерний зір, голосове управління, інтелектуальна мобільна система, нейронна мережа, мобільність, ітераційний асинхронний алгоритм, глибина зображення.

**Постановка проблеми.** У світі стрімкого розвитку технологій важливо не лише створювати інноваційні рішення, але й забезпечувати їх доступність та використання в повсякденному житті. Однією з ключових сфер, де технології можуть справжньою мірою змінити життя,

є розробка інтелектуальних мобільних систем для людей з вадами зору [1]. У цьому контексті, покликано вирішити низку проблем, що виникають при використанні сучасних рішень та розширити їх функціонал за допомогою смартфона, який став необхідним елементом повсякденного життя.

На сьогоднішній день багато існуючих технологій, спрямованих на полегшення життя людей з вадами зору, часто обмежені своєю функціональністю, портативністю та високою вартістю. Великі та незручні пристрої можуть ставити під сумнів їхню практичність у повсякденному житті. Багато з пристроїв для незрячих працюють в обмеженому режимі, надаючи базову інформацію про оточуючий світ. Зазвичай, ці рішення не забезпечують детального опису об'єктів навколо та не дозволяють повноцінно взаємодіяти з навколишнім середовищем [2]. Також важливим фактором є не лише точність розпізнавання об'єктів та голосу, а й можливість забезпечення цього процесу в реальному часі. Затримки чи невдалі спроби розпізнавання можуть суттєво впливати на здатність користувача ефективно взаємодіяти з навколишнім світом та отримувати актуальну інформацію. Це стає особливо актуальним, коли користувачі перебувають в русі, переходять дорогу або виконують щоденні обов'язки. Отже, однією з найважливіших характеристик ефективної системи для людей з вадами зору на базі смартфона є її здатність працювати в режимі реального часу [3].

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Експоненціальне зростання індустрії смартфонів проклало шлях до їх більш глибокого вивчення в дослідженнях навігаційної допомоги. Система навігаційної допомоги, запропонована в роботі [4] автори використовували смартфон для взаємодії з користувачем за допомогою голосового введення. Стереокamera використовувалися для зйомки відео з навколишнього середовища, а потім надсилання його на хмарну обчислювальну платформу. У роботі [5, 6] пропонувані системи вимагали постійного підключення до мережі передачі даних, щоб функціонувати через віртуальні окуляри. Система, представлена в роботі [7], складається з системи розпізнавання зображень, інтегрованої з додатком для смартфонів. Система підтримує два режими роботи залежно від доступності мережі: онлайн і офлайн. Смартфон використовувався для захоплення об'єктів перед користувачем і надсилання їх на внутрішній сервер. Для розпізнавання об'єктів було застосовано два алгоритми: швидший R-CNN та YOLO. Швидший алгоритм R-CNN використовувався в автономному режимі системи для отримання вищої точності. Алгоритм YOLO, навпаки, застосовувався в онлайн-режимі для отримання більшої швидкості обробки. Після визначення перешкод і відстані до них користувач отримував повідомлення про результати в аудіорежимі.

У роботі [8], автори розробили гнучку і портативну систему з використанням мобільного телефону з глибинною камерою для виявлення перешкод без необхідності придбання додаткових апаратних пристроїв. На рис. 1 показано запропоновану систему для носіння. Смартфон вставляється в портативну, складну тканинну сумку-слінг, яка вішається на шию користувачеві. Недоліком даної роботи є обмежена точність виявлення перешкод через використання лише глибинної камери мобільного телефону.



Рис. 1. Система допомоги при пересуванні людей з вадами зору за допомогою смартфона на базі Android (праворуч) та слінг-сумки (ліворуч)

Автори роботи [9] представили систему навігаційної допомоги, основними компонентами якої є RGB-D камера, інерційний вимірювальний блок (IMU), встановлений на парі окулярів, і смартфон. На смартфоні був встановлений легкий CNN для виявлення перешкод, визначення їх положення та орієнтації. Хоча автори стверджують, що система була протестована і працює як в приміщенні, так і на вулиці, кабелі, що з'єднують різні компоненти системи, можуть створювати незручності для користувачів під час навігації.

PERCEPT-II - це система навігації в приміщенні на основі смартфона, запропонована в роботі [10]. Це додаток для Android, який дозволяє людям з вадами зору отримувати навігаційні інструкції до місця призначення, коли вони торкаються певних орієнтирів, обладнаних мітками ближнього радіозв'язку. Основне обмеження системи пов'язане з установкою міток NFC, що передбачає високі витрати на обслуговування при широкомасштабному розгортанні.

Підсумовуючи, можна сказати, що значні обмеження більшості розглянутих систем пов'язані з портативністю, що робить їх незручними під час навігації. Хоча існують портативні рішення, багато з них залежать від підключення до мережі та обробки даних на сервері. Користувачі, які потребують підключення до Інтернету під час

навігації, можуть бути стурбовані питаннями конфіденційності та безпеки. Хоча деякі дослідники вивчали моделі виявлення об'єктів загального призначення з кращою точністю, вони не показали, як їх можна інтегрувати в портативну систему з низькими обчислювальними ресурсами. Як правило, при використанні в реальному часі моделі виявлення об'єктів/перешкод повинні мати малий час обробки даних без шкоди для точності. Однак, коли використовуються універсальні моделі об'єктів, вони можуть мати достатню точність, але потребувати більше часу для отримання результату, що може спричинити аварії або зіткнення під час навігації через затримку в часі реагування [1].

Таким чином, **метою роботи** є розроблення та впровадження інтелектуальної мобільної системи комп'ютерного зору та голосового управління для людей з вадами зору на основі смартфона, що працює в режимі реального часу та надає можливість використання як в онлайн, так і в офлайн режимах. Головний акцент робиться на забезпеченні швидкого та ефективного доступу користувачів до необхідної інформації, навігації та взаємодії з системою в різних умовах використання.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Запропонована система, яка визначає себе як універсальний додаток для смартфонів, призначена для задоволення потреб користувачів із вадами зору. Вона спроектована для роботи на смартфонах з операційною системою Android, і може бути адаптована до інших платформ за умови наявності додаткової програмної та апаратної підтримки. Перелік функцій системи є лише частковим і може бути розширений у майбутньому. Структурно-функціональна схема мобільної системи включає різні модулі, які між собою взаємодіють та знаходяться на різних рівнях: рівень даних, логічний рівень та рівень представлення (рис. 2).

*Рівень даних* у системі включає різні функціональні модулі, кожен з яких має своє власне призначення:

- Модуль обробки зображень, який використовує алгоритми, автономні нейромережеві моделі та комунікаційні інтерфейси для обробки графічних даних.
- Модуль навігації, що забезпечує повну навігаційну функціональність користувача, розраховуючи маршрути, траєкторії та переміщення на основі відкритих карт та даних пристрою.
- Модуль сенсорних даних з прямими інтерфейсами для отримання даних з апаратних компонентів, таких як датчики та комунікаційні інтерфейси.

- Модуль аналітики, що складається з вбудованих і сторонніх компонентів для зберігання та аналізу даних, включаючи базу даних.

- Модуль голосового управління, що використовує комбінацію вбудованих і хмарних систем голосового управління API для підвищення доступності.

- Мережевий модуль, який служить інтерфейсом зв'язку з серверами та різними хмарними сервісами.

*Рівень бізнес логіки* домену складається з динамічних варіантів використання, які розглядаються як атомарні операції і конфігуруються на основі багатопотоковості системи. Приклади включають обробку зображень і зіставлення з даними акселерометрів і гіроскопічних датчиків для прогнозування патернів руху користувача.

*Рівень представлення*, залежний від платформи розгортання, має чітко визначені інтерфейси для регулювання взаємодії між користувачем і системою. Ці інтерфейси включають аудіовихід пристрою, вібраційні сигнали, дисплей та зв'язок з периферійними пристроями. Кожен рівень функціонує автономно з логічно відокремленими модулями, що взаємодіють через реалізовані інтерфейси. Типи даних сутностей адаптовані до конкретної робочої області для забезпечення цілісності та безпеки. Такий архітектурний підхід сприяє зручності розширення системи, міграції, уніфікації модулів та крос-платформеній реалізації в майбутньому.

У даній системі реалізована паралельна обробка завдань для оптимізації використання ресурсів. Деякі процеси, такі як початкова ініціалізація та основні функціональності навігації, виконуються в одному потоці виконання для уникнення конфліктів та оптимізації витрат часу. Завдання, які можуть виконуватися паралельно, такі як навігація та обробка зображень, розподіляються на підзадачі, що використовують асинхронний підхід та можуть виділяти ресурси при виході зі стану паузи.

Для запропонованої системи ми успішно розробили та впровадили модуль безперервного голосового управління, використовуючи хмарний сервіс Speech-To-Text API. Цей модуль дозволяє використовувати складну структуру голосових команд, повністю відповідаючи основним вимогам нашої системи. Однак, враховуючи залежність від стабільного інтернет-з'єднання для використання API, ми також впровадили альтернативний модуль обробки голосових команд. Зокрема він включає можливість використання вбудованої



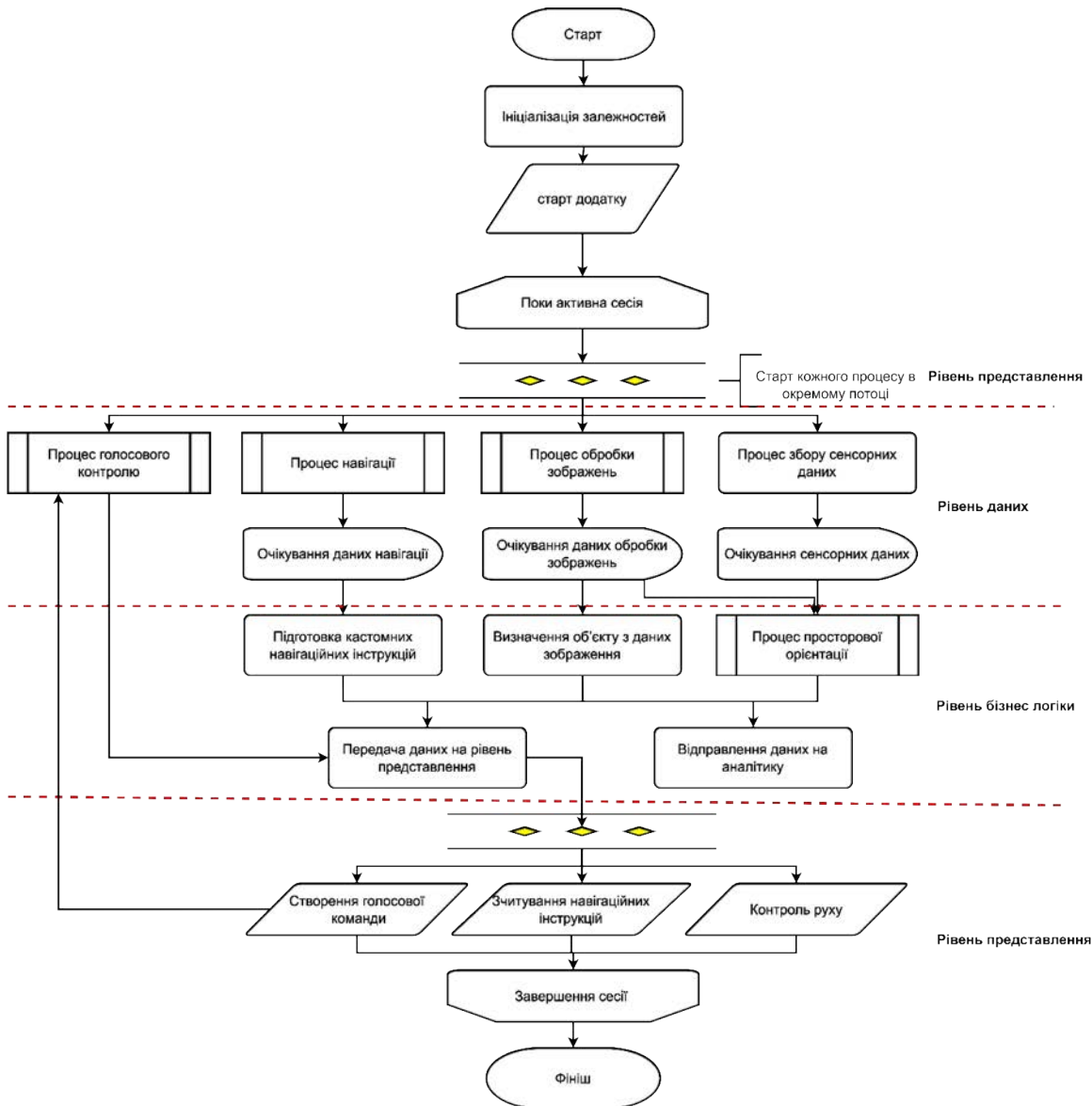


Рис. 2. Структурно-функціональна схема мобільної системи комп'ютерного зору та голосового управління для людей з вадами зору

нейромережевої моделі для класифікації команд та голосового управління, надаючи системі автономність та високу швидкість роботи. Цей модуль може діяти як резервний варіант у випадку недоступності основного Speech-To-Text API, забезпечуючи неперервну функціональність системи в режимі реального часу. З метою оптимізації та інтеграції обох модулів в єдину систему збору даних, ми внесли покращення у загальну архітектуру модуля безперервного голосового управління (рис. 3). Ми розробили модифікований репозиторій VoiceRecognitionRepository, який об'єднує два різних джерела даних: VoiceRecognitionDataSourceApi, що використовує Speech-To-Text API для класифікації команд, та

VoiceRecognitionDataSourceEmbeddedModel, яке використовує вбудовану нейромережеву модель (Embedded AI) для того ж самого завдання.

У класі репозиторію були додані дві окремі функції розпізнавання команд для кожного джерела даних відповідно. Також була впроваджена логіка, яка дозволяє динамічно перемикатися між цими джерелами на основі умов, таких як помилки або відмови в роботі модулів. Результати нашої роботи відображені на блок-схемі, представлений на рис. 4.

Отже, загальний алгоритм безперервного голосового управління був адаптований з урахуванням умов використання різних джерел розпізнавання команд та функціонує наступним чином:

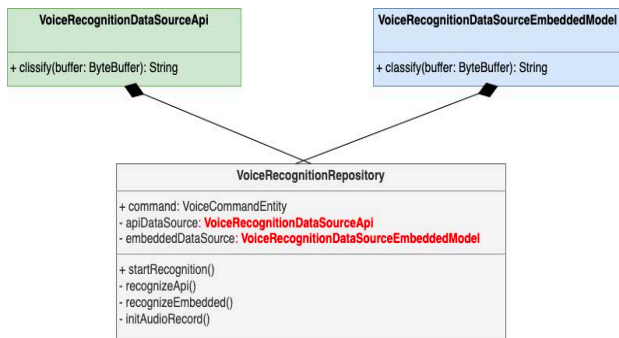


Рис. 3. Діаграма класів модуля безперервного голосового управління

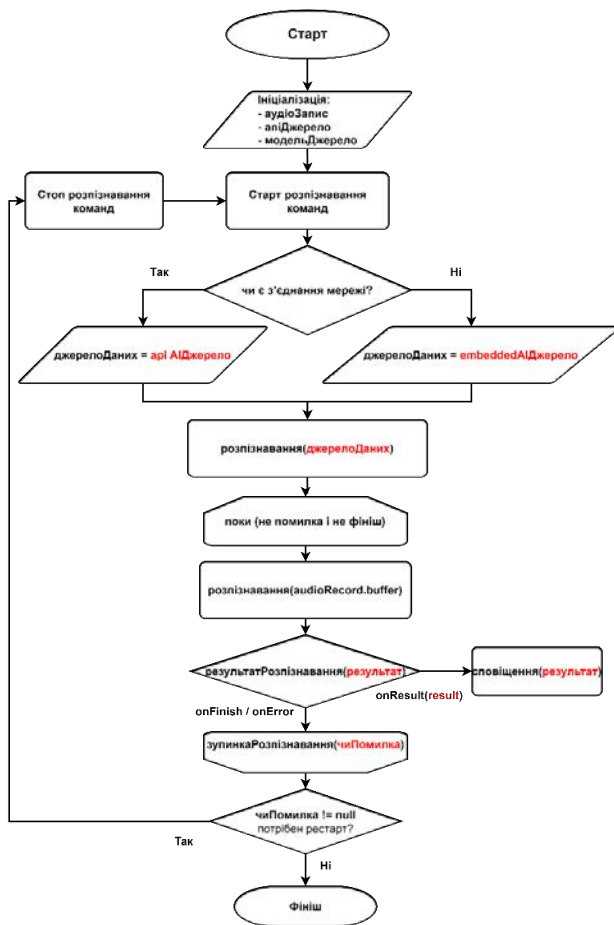


Рис. 4. Блок-схема алгоритму голосового управління для онлайн та офлайн режиму

1. Ініціалізація джерел даних для модулів розпізнавання команд з використанням API та вбудованої нейронної мережі.
2. Початок запису аудіоданих.
3. Перевірка доступності Інтернет-з'єднання (активне/неактивне).
4. Перемикання модуля відповідно до результату перевірки Інтернет-з'єднання.
5. Запуск циклу розпізнавання команд.
6. Обробка результатів розпізнавання (команда / помилка / завершення):

- Команда: активація відповідної команди.
- Помилка: зупинка функції розпізнавання, перезапуск функції розпізнавання.
- Завершення: зупинка функції розпізнавання, завершення роботи модуля голосового керування.

Ми провели порівняльний аналіз двох підходів реалізації голосового контролю. Розглядали параметри швидкості обробки та точності результату для моделі Embedded AI та Speech-to-Text Cloud API (рис. 5).

Модель вбудованого ШІ класифікує аудіокоманди з обмеженим списком на дев'ять елементів, що дозволяє швидко обробляти дані локально. Це, однак, призводить до обмежень у статичному списку команд та можливих помилок у розпізнаванні.

Speech-to-Text Cloud API, реалізований на стороні клієнта, надає більшу гнучкість з можливістю динамічного розширення списку розпізнаваних сутностей. Однак, цей підхід вимагає більше часу на обробку через відправлення аудіоданих на віддалений сервер.

VoiceControlledApp			VoiceControlledApp		
Embedded model			Speech recognition API		
Result	Accuracy	Time ms	Result	Accuracy	Time ms
go	0.9984401	24	START	0.98762906	230
stop	0.99988866	33	STOP	0.95282274	70
up	0.87787783	37	NEXT	0.9738304	320
right	0.99842393	41	BACK	0.9237496	420
up	0.99994826	39	ALLOW	0.96366084	390
up	0.98488694	36	DISALLOW	0.78784275	450
down	0.99250424	38	EXIT	0.98762906	970
up	0.79631543	30	SETTINGS	0.98762906	510
right	0.40231836	36	AUTH	0.9716112	40
up	0.97831184	32	ABOUT	0.98000145	560
up	0.32232675	51	HELP	0.98472625	940
right	0.9343734	40	UNIQUE	0.98762906	550
up	0.9337167	41			
go	0.99989104	31			
down	0.614984	29			
left	0.7197286	29			
go	0.90625566	40			
left	0.9996886	30			
stop	0.56151736	33			
off	0.84865606	33			
up	0.48891592	34			
up	0.9837015	37			
up	0.80413634	61			
up	0.4909583	31			
go	0.70920146	31			
go	0.92218935	38			
down	0.9959894	29			

Рис. 5. Порівняння ефективності моделі Embedded AI (а) з моделлю Speech-to-Text Cloud API (б)

Також, у пропонуваній системі використовується нейромережева модель MobiNet третьої версії для класифікації об'єктів на зображенні. Модель приймає оброблений піксельний масив розміром 512x512 пікселів у якості вхідних даних. Результатом роботи моделі є словник із цілими числами та плаваючою комою, що відображає унікальний номер класифікованого об'єкта та

йому відповідне відсоткове значення. Значення з найвищим відсотком визначається як кінцевий результат для обробленого кадру та передається користувачеві. Модель оцінки глибини MiDaS 2 Lite використовує тензор та базується на роботі з простими зображеннями від камери. Вона навчена на 10 різних наборах даних і на вході отримує двовимірний піксельний масив розміром 256x256 пікселів. Результатом моделі є одновимірний масив значень з плаваючою комою, що відповідає квадрату початкового розміру зображення. Отримане зображення використовується для керування переміщенням користувача в просторі за допомогою рекурсивного алгоритму визначення та уникнення перешкод по горизонталі. Глибина зображення визначає відстань до об'єктів, і ці дані використовуються для коригування переміщення користувача в просторі. Під час обробки зображень для оцінки глибини використовується вихідне зображення для розрахунку варіантів руху користувача для уникнення перешкод. У попередній нашій роботі ми використовували рекурсивний метод [11] ітерацій над матрицею карти глибини для обчислення суми значень пікселів зображення (рис. 6). Цей підхід виявився ефективним і давав бажаний результат, але він придатний лише для синхронних обчислень. Використання асинхронного підходу призводило до втрат продуктивності, оскільки кожен рекурсивний крок, виділений в окремий мікропотік, блокував весь контекст асинхронної роботи. Кожен батьківський мікропотік мусив чекати завершення роботи всіх створених ним мікропотоків, що збільшувало час обробки матриці. Для оптимізації часу обробки при використанні асинхронного поділу обчислень матриці карти глибини, алгоритм проходження по елементах матриці було змінено на ітераційний підхід (рис. 7).

Асинхронний ітераційний алгоритм обчислення суми матриці карти глибин працює за звичайним принципом обчислення значень у двовимірному масиві, за винятком того, що обчислення одновимірних масивів відбувається асинхронно (рис. 7).

Ключові етапи алгоритму включають вибір змінної для суми, використання зовнішнього циклу для ітерації значень  $x$  у масиві, де кожен  $x$  представляє собою одновимірний масив  $y$ , та асинхронне обчислення значень одновимірних масивів та збереження суми у відповідній змінній. Алгоритм завершується виходом з циклів та поверненням готової суми значень масивів. Для проведення експериментів і тестування різних

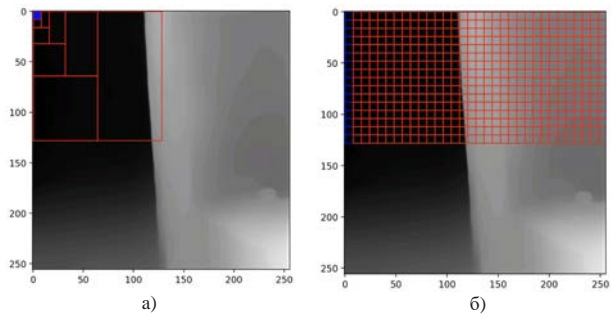


Рис. 6. Рекурсивний (а) та ітераційний (б) підхід обробки матриці карти глибини зображення

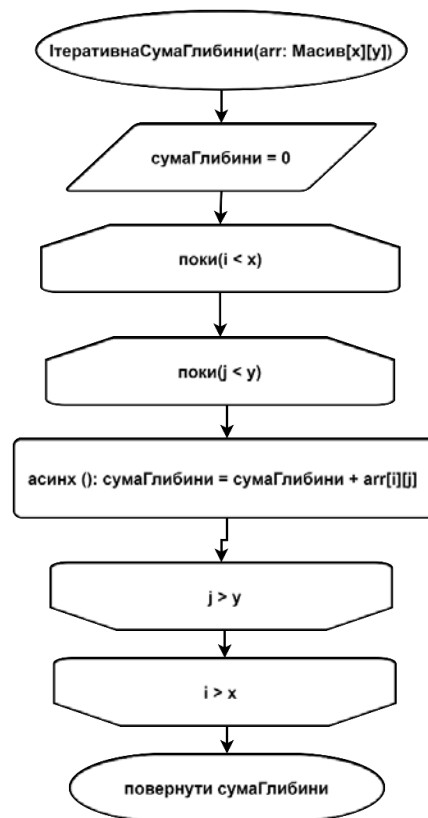


Рис. 7. Асинхронний ітераційний алгоритм обчислення суми матриці карти глибини зображення

підходів було використано тестове середовище з картами глибин різних розмірів. Було розраховано середні часи обробки для рекурсивного та асинхронного ітераційного підходів, провівши по 500 експериментів для кожного варіанту розмірності матриці. Результати тестування алгоритму з рекурсивним підходом до обчислення значень матриці карти глибин представлені в таблиці 1. Середні значення часу обробки коливаються в діапазоні від 600 мкс до 70 мс.

Таблиця 1

Дані тестування алгоритму з рекурсивним підходом

	index	count	mean	std	min	25%	50%	75%	max
0	64	500.0	689.812	2342.05144	3.0	9.00	152.5	439.75	33609.0
1	128	500.0	2214.28	4013.85656	22.0	75.00	702.5	2950.50	34894.0
2	256	500.0	4088.71	7716.00429	104.0	191.75	1893.0	3214.50	65868.0
3	512	500.0	8604.23	14591.0224	344.0	547.00	5465.0	11803.25	102867.0
4	1024	500.0	23498.7	31941.7372	1257.0	1636.75	17788.	40079.75	334632.0
5	2048	500.0	70002.6	78368.7497	4309.0	4717.75	66035.	118967.5	999279.0

Таблиця 2

Дані тестування алгоритму з асинхронним ітеративним підходом

	index	count	mean	std	min	25%	50%	75%	max
0	64	500.0	639.746	4396.02188	119.0	278.75	330.5	436.25	98358.0
1	128	500.0	842.992	4454.18267	206.0	447.00	535.0	662.50	99803.0
2	256	500.0	1237.098	4528.91724	329.0	794.75	950.5	1075.25	100069.0
3	512	500.0	1194.190	438.767702	691.0	875.50	1022.0	1520.25	3591.0
4	1024	500.0	1268.908	378.224885	611.0	899.00	1326.5	1559.75	2324.0
5	2048	500.0	2191.168	613.270983	1530.0	1863.00	1999.5	2278.00	9053.0

Дані тестування алгоритму з асинхронним ітераційним підходом до обчислення значень матриці карти глибини наведені в таблиці 2. Середні значення часу обробки для цього підходу коливаються від 600 мкс до 2 мс.

Отже, за результатами дослідження двох підходів до обчислення карти глибин виявилось, що ітераційний асинхронний підхід у середньому в 35 разів швидший, ніж рекурсивний (рис. 8). Тому він був обраний як основа для алгоритму визначення коефіцієнтів руху користувача, оскільки він дозволяє ефективніше передавати результати користувачеві у вигляді команд.

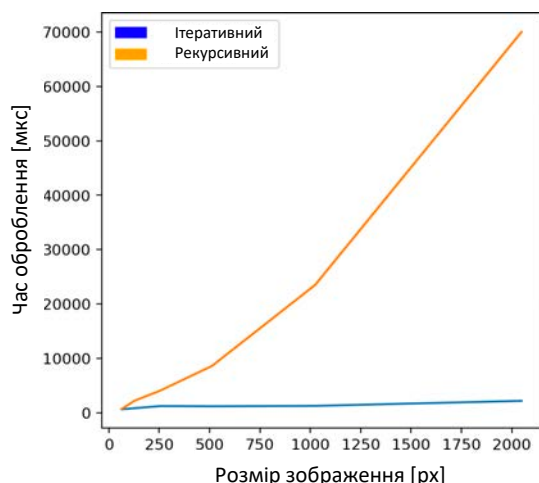


Рис. 8. Порівняння часу оброблення карти глибини зображення різних підходів

Ми також вдосконалили алгоритм, додаючи розрахунок перешкод як по горизонтальній, так і по вертикальній осі на основі визначення коефі-

цієнтів глибини зображення. Для цього площина зображення ділиться на чотири частини для кожної із них визначається центр, з якого буде виконуватися розрахунок. Отримані половинки вихідного масиву передаються як параметр на вхід інтерактивного алгоритму для обчислення суми значень глибини та їх усереднення. Це поліпшення дало можливість отримати більш точні та повні дані про обстановку, що в свою чергу дозволяє ефективніше визначати команди руху для користувача. Чим більше перешкод з одного боку по відношенню до іншого, тим вищий коефіцієнт, тим і ближчим є перешкода.

Процес перевірки працездатності розробленого прототипу інтелектуальної мобільної системи був проведений на високотехнологічному мобільному пристрої Google Pixel 6. Цей пристрій обладнаний всіма необхідними характеристиками для успішного виконання експериментів та валідації роботи системи, зокрема, операційною системою Android, першим поколінням тензорного процесора та вбудованою 50-мегапіксельною камерою. Такий вибір конкретного пристрою для тестування був обумовлений його високим технічним рівнем та можливостями, що відповідають вимогам системи. Це забезпечило надійність та точність отриманих результатів, а також підтвердило робочу здатність системи в реальних умовах експлуатації.

У ході тестування було здійснено візуалізацію результатів роботи функції просторової орієнтації. Для цього були налаштовані компоненти, які автоматично регулюють яскравість на основі коефіцієнтів, отриманих під час обробки глибини

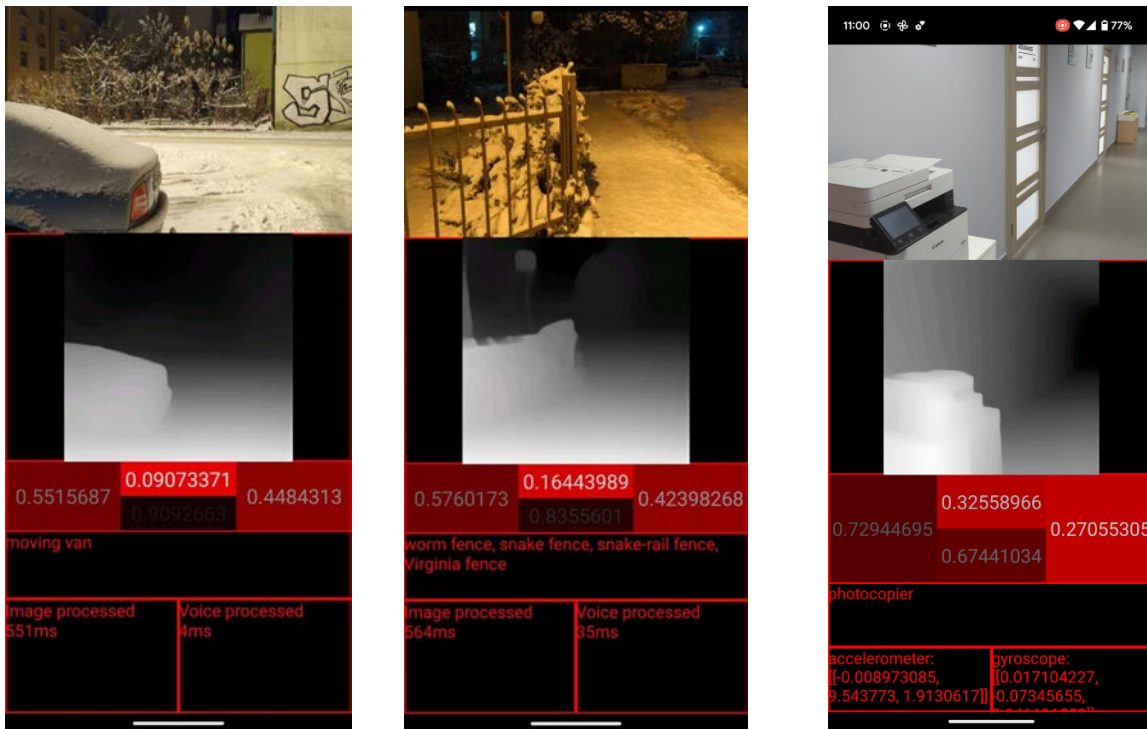


Рис. 9. Тестування розробленої інтелектуальної мобільної системи комп'ютерного зору та голосового управління

зображення. Цей підхід сприяє ефективній візуалізації та виведенню користувачеві інформації щодо просторового середовища. У процесі тестування також проводилася оцінка часу, витраченого на обчислення при обробці зображення та виконанні голосових команд. Це важливий аспект, який дозволяє визначити ефективність та продуктивність системи в реальному часі.

Під час тестування в різноманітних сценаріях (рис. 9) помітно, що об'єкти, що знаходяться ближче до камери, відображають більше світла, що призводить до яскравіших зображень (коефіцієнт глибини зображення наближається до 1). З іншого боку, об'єкти, розташовані далеко, відбивають менше світла, що робить їх зображення темнішим (коефіцієнт глибини зображення наближається до 0). Шляхом прив'язки значень яскравості до відстані, система створює карту глибини, яка передає тривимірну структуру оточення та полегшує виявлення об'єктів.

У порівнянні з попередньою розробкою, удосконалення включають обчислення коефіцієнтів не лише в горизонтальній, але й в вертикальній площинах [11]. Це покращення дозволяє системі точніше оцінювати просторове оточення для ефективного уникнення перешкод. Аналіз даних з акселерометра та гіроскопа забезпечує важливу інформацію про рух та орієнтацію при-

строю. Акселерометр оцінює зміни прискорення, нахилу та обертання, надаючи комплексне розуміння просторової динаміки. Гіроскоп доповнює цей аналіз, надаючи інформацію про кутові зміни в орієнтації пристрою. Цей синергетичний підхід виконує ключову роль у виконанні функцій, таких як уникнення об'єктів, навігаційна допомога та просторова орієнтація в реальному часі для осіб із вадами зору. Додатково, система вдосконалено інтегрує функції голосового управління, які працюють у гібридному режимі, залежно від доступності Інтернет-з'єднання.

Серед ключових переваг системи слід відзначити її можливість працювати в режимі реального часу. Це означає, що система забезпечує миттєву реакцію та швидкі результати обробки без помітних затримок. Наприклад, у контексті системи просторової орієнтації на мобільному пристрої для осіб із вадами зору, можливість отримувати дані та повідомлення про оточуюче середовище в реальному часі допомагає користувачеві ефективно реагувати на перешкоди та небезпеки. Режим реального часу розширює функціональні можливості системи та гарантує її актуальність в різних сценаріях використання.

**Висновки.** Розроблено та протестовано прототип інтелектуальної системи комп'ютерного зору та голосового управління на базі смартфона для

осіб із вадами зору. Ми спроектували нашу систему так, щоб вона була легкою у використанні, портативною та доступною за ціною, забезпечуючи доступність для різних користувачів. Важливим кроком в удосконаленні є впровадження голосового управління, що ґрунтується на комбінації вбудованих та хмарних нейромережових моделях. Це значно покращує доступність та продуктивність нашої системи, забезпечуючи ще більш ефективну взаємодію з користувачем. Із застосуванням передових технологій, таких як нейронна

мережа MobiNet3 та модель MiDaS 2 Lite, ми досягли високої точності у класифікації об'єктів та визначенні глибини зображення. Реалізовано алгоритм просторового орієнтування на основі ітеративного обчислення суми значень масиву глибини зображень, продемонструвавши його ефективність у реальному часі по відношенню до рекурсивного підходу. Одержані результати тестування підтверджують високий рівень точності та швидкодії, зробивши систему практичною та вигідною для широкого кола користувачів.

#### Список літератури:

1. Kuriakose B., Shrestha R., and Sandnes F. E. DeepNAVI: A deep learning based smartphone navigation assistant for people with visual impairments. *Expert Syst. Appl.* 2023. vol. 212 no. 118720. p. 118720.
2. Li Q., Li L., Li X., Li C., Zhang L. A new navigation system for the visually impaired based on visual and audio feedback. *Journal of Healthcare Engineering*, 2019. pp. 1–9. DOI: 10.1155/2019/1670586.
3. Aadi F. Z. Proposed real-time obstacle detection system for visually impaired assistance based on deep learning. *Int. J. Adv. Trends Comput. Sci. Eng.* 2020. Vol. 9. No. 4. pp. 6649–6652.
4. Bai J., Liu D., Su G. and Fu Z. A cloud and vision-based navigation system used for blind people. *Proceedings of the 2017 International Conference on Artificial Intelligence Automation and Control Technologies*. pp. 1–6. 2017.
5. Ali H. A., Rao S. U., Ranganath S., Ashwin T. S. and Reddy G. R. M. A Google Glass Based Real-Time Scene Analysis for the Visually Impaired. in *IEEE Access*. 2021. vol. 9. pp. 166351–166369. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3135024.
6. Mukhiddinov M. and Cho J. Smart glass system using deep learning for the blind and visually impaired. *Electronics (Basel)*. 2021. vol. 10. no. 22. p. 2756.
7. Lin B.-S., Lee C.-C., and Chiang P.-Y. Simple smartphone-based guiding system for visually impaired people. *Sensors (Basel)*. 2017. vol. 17. no. 6, p. 1371.
8. See A. R., Sasing B. G., and Advincula W. D. A smartphone-based mobility assistant using depth imaging for visually impaired and blind. *Appl. Sci. (Basel)*. 2022. vol. 12. no. 6. p. 2802.
9. Bai J., Liu Z., Lin Y., Li Y., Lian S., and Liu D., Wearable travel aid for environment perception and navigation of visually impaired people. *Electronics (Basel)*. 2019. vol. 8. no. 6, p. 697.
10. Ganz A., Schafer J. M., Tao Y., Wilson C. and Robertson M. PERCEPT-II: Smartphone based indoor navigation system for the blind. *2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. Chicago. IL. USA. 2014. pp. 3662–3665. doi: 10.1109/EMBC.2014.6944417.
11. Beshley M., Volodymyr P., Beshley H., and Gregus Jr M. A smartphone-based computer vision assistance system with neural network depth estimation for the visually impaired, in *Artificial Intelligence and Soft Computing, Cham: Springer Nature Switzerland*, 2023, pp. 26–36.

#### **Beshley M.I., Pastukh V.A., Beshley H.V., Andrushchak V.S., Klymash M.M. DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT MOBILE SYSTEM OF COMPUTER VISION AND VOICE CONTROL FOR VISUAL IMPAIRED PEOPLE**

*In this article, a smartphone-based intelligent mobile system of computer vision and voice control is developed, specially adapted for visually impaired users. The developed system operates in real time and provides the possibility of using both online and offline modes, expanding the functionality of modern solutions for blind and visually impaired persons. An important aspect is the implementation of a voice control module that uses a combination of embedded and cloud-based APIs of neural network models, which significantly increases the system's accessibility and efficiency. We used advanced technologies such as the MobiNet3 neural network and the MiDaS 2 Lite model for object classification and image depth estimation. We improved traditional visual recognition methods and implemented an iterative asynchronous depth calculation algorithm, which ensured the system's outstanding performance. The test results confirm that the processing time for our interactive algorithm is in the range of 600  $\mu$ s to 2 ms, which is an impressive improvement over traditional recursive methods. We have introduced innovations to the system, including the calculation of image depth coefficients in both horizontal and vertical planes, which represents a significant step of improvement over our previous version. These changes contribute to a more accurate determination of the system's spatial environment, improving its ability to effectively avoid obstacles. In addition, we have implemented the analysis of accelerometer and gyroscope data, which provides important information about the movement and orientation of the device. The accelerometer assesses changes in acceleration, tilt, and rotation to provide a comprehensive view of spatial dynamics. The gyroscope complements this analysis by providing information about angular changes in the device's orientation. These integrated enhancements play a crucial role in functions such as object avoidance, voice control, navigation assistance, and spatial orientation for the visually impaired. The testing proved that the combination of voice control and image recognition allows our system to work in real time and provide users with up-to-date information.*

**Key words:** Smartphone, navigation assistance, computer vision, voice control, intelligent mobile system, neural network, mobility, iterative asynchronous algorithm, image depth.

UDC 004.91

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/11>**Haitan O.M.**

National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”

**Kurylekh A.S.**

National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”

**Havrylko D.D.**

National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”

## GENDER-SENSITIVE ANALYSIS OF THE STATE OF THE IT INDUSTRY IN UKRAINE

*The article considers the issue of gender equality in the IT field. A gender analysis of IT education was conducted, as well as a gender portrait of the IT industry as a whole. The analysis of the gender distribution by IT specialties showed that the largest share of girls is concentrated in the specialties “Applied Mathematics” and “System Analysis”, the smallest one is in the specialty “Computer Engineering”. A survey of female students of higher education institutions specializing in the field of knowledge 12 “Information technologies” is conducted and main reasons for choosing a IT specialty by girls are defined. Measures at the state level aimed at achieving gender equality are identified, in particular joining the Biarritz Partnership initiative, adoption of the National Strategy for Bridging the Gender Pay Gap for the period up to 2030. Activities in secondary and higher schools aimed at popularizing of STEM fields among girls are systematized. It is established that the achievement of gender equality is key Goal 5 for IT companies according to the Sustainable Development Goals (also known as the Global Goals, key tracks of country development adopted at the UN Summit on Sustainable Development), according to which diversity, equity & inclusion strategy is implemented in IT companies. The activities of professional women communities in IT industry are considered (ACM Women, WomenENCourage initiative, Women Who Code, W.Tech, STEM Girls, SheLeadsTech initiative from ISACA Kyiv, etc.), as well as STEM Girls as a community of active girls in schools, colleges and universities in Ukraine. Studies noting a positive relationship between gender, racial and cultural diversity and the financial results of organizations are highlighted. Recommendations for achieving gender equality were formed. Object of research is the gender analysis in the IT-industry. The purpose of the research is to consider gender status of training in IT specialties, gender portrait of an IT specialist and the measures to ensure the gender parity.*

**Key words:** gender equality, IT-industry, education, corporate social responsibility initiatives, Sustainable Development Goals, STEM.

**Introduction.** There is no gender parity in technical sciences, in particular in the IT field. This issue is raised both at the state level within the framework of the Biarritz Partnership initiative and other state programs, and at the level of sectoral corporate social responsibility initiatives. Achieving of gender equality is a priority for IT companies according to the Sustainable Development Goals. Within the framework of achieving this key goal, the company conducts various activities, including popularization of STEM among girls and career guidance meetings of IT professionals with teenage girls, implementation of equal conditions and opportunities in the workplace, cooperation with Women who code and internal projects aimed at the development of women in companies. However, the origins of gender inequality lie at school and are

clearly expressed in the choice of a major for study. Therefore, it is important to study the issue of gender equality, starting with educational institutions.

**Task statement.** *Object of research* is the gender analysis in the IT-industry. *Purpose of research* is to consider gender status of training in IT specialties, gender portrait of an IT specialist and the measures to ensure the gender parity.

**Analysis of recent research and publications.** The problem of gender equality is considered in works of different Ukrainian and foreign authors. These works can be classified according to the topics: gender gap in different subjects areas, in different countries, factors influencing such gap, gender balance in secondary and higher education in STEM courses, differences in perception and self-assessment of different genders, gender inequality

in career opportunities, new models to evaluate and predict gender gap.

**Outline of the main material of the study.**

**High education in IT.** A survey conducted by GlobalLogic among its specialists showed that 20% of specialists believe that it is enough to have a high IT education to start a career in IT, and the other 80% of specialists believe that additional training and practice are necessary [1].

The analysis of the gender distribution by IT specialties shows that the largest share of girls is concentrated in the specialties “Applied Mathematics” and “System Analysis” (35% for bachelor’s degree and 20% for master’s degree), the smallest one is

in the specialty “Computer Engineering” (12% for bachelor’s degree and 9% for master’s degree). The possible reason is that “Computer Engineering” is traditionally considered as male specialty not interesting for women. The average girl percentage for IT specialties: bachelor’s degree – 19%, master’s degree – 12%. The largest number of all entrants chooses the “Computer Science” specialty for admission.

The majority of IT specialists with high IT education graduated in the following specialties: “Computer Science”, “Software Engineering”, “Information Systems and Technologies”, “Computer Engineering”.

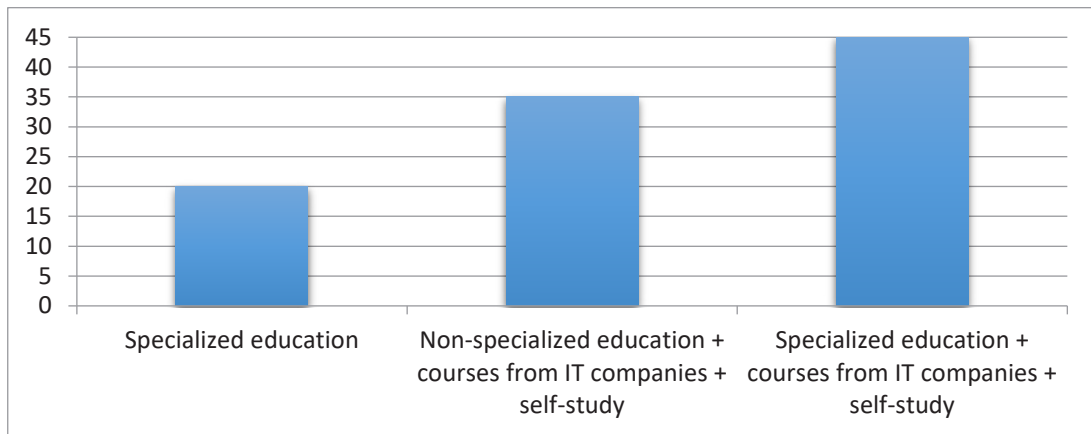


Fig. 1. Necessary background to start a career in IT

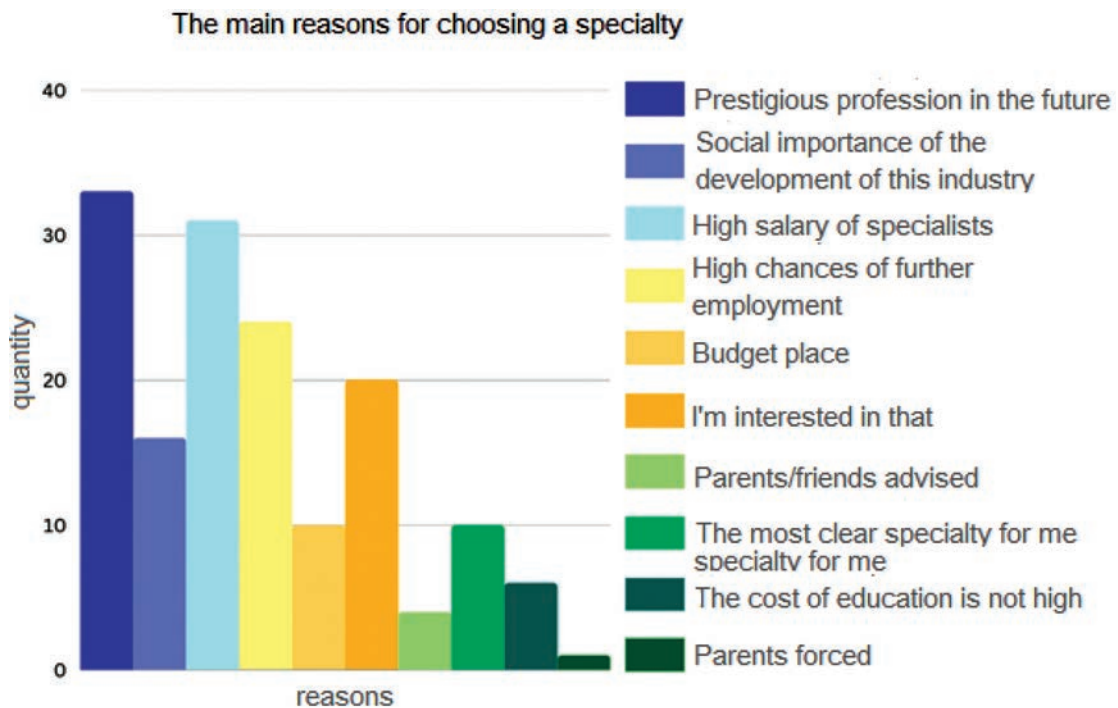


Fig. 2. The main reasons for choosing a IT specialty by girls



A survey of female students of higher education institutions specializing in the field of knowledge 12 “Information technologies”, conducted by the authors of this study, showed that the vast majority of female students chose the specialty for study due to the prestige of the profession and the high salary of specialists.

Indices of gender parity among students of higher educational institutions of Ukraine for bachelor’s and master’s degrees before the start of martial law is shown in fig. 3 [2]. As shown in the figure, the percentage of girls is higher at the master’s degree.

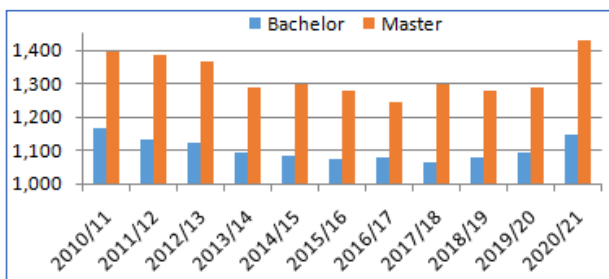


Fig. 3. Indices of gender parity among students of higher educational institutions

Source: ukrstat.gov.ua

**Labor market in IT.** As O. Zelenska noted, while presenting the National Strategy for Bridging the Gender Pay Gap for the period up to 2030 at the UN General Assembly, the average pay gap between men and women is 18.6%. In the IT sector, this gap reaches 75%. The main reasons are the gender gap, less experience of women in IT, working in non-technical positions with lower salaries. However, this indicator is on average of 13% in favor of men in EU countries [3].

According to O. Zelenska, the main factor in reducing the gender gap is Ukraine’s joining the Biarritz Partnership international initiative. However, a significant role in the IT industry is also given to the cooperation with foreign companies for which gender balance is a key issue.

According to the salary survey conducted by a specialized portal for the IT industry DOU, the share of women in the IT industry is 23% (71,8 thousand women against 240,5 thousand men) [4]. This number correlates with the ratio in other EU countries and the USA. Thus, in the USA, the share of women in the IT industry in 2020 was 26% [5]. Every year the number of women in IT increases, so over the past 10 years the number of women has doubled [4].

A slight decrease in the woman share in 2023 may be due to the departure of women abroad because of the full-scale invasion of Russia. But taking into

account the possibility of remote work in the IT field, the trend is expected to continue. According to UNIAN, 41% of IT specialists who left the country after the full-scale invasion plan to return to Ukraine.

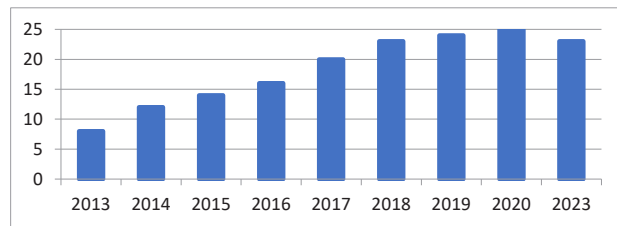


Fig. 4. Percentage of women in IT in 2013–2023 years

Despite the fact that more women than men in IT have a higher education (78% versus 74.5% according to the DOU survey), there is an advantage of men in technical specialization and women in creative ones in IT. The majority of women work in non-technical positions (75%). Among technical specialties, the largest number of women is 36% in QA, which can be explained by a lower entry threshold in manual testing, less desire of men to occupy this position due to the existence of stereotypes about the preference of developers over testers, and lower salaries. Among software developers, who make up half of all IT professionals, only 8% are women. However, it should be noted that the number of female developers has doubled over the past five years. Absolute higher number of women in HR/Recruiting categories – 92% and Customer Success – 73% [4].

**Measures to ensure gender equality.**

– Measures at the state level, in particular joining the Biarritz Partnership initiative, adoption the National Strategy for Bridging the Gender Pay Gap for the period up to 2030. In September 2020, Ukraine has gained the status of a Biarritz Partnership member, an international initiative of equal rights and opportunities for all. Ukraine adopted a number of laws, joined the EPIC international partnership on wage equality and conducts the initiatives aimed at achieving gender equality within the framework of Biarritz Partnership.

In September 2023 the Cabinet of Ministers of Ukraine approved the National Strategy for Bridging the Gender Pay Gap for the period up to 2030 [3], which involves overcoming stereotypes and discrimination based on gender (conducting an educational campaign to increase women’s awareness of their rights and opportunities, gender audits and exchange of best practices for implementing gender equality in the workplace), improving legislation on equal pay, creating conditions for a convenient combination of family and professional duties.

Ukraine is implementing the National project “Diia. Cifrovaosvita” by Ministry of Digital Transformation of Ukraine, which provides the National Online Edutainment Platform “Diia. Osvita” for development of the digital literacy and mastering the new profession [6]. Digital Education Project aims to master digital skills and reduce the digital gap. It is very actual project taking into account more than 5 million displaced people, people who have lost their jobs, and the opportunity to become a switcher in the IT sector. Ministry of Digital Transformation of Ukraine is the organizer and partner of a set of events in gender equality, in particular, the conference “Girls in ICT Day”.

– *Activities in secondary and high schools aimed at popularizing of STEM courses among girls.* The gender gap is caused by stereotypes about male and female occupations that are instilled starting from school. Therefore, measures in secondary and higher education, aimed at getting girls interested in IT education and refuting stereotypes related to programming and technologies, to ensure gender balance in general, are particularly relevant (tab. 1–3).  
 – *Events and professional holidays for women in IT.* Perspektywy Women in Tech Summit (Warsaw, Poland) is an international summit where women – representatives of technical industries

Table 1

**Gender events in secondary education**

Workstreams	Examples	Benefits
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Development of STEM lessons</li> <li>• Development of gender-sensitive lessons</li> <li>• STEM events for school children</li> <li>• Vocational and career guidance events for girls</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teachers’ Competition “Best STEM lesson”</li> <li>• All-Ukrainian Teachers’ Competition “Best Gender-Sensitive STEM Lesson Online”</li> <li>• STEM Girls Camp for school girls</li> <li>• Courses “Python programming”, “UX/UI design” for school girls from “Girls in Tech”</li> <li>• STEM-challenges for institutions that are branches of STEM Girls</li> <li>• Vocational and career guidance meetings with teenage girls from EPAM</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Popularization of STEM education through the development of integrated lessons/activities, the evaluation criteria of which include gender sensitivity and compliance with the principles of STEM education.</li> <li>• Support of using creative methods in education</li> <li>• Girl promotion in the technologies</li> </ul>

Table 2

**Gender events in higher education**

Workstreams	Examples	Benefits
<ul style="list-style-type: none"> <li>• STEM events for students (competitions, Olympiads, hackathons)</li> <li>• Scholarships</li> <li>• Initiatives to raise awareness on gender equality (meetings, webinars, lectures, tours to companies)</li> <li>• Participation in professional associations</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Professional hackathons: FTI_HACK 2022, IT-Revolution’22, std.:hackathon</li> <li>• Three-day Hackathon for female students “Hack4Good: how to get girls interested in tech”</li> <li>• Meetings with female students within “Girls in ICT Day”</li> <li>• Kharkiv Information &amp; Communication Technologies ACM-Women Chapter (ACM Student Membership)</li> <li>• Scholarship support for female students and post graduate students in Computer Science to participate in scientific conferences</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Professional development of students in STEM courses</li> <li>• Girl promotion and awareness in technologies</li> <li>• Access to the platform of free communication with community, to online courses, e-books and videos, digital scientific library, to the center of career and employment, scholarship support</li> </ul>

Table 3

**Gender events in professional education**

Workstreams	Examples	Benefits
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Courses in gender equality</li> <li>• Free professional courses</li> <li>• Educational institutions are branch offices of STEM Girls</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Course “Gender equality in educational institution: theory and practice of implementation” from Educational Platform Vseosvita</li> <li>• Course “Women and men: gender for all” (Educational Platform Prometheus)</li> <li>• Educational Platforms Coursera, Udemy, Prometheus,</li> <li>• Training courses of EPAM, SoftServe, QATestLab, etc.</li> <li>• Program Wildau-Kharkiv IT Bridge “Digital Ukraine: Ensuring academic success in times of crisis (2022) – access to the IT-courses of 60 best Ukrainian teachers</li> <li>• Course “Introduction in IT” for women from Beetroot Academy.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Theoretical background of gender equality and practical mechanisms of creating a gender-sensitive educational institution</li> <li>• Mastering hard skills in IT for all genders for greater competitiveness in the labor Possibility to become IT switcher</li> <li>• Possibility for women to grow and realize their potential in IT field.</li> </ul>

Table 4

**Gender diversity strategy in the workplace**

Workstreams	Examples	Benefits
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Implementation of equal conditions and opportunities in the workplace.</li> <li>• Continuous collection and analysis of statistical data on age and gender of employees in order to ensure diversity and improve inclusion.</li> <li>• Cooperation with professional associations</li> <li>• Internal projects aimed at women development in company</li> <li>• Individual participation in professional associations</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Companies in the “IT Ukraine” Association, that have joined gender equality goal ensure equal conditions and opportunities within company</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensuring gender diversity in IT companies</li> <li>• Increasing the number of women in IT</li> <li>• Financial benefits of women involvement in IT companies</li> </ul>

can communicate, attend lectures of authoritative speakers and thematic workshops, meet with leaders of the world’s leading high-tech companies, and also hear inspiring success stories from the most influential women in technology. Female IT students from Ukraine can receive a grant for free participation in the summit, travel and accommodation.

International Girls in ICT Day is a global initiative to raise awareness among girls about the importance of digital skills and encourage them to get education and build career in ICT. “STEM Girls” joined the celebration of the “International Girls in ICT Day” in Ukraine and held an online conference “Girls in ICT Day” to encourage increase in number of girls in information and communication technologies. During the online conference, the stories of successful inspiring women were demonstrated, an interactive workshop, quizzes and competitions were held, and recommendations were given on training, career and leadership in ICT. “Girls in ICT Day” took place within the framework of the project "Springboard to Equality", the joint Swedish-Ukrainian project supported by UNFPA, the UN fund and implemented to withdraw from gender stereotypes in education and at work. “Girls in ICT Day” contributes to overcome the gender digital gap and gender stereotypes when choosing a future career [7].

– *Implementation of diversity, equity & inclusion strategy in IT companies.*

In March 2021, the Association “IT Ukraine”, which brings together the largest Ukrainian IT companies, joined the implementation of the Sustainable Development Goals (SDGs) adopted by the United Nations, in particular Goal 5: Gender Equality. Members of the Association, including Luxoft, EPAM, Sigma Software, TECHIIA, Intellias, SoftServe, Infopulse, ELEKS, Itera, Beetroot, implement corporate social responsibility projects, educational and social projects focused on the gender diversity issue. For instance, ERAM conducts vocational and career guidance meetings with teenage girls, Sigma Software popularizes the STEM (science,

technology, engineering and math) field among girls, Beetroot ensures constant women promotion in the technologies through scholarships and a wide range of initiatives to increase gender awareness. All companies that have joined the gender equality goal ensure introduction of the equal conditions and opportunities within the company (tab. 4). Some of them publish reports on the gender ratio in their teams and events aimed at gender equality [3].

Research on gender diversity conducted by the MacKinsey Institute [8] and the Peterson Institute for International Economics [9] demonstrated a positive relationship between gender, racial and cultural diversity and performance of the organization. In particular, MacKinsey analyzed the data of 366 companies from Canada, Latin America, the United Kingdom, and the USA and noted a 15% improvement in financial indicators for companies in the top quartile with a high level of gender diversity. Peterson Institute researchers based on data analysis of 21,980 firms from 91 countries suggest that the presence of women in corporate leadership positions may improve firm performance. However, it should be noted that recruitment in IT based on the principle of diversity and vacancies "for women only" as well as any quotas, carry the threat of discrimination, reluctance of quality specialists to be hired according to quotas, etc. Research by the Peterson Institute also found no impact of board gender quotas on company performance.

*Women unite in professional communities* (ACM Women, WomenENCourage initiative, Women Who Code, W.Tech, STEM Girls, SheLeadsTech initiative from ISACA Kyiv), where women inspire and support each other to advance in technical majors. The main goals of professional communities are women engagement into computing, opportunity to become a part of professional associations, free communication platform for the community, collaboration of IT business and education representatives, coordination of activities, additional employment opportunities, scholarship support for women students and post



**Fig. 5. Likelihood of financial performance by diversity quartiles, %**  
 Source: MacKinsey diversity database

graduates in IT, access to educational and scientific resources, access to the best IT-events.

STEM Girls is a community of active girls in schools, colleges and universities in Ukraine, which unite in order to attract more and increase the number of girls in STEM fields. The main goals of the “STEM Girls” branches are contribution of the educational institution to the development of STEM in Ukraine; involvement the girls of educational institution in STEM movement (participation in events initiated by STEM Girls, organization of STEM activities); informing the public and the STEM community about their achievements.

**Conclusions.** The work considers the analysis of the state of the IT industry in Ukraine in the context of gender equality ensuring. Despite the positive trend towards an increase of the quantity of women in Ukrainian IT field the gender gap still persist.

In order to achieve gender parity in Ukraine, a number of activities aimed at overcoming gender stereotypes,

popularizing STEM disciplines among girls, attracting women to the field of computer technology, promoting women’s knowledge and interest in science and IT are being held. There are IT companies and organizations that promote the involvement of women in computing at the university level and offer student events and projects aimed at improving the working and learning environment for women in computing. Participation in such events motivates women to join initiatives and develop professionally.

To decrease gender gap one should note such recommendations: more active career guidance and popularization of STEM courses among girls; increase of number of Ukrainian IT companies that join the implementation of the Sustainable Development Goals and their involvement in the initiatives aimed at popularization of women in tech; demonstration of the stories of successful women in tech as example for their young colleagues; equal gender work and salary conditions.

#### Bibliography:

1. Які IT-спеціальності є найперспективнішими на думку IT-фахівців – опитування GlobalLogic. URL: <https://speka.media/yaki-it-specialnosti-je-naiperspektivnisimi-na-dumku-it-faxivciv-opituvannya-globallogic-9wl8nv> (accessed: 20.09.2023).
2. Державна служба статистики України. URL: [ukrstat.gov.ua](http://ukrstat.gov.ua) (accessed: 20.09.2023).
3. Уряд схвалив Національну стратегію подолання гендерного розриву в оплаті праці в Україні на період до 2030 року. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/uriad-skhvalyv-natsionalnu-stratehiu-podolannia-hendernoho-rozryvu-v-oplati-pratsi-v-ukraini-na-period-do-2030-roku> (accessed: 20.09.2023).
4. DOU. URL: <https://dou.ua> (accessed: 20.09.2023).
5. The State of Women in Tech. URL: <https://www.dreamhost.com/news/announcements/state-of-women-in-tech/> (accessed: 20.09.2023).
6. Нові навички і професії: Міністерство цифрової трансформації запустило едьютейнмент-платформу «ДІЯ.ОСВІТА». URL: <https://mon.gov.ua/ua/news/novi-navichki-i-profesiyi-ministerstvo-cifrovoyi-transformaciyi-zapustilo-edyutejment-platformu-diy-aosvita> (accessed: 20.09.2023).

7. Міжнародний День дівчат в ІКТ. URL: <https://csr-ukraine.org/news/international-girls-in-ict-day/> (accessed: 20.09.2023).
8. Hunt D.V., Layton D., and Prince S. Why diversity matters? URL: <https://www.mckinsey.com/business-functions/organization/our-insights/why-diversity-matters> (accessed: 20.09.2023).
9. Noland M., Moran T., and Kotschwar B.R. Is Gender Diversity Profitable? Evidence from a Global Survey. URL: <https://www.piie.com/publications/working-papers/gender-diversity-profitable-evidence-global-survey> (accessed: 20.09.2023).

### **Гайтан О.М., Курилех А.С., Гаврилко Д.Д. ГЕНДЕРНОЧУТЛИВИЙ АНАЛІЗ СТАНУ ІТ ГАЛУЗІ В УКРАЇНІ**

*У статті розглядається питання гендерної рівності в ІТ-сфері. Проведено гендерний аналіз ІТ-освіти, побудовано гендерний портрет ІТ-індустрії в цілому. Аналіз гендерного розподілу за ІТ-спеціальностями показав, що найбільша частка дівчат зосереджена на спеціальностях «Прикладна математика» та «Системний аналіз», найменша – на спеціальності «Комп'ютерна інженерія». Проведено опитування студенток вищих навчальних закладів галузі знань 12 «Інформаційні технології» та визначено основні причини вибору дівчатами ІТ-спеціальності. Визначено заходи на державному рівні, спрямовані на досягнення гендерної рівності, зокрема приєднання до ініціативи «Біарріц партнерство», прийняття Національної стратегії подолання гендерного розриву в оплаті праці на період до 2030 року. Систематизовано діяльність у середній та вищій школах, спрямовану на популяризацію STEM-дисциплін серед дівчат. Встановлено, що досягнення гендерної рівності є ключовою метою 5 для ІТ-компаній відповідно до Цілей сталого розвитку (відомих як Глобальні цілі, ключові напрямки розвитку країни, прийняті на саміті ООН зі сталого розвитку), згідно якої в ІТ-компаніях реалізується стратегія різноманітності, справедливості та інклюзії. Розглянуто діяльність професійних жіночих спільнот в ІТ-галузі (ACM Women, ініціатива WomenENCourage, Women Who Code, W.Tech, STEM Дівчата, SheLeadsTech ініціатива від ISACA Київ тощо), а також діяльність STEM Дівчат як спільноти активних дівчат у школах, коледжах та університетах України. Виділено дослідження, які відзначають позитивний зв'язок між гендерною, расовою та культурною різноманітністю та фінансовими результатами діяльності організації. Сформовано ряд рекомендацій щодо досягнення гендерної рівності. Об'єктом дослідження є гендерний аналіз в ІТ-індустрії. Мета дослідження – розглянути гендерний статус підготовки ІТ-спеціальностей, гендерний портрет ІТ-фахівця та заходи щодо забезпечення гендерного паритету.*

**Ключові слова:** гендерна рівність, ІТ-індустрія, освіта, ініціативи корпоративної соціальної відповідальності, цілі сталого розвитку, STEM.

**Гладка О.М.**

Національний університет водного господарства та природокористування

**Карпович І.М.**

Національний університет водного господарства та природокористування

**Сех О.Б.**

Національний університет водного господарства та природокористування

## ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА БУДІВЕЛЬНОГО МАГАЗИНУ

*Статтю присвячено дослідженню процесу розробки інформаційної системи на прикладі системи для підтримки роботи будівельного магазину. Ефективне управління будівельним магазином потребує сучасного програмного забезпечення, що є інструментом для підтримки різних виробничих процесів, таких як управління товарами, продажами, касою, клієнтами та звітністю. Проблемами, що потребують вирішення, є великий обсяг інформації, яку потрібно швидко опрацювати, організація ефективного пошуку необхідної інформації, збереження та захист даних, зокрема, фінансових. Виявлені проблеми, що виникають при управлінні будівельним магазином, свідчать про необхідність використання сучасних інформаційних технологій в даній сфері.*

*Проведено дослідження та аналіз предметної області, розглянуто основні функціональні характеристики, а також переваги і недоліки схожих інформаційних систем і аналогічного програмного забезпечення, виконано UI/UX аналіз розроблюваної інформаційної системи, що дозволило визначити оптимальний функціонал і основні характеристики користувацького інтерфейсу системи.*

*Розроблено інформаційну систему для обліку роботи будівельного магазину, що передбачає проектування та створення бази даних, розробку відповідних форм і функціональних модулів інформаційної системи. Для проектування інформаційної системи використано UML діаграми, що моделюють відповідні етапи роботи і візуалізують процеси розробки функціональних модулів системи. Засобом розробки обрано мову програмування C#, яка надає безкоштовний доступ до багатьох бібліотек, має різноманітний функціонал, а також можливість створення інтерфейсу за допомогою фреймворку Windows Forms.*

*Створена функціональна інформаційна система дозволяє оптимізувати процеси роботи будівельного магазину, забезпечує швидкий доступ до необхідної інформації, спрощує процеси керування продажами, а також допомагає у веденні звітності і прийнятті управлінських рішень.*

**Ключові слова:** інформаційна система, база даних, будівельний магазин, автоматизація, Windows Forms, C#.

**Постановка проблеми.** Інформаційні системи стали необхідною складовою в різних сферах діяльності, виконуючи важливу роль. Вони набули великого значення у керуванні бізнесом, державними структурами, освітою, у виробництві, управлінні банківськими системами та іншими галузями. Їх використовують для збору, обробки, управління ресурсами організації чи підприємства, що забезпечує прийняття кращих рішень та високу продуктивність [1].

У період повоєнної відбудови в Україні, на нашу думку, великого розвитку потребуватиме будівельна галузь та торгівля будівельними матеріалами. Після війни вся країна буде відбудовувати зруйновані будинки, дороги, будувати нові будівлі, і саме будівельні магазини стануть ключовими центрами забезпечення матеріалами та інструментами.

Важливим завданням, зокрема, є ефективне управління будівельним магазином. Щоб досягти успіху і забезпечити стабільне функціонування підприємства, потрібні ефективні інструменти для підтримки різних процесів, таких як управління товарами, продажами, касою, клієнтами та звітністю.

Однією з проблем є великий обсяг інформації, яку потрібно швидко опрацювати, що ускладнює ведення обліку товарів та продажів. Старі методи роботи з документами та ручний чи частково ручний облік вже не відповідають сучасним вимогам ефективності та швидкості роботи. Це призводить до затримок у виконанні продажів, непродуктивного використання ресурсів та погіршення якості обслуговування клієнтів [2].

Тому розробка та впровадження інформаційної системи підтримки роботи будівельного мага-

зину є дуже важливими та актуальним завданням. Така система допомагає підвищити ефективність управління діяльності підприємства, забезпечити швидкий доступ до необхідної інформації та полегшити процес керування продажами, товарами, звітністю, дозволяє покращити якість обслуговування клієнтів.

Проблема розробки якісної і ефективної інформаційної системи полягає у необхідності дослідження UI/UX характеристик створюваної системи, визначенні оптимального функціоналу, проектуванні відповідної бази даних, виборі інструментів розробки тощо [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для будівельних магазинів важлива взаємодія з клієнтами та надання якісного обслуговування: консультування, допомога в підборі матеріалів, швидкий продаж, доставлення товарів. Лише ті компанії, які забезпечують високий рівень обслуговування клієнтів, здатні залучити більше клієнтів [4].

Однією з ключових функцій будівельних магазинів є забезпечення належного контролю і наявності товарів. Вони повинні мати товарів на тижні вперед, щоб задовольняти потреби клієнтів, уникати недостачі товарів. Для того, аби зменшити втрати, оптимізувати витрати та забезпечити швидке постачання товарів в магазин потрібне ефективне керування товарами [5].

Для успішної роботи будівельного магазину необхідно мати ефективну систему керування будівельного магазину. Автоматизована система управління, електронний облік товарів, замовлень та інші інструменти допомагають покращити ефективність, точність та швидкість обробки процесів у будівельних магазинах [6]. Однак при керуванні будівельним магазином та використанні інформаційних систем часто виникають деякі проблеми [7].

Оскільки головне завдання будь-якого магазину – отримання прибутку, фінансовий облік є однією з важливих складових в управлінні будівельним магазином. Фінансові операції дають змогу забезпечити стабільність, контроль і прибутковість підприємства. Без автоматизації фінансового обліку та фінансових операцій це може призвести до багатьох проблем, які важко вирішити, а також може негативно вплинути на фінансову стабільність і продуктивність самого магазину [8].

**Постановка завдання.** Виявлені проблеми, що виникають при управлінні будівельним магазином, свідчать про необхідність використання сучасних інформаційних технологій в даній сфері.

Автоматизовані системи управління товарами, продажами та обслуговуванням клієнтів, а також фінансовими операціями можуть в суттєвій мірі спростити процеси керування та підвищити ефективність роботи будівельного магазину [9].

**Метою** даної роботи є дослідження та розробка інформаційної системи підтримки роботи будівельного магазину. Для досягнення цієї мети виконані такі завдання як аналіз та дослідження предметної області; вивчення систем-аналогів [10]; проектування і розробка бази даних для зберігання інформації про товари, продажі, клієнтів та звітність будівельного магазину; розробка користувацького інтерфейсу з урахуванням UI/UX підходу до дизайну інформаційних систем; реалізація функціоналу системи з використанням платформи Windows Forms та мови програмування C#.

**Виклад основного матеріалу.** Проведені дослідження дозволили визначити такі головні елементи розробленої інформаційної системи як керування товарами, керування замовленнями, керування клієнтами, керування продажами, керування фінансовими операціями.

Одна з важливих проблем, з якими стикаються будівельні магазини, є керування товарами. Деякі основні аспекти та проблеми керування товарами в будівельному магазині включають наступне:

- нестача або зavelика кількість товарів, що можуть мати негативний вплив на діяльність будівельного магазину. Нестача товарів може призвести до втрати клієнтів чи продажів; надлишки товарів спричиняють зайві затрати на зберігання, що у підсумку приведе до фінансових втрат;
- неправильна інформація про наявність товарів. Відсутність точної інформації про товари може спричинити до неправильних замовлень, які своєю чергою несуть магазину репутаційну втрату. Неактуальна або неповна інформація про наявність товарів може бути результатом ручного обліку (відсутності інформаційної системи) чи помилок у внесених даних;
- погане планування про потреби та постачання. Недооцінка або переоцінка потреб призведе до наслідків з товарами. Недостатнє планування може створити проблеми з неправильним використанням ресурсів, затримки з постачаннями;
- повільна реакція на зміни потреб клієнтів. Магазин повинен бути наготові для реагування на зміни потреб клієнтів та забезпечити швидку появу необхідних товарів у заданий термін. Повільна реакція на зміни попиту може призвести

до збитків від продажу, втрату конкурентоспроможності та відтік клієнтів.

Не менш важливими елементами управління будівельним магазином є процеси замовлення та постачання товарів. Неясність в цих процесах може призвести до низки проблем, які в перспективі значно ускладнюють роботу магазину і впливають на подальшу роботу з клієнтами:

- затримки в постачанні. Відсутність інформаційної системи для поставок та слабка комунікація з постачальниками можуть призвести до проблем у постачанні товарів. Несвоєчасне доставлення матеріалів та інструментів до магазину може призвести до перебоїв у виконанні замовлень клієнтів, втрати довіри та незадоволення з їх боку;

- неправильний облік товарів. Така ситуація виникає, коли система показує, що товар є на складі, але насправді його немає. Також можуть виникнути випадки, коли товари є на складі, але система вважає їх відсутніми;

- помилки в комунікації: Ручне введення даних та обмін інформацією замовлення з постачальниками можуть призвести до помилок в комунікації.

Важливим в діяльності будівельних магазинів є також управління клієнтами, що потребують пошуку ефективних рішень:

- додавання, збереження та оновлення клієнтських даних. Однією з основних проблем є збереження та оновлення клієнтської інформації. Зростаюча тенденція в базі клієнтів і потреба у збереженні детальних даних про них (контактна інформація, ПІБ тощо) може стати складною задачею без використання відповідної інформаційної системи. Відсутність призведе до втрати часу на пошук у ручному вигляді клієнтів з детальною інформацією. Рішення полягає в тому, щоб створити інформаційну систему, яка дозволить зберігати та оновлювати інформацію про клієнтів точно та швидко, що забезпечить продуктивність будівельного магазину;

- швидке обслуговування. Для забезпечення високого рівня обслуговування клієнтів необхідно розробити детальні процедури та інструкції, особливо якщо працівники не мають достатнього досвіду або працюють з інформаційною системою вперше. Одним із необхідних рішень для забезпечення швидкого обслуговування є використання торгових касових апаратів для ефективної обробки платежів. Крім того, рішенням є інформаційна система підтримки будівельного магазину, яка оптимізує процеси обслуговування. Для

співробітників така практика дозволяє вдосконалювати свої навички обслуговування, системного адміністрування та спілкування з клієнтами.

Загальна структура створеної інформаційної системи наведена на рис. 1 і містить такий функціонал:

- авторизація користувача;
- можливість додавати, редагувати та видаляти інформацію про товар;



Рис. 1. Загальна схема інформаційної системи

- функціонал для поставок, тобто накладних, що прибули, друк накладних, пошук за датою і заданими ключовими словами;
- інформація про постачальників;
- функціонал для продажу товару, що включає пошук товару за різними параметрами, можливість додавання знижки на товар;
- функціонал для звітності про щоденні продажі;
- збереження інформації про оплату;
- інформація про корпоративних клієнтів;
- інформація про співробітників магазину.

Діаграма класів (рис. 2) показує бізнес-логіку системи.

Проектування інформаційної системи здійснено шляхом побудови відповідних UML діаграм, що моделюють і візуалізують процеси розробки програмного забезпечення різних виробничих етапів, зокрема, діаграми класів (рис. 3), діаграм



компонентів, прецедентів, активностей та послідовностей [11–13].

Для реалізації інформаційної системи вибрано мову програмування C#, оскільки вона надає безкоштовний доступ до багатьох бібліотек, має різноманітний функціонал, а також можливість створення інтерфейсу за допомогою фреймворку Windows Forms. Для реалізації SQL-запитів у Windows Forms використано бібліотеку System.Data.OleDb, що призначена для встановлення з'єднання з базою даних та виконання SQL-запитів [14].

Реалізовано такі основні можливості інформаційної системи:

- керування процесами товарів: система дозволяє вести детальний облік товарів, організацію процесу закупівлі, створення накладної, що оформляє операції надходження товарів від постачальників і повернення товарів від покупців, здійснення продажів та отримання повідомлення про недостатню кількість товару;
- керування процесами продажів: проведення розрахунків у готівковій та безготівковій формі, реєстрація продажів та оплати товарів, створення звітів та аналіз продажів для прийняття виробничих рішень;

- касове обслуговування: система має вбудований касовий модуль для зручного розрахунку з покупцями, приймання платежів і виконання фінансових операцій;
- клієнтська база даних: завдяки системі можна виконувати різні операції з базою даних клієнтів;
- звітність і аналітика: система надає можливість згенерувати різноманітні звіти про продажі, товари, прибуток.

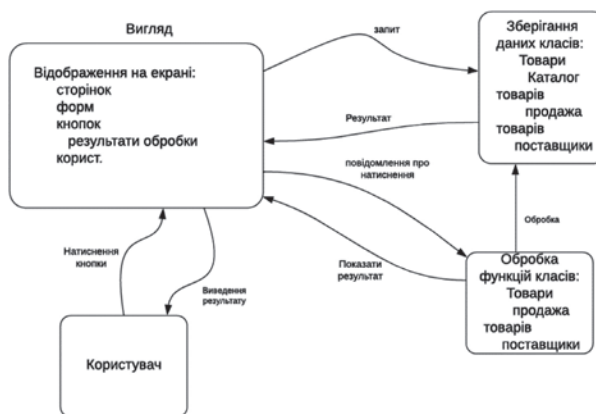


Рис. 2. Архітектура інформаційної системи

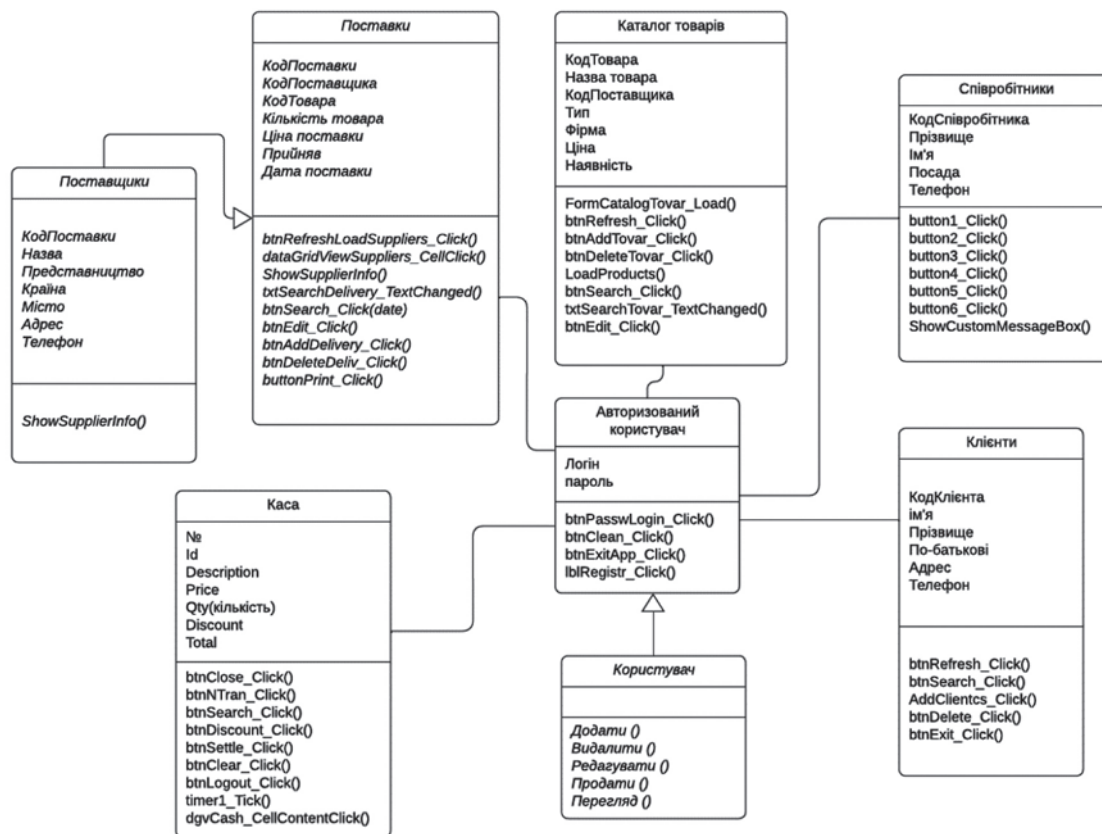


Рис. 3. Діаграма класів інформаційної системи

**Висновки.** Сучасні інформаційні системи мають значний вплив на різноманітні сфери людської діяльності. Впровадження інформаційних систем дозволяє уникнути проблем, пов'язаних з паперовою роботою, а також зменшити ризик помилок, які можуть призвести до втрати репутації та прибутковості [15]. Для ефективного функціонування підприємства, зокрема, будівельного магазину, необхідна швидка та точна обробка різних процесів, таких як продаж товару, приймання поставок, реалізація продажів тощо.

Розроблена інформаційна система підтримки роботи будівельного магазину забезпечує збереження інформації, можливість перегляду та пошуку, функціонал для продажу товару покуп-

цям, різні опції для обробки даних та звітності з продажів. Інтерфейс системи простий і зрозумілий, що дозволяє користувачам швидко освоїти його за обмежений час.

Для забезпечення оптимального використання інформаційної системи в будівельному магазині, який може мати обмежений обсяг та ресурси, можна використовувати реляційну базу даних Access. Недоліки, які вона має перекриваються її простотою, швидкістю навчання та легкістю керування. Для покращення інформаційної системи, а також для розробки Web версії системи, необхідно використовувати базу даних на основі MySQL, оскільки вона має більші можливості у роботі з даними та підходить для великого обсягу інформації.

### Список літератури:

1. Плескач В. Л., Затонацька Т. Г. Інформаційні системи і технології на підприємствах: підручник. К.: Знання, 2011. 718 с.
2. Томашевський О. М., Цегелик Г. Г., Вітер М. Б., Дудук В. І. Інформаційні технології та моделювання бізнес-процесів: навч. посіб. для студентів вищ. навч. закл. К.: Центр уч. літ-ри, 2012. 296 с.
3. Kuz, M. V., Nezamai, B. S., Rovinskyi, V. A., & Podubynska, N. D. (2023). Software Quality Forecasting Based on Requirements Quality Analysis. *Methods and Devicis of Quality Control*, (1(50)), 101–112. [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2023-1\(50\)-101-112](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2023-1(50)-101-112)
4. Simplilearn. Quality Management interview Guide | Quality. URL: <https://www.simplilearn.com/25-quality-management-interview-questions-answers-guide-pdf> (дата звернення 02.11.2023)
5. EEMERITUS. What is Information System? Definition, Examples, & Facts. URL: <https://emeritus.org/in/learn/information-system/> (дата звернення 02.11.2023)
6. Berkeley Extension. Blog Category: UX/UI. URL: <https://bootcamp.berkeley.edu/blog/category/uxui/> (дата звернення 02.11.2023)
7. NEXTTECHNOLOGY. IT Consultants for the global IT Advisory Company URL: <https://nexttechnology.io/case-study/it-consultants-for-the-global-it-advisory-company/> (дата звернення 02.11.2023)
8. Rentsoft cloud technologies. BAS Малий бізнес. ПРОФ (BAS small business). URL: <https://rentsoft.ua/catalog/bas-maliy-biznes-prof/> (дата звернення 02.11.2023)
9. Гужва В. М. Інформаційні системи і технології на підприємствах: Навч. пос. К.: КНЕУ, 2001. 400 с.
10. Ukrainian Intelligent Technology. BAS Малий бізнес. URL: <https://uit.kiev.ua/product/bas-malij-biznes/> (дата звернення 02.11.2023)
11. Miro. What are UML diagrams, and how can you use them? URL: <https://miro.com/blog/uml-diagram/> (дата звернення 02.11.2023)
12. Visual Paradigm. What is Unified Modeling Language (UML)? URL: <https://www.visual-paradigm.com/guide/uml-unified-modeling-language/what-is-uml/> (дата звернення 02.11.2023)
13. IBM. Creating use-case diagrams. URL: <https://www.ibm.com/docs/en/rsar/9.5?topic=diagrams-creating-use-case> (дата звернення 02.11.2023)
14. Microsoft Ignite. Клас Ole DbConnection. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/api/system.data.oledb.oledbconnection?view=dotnet-plat-ext-7.0> (дата звернення 02.11.2023)
15. Karpovych, I. M., Hladka, O. M., & Ustymchik, M. (2019). FEATURES OF MODELING THE MARKET OF SOFTWARE. *Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International Scientific and Practical Conference*, (3), 139–140. <https://doi.org/10.31713/MCIT.2019.02>

### **Hladka O.M., Karpovich I.M., Sekh O.B. INFORMATION SYSTEM OF THE BUILDING STORE**

*The paper is devoted to the study of the process of developing an information system using the example of a system to support the work of a building store. Effective management of a building store requires modern software, which is a tool to support various production processes, such as management of goods, sales, cash register, customers and reporting. The problems that need to be solved are a large volume of information that needs to be processed quickly, the organization of an effective search for the necessary information, the preservation and protection of data, in particular, financial data. Identified problems that arise in the management of a building store indicate the need to use modern information technologies in this field.*

*The research and analysis of the subject area was conducted, the main functional characteristics were considered, as well as the advantages and disadvantages of similar information systems and similar software, the UI/UX analysis of the developed information system was performed, which made it possible to determine the optimal functionality and main characteristics of the user's interface of the system.*

*We have developed an information system for accounting for the work of a building store, which involves the design and creation of a database, the development of appropriate forms and functional modules of the information system. UML diagrams were used to design the information system, simulating the relevant work stages and visualizing the development processes of the system's functional modules. The C# programming language was chosen as the development tool, which provides free access to many libraries, has a variety of functionality, and also the ability to create an interface using the Windows Forms framework.*

*The created functional information system allows you to optimize the work processes of the hardware store, provides quick access to the necessary information, simplifies sales management processes, and also helps in reporting and making management decisions.*

**Key words:** *information system, database, building store, automation, Windows Forms, C#.*

**Довбиш І.О.**

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

**Муравйов О.В.**

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

## ЗАЛЕЖНІСТЬ АЛГОРИТМУ ВИБОРУ ЛІДЕРА РОЮ ВІД РІВНЯ АВТОНОМНОСТІ БПЛА

*Застосування БпЛА значно прискорює процес виконання задач у різних сферах життєдіяльності людини, одночасно підвищуючи якість отриманого результату. Дрони дозволяють економити фінансові ресурси, зберігати життя та здоров'я людей. Наразі БпЛА використовують у найрізноманітніших галузях: військова справа, агропромисловість, цивільна авіація, інфраструктура, будівництво, медіа сфера та сфера розваг. Зважаючи на ефективність застосування БпЛА, стрімко зростають вимоги до них та складність задач, що на них покладається. Іноді поставлені завдання неможливо або надзвичайно ресурсозатратно виконати лише за допомогою одного дрона, що обумовлює необхідність використання роїв БпЛА.*

*Рої БпЛА можуть бути централізованими та децентралізованими. Різниця полягає у взаємодії між членами групи та задачами, що вони виконують. У централізованому рою керування здійснюється через один дрон, за яким слідує інші. У свою чергу, БпЛА децентралізованого рою самостійно приймають рішення та діють окремо задля досягнення спільної мети.*

*Централізовані рої дронів є найлегшими для побудови архітектури та взаємодії з оператором або наземною системою при необхідності. Керування роєм за допомогою БпЛА-лідера економить енергоресурси та зберігає цілісність групи. Також дану архітектуру можна використовувати для БпЛА різного рівня автономності. Єдиним недоліком централізованого рою є можливість втрати лідера, що призводить до втрати усього рою.*

*У даній статті запропоновано алгоритми вибору лідера групи БпЛА. Вони допомагають зберегти рій при втраті контакту або технічній несправності попереднього дрона-лідера, що дозволить продовжити виконання поточного завдання та зекономити ресурси. Розглянуті алгоритми для трьох різних типів взаємодії між дронами у рою, що залежать від рівня автономності, а отже, й можливостей застосування БпЛА. Запропоновані у статті алгоритми побудовані з урахуванням необхідності економії часу на прийняття рішень, забезпечення найменшої кількості переданої інформації та мінімізації процесів обробки отриманих сигналів, що дозволить також зекономити енергоресурси. Проаналізовані необхідні умови, яким має відповідати обраний БпЛА-лідер.*

**Ключові слова:** *безпілотний літальний апарат, рій БпЛА, алгоритм вибору лідера, вибір лідера, централізований рій БпЛА.*

**Постановка проблеми.** Виконання деяких актуальних на сьогоднішній день завдань вимагає використання рою БпЛА, що значно пришвидшує процес досягнення поставленої мети, наприклад, дозволяє охоплювати більшу територію та переміщувати більшу кількість вантажу за певний інтервал часу.

Одним із найлегших у реалізації типів роїв БпЛА є централізований рій, що керується за допомогою дрона-лідера. Побудова такого рою є можливою для БпЛА різного рівня автономності, а також для груп дронів, що складаються з різних типів БпЛА [1, с. 200–202]. Дана архітек-

тура рою зменшує кількість енергії та часу, що витрачаються на прийняття рішень або забезпечення комунікації між наземною станцією та усім роєм. За все вищеперераховане у централізованому рою відповідає лідер.

Ключовим недоліком рою БпЛА, керування якого здійснюється за допомогою лідера, є можливість втрати дрона-лідера. Наслідком може бути втрата усього рою, що унеможливує подальше виконання завдання та призводить до великих економічних збитків. Для вирішення даної проблеми необхідно забезпечити алгоритм вибору альтернативного лідера, яким керуватимуться БпЛА

в групі, унаслідок втрати контакту з попереднім лідером. Процес вибору нового лідера також має відбуватися з мінімальними часовими витратами та шляхом передачі мінімальної кількості інформації між членами рою.

Вибір лідера рою БПЛА не може здійснюватися випадково. Надзвичайно важливим є врахування положення дрона відносно інших членів групи, їх залишкової енергії, технічного стану БПЛА.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Архітектура централізованого рою БПЛА, у якому керування здійснюється через дрона-лідера, використовується сьогодні у багатьох сферах. Подолання головної вразливості даної архітектури – можливості втрати лідера під час виконання поставленої задачі – реалізується застосуванням різних алгоритмів вибору альтернативного БПЛА-лідера за умови втрати попереднього [2, с. 16–51]. В основу даного механізму можна покласти алгоритми досягнення консенсусу у розподілених системах. У матеріалі [3, с. 93–97] викладений варіант реалізації протоколу вибору лідера у рою БПЛА на основі алгоритму Raft з урахуванням вимог, яким має задовольняти новий дрон-лідер. Застосування даного протоколу передбачає високу ймовірність правильного вибору БПЛА-лідера та збереження відповідальності за координацію дій групи дронів протягом значного періоду часу.

Алгоритм вибору лідера рою має задовольняти наступним параметрам [4, с. 9]:

- унікальність: наявність лише одного БПЛА, що вважає себе лідером;
- згода: усі члени рою знають, який саме БПЛА є лідером;
- масштабування: кількість повідомлень між членами групи при реалізації процесу вибору лідера має бути обмеженою та корегуватися відповідно до кількості БПЛА у рою.

Вказані параметри можуть гнучко застосовуватися до роїв БПЛА різних рівнів автономності.

Архітектура рою БПЛА та спосіб комунікації між його членами залежать від функціоналу окремих дронів, а отже різнитися будуть й алгоритми вибору лідера в залежності від складу групи.

**Метою статті** є аналіз залежності між алгоритмом вибору лідера у рою та рівнем автономності БПЛА-членів групи, розробка алгоритмів, що відповідають функціональним можливостям БПЛА, та урахування можливих проблем при їх практичній реалізації.

**Виклад основного матеріалу.** Для реалізації об'єднання в рій БПЛА мають відповідати характеристикам дрона принаймні 2 рівня автономності

[5, с. 159]. Автоматизованими мають бути процеси зльоту, посадки та польоту по заданій траєкторії. При забезпеченні цього функціоналу стає можливою побудова рою БПЛА, у якому кожен наступний дрон слідує і повністю копіює дії попереднього. Керування такою групою здійснюється через БПЛА-лідера, що задає траєкторію руху усіх інших дронів-членів рою.

При використанні такої архітектури рою БПЛА, передача статусу лідера має відбуватися відповідно до того, як дрони були розташовані в архітектурі групи при її запуску. Тобто, відповідно до рис. 1, при втраті БПЛА-лідера його статус передається дрону під номером 2. Якщо група втрачає й БПЛА номер 2, лідерство покладається на номер 3.

Керування даним роєм здійснюється за допомогою наземної станції або оператора. Фіксування втрати БПЛА-лідера має відбуватися на землі, після чого надсилається відповідне повідомлення про отримання статусу лідера наступному БПЛА в групі.

У даному випадку немає необхідності в забезпеченні комунікації між усіма дронами рою для узгодження лідера. Також не є необхідним поширення у групі інформації про те, який дрон вважається лідером на поточний момент.

Рівень автономності БПЛА, розглянутих у попередньому прикладі, не дозволить передбачити повернення втраченого дрона в склад групи, адже на період втрати контакту із наземною станцією БПЛА повинен самостійно генерувати траєкторію польоту, розпізнавати та уникали перешкоди.

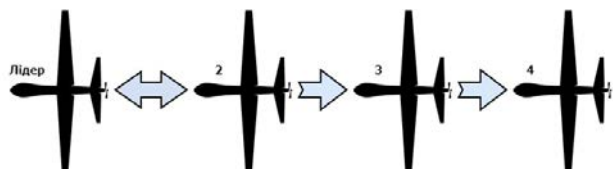


Рис. 1. Архітектура рою БПЛА з лідером, у якій кожен наступний дрон слідує за попереднім

При підвищенні рівня автономності БПЛА до третього можливо реалізувати більш складну архітектуру рою. У випадку, коли кожен дрон може самостійно розпізнавати об'єкти та будувати власну траєкторію руху, стає доступною архітектура, що представлена на рис. 2. При даній реалізації рою БПЛА-лідер підтримує зв'язок з наземною станцією, може отримувати від неї додаткові завдання та повідомлення про необхідність зміни траєкторії руху. БПЛА-послідовники зберігають зв'язок із найближчими членами рою [6, с. 38–39].

Ідеальним варіантом є знаходження лідера у центрі рою, що забезпечує його контакт з максимальною кількістю БпЛА-членів групи.

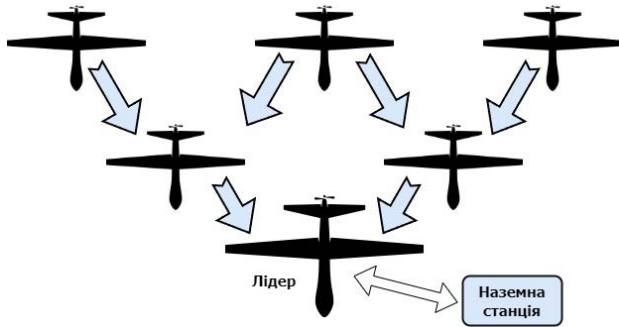


Рис. 2. Архітектура рою БпЛА з лідером, при якій дрон-лідер підтримує зв'язок з наземною станцією, а БпЛА-послідовники сліdkують за дронами, що знаходяться найближче до них

У даному випадку, при втраті БпЛА-лідера, наступного лідера обирає наземна станція, опираючись на дані, отримані від усіх членів рою. Дані можуть надходити у вигляді наступного вектору значень:

$$\bar{x}_i = (i, E, Damage, N, Type, Task), \quad (1)$$

де  $i$  – номер БпЛА, від якого отримана інформація;  $E$  – залишкова енергія дрона;  $Damage$  – наявність ушкоджень;  $N$  – кількість БпЛА, що зберігають контакт з даним дроном;  $Type$  – тип БпЛА, якщо у рою наявні декілька різних типів дронів [7, с. 17–19];  $Task$  – наявність ключового елементу у конструкції БпЛА, що необхідний для виконання певного завдання.

Деякі зі змінних у виразі (1) можуть встановлювати обмеження на можливість конкретного дрона бути кандидатом на отримання статусу лідера. При виконанні деяких завдань лідером може бути лише певний тип БпЛА (змінна  $Type$ ) або БпЛА повинен мати спеціальне корисне навантаження (змінна  $Task$ ). Також лідером не може стати ушкоджений дрон (змінна  $Damage$ ), при умові, що у рою залишилися неушкоджені, адже пріоритетним є вибір лідера, який зможе зберігати даний статус триваліший час, що зекономить енергоресурси, які витрачаються на вибір БпЛА-лідера.

Статус лідера повинен отримати той БпЛА, що відповідає вищезазначеним вимогам та має найвищі значення параметрів  $E$  та  $N$ . Таким чином, обраний дрон зберігатиме зв'язок з найбільшою можливою кількістю дронів та зможе перебувати у статусі лідера тривалий час. Визначення може відбуватися шляхом сумування даних параметрів, помножених на відповідні коефіцієнти  $k_E$  та  $k_N$ , які можуть варіюватися залежно від умов завдання.

$$Value = k_E \cdot E + k_N \cdot N \quad (2)$$

Якщо декілька БпЛА в групі мають однакове значення  $Value$ , розраховане на основі рівняння (2), перевага надаватиметься тому дрону, що має більше значення  $N$ . Якщо декілька БпЛА мають ідентичні значення  $E$  та  $N$ , перевага надається дрону з меншим номером  $i$ .

Після аналізу ситуації, що склалася у рою, та вибору лідера кожен БпЛА має отримати інформацію про свій статус. У результаті лише один дрон має вважати себе лідером, а інші – послідовниками.

У відповідній рис. 2 архітектурі рою алгоритм вибору лідера групи передбачає обмін інформацією між кожним БпЛА-членом рою та керуючою системою. Час витрачається лише на передачу інформації та аналіз отриманих даних системою. При цьому не відбувається обробка інформації безпосередньо на борту БпЛА та не забезпечується обмін інформацією між дронами для реалізації процесу вибору лідера рою.

За умови відновлення контакту з втраченим дроном-лідером, він позбавляється свого колишнього статусу та стає БпЛА-послідовником у рою. Повідомлення про наявність нового лідера приходить від наземної станції, з якою втрачений БпЛА встановлює зв'язок.

Архітектура рою дронів, що передбачає наявність лідера, може бути ефективно застосована також для групи БпЛА 4 рівня автономності [5, с. 160–161]. Ці дрони здатні самостійно шукати способи виконання поставлених завдань, розпізнавати та уникати перешкоди. Комунікація у рою таких БпЛА відбувається безпосередньо між членами групи без втручання людини та наземної системи. Використання архітектури рою дронів з лідером може оптимізувати виконання завдань, адже прийняття значної частини рішень відбуватиметься на борту одного дрона.

Вибір БпЛА-лідера у такому рою може відбуватися шляхом голосування. Дрони у групі сліdkують і зберігають зв'язок лише з найближчими дронами, тому найпершими втрату лідера зафіксують ті БпЛА, що знаходилися на найменшій до нього відстані [8, с. 92]. Кожен дрон, що фіксує втрату лідера, стає кандидатом на отримання цього статусу і надсилає сигнал про втрату і свою кандидатуру іншим (етап 1). Ті БпЛА, що отримали таке повідомлення, мають проголосувати за кандидата, від якого отримали сигнал про втрату, найшвидше. Кожен БпЛА має лише один голос, кандидати голосують за себе. Для реалізації алгоритму необхідно передбачити можливість

передачі інформації між усіма дронами рою на період голосування. Найбільшу кількість голосів отримує той БпЛА, від якого швидше надходить інформація, а отже, робота у рою при його лідерстві матиме менше затримок.

Голосування має тривати обмежений час. На борту кожного БпЛА таймер має відраховувати час від моменту надходження інформації про втрату лідера групи. Переривання спрацює найшвидше на борту того дрона-кандидата, який першим зафіксував втрату лідера. Після проведення голосування потрібно порівняти кількість отриманих голосів (етап 2). Для цього кожен дрон-кандидат передає до інших членів рою вектор значень своїх параметрів відповідно до рівняння (1), а також дані про кількість отриманих ним голосів. Передача даного масиву даних також є свідченням для кожного БпЛА у групі про початок підведення підсумків голосування. На борту кожного дрона рою виконується порівняння отриманих векторів

з параметрами від кандидатів і фіксування кандидата з найбільшою кількістю голосів, якого надалі БпЛА вважатиме лідером. Після порівняння отриманих декількох векторів даних кожен БпЛА передає іншим членам групи інформацію про того дрона, якого сам вважає лідером у даний момент.

Якщо дрон-кандидат отримує інформацію про те, що інший кандидат у групі отримав більшу кількість голосів, він втрачає статус кандидата та починає вважати лідером рою БпЛА з більшою кількістю набраних голосів. Аналогічна ситуація відбувається у випадку, якщо дрон-кандидат отримує вектор даних з ідентичною своїй кількістю голосів, але меншим унікальним номером. Якщо БпЛА-кандидат отримує від іншого дрона вектор значень зі своїм унікальним номером, він не втрачає статус кандидата.

На процес порівняння отриманих голосів також виділяється обмежений час. Далі необхідно узгодити лідера та впевнитися у тому, що лідером себе

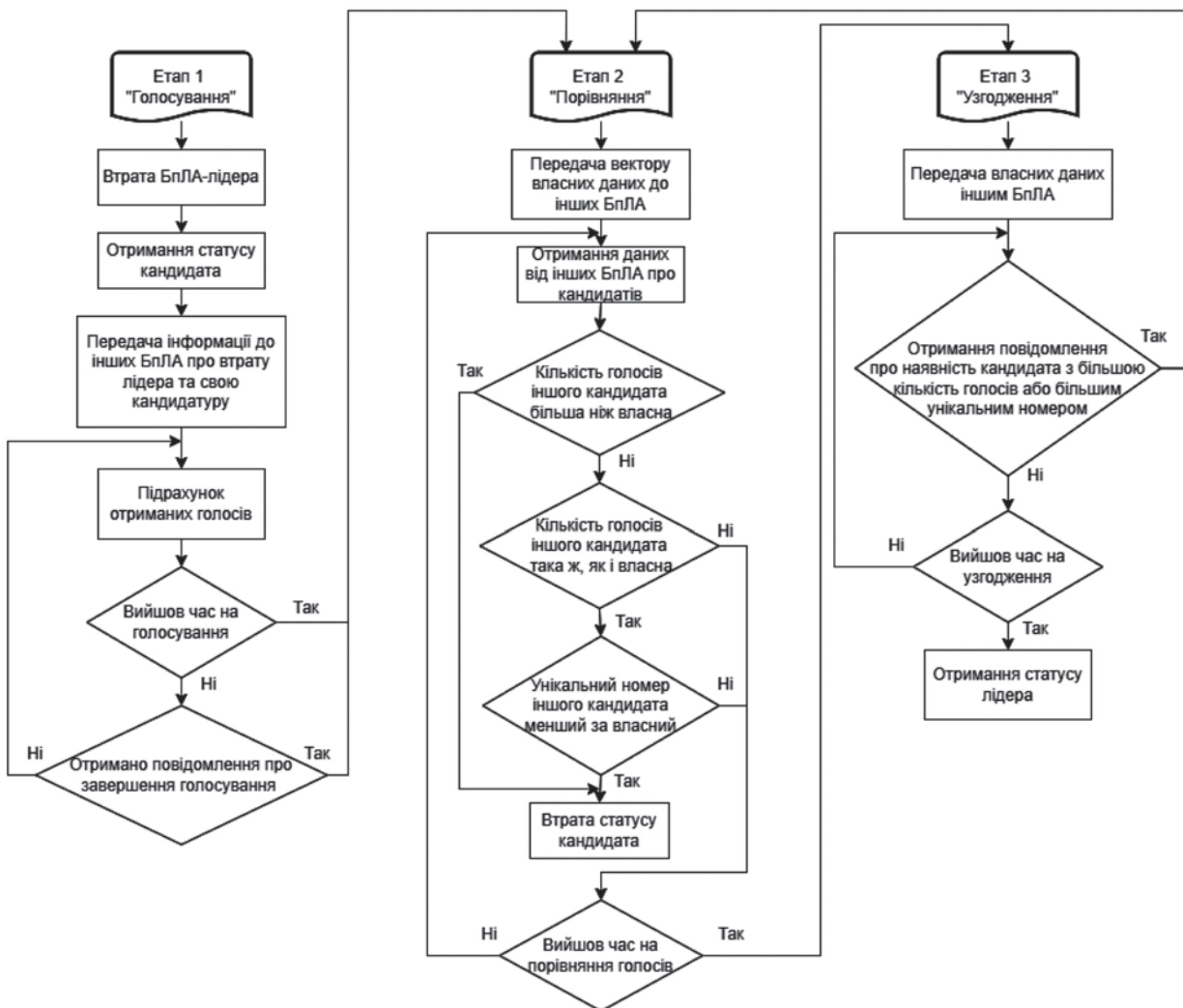


Рис. 3. Алгоритм дій для БпЛА, що є кандидатом в лідери рою з дронів 4 рівня автономності

вважає лише один БпЛА (етап 3). Для цього єдиний дрон-кандидат, що має залишитися після 2 етапу, ще раз надсилає вектор значень, у якому міститься унікальний номер, кількість голосів та статус лідера. Якщо інші БпЛА вже вважають його лідером групи внаслідок процесу порівняння результатів, відповідь від них не передбачена. Якщо ж один із дронів має інформацію про іншого кандидата з більшою кількістю набраних голосів або з такою ж кількістю голосів, але меншим унікальним номе-

ром, він надсилає сигнал про необхідність повторного проведення порівняння результатів голосування. Дана ситуація свідчатиме про те, що після 2 етапу залишилося декілька кандидатів.

Алгоритми дій для дрона-кандидата та члена рою, що не має такого статусу під час процесу вибору лідера, представлені відповідно на рисунках 3 та 4. Запропоновані алгоритми розроблені з урахуванням необхідності економії енергії кожного БпЛА та витраченого на голосування часу.

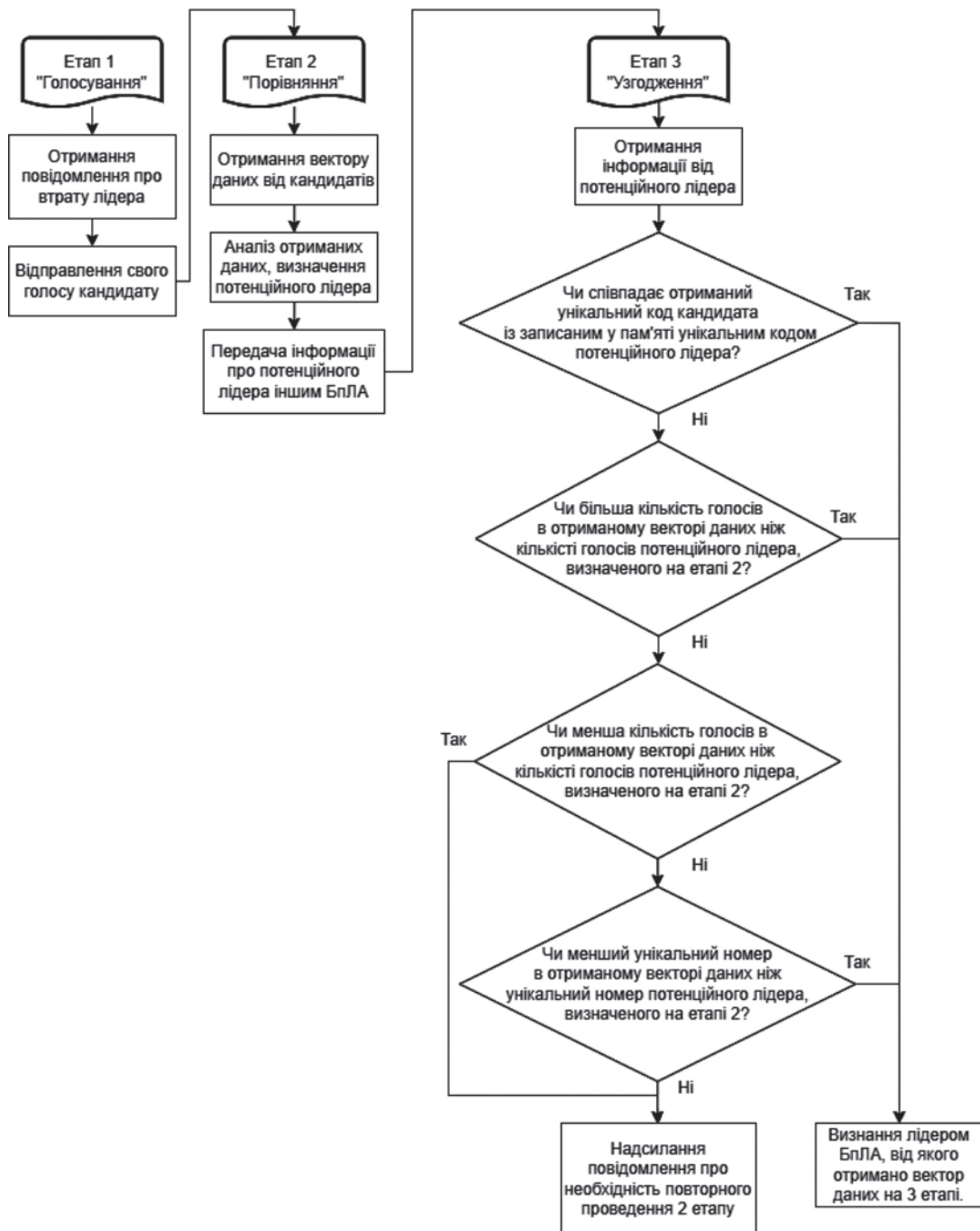


Рис. 4. Алгоритм дій для БпЛА, який не отримав статус кандидата в лідери рою, що складається з дронів 4 рівня автономності



Асимптотична складність наведених алгоритмів  $O(n^2)$ , де  $n$  – кількість БПЛА у рою, обумовлена передачею інформації від кожного кандидата всім членам групи про втрату лідера, про свою кандидатуру на місце лідера та етапом порівняння кількості голосів, де кожен БПЛА має приймати дані, аналізувати та передавати їх іншим дронам [9, с. 60]. Дану складність необхідно враховувати при розрахунку часу на проведення кожного етапу процесу вибору БПЛА-лідера у рою.

**Висновки.** Для уникнення ризику втрати централізованого рою необхідно передбачити алгоритм вибору дрона-лідера. Структура та складність даного алгоритму залежать насамперед від архітектури рою та рівня автономності використаних БПЛА.

Для рою БПЛА, у якому кожен наступний дрон слідує за попереднім та повністю копіює його дії, достатньою є передача статусу лідера між БПЛА відповідно до порядкового номера дрона в архітектурі рою.

Рій з БПЛА 3 рівня автономності дозволяє реалізувати вибір лідера за допомогою наземної станції, яка аналізує такі показники кожного дрона, як залишкова енергія, наявність ушкоджень, кількість БПЛА, з якими даний дрон підтримує зв'язок, тип БПЛА та наявність у нього ключового елементу конструкції, необхідного для виконання конкретного завдання.

Для БПЛА 4 рівня автономності, що можуть комунікувати між собою у рою, вибір лідера відбувається шляхом голосування. Запропонований алгоритм включає три етапи: голосування, порівняння та узгодження, на кожен з яких виділяється певна кількість часу.

#### Список літератури:

1. Муравйов О.В., Довбиш І.О., Галаган Р.М., Богдан Г.А., Момот А.С. Перспективи розвитку технологій та підвищення рівня автономності БПЛА. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2023. Том. 34 (73). №2. С. 199–205.
2. Campobasso M.J., Leader-Follower Trajectory Generation and Tracking for Quadrotor Swarms. 2017. *Master's theses for the degree of master in science in engineering physics*. Embry-Riddle Aeronautical University.
3. Gupta I., van Renesse R., Birman K.P. A Probabilistically Correct Leader Election Protocol for Large Groups. Presented at *14th International Conference on Distributed Computing*. 2000. pp. 89–103.
4. Zuo Y., Yao W., Chang Q., Zhu X., Gui J., Qin J. Voting-Based Scheme for Leader Election in Lead-Follow UAV Swarm with Constrained Communication. *Electronics*. 2022. Vol. 11. № 14: 2143.
5. Довбиш І.О., Муравйов О.В. Залежність архітектури рою від рівня автономності БПЛА. *XVI Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування»*, м. Київ, збірник праць конференції. 2023. С. 158–161.
6. Авілов А.І., Ткачук С.С. Ієрархічна модель взаємодії оператора з “роєм” безпілотних літальних апаратів. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2023. № 1(75). С. 37–40.
7. Довбиш І.О., Муравйов О.В., Галаган Р.М., Богдан Г.А., Момот А.С. Силові установки та джерела енергії сучасних БПЛА. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2023. Том. 34(73). № 5. С. 16–21.
8. Лупандін В.А., Мегельбей Г.В., Мацько О.Й., Куртсеїтов Т.Л., Міроненко П.О. Основні тенденції створення та застосування груп безпілотних літальних апаратів. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2019. № 2(35). С. 88–96.
9. Шинкренко В.І. Особливості практичного застосування показників обчислювальної складності алгоритмів. *Проблеми програмування*. 2008. № 2–3. Спеціальний випуск. С. 57–63.

#### Dovbysh I.O., Muraviov O.V. THE SWARM LEADER ELECTION ALGORITHM DEPENDENCE OF THE UAVS AUTONOMY LEVEL

*The use of UAVs significantly speeds up the process of performing tasks in various spheres of human activity. At the same time they increase the quality of the obtained result. Drones also allow to save financial resources, preserve people's lives and health. Currently, UAVs are used in a wide variety of fields: military industry, agricultural industry, civil aviation, infrastructure and construction, media and entertainment. Taking into consideration the efficiency of the UAVs use, the requirements for them and the complexity of the tasks they face are rapidly growing. Sometimes the assigned tasks can not be performed by only one drone, which is why swarms of UAVs are used.*

*UAVs swarms can be centralized or decentralized. The difference lies in the interaction between group members and the tasks they perform. In a centralized swarm control is exercised by one drone, which is followed by others. Conversely, the UAVs of the decentralized swarm independently make decisions and act separately to achieve a common aim.*

*Centralized swarms of drones are the easiest to architect and interface with an operator or ground system. Swarm control by a UAV-leader saves energy and preserves the integrity of the swarm. Also the architecture of this swarm can be used for UAVs of different autonomy levels. The only disadvantage of a centralized UAVs swarm is the possibility to lose the leader, which leads to the loss of the entire swarm.*

*Algorithms for the UAVs swarm leader selection are proposed in this article. They will help to preserve the swarm in case of contact loss or technical malfunction of the previous leader drone, which will allow continuing the current task and saving considerable amount of financial resources. Algorithms for three different types of interaction between drones in a swarm are reviewed. They depend on the level of autonomy and the capabilities of the UAVs of the swarm members as well. The discussed algorithms are built taking into account the need to save time for decision-making, ensuring the smallest amount of transmitted information and minimizing the processes of processing received signals, what will also save energy resources.*

**Key words:** *unmanned aerial vehicle, UAVs swarm, leader selection algorithm, leader selection, centralized UAVs swarm.*

УДК 62.64

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/14>**Заболотний О.В.**Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»**Ходєєв А.А.**Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»

## СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ГОМОГЕННОСТІ ВОДНО-ПАЛИВНОЇ ЕМУЛЬСІЇ

Використання модифікованих палив та зменшення шкідливих викидів у навколишнє середовище є важливими науковими напрямками, які в даний час вивчаються багатьма дослідниками в усьому світі. Водно-паливні емульсії є одним з перспективних альтернативних видів палива, а їх використання забезпечує зменшення кількості шкідливих вихлопних газів, особливо оксидів азоту та твердих частинок. Головним фактором для використання водно-паливних емульсій як альтернативного енергоносія є гомогенність емульсії, тобто її стабільність у часі. Наразі гомогенність емульсії перевіряється шляхом взяття зразків для аналізу. Цей процес займає певний час і потребує залучення додаткових людських ресурсів. В даній роботі описано автоматичну систему контролю гомогенності емульсії. Вона складається з сенсорів каламутності, які монтуються в наявні ємності для збереження емульсії, електронного модуля та програмованого логічного контролера. Розроблено експериментальний стенд для перевірки основних метрологічних характеристик сенсорів каламутності за стандартними зразками суспензії каоліну, які покривають увесь діапазон вимірювання. Експериментальні дослідження показали, що сенсори каламутності мають великий діапазон вимірювання, високу чутливість та мають близьку до лінійної характеристику перетворення сигналу. Використання сенсорів каламутності дозволяє фіксувати етапи руйнування емульсії, такі як седиментація, коалесценція та повне розшиарування на дві рідини. Фіксація моменту руйнування емульсії у реальному часі надає можливість застосовувати три різні режими для відновлення гомогенності емульсії шляхом повторного перемішування з різними часовими інтервалами. Це забезпечить суттєве зменшення часу на відновлення гомогенності водно-паливної емульсії. Запропоновану систему можливо інтегрувати у більшість наявних установок для виготовлення та збереження водно-паливних емульсій.

**Ключові слова:** водно-паливна емульсія, гомогенність, сенсор, каолін, статична характеристика перетворення, програмований логічний контролер, перемішування, виконуючі пристрої.

**Постановка проблеми.** В наш час широко розвивається пошук перспективних альтернативних видів палива для використання у промислових, транспортних та енергогенеруючих галузях, для підвищення технічних та екологічних показників під час використання рідких палив. Одним із перспективних енергоносіїв є водно-паливна емульсія [1] (ВПЕ) використання якої [2–6] підвищує ефективність згорання палива, забезпечує зменшення кількості шкідливих викидів та дозволяє зменшити витрату палива за рахунок його змішування з водою.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** На даний час процес виготовлення ВПЕ широко досліджується та модернізується, було розроблено багато найрізноманітніших установок для створення ВПЕ які використовують різні методи для виготовлення емульсій [7–11] та різних набір інгре-

дієнтів для прискорення процесу виготовлення та підвищення стабільності. В сучасних установках для приготування емульсій використовується значна кількість контрольно-вимірювальної апаратури для керування процесу виготовлення, але не враховується один з найважливіших факторів, а саме контроль її гомогенності після приготування та під час збереження (транспортування). Стабільність емульсії необхідно підтримувати постійно, адже коли емульсія втратить свою гомогенність, вона повністю втратить усі переваги від використання і почне нести руйнівний характер для двигунів через обводнення палива [12–17].

**Постановка завдання.** Існує багато методів для контролю стабільності емульсії, але більшість цих методів використовується у лабораторних умовах або близьких до них шляхом взяття проб для аналізу. Тому виникає необхідність

розроблення автоматизованої системи контролю гомогенності емульсії, яку можна використовувати в наявних установках для виготовлення, збереження та транспортування водно-паливних емульсій.

**Виклад основного матеріалу.** Для контролю гомогенності водно-паливної емульсії може бути використаний електронний модуль TS-300B сумісно з сенсором TSW-30 [18, 19] для вимірювання каламутності (рис. 1).



**Рис. 1.** Зовнішній вигляд електронного модуля TS-300B та сенсора каламутності TSW-30

Принцип роботи сенсорів базується на вимірюванні інтенсивності світлового потоку, розсіяного зваженими частинками речовини, що досліджується, з'являється можливість зробити прив'язку до стандартних одиниць вимірювання каламутності NTU (Nephelometric Turbidity Unit).

До складу ВПЕ входить паливо і водна складова, які окремо є прозорими рідинами, що сприяє безперешкодному проходженню світлового потоку. Після приготування емульсії утворюється гомогенна рідина, в якій у безперервній фазі (паливі) рівномірно розподілені зважені частинки дисперсної фази (води), в наслідок чого новостворена ВПЕ втрачає свою прозорість, що перешкоджає проходженню світлового потоку. Через це з'являється можливість фіксувати момент розшарування в місці встановлення сенсорів, бо під час злиття зважених частинок з'являтимуться зони, в яких буде полегшено проходження світлового потоку.

Використовуючи електронний модуль TS-300B з'являється можливість контролювати гомогенність рідини у реальному часі. Коли рівень сигналу на виході модуля є близьким до 0 В, емульсію вважають гомогенною, а при високому рівні сигналу в діапазоні від 3,7 В до 4,5 В можна вважати, що відбулося повне розшарування.

Було проведено серію дослідів для оцінки рівня чутливості сенсорів каламутності. Для цього обрано одну з стандартних методик для калібрування сенсорів каламутності за стандартними

сумішами каоліну [19, 20]. При приготуванні стандартних суспензій використовували мірні ємності, механічний міксер потужністю 10000 об/хв та електронні ваги з роздільною здатністю 0.01 г. Також було використано дистильовану воду та каолін вищого ступеня очищення (рис 2).

Під час досліджень були виготовлені стандартні суспензії із вмістом каоліну у таких пропорціях: 50, 100, 200, 500, 700, 1562, 3125, 6250, 7812, 9375 мг/л. Вони покривають повний діапазон вимірювання сенсора TSW-30 який складає  $\geq 3000$  NTU.

Для експериментальних досліджень чутливості сенсорів був розроблений стенд, до складу якого увійшли: мірні ємності, три первинних сенсори TSW-30, електронний модуль TS-300B, блок живлення із можливістю регулювання напруги в діапазоні від 4.2 до 5.2 В та мультиметр в режимі вимірювання напруги (рис. 3).



**Рис. 2.** Процес приготування стандартної суспензії



**Рис. 3.** Лабораторний стенд для вимірювання каламутності

Спершу сенсори занурювали в очищену або дистильовану воду для фіксації нульової точки

діапазону вимірювання, з одночасною фіксацією її температури, значення якої буде потрібне для корекції результатів вимірювань. В процесі досліджень використано дистильовану воду з температурою 25°C, тому надалі корекція температури не проводилась, для відмінних від 25°C значень температури необхідно вводити температурну поправку. Після чого були проведенні спостереження на усіх виготовлених суспензіях використовуючи 3 сенсори (було реалізовано десять окремих спостережень для кожного зразка (табл. 1).

Таблиця 1

**Середнє значення вихідної напруги сенсорів каламутності**

C, мг/л	$\bar{U}$ сенсор 1, В	$\bar{U}$ сенсор 2, В	$\bar{U}$ сенсор 3, В
0	3,68	3,74	3,74
50	3,651	3,706	3,724
100	3,627	3,672	3,698
200	3,592	3,642	3,657
500	3,515	3,561	3,562
700	3,375	3,413	3,483
1562	3,032	3,027	3,158
3125	2,457	2,398	2,612
4687	1,885	1,799	1,898
6250	1,232	1,165	1,4
7812	0,748	0,705	0,888
9375	0,08	0,07	0,122

Після проведення вимірювань необхідно обчислити коефіцієнт K, який може відрізнятись залежно від партії виготовлених сенсорів, умов навколишнього середовища, навколишнього освітлення при використанні прозорих ємностей. Також одним із суттєвих факторів, який може впливати на покази сенсорів, є вхідна напруга живлення електронного модуля.

Розрахуємо нульову точку вимірювання для кожного з трьох сенсорів.

$$K = 865,68 * U_0. \quad (1)$$

Після чого необхідно здійснити підстановку значень K [19, с. 191] у формулу для обчислення каламутності в стандартних одиницях вимірювання (NTU).

$$NTU = -865,68 * U + K. \quad (2)$$

Отримані значення залежності концентрації, вираженої у мг/л, до значень каламутності в одиницях NTU (табл. 2), мають характер зміни, близький до лінійного. Проведено порівняння отриманих результатів з даними роботи [20], де наведено результати контрольних спостережень каламутності у розчинах каоліну з використан-

ням спеціальних засобів вимірювання (Hydrolab DS5X, OTT Hydromet GmbH, Kempten, Germany) для визначення каламутності. Результати такого порівняння наведено на рисунку 4.

Таблиця 2

**Співвідношення концентрації у мг/л і значень NTU**

C, мг/л	NTU сенсор 1	NTU сенсор 2	NTU сенсор 3	NTU Hydrolab DS5X
0	0	0	0	0
50	25,1	29,07	13,49	16
100	45,87	58,51	36	32
200	76,17	84,48	71,49	64
500	142,83	154,6	153,73	160
700	264,03	282,72	222,12	224
1562	560,95	616,87	503,47	500
3125	1058,72	1161,38	976,13	1000
4687	1553,89	1679,93	1594,22	1500
6250	2119,18	2228,77	2025,33	2000
7812	2538,17	2626,98	2468,56	2500
9375	3116,44	3176,69	3131,67	3000

Через великий діапазон вимірювання сенсора TSW-30 з'явилась необхідність розрахувати нову функцію для отримання статичної характеристики перетворення. Було реалізовано апроксимацію значень, наведених в таблиці 2, методом найменших квадратів (поліномом першого порядку).

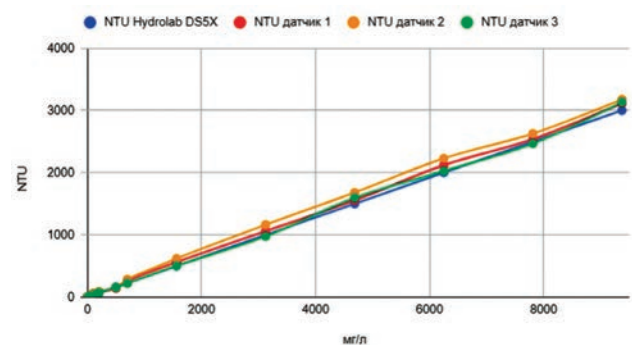


Рис. 4. Залежність каламутності рідини (NTU) від концентрації каоліну

Розраховані середні значення показників NTU для трьох сенсорів наведено у таблиці 3.

Були визначені параметри a і b апроксимуючого полінома першого порядку, де

$$a = 14,426,$$

$$b = 0,3325.$$

Теоретична лінійна модель залежності каламутності рідини (NTU) від значень концентрації каоліну (мг/л) має вигляд:

$$a + b * C = NTU \quad (4)$$

Теоретичні значення NTU для кожної точки С записані у таблиці 4.

Таблиця 3  
Середні значення показників NTU з трьох сенсорів

C, мг/л	$\overline{NTU}$
0	0
50	22,55
100	46,79
200	77,38
500	150,38
700	256,29
1562	560,43
3125	1065,41
4687	1609,34
6250	2124,42
7812	2544,57
9375	3141,6

Таблиця 4  
Теоретичні значення NTU контрольних точок концентрації каоліну

C, мг/л	$\overline{NTU}$
0	14,42
50	31,05
100	47,67
200	80,92
500	180,67
700	247,17
1562	533,79
3125	1053,48
4687	1572,85
6250	2092,55
7812	2611,916
9375	3131,61

Побудовані графіки порівняння результатів, отриманих під час досліджень, та результатів, отриманих після апроксимації зображено на рисунку 5.

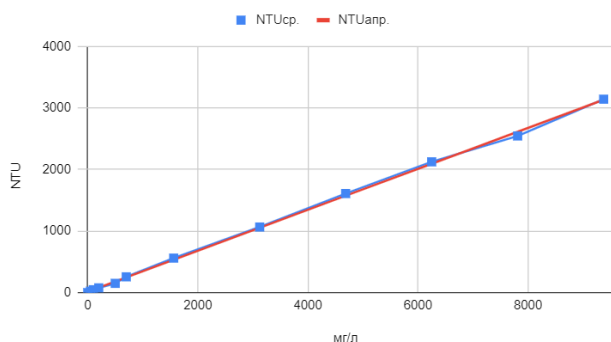


Рис. 5. Порівняння експериментальних та теоретичних розрахунків

На рисунку 5 видно, що формула (4) здійснює якісну апроксимацію результатів експериментальних досліджень.

Аналіз результатів експериментів показав, що сенсор TSW-30 разом з електронним модулем TS-300 В забезпечує великий діапазон вимірювання каламутності (до 3000 NTU) і високу чутливість у порівнянні з аналогами, що викликало необхідність уточнення номінальної статичної характеристики перетворення.

Сенсор з електронним модулем може використовуватись для дослідження та фіксації моменту розшарування ВПЕ. Контролюючи напругу на виході електронного модуля TS-300 В, можна приймати рішення щодо запуску повторного перемішування емульсії та її повернення до гомогенного стану в автоматичному режимі.

Для створення системи контролю гомогенності ВПЕ необхідно використати додатковий електронний блок, який буде опитувати виходи сенсорів, здійснювати обробку отриманих сигналів та генерувати керуючі команди на виконуючі пристрої. Таким блоком може бути програмований логічний контролер (ПЛК).

Принцип роботи системи базується на розділенні ємності з ВПЕ на три умовні зони, в яких будуть вмонтовані сенсори каламутності. В кожній зоні здійснюють моніторинг стабільності емульсії в реальному часі. Аналогові виходи електронних модулів TS-300 В підключають до аналогових входів ПЛК, де вихідна напруга буде перетворена з використанням формули (2) для відображення значень у одиницях NTU. Сенсори каламутності попередньо калібрують у нульовій точці в умовах, близьких до експлуатаційних, з визначенням коефіцієнту К для кожного з них (1). Після обробки даних на ПЛК за допомогою дискретного виходу формуються вихідні сигнали, які передають команди на керуючі пристрої для запуску відповідного режиму відновлення гомогенності емульсії. За потреби можна відображати стан емульсії на панелі оператора (рис. 6).

Ємність з емульсією умовно поділяється на три зони, де перший сенсор монтується зверху, другий по середині, а третій на дні ємності, що дозволить зафіксувати момент втрати гомогенності емульсії [21]. Рівномірне розміщення трьох сенсорів дозволить фіксувати повний процес розшарування ВПЕ (схематично процес розшарування зображено на рис. 7).

У новоутвореній гомогенній емульсії сигнали з виходу модуля будуть наблизитись до 0 В. Зважені частинки води будуть рівномірно розповсюдженні у паливі, що перешкоджатиме проходженню світлового потоку. На початку розшарування емульсії розпочнеться процес седиментації. Повного

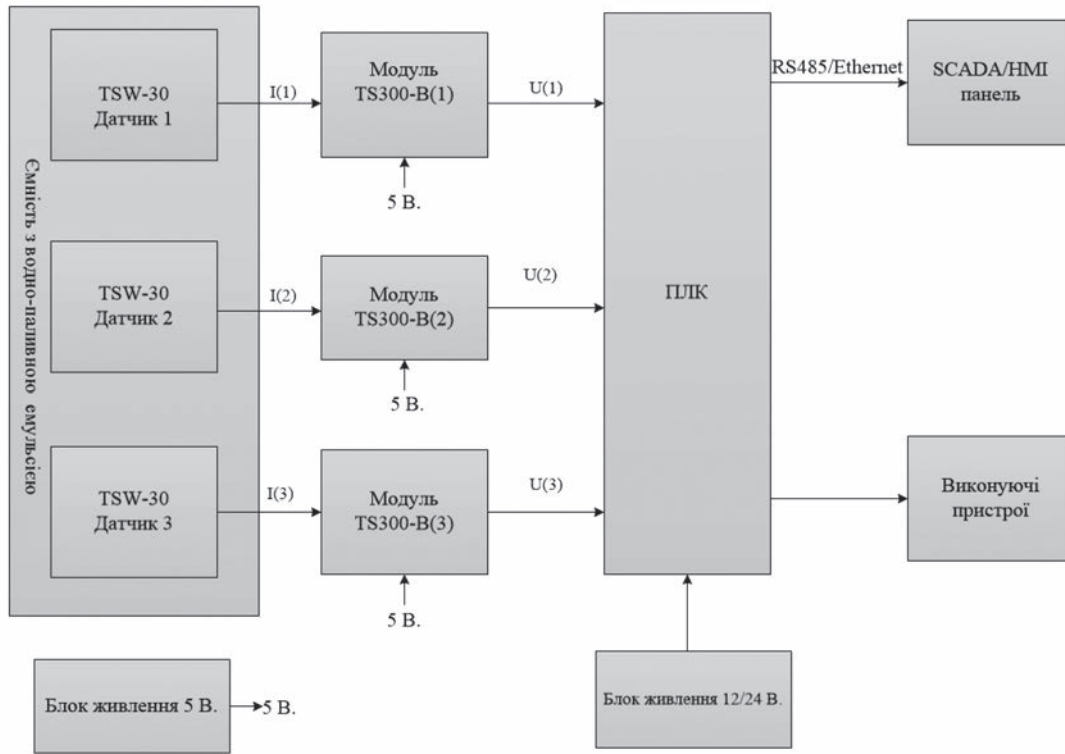


Рис. 6. Схема електрична структурна системи контролю гомогенності ВПЕ

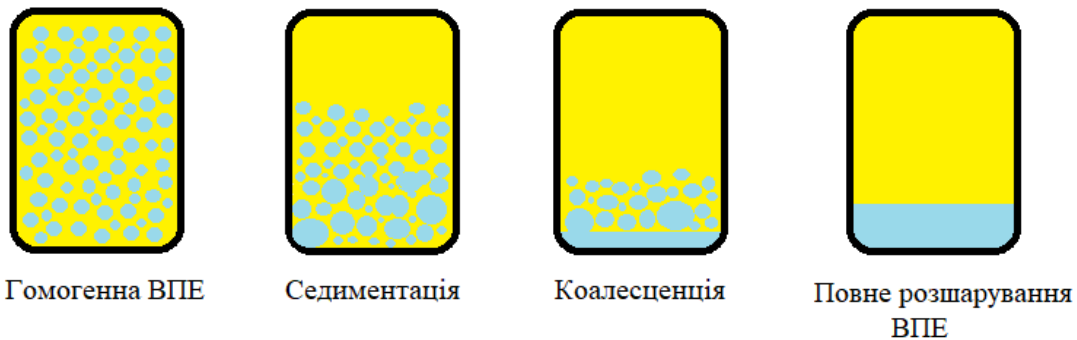


Рис. 7. Схематичне зображення процесу розшарування ВПЕ

руйнування емульсії не відбувається, утворюються дві емульсії, одна з яких є має більшу концентрацію дисперсної фази, ніж інша. Саме під час цього процесу сигнали з усіх трьох сенсорів почнуть суттєво змінюватись за рахунок розповсюдження випромінюваного світлового потоку у рідині. Наступним етапом є коалесценція, тобто початок повного руйнування емульсії (виділення в чистому виді обох фаз рідини через об'єднання крапель дисперсної фази). Під час коалесценції сигнали сенсорів зміняться, і сигнал з виходу сенсора, розміщеного на дні ємності, буде максимальним. Сигнали на виходах середнього та верхнього сенсорів будуть поступово зростати залежно від насиченості дис-

персної фази у зоні їх чутливості. Після повного розшарування емульсії вихідна напруга на виходах середнього та верхнього сенсорів буде також дорівнювати максимальному значенню напруги. Це буде свідчити про повну втрату гомогенності ВПЕ.

Через те, що всі системи для приготування емульсії споживають велику кількість енергії, оптимальним буде використовувати різні режими повторного перемішування, алгоритм включення яких буде реалізований у ПЛК. Знаючи, на якому з етапів розшарування знаходиться ВПЕ, можна використовувати три режими, які надають можливість зменшити час на повторну стабілізацію емульсії шляхом повторного механічного перемішування.

Під час запуску системи аналізують усі вихідні напруги на виходах сенсорів та фактичний стан емульсії. Його можна поділити на 4 основних типи та впровадити для кожного типу відповідний режим перемішування залежно від потреб у використанні:

– стабільна емульсія – повторне перемішування не потрібне;

– седиментація – з'являється необхідність провести повторне механічне перемішування, витрачаючи від 15 до 35% від основного часу приготування, для повторного подрібнення та рівномірного розповсюдження дисперсної фази;

– коалесценція – почався процес руйнування ВПЕ, має місце виділення двох фаз рідини, необхідний процес перемішування тривалістю від 50 до 80% від основного часу для рівномірного розподілення рідин з подальшим розповсюдженням та утворенням зважених частинок дисперсної фази необхідного розміру;

– повне розшарування емульсії – повторити стандартний процес виготовлення ВПЕ.

Отже, для збереження часу та витраченої енергії можна використати три різні режими для відновлення гомогенності і оптимізувати процес виготовлення та збереження ВПЕ.

**Висновки.** В даній роботі було здійснене дослідження працездатності та чутливості сенсора TSW-30 сумісно з електронним модулем TS-300B для створення системи контролю гомогенності з подальшою інтеграцією у автоматизо-

вану систему виготовлення та збереження ВПЕ. Перевірка чутливості та працездатності проводилась на стандартних розчинах каоліну, і показала, що цей сенсор має великий діапазон вимірювання каламутності (до 3000 NTU) і високу чутливість. Але через збільшений діапазон вимірювання виникла необхідність отримати уточнену номінальну статичну характеристику перетворення. Сенсор TSW-30 сумісно з електронним модулем TS-300B може використовуватись для контролю втрати гомогенності і фіксації процесів седиментації, коалесценції та повного розшарування ВПЕ. Фіксація процесів розшарування емульсії дозволяє впровадити три різні режими відновлення гомогенності, що дозволить скоротити час та зменшити витрату енергії на стабілізацію наявних емульсій.

У роботі запропоновано структурну схему системи контролю гомогенності ВПЕ. Структурна схема включає містить ключові компоненти системи, такі як сенсори TSW-30, розміщені у трьох точках ємності з емульсією, модулі TS-300 B, ПЛК, у якому реалізований алгоритм роботи з функцією зберігання та обробки даних, НМІ панель для додаткової фізичної візуалізації, а також керуючі пристрої, що ініціюють повторне перемішування наявної ВПЕ. Використання запропонованої системи дозволяє підвищити продуктивність за рахунок значної економії часу та енергії на підтримання гомогенності емульсії безпосередньо перед транспортуванням або використанням.

#### Список літератури:

1. Patel, K. R., Dhiman, V. Research study of water-diesel emulsion as alternative fuel in diesel engine—an overview. *Int. J. Latest Eng. Res. Appl.*, 2(9), 2017. Pp. 37–41.
2. Patel, N. S., Modi, M. A., Patel, T. M., Investigation of Engine Performance using Emulsified Diesel fuel. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*. Vol. 14, 2017. Pp. 79–87.
3. Jeyakumar, S., Raja, S., BK, R. B., Yadav, S. Study on reduction of NOx in diesel engine using diesel-water emulsion method. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* Vol. 5, 2018. Pp. 1509–1512.
4. Karim, Z. A. A., Khan, M. Y. Experimental Investigation of Performance and Emission Characteristics of IDI Diesel Engine Using Homogenized Water in Bio-Diesel Emulsion. *MATEC Web of Conferences*, Vol. 8, 2018. Pp. 933-942. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822504022>.
5. Mahmood, A. S., Qatta, H. I., Hussein, N. F., & Ismaeel, A. A. Effect of using diesel-water emulsion as a fuel on diesel engine emissions: An experimental study. *International Journal of Energy and Environment*, 10(6), 2019. Pp.321-328.
6. Bukkarapu, K. R., Jyothi, Y., Raju, L. S., Babu, G. C., & Narayanan, K. A Review on Current Trends in Water in Oil Emulsions. *International journal of mechanical engineering and technology*, 8(4), 2017. Pp. 359–371.
7. Заболотний О. В., Ходєєв А. А. Дослідження сучасних методів створення водно-паливної емульсії //The 5 th International scientific and practical conference “Science and technology: problems, prospects and innovations”. (February 16-18, 2023). Osaka, Japan.
8. Ahmed Taha, Eman Ahmed, Amr Ismaiel, Muthupandian Ashokkumar, Xiaoyun Xu, Siyi Pan, Hao Hu, Ultrasonic emulsification: An overview on the preparation of different emulsifiers-stabilized emulsions, *Trends in Food Science & Technology*, Vol. 105, 2020. Pp. 363–377.



9. Seungchul W., Woongil K., Jungkoo L., Kihyung L., Fuel properties of water emulsion fuel prepared using porous membrane method for low pollutant engine at various temperatures, Energy Report, Vol.7, 2021. Pp. 6638–6650.
10. Kojima K., Kojima J., On-Board Ultrasonic Water-in-Diesel Emulsion (WiDE) Fuel System for Low-Emission Diesel Engine Combustion, The Ohio Journal of Science, Vol.118, 2018. Pp. 44–56.
11. Dhani Avianto Sugeng, Ahmad Muhsin Ithnin, Wira Jazair Yahya, Hasannuddin Abd Kadir Emulsifier-Free Water-in-Biodiesel Emulsion Fuel via Steam Emulsification: Its Physical Properties, Combustion Performance, and Exhaust Emission. Energies, Vol.13, 2020. Pp. 5406.
12. Patil, H., Gadhave, A., Mane, S., Waghmare, J. Analyzing the stability of the water-in-diesel fuel emulsion. Journal of Dispersion Science and Technology, 36(9), 2014. Pp. 1221–1227. <https://doi.org/10.1080/01932691.2014.962039>
13. Akbari, S., Nour, A. H. Emulsion types, stability mechanisms and rheology: A review. 1 (1), 2018. Pp. 14–21.
14. Zabolotnyi, O.; Zabolotnyi, V. & Koshevoy, N. Capacitive Water-Cut Meter with Robust Near-Linear Transfer Function. Computation. 2022. (10). DOI:10.3390/computation10070115.
15. Zabolotnyi, O. Moisture content control in heavy fuel during the process of emulsification with a help of capacitive sensors. 25th International Scientific Conference Transport Means 2021, October 6–8, 2021. Kaunas, Lithuania.
16. Alvarado, V., Wang, X. & Moradi, M. (2011). Stability Proxies for Water-in-Oil Emulsions and Implications in Aqueous-based Enhanced Oil Recovery. Energies. (4). 2011. Pp. 1058–1086. DOI:10.3390/en4071058
17. Singh, G., Lopes, E, Hentges, Ns & Ratner, A. Experimental Investigation of Water Emulsion Fuel Stability. Energies, 4(7), 2019. P. 1058–1086.
18. TS-300B High Quality Arduino Turbidity Sensor URL: <https://www.innovators-guru.com/ts-300b-arduino-turbidity-sensor> (дата звернення 06.11.2023).
19. Заболотний, О., Ходєєв, А. Синтез номінальної статичної характеристики перетворення сенсора каламутності TS-300В. Grail of Science, (31), 2023. Pp. 187–196. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.15.09.2023.32>
20. Isoyama, R., Taie, M., Kageyama, T., Miura, M., Maeda, A., Mori, A. & Lee, S. A Feasibility Study on the Simultaneous Sensing of Turbidity and Chlorophyll a Concentration Using a Simple Optical Measurement Method, Micromachines 2017, 8(4), DOI:10.3390/mi8040112.
21. Costa C., Medronho B., Filipe A., Mira I., Lindman B., Edlund H., Norgren M. Emulsion Formation and Stabilization by Biomolecules: The Leading Role of Cellulose. Polymers.2019;11(10):1570. <https://doi.org/10.3390/polym11101570>

### Zabolotnyi O.V., Khodieiev A.A. WATER-FUEL EMULSION HOMOGENEITY CONTROL SYSTEM

*The need for more efficient fuels and a less polluted environment are important areas of research currently being studied by many researchers around the world. Water-fuel emulsion is one of the promising alternative types of fuel. It reduces the amount of harmful exhaust gases, especially nitrogen oxides and particulate matter. The main factor for the use of water-fuel emulsions as an alternative energy carrier is the homogeneity of the emulsion, that is, its stability over time. Currently, emulsion homogeneity is checked by taking samples for analysis. This process takes time and requires additional human resources. This paper describes an automatic system for monitoring emulsion homogeneity. It consists of turbidity sensors that are mounted in existing emulsion storage tanks, an electronic module, and a programmable logic controller. An experimental bench was developed to test the main metrological characteristics of the turbidity sensors using standard kaolin suspension samples covering the entire measurement range. Experimental studies have shown that turbidity sensors have a large measuring range, high sensitivity and have a close to linear signal conversion characteristic. The use of turbidity sensors allows recording the stages of emulsion breakdown, such as sedimentation, coalescence and complete separation into two liquids. Fixing the moment of emulsion breakdown in real time makes it possible to apply three different modes to restore emulsion homogeneity by repeated stirring at different time intervals. This will significantly reduce the time to restore the homogeneity of the water-fuel emulsion. The proposed system can be integrated into most existing facilities for the production and storage of water-fuel emulsions.*

**Key words:** water-fuel emulsion, homogeneity, sensor, kaolin, static characteristics of transformation, programmable logic controller, mixing, executing devices.

**Котенко М.М.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

**Вакалюк Т.А.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

## ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ВЗАЄМОДІЇ МІКРОСЕРВІСНИХ КОМПОНЕНТІВ

*В контексті постійного розвитку розподілених систем дана робота аналізує динамічну взаємодію мікросервісних компонентів, зокрема, враховуючи рівновагу між синхронними та асинхронними методами комунікації. Взаємосервісна комунікація є фундаментальним елементом архітектури мікросервісів, відіграючи ключову роль у визначенні ефективності, надійності та масштабованості системи. Робота систематично аналізує основні парадигми, розкриваючи різницю між прямими взаємодіями, характерними для синхронних систем, та характеристиками асинхронних систем, які ґрунтуються на подієвій моделі. Такі диференціації важливі для глибокого розуміння впливу кожної з них на архітектуру системи та її продуктивність. Асинхронна комунікація характеризується здатністю ініціювати події, на які можуть реагувати кілька учасників, що сприяє гнучкості, адаптивності та резистентності системи до зовнішніх змін. Децентралізація у відносинах між ініціаторами та слухачами подій відображає принципи динамічного обміну інформацією, підкреслюючи її ключове значення в контексті сучасних технологічних реалій. Однак перехід до цієї парадигми не обходиться без перешкод. Спеціалісти, звиклі до традиційних підходів управління компонентами, можуть зіткнутися з концептуальними та технічними труднощами при адаптації до цієї моделі. У сценаріях, де синхронна комунікація є оптимальною для випадків, які потребують миттєвої взаємодії, її обмеженості в архітектурі мікросервісів, такі як потенційні затримки, надмірне навантаження та нестабільність служб, стають помітними. Хоча асинхронні механізми відзначаються своєю ефективністю в багатозадачних операціях, їх адаптація супроводжується власними викликами, включаючи забезпечення доставки, інтегрованість послідовностей та обробку помилок. Даний аналіз акцентується на необхідності обережного підходу до вибору методів комунікації в мікросервісах. Врахування переваг та обмежень кожного методу може сприяти розробці надійних, масштабованих та ефективних систем. Перспективи розподіленого обчислення тісно пов'язані з розумінням та застосуванням цього балансу.*

**Ключові слова:** мікросервіси, взаємодія компонентів, синхронна комунікація, асинхронна комунікація, подієво-орієнтоване спілкування, брокер подій, балансування навантаження.

**Постановка проблеми.** В епоху стрімкого технологічного розвитку, коли організації змушені адаптуватися до непередбачувано швидких змін, вибір відповідної архітектури програмних систем стає основою конкурентоспроможності. Мікросервісна архітектура, що використовує автономні служби, кожна з яких спеціалізується на конкретній функції і спілкується через відкриті інтерфейси, відіграє тут ключову роль.

Основний акцент у мікросервісному підході ставиться на взаємодію цих компонентів. Ця взаємодія – це не просто технічна характеристика; вона відображає глибокі організаційні принципи, командну динаміку і, в кінцевому підсумку, бізнес-стратегію. Здатність компонентів ефективно взаємодіяти, адаптуватися до помилок, обмінюватися даними швидко і надійно, масштабуватися під зростаючі потреби – це те, що визначає

реальну цінність та потужність мікросервісної архітектури.

Важливість правильної взаємодії між мікросервісами важко переоцінити. Якщо взаємодія оптимізована, система може швидко реагувати на зміни, надаючи високу продуктивність і стабільність. З іншого боку, недоліки у координації можуть призвести до затримок, помилок і, як наслідок, до зниження довіри клієнтів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Огляд наукових досліджень та публікацій демонструє неперервну еволюцію парадигми мікросервісної архітектури. Згідно з концептуалізацією, запропонованою Льюїсом і Фаулером, мікросервіси виступають як адаптивна структурна одиниця, що фасилітує прискорене розгортання та оптимізацію процесів технічної підтримки програмного забезпечення [1]. Річардсон, у своїй монографії

“Microservices Patterns”, виокремлює архітектурні патерни та методологічні підходи, які підсилюють дизайн та імплементацію мікросервісів [2]. Робота Мітри та співавторів оцінює мікросервісну архітектуру через призму ключових принципів, втілених практик та корпоративної культури, що є необхідними для ефективної інтеграції [3]. Шерманн, Ціто та Лайтнер проводять аналіз реальних індустріальних стратегій, використовуючи мікросервіси як інструментарій для модернізації об’ємних монолітних систем [4]. Критичний розгляд трансформаційних процесів від монолітичної архітектури до мікросервісно орієнтованої та виявлення взаємозв’язків між компонентами представлено у дослідженні Мазламї, Ціто та Лайтнера [7]. Різноманітність методологічних підходів до реалізації комунікації між сервісами піддається деталізованому аналізу в роботі Сліви та Панчика, які проводять порівняльний огляд програмних інтерфейсів REST API, GraphQL і gRPC [12]. Обговорення важливості компетентного управління навантаженням у мікросервісних архітектурах знаходить своє відображення у широкому спектрі наукових публікацій [13, 14, 15, 18, 19], які підкреслюють імператив оптимізації розподілу запитів та часу відгуку між сервісами. Тежас і Хемаваті присвячують своє дослідження використанню Apache Kafka як інструменту для ефективної взаємодії між мікросервісами, підкреслюючи його роль у забезпеченні високої пропускну здатності [22]. Аспі та коавтори розглядають імплементацію асинхронних мікросервісів в контексті “Smart Village”, з акцентом на зростанні ефективності через асинхронний режим обробки даних [23]. Асинхронний шаблон запит-відповідь презентує модель для створення децентралізованих систем, здатних виконувати запити у фоновому режимі, тим самим підвищуючи пропускну спроможність та еластичність системи [24].

**Мета дослідження** – теоретичний аналіз принципів взаємодії мікросервісних компонентів, що полягає у вивченні механізмів спілкування між мікросервісами, виявленні потенційних викликів цієї взаємодії та розгляді методів їх оптимізації.

**Виклад основного матеріалу.** У світі інженерії програмного забезпечення архітектурні рішення постійно еволюціонують, пристосовуючись до змінних бізнес-потреб, досягнень у технологіях та розмірів організацій. Серед безлічі варіантів архітектури виокремився мікросервісний підхід, який глибоко перетворює процес проектування, розробки та розгортання програмного забезпечення.

У минулому багато програмних додатків стартували як монолітні структури. У монолітній архітектурі всі функціональні компоненти, від елементів інтерфейсу користувача до модулів обробки даних та операцій з базами даних, були тісно інтегровані та об’єднані в єдиний, незмінний блок. Незважаючи на те, що ця модель пропонує простоту на початкових етапах розробки та розгортання додатку, з часом вона ставала все більшою та менш гнучкою зі зростанням додатка. Масштабування конкретних функцій, внесення змін чи впровадження нових технологій в монолітичну систему стає складним та ризиковим процесом, і часто потребує обширних змін та комплексного тестування всього додатка.

Мікросервіси виникли, щоб вирішити ці проблеми, сприяючи впровадженню розподіленого підходу до проектування програмного забезпечення [2, с. 4–8]. У цій архітектурі програми розкладаються на невеликі, незалежні та слабо зв’язані сервіси. Кожен сервіс відповідає за свій власний функціонал, функціонує автономно і взаємодіє з іншими сервісами через чітко визначені інтерфейси, такі як HTTP/REST або черги повідомлень.

З появою більш очевидних переваг мікросервісів – таких як швидші цикли випуску, покращена масштабованість, стійкість та можливість використання різних технологій – цей архітектурний стиль почав отримувати все більше популярності. Використання контейнерів та інструментів для оркестрації, таких як Docker і Kubernetes, додатково сприяло поширенню мікросервісів, надаючи легке, стандартизоване та розширюване середовище для розгортання окремих сервісів.

Слід зауважити, що термін «мікросервіси» не має універсально прийнятого визначення. Тим не менше, є декілька ключових особливостей, які програмна система має мати, щоб заслуговувати на класифікацію як система, заснована на парадигмі мікросервісів. Серед цих характеристик можна вказати на:

– **Невеликий розмір.** В мікросервісному домені розмір сервісу є умовним і підвладним різноманітним факторам. Якість сервісу може визначатися на основі основних бізнес-операцій або ж спрямовуватися на конкретні завдання. Проте за результатами дослідження [4], що включало аналіз 40 організацій, існує загальна схильність уникати екстремально коротких сервісів з менше ніж 100 рядків коду, а також дуже об’ємних, які містять понад 1000 рядків коду. Цей аналіз підкреслює тенденцію до розробки сервісів із чітко визначеною метою та специфікацією для ефективного виконання певної функції.

– **Децентралізація.** Мікросервісні системи активно поширюють ідею розподілених процесів, але вони не є єдиною архітектурою з такою концепцією. Архітектура орієнтована на сервіс (SOA), яка є попередницею в області програмної інженерії, вже використовувала такий розподілений підхід. Основна відмінність мікросервісів полягає у збільшеному ступені децентралізації, зокрема в аспекті управління даними. У мікросервісному підході кожна бізнес-задача та її асоційовані дані існують в рамках окремого, самодостатнього сервісу. Такий сервіс може незалежно від інших розгортатися та працювати в своєму власному хостинговому середовищі [5].

– **Обмежений контекст (Bounded Context).** У рамках архітектури мікросервісів кожен сервіс ретельно розробляється навколо конкретної бізнес-функції, а набір таких функцій формує домен [6, с. 40–42]. Ці виокремлені сервіси функціонують у межах своїх відповідних доменів, забезпечуючи їх захист від складностей більшої системи. Такий підхід за своєю природою сприяє підвищенню автономії, сприяє децентралізованому управлінню та спрощує процеси оновлення або заміни сервісів [7]. Якщо сервісу потрібна взаємодія за межами свого рідного домену, вона координується через чітко визначений інтерфейс на загальному рівні домену. Цей принцип проектування забезпечує чітке відокремлення завдань і зберігає цілісність контекстуальних меж кожного мікросервісу.

При розробці систем на основі мікросервісної архітектури важливо правильно вибрати метод комунікації [8, с. 39]. Міжпроцесорне спілкування в мікросервісах має особливе значення порівняно з монолітними системами [2, с. 65–66]. У монолітних системах модулі легко взаємодіють завдяки узгодженим мовним структурам. Натомість мікросервісна архітектура передбачає поділ на ізольовані сервіси, які можуть функціонувати в різних обчислювальних середовищах. Основним критерієм вибору способу міжпроцесорної взаємодії в таких системах є його синхронність чи асинхронність. Такий вибір значущо впливає на продуктивність, надійність та гармонійність архітектури системи.

У контексті мікросервісів, синхронна комунікація традиційно базується на моделі «запит/відповідь». В цій схемі, мікросервіс ініціює запит до іншого сервісу та очікує його відгуку. Зазвичай, відправник тимчасово зупиняє свою діяльність, очікуючи відповіді від приймача. Ця взаємодія часто здійснюється за допомогою HTTP. Тобто,

клієнт робить виклик, передаючи свій запит, зазвичай у форматі JSON або XML через HTTP, а потім чекає відповіді. Для реалізації такої синхронної комунікації в мікросервісних архітектурах на передовій стоять технології, як REST API, gRPC та GraphQL.

**REST (Representational State Transfer) API** – це архітектурний підхід, який базується на протоколі HTTP та визначає правила для створення веб-сервісів. Системи, побудовані за цією концепцією, характеризуються легкістю, адаптивністю та гнучкістю масштабування. RESTful API використовує HTTP-запити для взаємодії з ресурсами, які зазвичай представлені через URL, здійснюючи дії створення, читання, оновлення та видалення (CRUD). Основна перевага цього підходу полягає в тому, що кожен запит містить всі необхідні дані для його правильної обробки. Використовуючи загальноприйняті методи HTTP, REST API забезпечує інтуїтивно зрозумілі точки доступу та використовує HTTP-статуси для вказівки на результат обробки запиту [9, с. 2–9].

**gRPC** – це відкрита високопродуктивна платформа для викликів віддалених процедур (RPC), спочатку розроблена Google. Вона використовує передові можливості HTTP/2 та Protocol Buffers (Protobuf) для надання платформи двійкової серіалізації, що не залежить від мови. Засновуючись на принципах мультиплексованих, двосторонніх потоків, gRPC значно підвищує продуктивність порівняно з традиційними комунікаційними протоколами [10]. Адаптивність цього фреймворку до різноманітних платформ та його підтримка потокової передачі роблять його незамінним інструментом для розробки додатків у хмарному середовищі, особливо в мікросервісних архітектурах.

**GraphQL** – мова запитів до API, створена Facebook у 2012 році та оприлюднена у 2015 році, яка надає стійке та гнучке середовище для доступу до специфічних даних. Відрізняючись від традиційних REST API з їхніми фіксованими кінцевими точками, GraphQL дозволяє користувачам звертатися саме до тих даних, які їм необхідні, оптимізуючи мережеві запити. Її основа базується на системі типів, що визначає структуру даних та можливі операції над ними, стаючи чітким контрактом між клієнтом і сервером. Такий схемний підхід, доповнений інтроспективними функціями GraphQL, надає можливості для глибокої валідації, автозаповнення та розширених інструментів [11, с. 28–29].

Вибираючи синхронну технологію для взаємодії мікросервісів, слід звернути увагу на висно-

вки дослідження [12], де були показані різниці в ефективності різноманітних технологій обміну даними. Відзначено, що gRPC є найбільш ефективним для швидкого обміну даними між клієнтом та сервером, роблячи його оптимальним вибором для додатків, що вимагають швидкої передачі даних без урахування їх об'єму. GraphQL, за даними [12], мав труднощі при роботі з меншими наборами даних, але продуктивність зростала із збільшенням об'єму даних. Дослідження також вказує, що REST має стабільну і збалансовану продуктивність в різних умовах, що підкреслює його широке застосування. Особливий акцент зроблено на кореляцію між використанням пам'яті та продуктивністю: gRPC, незважаючи на високу швидкість, потребує значних ресурсів пам'яті. На підставі вищезазначеного [12], можна зробити висновок, що вибір технології повинен базуватися на специфіці потреб сервісів. gRPC ідеально підходить для тих, хто шукає швидкість, тоді як REST залишається універсальним рішенням. GraphQL рекомендується для сервісів, що працюють із складними структурами даних і операціями на основі запитів.

Синхронні виклики у контексті мікросервісної архітектури асоціюються з простотою та інтуїтивністю, відображаючи традиційний послідовний підхід до програмування. Більшість розробників звикли до синхронного стилю, використовуючи його для створення SQL чи HTTP запитів. Тому при переході до розподіленої архітектури цей стиль виглядає знайомим. Проте, не дивлячись на зрозумілість та простоту імплементації, синхронна взаємодія приховує ряд обмежень та ризиків. Основна проблема полягає в тому, що при збою одного мікросервісу, інші, які на нього посилаються, можуть заблокуватися, очікуючи відгуку. Така поведінка може створити ланцюговий ефект, коли недоступність одного компонента веде до проблем в усій системі. До того ж, можливі затримки у взаємодії між мікросервісами можуть погіршити загальну продуктивність і збільшити час очікування відгуку [8, с. 96].

Для вирішення вищезазначених викликів часто використовують балансування навантаження. Використання різних методів та технік балансування навантаження може забезпечити стабільність розподіленої системи, розподіляючи завдання між різними мікросервісами та ресурсами. Це забезпечує уникнення "вузьких місць", максимізуючи ефективність системи. Таким чином, замість того, щоб допустити, що одна помилка впливає на усю систему, балансування

навантаження розподіляє запити, зменшуючи ризики та підвищуючи загальну продуктивність та відгук системи [13].

Балансування навантаження зазвичай поділяється на дві категорії: статичне балансування навантаження та динамічне балансування навантаження.

Статичні стратегії балансування навантаження передбачають розподіл трафіку між сервісами на основі типової діяльності системи або заздалегідь визначених ресурсів. Водночас, рішення про перерозподіл навантаження приймається без врахування актуального стану системи [15]. Хоча статичні алгоритми балансування навантаження є простими у реалізації та впровадженні, вони можуть викликати проблеми в продуктивності системи через ризик перевантаження чи недостатнього завантаження [14].

Найпопулярнішими статичними методами балансування навантаження є наступні:

– **Round-Robin** – алгоритм циклічного планування. Його головна ідея полягає в цілеспрямованому розподілі завдань між вузлами в послідовному порядку. Починаючи з довільно вибраного вузла, завдання розподіляються послідовно. Кожний сервер обслуговує процеси без попереднього призначення пріоритетів, що забезпечує відсутність затримок. При рівному розподілі навантаження це забезпечує швидке реагування. Але існують випадки, коли процеси потребують різного часу на виконання: окремі вузли можуть перевантажуватися, а інші залишатися невикористаними [15].

– **Weighted Round-Robin** – удосконалена версія алгоритму циклічного планування. Визначає вагу кожного сервера з урахуванням його потужності та можливостей [15]. За допомогою цих ваг завдання розподіляються так, що сервери із вищою потужністю отримують більше завдань [14]. У випадку, коли всі сервери мають однакову вагу, трафік рівномірно розподіляється між ними [15]. Незважаючи на ефективність цього методу у розподілі завдань відповідно до потужності сервера, він може бути трохи повільнішим в порівнянні із звичайною версією цього алгоритму [14]. Зазвичай, адміністратори визначають ваги серверів, виходячи з їхньої оцінки потужності сервера та його спроможності обробляти трафік.

– **IP Hashing** – за допомогою IP-адреси клієнта, цей підхід генерує специфічний хеш-ключ, щоб вибрати найкращий сервер для обробки запиту. Інтегруючи IP-адреси клієнта та сервера, метод створює унікальний ключ для спрямування

клієнта на відповідний сервер [17]. У випадках, коли сеанс розривається, ключ може бути повторно згенерований, гарантуючи, що запит клієнта залишається у відповідності з початковим сервером [16, 17]. Ця система необхідна, коли потрібно підтримувати активні сеанси або зберігати інформацію під час ряду звернень клієнта [16]. Такий підхід є ключовим елементом балансування навантаження, що забезпечує стабільність у співпраці між клієнтом та сервером.

Динамічні методи балансування навантаження, на відміну від статичних, спрямовані на виявлення найменш завантажених серверів або віртуальних машин у системі, щоб гарантувати ефективний розподіл завдань [14, 15]. Використання таких методів передбачає взаємодію в реальному часі з мережею, що може спричинити зростання трафіку. Основною відмінністю методів динамічного балансування є їх гнучкість: ці методи мають можливість реагувати на поточний стан системи, перерозподіляючи задачі від перевантажених до менш зайнятих ресурсів серверів у реальному часі [15].

Наступні методи динамічного балансування навантаження найбільше зустрічаються на практиці:

– **Least Connection** – це стратегія балансування навантаження направляє користувачські запити до сервера з найменшим числом активних з'єднань [17]. Відповідно до цього методу, сервери з меншим числом з'єднань вважаються менш завантаженими та краще підходять для обробки нових запитів. Система рівномірно розподіляє навантаження, запобігаючи можливим перевантаженням. Метод враховує, що всі з'єднання потребують приблизно однакових ресурсів, тому він особливо ефективний для серверів з аналогічними характеристиками, що мають тривалі активні з'єднання [18].

– **Weighted least connection** – базується на методі мінімального з'єднання. При цьому підході, коли балансувальник навантаження отримує новий запит на завдання, він вибирає сервер на основі його поточної кількості з'єднань відносно призначеного йому вагового коефіцієнта в межах групи серверів [19]. Адміністратори мають можливість призначати різні вагові коефіцієнти кожному серверу, враховуючи, що деякі сервери можуть обробляти більшу кількість з'єднань, ніж інші. Цей метод враховує різні можливості кожного серверу та вплив кількості з'єднань, що підвищує ефективність системи.

– **Weighted response time** – ця стратегія враховує середній час відповіді кожного сервера у мережі, щоб приймати обґрунтовані рішення щодо маршрутизації. Вивчаючи як час відповіді,

так і поточну кількість відкритих з'єднань, які підтримує кожен сервер, алгоритм може більш точно визначити, куди направляти вхідний трафік [20, 21]. Основна перевага цього підходу полягає в тому, що він постійно прагне направляти користувачів до серверів, які демонструють найшвидший час відповіді, забезпечуючи таким чином оптимальний та швидкий досвід обслуговування для кінцевих користувачів.

– **Resource-based** – ресурсна стратегія оцінює реальні доступні ресурси кожного сервера у мережі. Для цього кожен сервер оснащений спеціалізованим програмним забезпеченням, яке часто називають «агентом» [21]. Цей агент відповідає за постійний моніторинг та звітність про доступні обчислювальні ресурси сервера, такі як використання ЦПУ та доступну пам'ять. Перед направленням трафіку балансувальник навантаження спілкується з цим агентом, щоб визначити поточну ємність сервера [20]. В результаті трафік направляється до серверів на основі їх реальної ємності та готовності обробляти запити, забезпечуючи збалансоване навантаження та запобігання перевантаженню будь-якого окремого сервера.

Враховуючи попередньо описані труднощі синхронної взаємодії, слід зазначити, що синхронне спілкування між сервісами не завжди задовольняє потреби, особливо у системах, що постійно змінюються, займаються обробкою великих потоків даних чи вимагають високу надійність. Тому індустрія все більше звертається до асинхронних методів спілкування. Ці методи дозволяють службам взаємодіяти без постійного очікування відповідей від інших учасників системи [22]. Служби можуть займатися паралельними завданнями, а отримавши повідомлення або запит вони негайно приступають до його аналізу та опрацювання. Така модель не лише оптимізує роботу, але й допомагає уникнути численних проблем, характерних для синхронної комунікації. Важливо підкреслити, що асинхронність сприяє зменшенню прямих залежностей між мікросервісами, що в свою чергу покращує стабільність системи, сприяє легшому розширенню та масштабуванню мікросервісної архітектури.

При детальному вивченні асинхронних методів комунікації можна виявити ряд специфічних підходів до передачі інформації, кожен з яких має свої характерні переваги та рекомендовані області застосування.

**Комунікація через спільні дані** – у цій моделі вищестоящий сервіс змінює спільно використовувані дані, які після цього використовуються

одним або декількома нижчестоящими сервісами для визначення конкретних операцій. Цей метод відзначається своєю простотою та універсальністю. Його можна без зусиль реалізувати, використовуючи добре відомі технології, такі як читання/запис файлів або операції з базами даних. Такий підхід сприяє не лише легкості впровадження, але й забезпечує взаємодію між широким спектром систем [8]. Ця модель ідеально підходить для обробки великих об'ємів даних, але може мати затримки через механізми опитування, що робить її менш оптимальною для обробки даних в реальному часі. Хоча можна розширити цю модель додатковими викликами для сповіщення нижчестоящих сервісів про нові дані, для негайної обробки даних ефективніше використовувати технології, такі як Kafka [22]. Однак основний виклик цього способу комунікації полягає в потенційних залежностях від спільного сховища даних. Його зміни можуть впливати на стабільність взаємодії сервісів. Надійність цієї моделі прямо залежить від стабільності та цілісності сховища даних [8, с. 102–104].

**Комунікація по принципу «запит-відповідь»** – цей метод взаємодії застосовується, коли від отримувача очікується відгук, але не негайно. В такій асинхронній комунікації сервіси не спілкуються безпосередньо; замість цього вони обмінюються повідомленнями за допомогою брокера. Сервіс надсилає повідомлення до брокера, а інші сервіси підписуються, щоб отримувати відповідні повідомлення [23]. Такий підхід зменшує складність безпосереднього спілкування мікросервісів, полегшуючи оновлення та масштабування, дозволяє інформувати відправника про результати обробки повідомлення у неблокуючий спосіб та чудово підходить для виконання довготривалих завдань.

Як приклад цього виду комунікації можна розглянути ситуацію з області електронної комерції, де система замовлень резервує товари в системі інвентаризації. Замість того, щоб безпосередньо запитувати систему інвентаризації, система замовлення надсилає запит, який ставиться в чергу. Система інвентаризації, коли їй зручно, обробляє цей запит і надсилає відповідь. Цю відповідь можна помістити в іншу чергу, яку пізніше перевіряє система замовлення [8, с. 106].

Однак, такий метод має свої складнощі. Поєднання відповідей з їхніми початковими запитом може бути непростим, особливо із затримками або коли є кілька шляхів обслуговування [24]. Крім того, асинхронна модель «запит-відповідь»

вимагає стратегій для вирішення можливих затримок, щоб уникнути нескінченного очікування відповіді, а також більш просунутого механізму обробки помилок.

**Комунікація, орієнтована на конкретні події (подієво-орієнтована комунікація)**, є методологією проектування, де специфічні дії або комунікаційні процеси ініціюються на основі попередньо встановлених подій [8, с. 111]. Цей підхід представляє зсув парадигми від традиційних схем «запит-відповідь», акцентуючи увагу на більш гнучкому та адаптованому механізмі комунікації [25].

Основний принцип подієво-орієнтованого спілкування полягає в розумінні подій як важливих змін у стані інформації [25]. Замість традиційних способів обміну повідомленнями, де служби мають чітке уявлення про структуру та вміст повідомлення, в даному методі комунікація не завжди потребує такої деталізації. Служби або компоненти комунікують між собою, відправляючи події, які вони генерують самостійно. Ці події діють як сигнали або активатори для інших частин системи чи окремих систем, свідчаючи про виконання певної умови або здійснення конкретної дії [23].

У цій конфігурації ключову роль відіграють посередники або брокери подій. Вони служать мостом, обробляючи підписки на події та забезпечуючи доставку сповіщень усім релевантним підписникам [8, с. 110; 26]. Особливість цієї системи полягає в тому, що вона децентралізована: видавці подій, зазвичай, не мають інформації про підписників і навпаки. Така схема підтримує моделі комунікації типу «один до багатьох» або «багато до багатьох», де численні видавці можуть ініціювати події, на які, в свою чергу, можуть відгукуватися багато підписників [25].

Центральною особливістю у цій комунікації є роз'єднаність між видавцями подій та підписниками, що дозволяє взаємодіям базуватися на моделі публікації та підписки. Така структура підсилює гнучкість системи, додає їй адаптивності та стійкості до непередбачених змін. Це знижує пряму залежність від конкретних подій, відкриваючи шлях для більш динамічного обміну інформацією [23].

У світі сучасних технологій, особливо у контексті мікросервісів, такий підхід до комунікації зарекомендував себе як надзвичайно ефективний. Він забезпечує слабку взаємозалежність між компонентами, що є критично важливим для складних розподілених систем. Це особливо корисно у сценаріях, де необхідно передавати динамічну

інформацію між різними службами або коли компоненти мають здійснювати незалежні дії, базуючись на зовнішніх подіях [8, с. 115]. Інновації у сфері Інтернету речей [26], в свою чергу, демонструють, як цей підхід може бути адаптований для різноманітних додатків, оптимізуючи комунікацію та масштабованість.

Впровадження подієво-орієнтованого спілкування приносить не лише переваги, але й виклики. Для команд і фахівців, які вперше стикаються з таким стилем взаємодії, можуть виникнути певні складнощі у сприйнятті та адаптації. Основна зміна полягає у тому, що фокус зсувається з прямого управління компонентами до самостійного визначення їх дій на основі зовнішніх подій. Це ставить перед розробниками завдання не лише технічного характеру, а й концептуального, оскільки вони повинні переосмислити спосіб взаємодії компонентів системи.

Поглиблюючи розуміння типів взаємодії мікросервісних компонентів, стає важливим докладніше вивчити випадки, коли варто вибрати синхронні чи асинхронні механізми комунікації.

Синхронна комунікація є невід'ємною частиною багатьох сучасних систем, особливо там, де швидкість реакції та отримання зворотного зв'язку є критичною. Наприклад, системи обробки запитів у онлайн-базах даних, транзакційні системи фінансових установ або навіть звичайний веб-запит до сервера. У всіх цих випадках користувач або система надсилає запит і очікує негайної відповіді перед тим, як продовжити наступний крок. Проте, не дивлячись на її простоту та ефективність у певних сценаріях, синхронна комунікація може стати проблемою в мікросервісних системах. Затримки мережі, високе навантаження на сервери та недоступність певних сервісів можуть стати перешкодами для її ефективності.

З іншого боку, асинхронна комунікація являється фундаментом систем, що працюють на основі подій чи конкретних тригерів. Такий під-

хід дозволяє системам відправляти повідомлення, переходити до інших завдань та обробляти відповідь після її отримання. Це робить цю модель підходящою для багатогранних операцій. Наприклад, коли одна дія активує кілька сервісів, асинхронна комунікація гарантує, що затримка в одному компоненті не блокує весь процес. Вона також незамінна в довготривалих завданнях. Уявімо завдання з обробки великого обсягу даних; тут асинхронний підхід гарантує, що ресурси не будуть прив'язані, очікуючи завершення процесу. Проте асинхронність також має свої виклики, зокрема гарантію доставки повідомлень, збереження послідовності та управління повідомленнями які дублюються.

**Висновки.** У даній роботі були розглянуті та проаналізовані механізми комунікації мікросервісних компонентів, акцентуючи увагу на відмінностях між синхронними та асинхронними методами. Синхронний метод комунікації, характеризований оперативністю реакцій, є есенціальним в контекстах, що потребують негайного зворотного зв'язку. Він демонструє ефективність у визначених умовах, проте може стикаються з викликами в структурах мікросервісів, зокрема через можливі затримки та перебої в обслуговуванні. З іншого боку, асинхронний метод базується на подієвій моделі та специфічних тригерах, забезпечуючи системам можливість паралельної обробки завдань та негайного реагування на вхідні події. Ця методика є оптимальною для комплексних операцій, зокрема, при активації декількох служб однією подією або в контексті тривалих процесів. Втім, асинхронний метод презентує ряд технічних викликів, таких як забезпечення доставки повідомлень, гарантія послідовності та управління дублюванням повідомлень. Вибір конкретного механізму комунікації визначається специфічними потребами системи, що підкреслює важливість глибокого аналітичного осмислення обох підходів.

#### Список літератури:

1. Lewis J., Fowler M. Microservices: a definition of this new architectural term. URL: <https://martinfowler.com/articles/microservices.html> (date of access: 20.09.2023).
2. Richardson C. Microservices Patterns: With examples in Java. Manning Publications, 2018. 522 p.
3. Microservice Architecture: Aligning Principles, Practices, and Culture / R. Mitra et al. O'Reilly Media, 2016. 146 p.
4. Schermann G., Cito J., Leitner P. All the Services Large and Micro: Revisiting Industrial Practice in Services Computing. Service-Oriented Computing – ICSOC 2015 Workshops. Berlin, Heidelberg, 2016. P. 36–47. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-662-50539-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-662-50539-7_4) (date of access: 24.09.2023).
5. Microservices: How To Make Your Application Scale / N. Dragoni et al. Lecture Notes in Computer Science. Cham, 2018. P. 95–104. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-74313-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-74313-4_8) (date of access: 01.10.2023).
6. Evans E. Domain-Driven Design: Tackling Complexity in the Heart of Software. Pearson Education, Limited, 2021.



7. Mazlami G., Cito J., Leitner P. Extraction of Microservices from Monolithic Software Architectures. 2017 IEEE International Conference on Web Services (ICWS), Honolulu, HI, USA, 25–30 June 2017. 2017. URL: <https://doi.org/10.1109/icws.2017.61> (date of access: 02.10.2023).
8. Newman S. Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems. O'Reilly Media, Incorporated, 2021. 616 p.
9. Richardson L., Ruby S., Amundsen M. RESTful Web APIs. O'Reilly Media, Incorporated, 2013.
10. Indrasiri K., Kuruppu D. GRPC : up and Running: Building Cloud Native Applications with Go and Java for Docker and Kubernetes. O'Reilly Media, Incorporated, 2020. 204 p.
11. Buna S. GraphQL in Action. Manning Publications Company, 2020. 375 p.
12. Śliwa M., Pańczyk B. Performance comparison of programming interfaces on the example of REST API, GraphQL and gRPC. Journal of Computer Sciences Institute. 2021. Vol. 21. P. 356–361. URL: <https://doi.org/10.35784/jcsi.2744> (date of access: 06.10.2023).
13. Prassanna J., Jadhav P. A., Neelanarayanan V. Towards an Analysis of Load Balancing Algorithms to Enhance Efficient Management of Cloud Data Centres. Proceedings of the 3rd International Symposium on Big Data and Cloud Computing Challenges (ISBCC – 16'). Cham, 2016. P. 143–155. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-30348-2\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-30348-2_13) (date of access: 07.10.2023).
14. Comparative analysis of metaheuristic load balancing algorithms for efficient load balancing in cloud computing / J. Zhou et al. Journal of Cloud Computing. 2023. Vol. 12, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s13677-023-00453-3> (date of access: 07.10.2023).
15. Shah N., Farik M. Static Load Balancing Algorithms In Cloud Computing: Challenges & Solutions. International Journal of Scientific & Technology Research, Volume 4, October 2015, P. 353-355.
16. Srikanth Dannarapu, Load Balancing Algorithms that can be used in Java Applications. URL: <https://medium.com/javarevisited/load-balancing-algorithms-that-can-be-used-in-java-applications-6f605d1bf19> (date of access: 08.10.2023).
17. Pachikkal C. S. Interservice Communication in Microservices. International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology, Volume 5, Issue 2, May 2021, P. 498-503. URL: <https://doi.org/10.48175/568> (date of access: 10.10.2023).
18. Xuan Phi N., Cong Hung T. Load Balancing Algorithm to Improve Response Time on Cloud Computing. International Journal on Cloud Computing: Services and Architecture. 2017. Vol. 7, no. 6. P. 01–12. URL: <https://doi.org/10.5121/ijccsa.2017.7601> (date of access: 11.10.2023).
19. Load Balancing Algorithm for Web Server Based on Weighted Minimal Connections. Journal of Web Systems and Applications. 2017. Vol. 1, no. 1. URL: <https://doi.org/10.23977/jwsa.2017.11001> (date of access: 11.10.2023).
20. What is load balancing? URL: <https://aws.amazon.com/what-is/load-balancing/> (date of access: 12.10.2023).
21. Types of load balancing algorithms. URL: <https://www.cloudflare.com/learning/performance/types-of-load-balancing-algorithms/> (date of access: 12.10.2023).
22. Tejas V. G., Hemavathy R. Microservices and its Intercommunication using Kafka. International Research Journal of Engineering and Technology, Volume 7, Issue 4, April 2020, P. 5632-5635. URL: <https://www.irjet.net/archives/V7/i4/IRJET-V7I41061.pdf> (date of access: 13.10.2023).
23. Implementation of Asynchronous Microservices Architecture on Smart Village Application / S. A. Asri et al. International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology. 2022. Vol. 12, no. 3. P. 1236. URL: <https://doi.org/10.18517/ijaseit.12.3.13897> (date of access: 15.10.2023).
24. Asynchronous Request-Reply pattern. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/architecture/patterns/async-request-reply> (date of access: 16.10.2023).
25. David J. S. Development of a digital twin of a flexible manufacturing system for assisted learning. URL: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.26398.08000> (date of access: 20.10.2023).
26. A Publish/Subscribe Protocol for Event-Driven Communications in the Internet of Things / C. Esposito et al. 2016 IEEE 14th Intl Conf on Dependable, Autonomic and Secure Computing, 14th Intl Conf on Pervasive Intelligence and Computing, 2nd Intl Conf on Big Data Intelligence and Computing and Cyber Science and Technology Congress(DASC/PiCom/DataCom/CyberSciTech)2016, Auckland, 8–12 August 2016. 2016. URL: <https://doi.org/10.1109/dasc-picom-datacom-cyberscitech.2016.79> (date of access: 23.11.2023).

## **Kotenko M.M., Vakaliuk T.A. THEORETICAL ANALYSIS OF MICROSERVICE COMPONENTS INTERACTION PRINCIPLES**

*Within the context of the continuous evolution of distributed systems, this study delves into the dynamic interplay of microservice components, particularly considering the balance between synchronous and*

*asynchronous communication methods. Inter-service communication is a fundamental aspect of microservice architecture, playing a pivotal role in determining the system's efficiency, reliability, and scalability. This work systematically examines core paradigms, elucidating the distinctions between direct interactions inherent in synchronous systems and the characteristics of asynchronous systems rooted in an event-driven model. Such differentiations are crucial for a profound understanding of the impact of each on system architecture and its performance. Asynchronous communication is characterized by its capability to initiate events that multiple participants can respond to, fostering flexibility, adaptability, and system resilience to external changes. The decentralization in relations between event initiators and listeners mirrors the principles of dynamic information exchange, underscoring its paramount importance in the realm of contemporary technological realities. However, transitioning to this paradigm is not without challenges. Professionals accustomed to traditional component management approaches may encounter conceptual and technical difficulties when adapting to this model. In scenarios where synchronous communication is optimal for instances requiring immediate interaction, its limitations in microservice architecture, such as potential delays, excessive load, and service instability, become evident. Although asynchronous mechanisms are notable for their efficiency in multitasking operations, their adaptation is accompanied by distinct challenges, including ensuring delivery, sequence integrity, and error handling. This analysis emphasizes the necessity for a judicious approach to selecting communication methods in microservices. Considering the advantages and constraints of each method can aid in developing reliable, scalable, and effective systems. The prospects of distributed computing are intrinsically linked to the comprehension and application of this balance.*

**Key words:** *microservices, component interaction, synchronous communication, asynchronous communication, event-driven communication, event broker, load balancing.*

*Лісовець С.М.*

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

## ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОКОЛИВАНЬ В КОНТУРІ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМ ПРИВОДОМ ПРОМИСЛОВОГО МАНІПУЛЯЦІЙНОГО РОБОТА ПО ПОЛОЖЕННЮ

Однією із задач, які необхідно вирішувати під час проектування і подальшої експлуатації промислових маніпуляційних роботів, в тому числі у складі робототехнічних систем та комплексів, є утримання (часто фіксація) робочого органу маніпулятора в заданому положенні протягом заданого часового проміжку із заданою точністю. Це пов'язано, насамперед, із зміною умов роботи промислового маніпуляційного робота (наявність вібрації, ударів, поштовхів), пружною піддатливістю його кінематичного ланцюга і зміною маси його робочого органу (наприклад, внаслідок заміни інструмента, який є складовою частиною робочого органу). З трьох основних способів вирішення такої задачі, перші два з яких полягають у використанні фіксуючих і самогальмівних елементів, найбільш доцільним є відслідковування заданого положення за рахунок роботи контуру керування електромеханічним приводом. Головною особливістю роботи такого контуру є наявність зони нечутливості, в основному пов'язана з обмеженою роздільною здатністю датчика положення. Внаслідок такої роботи робочий орган починає здійснювати в "околиці" точки позиціонування періодичні (квазіперіодичні) рухи, подібні до автоколиваний. При правильному налаштуванні такі рухи не будуть перевищувати заданої точності, і робота контуру керування буде коректною. У виконаному дослідженні здійснено розрахунок контуру керування згідно з критерієм стійкості Михайлова і методом гармонічної лінеаризації, в результаті якого було отримано амплітуду і частоту автоколиваний в такому контурі. Одночасно з цим було виконано симуляцію цього ж контуру у вигляді моделі в Simulink. Результати розрахунку, незважаючи на його наближеність, і симуляції збіглися в межах допустимої похибки. Крім цього, було встановлено, що отримані в результаті розрахунку і симуляції параметри автоколиваний є близькими до параметрів автоколиваний однієї з координат багатопільового робота «Універсал-5», отриманих іншими авторами.

**Ключові слова:** автоколивання, електромеханічний привід, контур керування, метод гармонічної лінеаризації, промисловий маніпуляційний робот, система позиціонування.

**Постановка проблеми.** Системи позиціонування сучасних промислових маніпуляційних роботів використовують переважно електромеханічні приводи, в яких застосовуються електричні двигуни постійного (колекторні чи безколекторні) або змінного струмів. Основними задачами робота, який має маніпулятор, є переміщення робочого органу маніпулятора в задане положення (разом з деталлю або інструментом, які таким органом утримуються) і утримання робочого органу маніпулятора в заданому положенні протягом заданого часового проміжку. В таких системах навантаження на робочий орган внаслідок виконання певних виробничих операцій може бути змінено в будь-який час (наприклад, внаслідок зменшення маси фарби в фарборозпилювачі), через що його положення також буде змінено відносно заданого. Абсолютна похибка позиціонування (орієнтування) робочого органу при цьому може значно збільшитись і перевищити допустиме значення. Для того, щоб надійно позиціону-

вати (орієнтувати) робочий орган, використовуються три основні способи.

Згідно з першим способом, для цього використовуються різні фіксуючі елементи (муфти, гальма і так далі). В такому випадку, особливо при виникненні нештатних або аварійних ситуацій, робочий орган буде надійно зафіксований. Але такі елементи значно ускладнюють конструкцію маніпуляційного робота, а іноді їх встановлення і використання є технічно неможливими. Згідно з другим способом, використовуються різні самогальмівні елементи. Але в такому випадку може в кілька раз збільшитись "сухе" тертя, внаслідок чого керування положенням робочого органу значно ускладниться. Згідно з третім способом, який є найбільш ефективним і який застосовується в сучасній робототехніці найчастіше, вал електричного двигуна (і, відповідно, вал механічного редуктора) утримується в заданому положенні за рахунок роботи контуру керування електромеханічним приводом промислового маніпуляційного робота по положенню.

Маніпуляційний робот, який має певну кількість ступенів свободи, звичайно має таку ж кількість електромеханічних приводів і контурів керування такими приводами. Отже, робота одного (рідше кількох) з таких контурів призводить до того, що робочий орган постійно знаходиться в «околиці» потрібної точки позиціонування, здійснюючи періодичні (квазіперіодичні) рухи, подібні до автоколивань. Так як динаміка таких рухів має явно нелінійний характер, то її дослідження представляє собою достатньо актуальну задачу [1, 2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Відомо, що одним з основних недоліків позиціонування робочого органу за рахунок автоколивань є підвищені вимоги до точності датчика положення. Але, наприклад, типовий сучасний датчик кутового положення RCS 3100 виробництва ATEK Electronics Sensor Technologies Inc. вартістю не більше \$100 (див. рис. 1) забезпечує повторюваність вимірювання кутового положення не гірше  $\pm 0,1^\circ$ , що при довжині останньої ланки маніпулятора 0,5 м забезпечує повторюваність лінійного положення робочого органу не гірше приблизно  $\pm 0,9$  мм – для багатьох практичних застосувань така точність є достатньою.



Рис. 1. Зовнішній вигляд датчика кутового положення RCS 3100

Мета роботи полягала в розрахунку режимів роботи і подальшій симуляції у вигляді моделі в Simulink контуру керування електромеханічним приводом промислового робота по положенню, регулятор положення якого має нелінійності у вигляді зони нечутливості (а часто і гістерезису) і обмежень.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Спрощена структура контуру керування електромеханічним приводом промислового робота по положенню наведена на рис. 2.

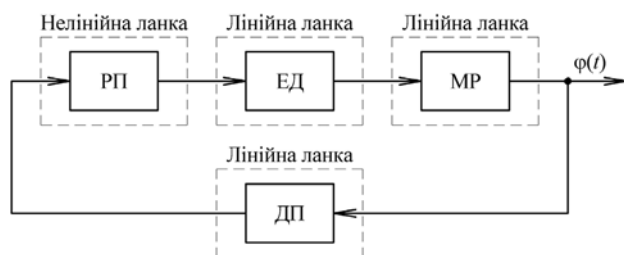


Рис. 2. Спрощена структура контуру керування електромеханічним приводом промислового робота по положенню

При цьому було припущено наступне: по-перше, такий контур керування дозволяє керувати кутовим положенням електромеханічного приводу  $\varphi(t)$ , а по-друге, точка позиціонування може бути будь-якою в діапазоні допустимих кутів повороту електромеханічного приводу, і розглядаються тільки рухи в «околиці» такої точки.

Така структура складається з регулятора положення (РП), електричного двигуна (ЕД), механічного редуктора (МР) і датчика положення (ДП). З точки зору теорії автоматичного керування, регулятор положення є нелінійною ланкою, а електричний двигун, механічний редуктор і датчик положення – лінійними ланками. Структура регулятора положення з нелінійністю у вигляді зони нечутливості наведена на рис. 3.

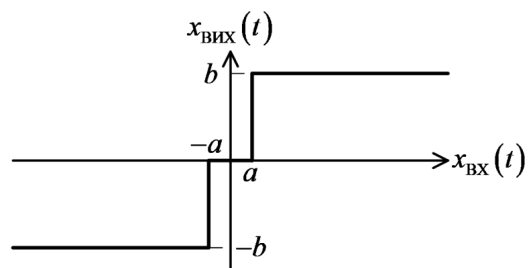


Рис. 3. Структура одного з найпростіших регуляторів положення

Регулятор положення являє собою типову нелінійну ланку з двома видами симетричних відносно відповідних координатних осей обмежень: відносно осі ординат він має для вхідного сигналу  $x_{вх}(t)$  зону нечутливості шириною  $\pm a$ , а відносно осі абсцис він має для вхідного сигналу  $x_{вх}(t)$  обмеження на рівні  $\pm b$  [2]. Така ланка може бути реалізована як у вигляді аналогової електричної схеми, так і у вигляді програмного коду в мікропроцесорі / мікроконтролері.

Згідно з методом гармонічної лінеаризації (який є достатньо точним, але принципово є наближенням), в контурі керування кутовим положенням існують коливання з незмінною амплітудою і частотою (автоколивання), форма яких є гармонійною внаслідок того, що лінійні ланки (всі або їх частина) такого контуру виконують роль фільтра основної гармоніки [3, 4, 5]. Коефіцієнт передачі регулятора положення  $K_{рп}$  на основній гармоніці є однозначною функцією амплітуди такої гармоніки  $A$  на своєму вході:

$$K_{рп}(A) = \frac{4b}{\pi A} \sqrt{1 - \frac{a^2}{A^2}}. \quad (1)$$

Наприклад, на рис. 4 наведено залежність  $K_{рп}(A)$  при  $a = 0,1$  і  $b = 1$ .

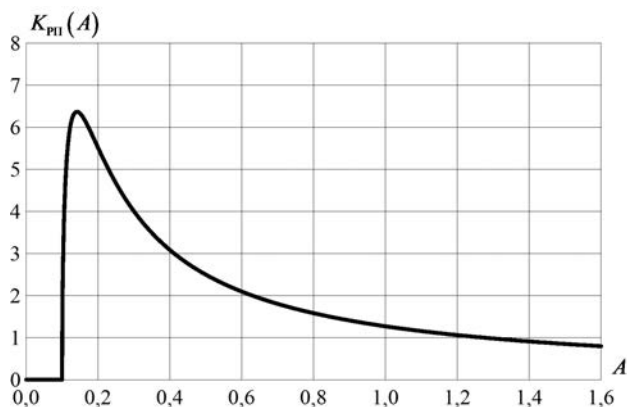


Рис. 4. Залежність  $K_{PP}(A)$  при  $a = 0,1$  і  $b = 1$

При інших значеннях  $a$  і  $b$  залежність  $K_{PP}(A)$  буде мати вигляд, аналогічний наведеному на рис. 4. Відповідно, передатна функція  $W_{PP}(s, A)$  буде такою:

$$W_{PP}(s, A) = K_{PP}(A), \quad (2)$$

або ж

$$W_{PP}(s, A) = \frac{4b}{\pi A} \sqrt{1 - \frac{a^2}{A^2}}. \quad (3)$$

Передатну функцію  $W_{ED}(s)$  електричного двигуна (як аперіодичної ланки 2-го порядку) можна представити наступним чином:

$$W_{ED}(s) = \frac{K_{ED}}{(T_{ED}^{MEX} s + 1)(T_{ED}^{MAG} s + 1)}, \quad (4)$$

де  $K_{ED}$  – коефіцієнт передачі;  $T_{ED}^{MEX}$  – електроємнісна стала;  $T_{ED}^{MAG}$  – електромагнітна стала.

А передатну функцію  $W_{MP}(s)$  механічного редуктора (як інтегруючої ланки) таким чином:

$$W_{MP}(s) = \frac{K_{MP}}{s}, \quad (5)$$

де  $K_{MP}$  – коефіцієнт передачі.

Якщо прийняти, що датчик положення реалізує одиничний від'ємний зворотний зв'язок, то його передатна функція  $W_{DP}(s)$  буде такою:

$$W_{DP}(s) = 1. \quad (6)$$

Отже, з урахуванням визначеності передатних функцій контур керування електромеханічним приводом матиме вигляд, наведений на рис. 5. Звідси можна отримати, що в розімкненому стані передатна функція  $W_{PO3}(s, A)$  контуру керування кутовим положенням буде такою:

$$W_{PO3}(s, A) = W_{PP}(s, A) W_{ED}(s) W_{DP}(s) W_{MP}(s) = \frac{K_{PP}(A) K_{ED} K_{MP}}{(T_{ED}^{MEX} s + 1)(T_{ED}^{MAG} s + 1) s}. \quad (7)$$

Відповідно, в замкненому стані передатна функція  $W_{ZAMK}(s, A)$  такого контуру буде такою:

$$W_{ZAMK}(s, A) = \frac{W_{PP}(s, A) W_{ED}(s) W_{DP}(s) W_{MP}(s)}{1 + W_{PP}(s, A) W_{ED}(s) W_{DP}(s) W_{MP}(s)} = (8)$$

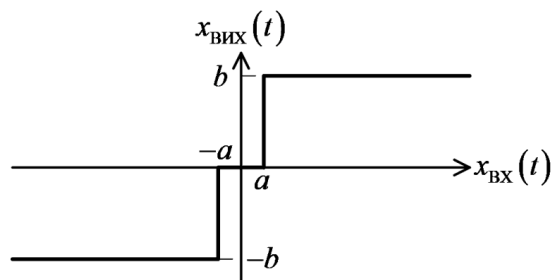


Рис. 5. Контур керування кутовим положенням з урахуванням визначеності передатних функцій

$$\begin{aligned} &= \frac{K_{PP}(A) K_{ED} K_{MP}}{(T_{ED}^{MEX} s + 1)(T_{ED}^{MAG} s + 1) s} = \\ &= \frac{K_{PP}(A) K_{ED} K_{MP}}{(T_{ED}^{MEX} s + 1)(T_{ED}^{MAG} s + 1) s + K_{PP}(A) K_{ED} K_{MP}} = \\ &= \frac{K_{PP}(A) K_{ED} K_{MP}}{T_{ED}^{MEX} T_{ED}^{MAG} s^3 + (T_{ED}^{MEX} + T_{ED}^{MAG}) s^2 + s + K_{PP}(A) K_{ED} K_{MP}}. \end{aligned}$$

Характеристичний поліном  $H(s)$  такої передатної функції має наступний вигляд:

$$T_{ED}^{MEX} T_{ED}^{MAG} s^3 + (T_{ED}^{MEX} + T_{ED}^{MAG}) s^2 + s + K_{PP}(A) K_{ED} K_{MP}. \quad (9)$$

Підставляючи  $j\omega$  замість  $s$ , можна отримати  $H(j\omega)$  в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} H(j\omega) &= T_{ED}^{MEX} T_{ED}^{MAG} (j\omega)^3 + (T_{ED}^{MEX} + T_{ED}^{MAG}) (j\omega)^2 + j\omega + K_{PP}(A) K_{ED} K_{MP} = \\ &= (K_{PP}(A) K_{ED} K_{MP} - (T_{ED}^{MEX} + T_{ED}^{MAG}) \omega^2) + j(\omega - T_{ED}^{MEX} T_{ED}^{MAG} \omega^3). \end{aligned} \quad (10)$$

Згідно з критерієм стійкості Михайлова для неперервних лінійних систем керування, для знаходження контуру керування кутовим положенням на межі стійкості (в автоколивальному режимі роботи) характеристичний поліном  $H(j\omega)$  (крива Михайлова) повинен проходити через точку з координатами  $(0,0)$  (початок координат комплексної площини). Виходячи з цього, було отримано наступну систему з двох рівнянь:

$$\begin{cases} K_{PP}(A) K_{ED} K_{MP} - (T_{ED}^{MEX} + T_{ED}^{MAG}) \omega^2 = 0; \\ \omega - T_{ED}^{MEX} T_{ED}^{MAG} \omega^3 = 0. \end{cases} \quad (11)$$

З другого рівняння системи (11) випливало, що колова частота

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{T_{ED}^{MEX} T_{ED}^{MAG}}}. \quad (12)$$

Підставляючи рівняння (12) в перше рівняння системи (11), можна було отримати, що

$$K_{PP}(A) = \frac{T_{ED}^{MEX} + T_{ED}^{MAG}}{K_{ED} K_{MP} T_{ED}^{MEX} T_{ED}^{MAG}}. \quad (13)$$

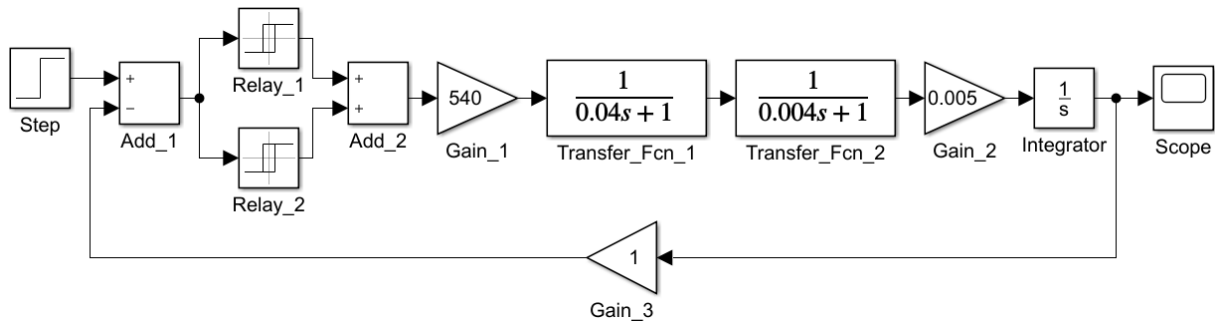


Рис. 6. Модель контуру керування електромеханічним приводом

Було розглянуто типовий електромеханічний привод промислового маніпуляційного робота. Для зручності розрахунків і моделювання кутові величини було застосовано в градусах, а регулятор положення був аналоговим і його параметри  $a$  і  $b$  були задані в вольтах. Було прийнято, що напруга живлення електричного двигуна становить 60 В і  $K_{\text{ЕД}} = 540 \text{ }^\circ/(\text{В} \cdot \text{с})$  – тобто при зміні напруги на 1 В швидкість обертання електричного двигуна зміниться на 540  $^\circ/\text{с}$  (1,5 об/с або 90 об/хв), і при напрузі 60 В становитиме 32400  $^\circ/\text{с}$  (90 об/с або 5400 об/хв). Крім цього, було прийнято, що  $T_{\text{ЕД}}^{\text{МЕХ}} = 0,04 \text{ с}$  і  $T_{\text{ЕД}}^{\text{МАГ}} = 0,004 \text{ с}$  та  $K_{\text{МР}} = 0,005$  (тобто механічний редуктор має коефіцієнт передачі 1:200), а також що коефіцієнт передачі датчика положення становить 1 В/ $^\circ$ . Також було визначено зону нечутливості регулятора положення як  $a = \pm 0,1 \text{ В}$  (тобто  $\pm 0,1 \text{ }^\circ$ ), а його керувальний вплив як  $b = \pm 60 \text{ В}$  (тобто в межах напруги живлення).

В результаті виконання розрахунку колової частоти  $\omega$  і амплітуди  $A$  автоколивань, згідно з формулою (12), було отримано, що колова частота автоколивань

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{0,04 \text{ с} \cdot 0,004 \text{ с}}} = 79,1 \frac{\text{рад}}{\text{с}}, \quad (14)$$

що відповідає частоті автоколивань  $f = 12,6 \text{ Гц}$  і періоду автоколивань  $T = 0,0795 \text{ с}$ . Згідно з формулою (13) було отримано, що коефіцієнт передачі регулятора положення

$$K_{\text{РП}}(A) = \frac{0,04 \text{ с} + 0,004 \text{ с}}{540 \cdot 0,005 \cdot 0,04 \text{ с} \cdot 0,004 \text{ с}} = 101,9. \quad (15)$$

Таким чином, згідно з формулою (1), мали наступне нелінійне рівняння:

$$101,9 = \frac{4 \cdot 60}{3,1416 \cdot A} \sqrt{1 - \frac{0,1^2}{A^2}}, \quad (16)$$

розв'язання якого дало  $A = 0,743$ .

Моделювання, в свою чергу, дало значення частоти автоколивань  $f = 12,1 \text{ Гц}$  і періоду автоколивань  $T = 0,0826 \text{ с}$  та амплітуди авто-

коливань  $A = 0,784$ . Враховуючи те, що формула (1) (а також інші формули, пов'язані з нею) є не точною, а наближеною, можна вважати, що результати розрахунків і моделювання співпали достатньо точно. Модель контуру керування електромеханічним приводом в Simulink наведена на рис. 6.

Автоколивання в контурі керування електромеханічним приводом, отримані в Simulink при  $\varphi_{\text{ВХ}}(t) = 15 \text{ }^\circ$ , наведені на рис. 7. Необхідно зауважити, що в залежності від настроювань регулятора положення перехідний процес в такому контурі може бути не тільки автоколивальним, але й із загасаючими коливаннями або аперіодичним.

Отримані в результат розрахунку і моделювання параметри автоколивань є близькими до параметрів автоколивань однієї з координат багатопільового робота «Універсал-5», отриманих іншими авторами.

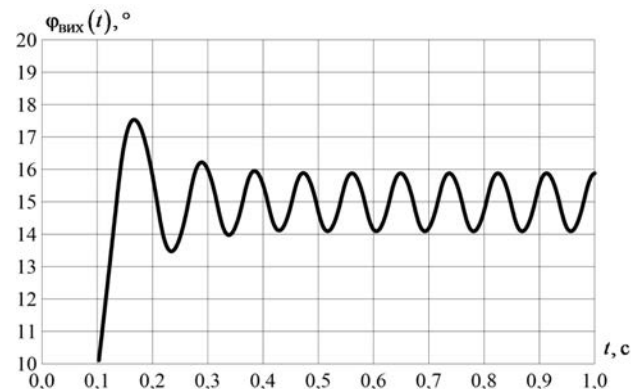


Рис. 7. Автоколивання в контурі керування електромеханічним приводом

**Висновки.** В проведеному дослідженні, використовуючи критерій стійкості Михайлова і метод гармонічної лінеаризації, показано, що утримання робочого органу маніпулятора в заданому положенні за рахунок роботи контуру керування електромеханічним приводом є одним з дієвих способів керування промисловим маніпуляційним роботом.

**Список літератури:**

1. Луцька Н.М. Оптимальні та робастні системи керування технологічними об'єктами. Монографія / Н.М. Луцька, А.П. Ладанюк. К.: Видавництво Ліра-К, 2015. 288 с.
2. Alberto Isidori. Nonlinear Control Systems (3rd edition). Springer London. 1995. Pp. 1–549.
3. Гоголюк П.Ф. Теорія автоматичного керування. Навч. посіб. / П.Ф. Гоголюк, Т.М. Гречин. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2009. 279 с.
4. Корчемний М.О. Теоретичні основи автоматики. Навч. посібн. / М.О. Корчемний, П.Б. Клендій, М.В. Потапенко. Тернопіль: Навчальна книга-Богдан, 2011. 304 с.
5. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. К.: Либідь, 1997. 544 с.

**Lisovets S.M. RESEARCH OF AUTO-OSCILLATIONS IN THE CONTROL CIRCUIT OF THE ELECTROMECHANICAL DRIVE OF THE INDUSTRIAL MANIPULATION ROBOT BY POSITION**

*One of the tasks that must be solved during the design and further operation of industrial manipulation robots, including as part of robotic systems and complexes, is to maintain (often fix) the working body of the manipulator in a given position during a given time interval with a given accuracy. This is primarily due to a change in the operating conditions of an industrial manipulation robot (the presence of vibrations, shocks, jerks), the elastic flexibility of its kinematic chain and a change in the mass of its working body (for example, due to the replacement of a tool that is a component of the working body). Of the three main methods of solving such a problem, the first two of which consist in the use of locking and self-braking elements, the most appropriate is the tracking of the given position due to the operation of the control circuit of the electromechanical drive. The main feature of the operation of such a circuit is the presence of an insensitivity zone, mainly associated with the limited resolution of the position sensor. As a result of such work, the working body begins to make periodic (quasi-periodic) movements similar to self-oscillations in the “neighborhood” of the positioning point. With proper adjustment, such movements will not exceed the specified accuracy, and the operation of the control circuit will be correct. In the performed study, the calculation of the control circuit was carried out according to the Mikhailov stability criterion and the method of harmonic linearization, as a result of which the amplitude and frequency of self-oscillations in such a circuit were obtained. At the same time, the simulation of the same circuit was performed in the form of a model in Simulink. The results of the calculation, despite its approximation, and the simulations coincided within the permissible error. In addition, it was established that the self-oscillation parameters obtained as a result of calculation and simulation are close to the self-oscillation parameters of one of the coordinates of the «Universal-5» multi-purpose robot obtained by other authors.*

**Key words:** *self-oscillation, electromechanical drive, control loop, harmonic linearization method, industrial manipulation robot, positioning system.*

**Макарова Л.М.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

**Латанська Л.О.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ НЕЛІНІЙНИХ РЕГРЕСІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗМІРУ ВЕБ-ЗАСТОСУНКІВ, ЩО СТВОРЮЮТЬСЯ МОВОЮ PYTHON З ВИКОРИСТАННЯМ DJANGO REST FRAMEWORK

*Визначення розміру програмного забезпечення на ранніх стадіях роботи над проектом є поширеною задачею в галузі інженерії програмного забезпечення. Використовуючи такі існуючі моделі як, наприклад, COCOMO, COCOMO II, ISBSG, COSMIC та отриманий розмір можна прогнозувати трудомісткість, вартість, тривалість проекту. Значну частину розроблюваних проектів становлять веб-застосунки. Однією з найбільш популярних мов веб-розробок є мова Python. Для неї існує ряд фреймворків, найбільш повним та розповсюдженим з яких є Django Rest Framework.*

*Метою дослідження є визначення найбільш якісної та достовірної нелінійної регресійної моделі для прогнозування розміру веб-застосунків, що створюються мовою Python з використанням Django Rest Framework.*

*Для отримання нелінійних регресійних моделей та інтервалів прогнозування застосовано методіку побудови нелінійних регресійних моделей на основі одновимірного нормалізуючого перетворення.*

*Для задачі аналізу побудовано дві нелінійні регресійні моделі разом з інтервалами прогнозування з використанням десятичного логарифму у якості нормалізуючого перетворення. В якості предикторів розглядалися такі метрики, як: кількість класів та кількість методів. Для однофакторної моделі предиктором слугувала кількість класів, для двофакторної – кількість класів та кількість методів у проекті. Також в роботі для порівняння була використана однофакторна нелінійна регресійна модель, побудована для веб-застосунків, які розроблені з використанням мови Java.*

*Отримані результати дозволяють зробити наступні висновки. При збільшенні кількості предикторів, що використовувалися для побудови нелінійних регресійних моделей для прогнозування розміру веб-застосунків, що створюються мовою Python з використанням Django Rest Framework, зростає якість моделі, а саме покращилися значення критеріїв якості та зменшилася ширина інтервалу прогнозування. При спробі застосувати нелінійну регресійну модель, побудовану для веб-застосунків, які розроблені з використанням мови Java, до емпіричних даних із даного дослідження, отримано низькі показники якості та більшу ширину інтервалу прогнозування. Це може слугувати підтвердженням необхідності побудови регресійних моделей для конкретної мови програмування та фреймворку.*

**Ключові слова:** оцінювання розміру програмного забезпечення, нелінійна регресійна модель, нормалізуюче перетворення, розробка програмного забезпечення, веб-застосунок, Python, Django Rest Framework.

**Постановка проблеми.** Визначення розміру програмного забезпечення на ранніх стадіях розробки проекту є важливою задачею, адже використовуючи отриманий розмір та такі моделі, як COCOMO, COCOMO II, ISBSG, COSMIC, можна виконати прогнозування вартості, тривалості та трудомісткості розробки [1–4]. Це призводить до більш якісного планування роботи над проектом, кращого управління ризиками проекту. Хоч сьогодні й існує певна кількість моделей для оцінювання розміру програмного забезпечення

для конкретних мов програмування та фреймворків, в більшості своїй ці моделі втрачають свою якість при застосуванні для іншої мови програмування, зокрема навіть при застосуванні моделі для іншого фреймворку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання побудови багатфакторних регресійних моделей для оцінювання розміру інформаційних систем для різних мов програмування, наприклад, Java та PHP, були розглянуті, зокрема, у роботах [5, 6]. Моделі в цих роботах будувалися на основі об'єктно-



орієнтованих метрик програмного забезпечення, які можна отримати з діаграми класів при ранньому проектуванні, наприклад, на кількості класів, кількості відносин між класами, середній кількості атрибутів, в той час як залежною величиною виступала кількість рядків коду. Одним із критеріїв, що дозволяє використовувати лінійний регресійний аналіз, є підпорядкування розподілу залежної змінної або залишків регресії нормальному закону, що на практиці буває рідко, це і зумовлює необхідність використання методів нелінійного регресійного аналізу.

На сьогодні існує ряд робіт, присвячених побудові нелінійних регресійних моделей для оцінювання розміру веб-застосунків, що створюються такими мовами, як, PHP з різними фреймворками [6–8], Java [9], Python [10]. У цих роботах також використовуються метрики діаграми класів, але у різних комбінаціях, що дозволяє умовно поділити ці роботи за використаними метриками. Втім порівняння різних моделей з однаковими факторами між собою та моделей з різними факторами не проводилось.

Відсутність досліджень щодо впливу кількості факторів нелінійної регресійної моделі на її якість та на ширину інтервалу прогнозування для мови Python та фреймворку Django Rest Framework є підставою для проведення дослідження.

**Мета роботи** – визначення найбільш якісної та достовірної нелінійної регресійної моделі для прогнозування розміру веб-застосунків, що створюються мовою Python з використанням Django Rest Framework.

В задачі аналізу будуть розглядатися дві нелінійні регресійні моделі разом з інтервалами прогнозування з використанням десятичного логарифму у якості нормалізуючого перетворення. В якості предикторів для двофакторної моделі будуть використовуватися такі метрики як: кількість класів та кількість методів у проекті. Для однофакторної моделі в якості предиктора приймається кількість класів.

Двофакторна нелінійна регресійна модель для оцінювання розміру веб-застосунків, що створюються мовою Python з використанням Django Rest Framework, була побудована в роботі [10]. Однофакторна нелінійна регресійна модель та інтервали прогнозування обох моделей будуються в рамках даного дослідження на емпіричних даних з [10].

Для досягнення поставленої мети роботи необхідно виконати наступні завдання:

– Провести дослідження існуючих моделей для оцінювання розміру веб-застосунків, розроблених, зокрема, з використанням мови Python.

– Виконати побудову однофакторної нелінійної регресійної моделі для оцінювання розміру веб-застосунків, що створюються мовою Python з використанням Django Rest Framework, для емпіричних даних на основі нормалізуючого перетворення.

– Виконати побудову інтервалів прогнозування обох моделей для оцінювання розміру веб-застосунків, що створюються мовою Python з використанням Django Rest Framework.

– Виконати порівняння побудованих регресійних моделей для оцінювання розміру веб-застосунків, що створюються мовою Python з використанням Django Rest Framework та однофакторної нелінійної регресійної моделі, побудованої для веб-застосунків, які розроблені з використанням мови Java.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** За умови гаусівського розподілу початкових даних в якості регресійної моделі можна взяти лінійну регресійну модель з наступним загальним виглядом:

$$Y = \hat{Y} + \varepsilon = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_kX_k + \varepsilon, \quad (1)$$

де  $\hat{Y}$  – результат прогнозування за рівнянням лінійної регресії,  $b_i (i = \overline{0, k})$  – параметри лінійного рівняння регресії,  $X_i (i = \overline{1, k})$  – значення незалежної змінної,  $\varepsilon$  – гаусівська випадкова величина,  $k$  – кількість факторів у моделі.

В тому випадку, коли початкові дані не є нормальними, необхідно будувати нелінійну регресійну модель. Одним з кращих за результативністю підходів до побудови нелінійних регресійних моделей є використання нормалізуючих перетворень. На відміну від лінеаризуючих перетворень чи методів підбору, нормалізуючі перетворення можна підібрати в більшості випадків.

Згідно [11] ітераційний алгоритм для побудови нелінійної регресійної моделі з використанням нормалізуючих перетворень наступний:

– Застосувати нормалізуюче перетворення до емпіричних даних та вилучити викиди.

– Для нормалізованих даних без викидів побудувати лінійну регресійну модель.

– Перевірити залишки лінійної регресії на відповідність нормальному закону розподілу та відкинути значення з максимальним відхиленням у разі невідповідності.

– Перейти від лінійної регресійної моделі до нелінійної, використавши зворотне нормалізуюче перетворення.

– Визначити інтервал прогнозування та відкинути значення, що виходять за границі інтервалу, якщо такі є.

Нормалізуюче перетворення негаусівського випадкового вектору  $P = \{Y, X_1, X_2, \dots, X_k\}^T$  у гау-

сівський випадковий вектор  $T = \{Z_Y, Z_1, Z_2, \dots, Z_k\}^T$  у загальному вигляді задається як:

$$T = \psi(P), \quad (2)$$

а зворотне перетворення до (2) – як:

$$P = \psi^{-1}(T), \quad (3)$$

де  $\psi$  – вектор,  $\psi = \{\psi_Y, \psi_1, \psi_2, \dots, \psi_k\}^T$ .

Таким чином нелінійна регресійна модель, що побудована з використанням нормалізуючого перетворення, має вигляд:

$$Y = \psi_Y^{-1}(\hat{Z}_Y + \varepsilon) = \psi_Y^{-1}(b_0 + b_1 Z_1 + b_2 Z_2 + \dots + b_k Z_k + \varepsilon), \quad (4)$$

де  $\psi_Y$  – перша компонента вектору  $\psi$  перетворення (2).

Негаусівський розподіл даних підтверджують значення квадрату відстані Махаланобіса (SMD), які можна визначити як:

$$d_i^2 = (X_i - \bar{X})^T S_N^{-1} (X_i - \bar{X}), \quad (5)$$

де  $X_i$  –  $i$ -та точка багатовимірних даних вектору  $X$ ;  $\bar{X}$  – вектор вибіркового середнього;  $S_N$  – вибіркова коваріаційна матриця:

$$S_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(X_i - \bar{X})^T, \quad (6)$$

де  $N$  – кількість елементів у вибірці.

Негаусівський розподіл багатовимірних емпіричних даних також підтверджує проведення тесту, який передбачає отримання оцінки багатовимірного ексцесу  $\beta_2$  [12], яку можна розрахувати як:

$$\hat{\beta}_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{(X_i - \bar{X})^T S_N^{-1} (X_i - \bar{X})\}^2. \quad (7)$$

Після побудови нелінійної регресійної моделі можна визначити її інтервал прогнозування як це робиться у [11]:

$$\psi_Y^{-1} \left( \hat{Z}_Y \pm t_{\alpha/2, \nu} S_{Z_Y} \left\{ 1 + \frac{1}{N} + (z_X^+)^T [(z_X^+)^T z_X^+]^{-1} (z_X^+) \right\}^{1/2} \right). \quad (8)$$

Тут  $\psi_Y^{-1}$  – взаємозворотне перетворення,  $t_{\alpha/2, \nu}$  – квантіль  $t$ -розподілу Стьюдента з рівнем значимості  $\alpha/2$  та  $\nu$  ступенями вільності,  $\nu = N - k - 1$ ,  $k$  – кількість незалежних змінних,  $z_X^+ = \{Z_1 - \bar{Z}_1, Z_2 - \bar{Z}_2, Z_3 - \bar{Z}_3\}^T$ ,  $S_{Z_Y}^2 = \frac{1}{\nu} \sum_{i=1}^N (Z_{Y_i} - \hat{Z}_{Y_i})^2$ ,  $(z_X^+)^T z_X^+ = k \times k$  матриця:

$$(z_X^+)^T z_X^+ = \begin{pmatrix} S_{Z_1 Z_1} & S_{Z_1 Z_2} & \dots & S_{Z_1 Z_k} \\ S_{Z_2 Z_1} & S_{Z_2 Z_2} & \dots & S_{Z_2 Z_k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{Z_k Z_1} & S_{Z_k Z_2} & \dots & S_{Z_k Z_k} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

де  $S_{Z_q Z_r} = \sum_{i=1}^N [Z_{q_i} - \bar{Z}_q][Z_{r_i} - \bar{Z}_r]$ ,  $q, r = \overline{1, k}$ .

Нелінійні регресійні моделі в межах цього дослідження будувались на основі емпіричних даних, зібраних на платформі GitHub: 71 проекту веб-застосунків, створених мовою Python з вико-

ристанням Django Rest Framework та наведених у роботі [10]. Подальше опрацювання отриманих емпіричних даних проводилось з використанням розширення до PyCharm Statistic [13, 14]. В результаті отримано наступні метрики програмного забезпечення: кількість рядків коду у тисячах KLOC ( $Y$ ), кількість класів Classes ( $X_1$ ), кількість методів проекту Methods ( $X_2$ ).

У випадку двофакторної нелінійної регресійної моделі у якості предикторів використаємо наступні метрики: кількість класів Classes ( $X_1$ ), кількість методів проекту Methods ( $X_2$ ), а залежною величиною буде кількість рядків коду у тисячах KLOC ( $Y$ ).

Негаусівський розподіл даних підтверджують отримані значення квадрату відстані Махаланобіса (SMD), знайдені за допомогою (5) та (6).

Також негаусівський розподіл даних підтверджується за допомогою багатовимірного ексцесу  $\beta_2$ . Для нормального розподілу  $\beta_2 = 15$ , що визначається за формулою  $\beta_2 = m(m+2)$ , де  $m$  дорівнює 3 [12]. Натомість для вихідних даних отримано значення 29,61.

Пошук викидів у даних виконано за допомогою нормалізуючого перетворення на основі десятичного логарифму та розрахунку квадрату відстані Махаланобіса за формулою (5) та тестової статистики за формулою (6), як наведено у [15, 16]. З початкового набору даних лишилось 62 проекти веб-застосунків, створених мовою Python з використанням Django Rest Framework.

Детально побудова нелінійної двофакторної регресійної моделі була представлена в [10]. Далі за допомогою (8) та (9) будуємо інтервал прогнозування двофакторної нелінійної регресії. Оскільки для двох точок (38 та 66) вихідні значення  $Y$  виходять за розраховані межі інтервалу прогнозування, вважаємо ці точки викидами та видалимо їх із загальної вибірки даних. Таким чином, в остаточному скорегованому наборі даних маємо 60 точок даних.

Для цього скорегованого набору даних виконуємо всі дії для побудови нелінійної регресійної моделі та інтервалу прогнозування. Остаточно лінійна двофакторна регресійна модель має вигляд:

$$Z_Y = -1,6417 - 0,0090 Z_1 + 0,9902 Z_2 + \varepsilon.$$

Застосувавши взаємо-зворотне нормалізуюче перетворення, отримуємо двофакторну нелінійну регресійну модель для оцінювання розміру веб-застосунків, створених мовою Python з використанням Django Rest Framework, яка має вигляд:

$$Y = 10^{e-1,6417} X_1^{-0,0090} X_2^{0,9902}.$$

Після побудови інтервалу прогнозування двофакторної нелінійної регресії модель вважається побудованою, адже відсутні значення змінної  $Y$ , які виходять за границі інтервалу прогнозування.

Оскільки для мови програмування Python серед опублікованих матеріалів не було знайдено відповідної моделі для порівняння, було прийнято рішення побудувати однофакторну нелінійну регресійну модель, оскільки це найпростіший варіант оцінювання у разі об'єктно-орієнтованої методології розробки.

Однофакторна нелінійна регресійна модель будувалась за тим же алгоритмом, що й двофакторна, незалежною величиною була обрана кількість класів  $Classes (X_1)$ , відповідно залежною – кількість рядків коду у тисячах KLOC ( $Y$ ).

На етапі попередньої обробки даних за допомогою квадрату відстані Махаланобіса було знайдено 11 викидів. Після побудови нелінійної регресійної моделі та інтервалу прогнозування було знайдено ще 6 точок, для яких вихідні значення  $Y$  виходять за розраховані границі інтервалу прогнозування. Ці точки також було видалено із загальної вибірки даних. Таким чином, в остаточному скорегованому наборі даних маємо 54 точки даних.

Для скоригованого набору даних будують нелінійну регресійну модель та інтервал прогнозування. Остаточно лінійна однофакторна регресійна модель має вигляд:

$$Z_Y = -1,0401 + 0,8597Z_1 + \varepsilon.$$

Відповідно однофакторна нелінійна регресійна модель для оцінювання розміру веб-застосунків, створених мовою Python з використанням Django Rest Framework має вигляд:

$$Y = 10^{e-1,0401} X_1^{0,8597}.$$

Після побудови інтервалу прогнозування однофакторної нелінійної регресії відсутні значення змінної  $Y$ , які виходять за границі інтервалу прогнозування.

Також було виконано порівняння моделей для веб-застосунків, створених мовою Python з використанням Django Rest Framework, з опублікованою однофакторною нелінійною регресійною моделлю, побудованою для веб-застосунків, які розроблені з використанням мови Java [17]. Для порівняння якості нелінійних регресійних моделей були використані такі критерії: коефіцієнт детермінації  $R^2$ , середня величина відносної похибки  $MMRE$ , рівень прогнозування  $PRED(0,25)$ , які наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

### Критерії якості нелінійних регресійних моделей

Критерії якості	Двофакторна (Python)	Однофакторна (Python)	Однофакторна (Java)
$R^2$	0,8520	0,7063	0,5686
MMRE	0,1966	0,3533	1,2285
$PRED(0,25)$	0,6833	0,4444	0,2254

Аналіз даних, наведених в табл. 1, показує, що двофакторна нелінійна регресійна модель має кращі значення всіх трьох критеріїв. Отримані результати дозволяють зробити висновок про збільшення якості моделі при включенні до неї додаткових предикторів. Однак значення  $PRED(0,25)$  дещо нижче за необхідне значення (не менше, ніж 0,75), що свідчить про необхідність або збільшення кількості предикторів, або використання для побудови моделі інших нормалізуючих перетворень, зокрема, Бокса-Кокса або Джонсона.

Оцінки для однофакторної нелінійної регресійної моделі, яка була побудована для веб-застосунків, що розроблені з використанням мови Java, свідчать про низьку якість отриманої моделі та необхідність будувати модель саме під конкретну мову програмування та фреймворк для отримання прийнятного результату. Таким чином, дана модель може відображати суттєву різницю у проектах програмного забезпечення, яка в свою чергу унеможливує застосування цієї моделі до емпіричних даних даного дослідження.

В таблиці 2 наведено інтервали прогнозування побудованих нелінійних регресійних моделей, а також їх ширини (фрагмент даних). Рядки, які містять прочерк, не ввійшли до даних, які було використано для остаточної побудови тієї чи іншої моделі.

У таблиці 2 напівжирним виділено кращі значення ширини інтервалу прогнозування серед усіх трьох моделей. Більше всього рядків з меншою шириною інтервалу прогнозування спостерігається для двофакторної нелінійної регресійної моделі – 46 рядків, для однофакторної – 3 рядки, для однофакторної моделі з використанням мови Java такі рядки відсутні (розглядалися лише ті рядки, де присутні усі три моделі).

Аналіз даних, які можна вважати викидами показує, що в процесі побудови нелінійних регресійних моделей деякі рядки були визначені спільними викидами для двофакторної та однофакторної моделей, деякі рядки були визначені викидами лише для однофакторної моделі, а деякі рядки були визначені викидами лише для двофакторної моделі.

Інтервали прогнозування нелінійних регресійних моделей та їх ширини (фрагмент даних)

№	KLOC (Y)	Двофакторна (Python)			Однофакторна (Python)			Однофакторна (Java)		
		LB	UB	Length	LB	UB	Length	LB	UB	Length
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	10,07	7,51	20,16	12,66	1,90	10,80	<b>8,90</b>	0,85	93,77	92,92
2	2,71	1,97	5,20	<b>3,23</b>	0,85	4,85	4,00	0,28	28,89	28,61
3	2,96	1,67	4,40	<b>2,73</b>	1,58	8,99	7,41	0,68	69,69	69,01
4	1,20	1,11	2,93	<b>1,82</b>	0,50	2,87	2,37	0,13	14,26	14,14
5	9,47	5,05	13,36	<b>8,31</b>	3,65	20,98	17,33	2,19	238,63	236,44
6	2,09	1,40	3,69	<b>2,28</b>	0,83	4,74	3,91	0,27	28,25	27,98
7	10,00							0,40	44,27	43,87
8	2,08	1,56	4,11	<b>2,55</b>	1,26	7,13	5,87	0,48	50,73	50,24
9	1,98	0,96	2,55	<b>1,59</b>	1,12	6,38	5,26	0,41	43,44	43,03
10	0,30							0,01	0,96	0,95
11	0,36	0,21	0,56	<b>0,35</b>	0,15	0,90	0,75	0,02	2,90	2,88
12	0,57	0,30	0,82	0,52				0,16	19,97	19,81
13	28,76	25,13	68,73	43,60	7,47	44,19	<b>36,72</b>	5,66	743,05	737,39
14	13,39	5,69	15,23	<b>9,54</b>	5,72	33,41	27,69	4,09	470,51	466,41
15	4,98	2,19	5,76	<b>3,57</b>	1,83	10,40	8,57	0,84	85,75	84,91
16	0,93				0,41	2,38	1,97	0,09	11,07	10,98
17	3,39	1,90	5,00	<b>3,10</b>	1,42	8,07	6,65	0,58	59,55	58,97
18	4,50	2,79	7,62	4,83				3,87	394,73	390,86
19	4,04	2,35	6,19	<b>3,84</b>	1,78	10,10	8,32	0,81	81,99	81,19
20	0,53	0,35	0,93	<b>0,58</b>	0,32	1,87	1,55	0,06	8,17	8,11

**Висновки.** У роботі було побудовано двофакторну та однофакторну нелінійні регресійні моделі для оцінювання розміру веб-застосунків, що створюються мовою Python з використанням Django Rest Framework, також було виконано порівняння цих моделей між собою та з опублікованою однофакторною нелінійною регресійною моделлю, побудованою для веб-застосунків, які розроблені з використанням мови Java.

Отримані результати показують, що зі збільшенням предикторів, на основі яких будується нелінійна

регресійна модель, якість моделі підвищується, а ширина інтервалу прогнозування – зменшується.

За результатами порівняння нелінійних регресійних моделей бачимо, що є необхідність будувати модель для конкретної мови програмування та фреймворку.

В подальшому для отримання більш якісних нелінійних регресійних моделей планується збільшувати кількість предикторів у моделі та застосовувати інші нормалізуючі перетворення, зокрема, Бокса-Кокса або Джонсона.

#### Список літератури:

1. Boehm B., Abts C., Chulani S. Software development cost estimation approaches – A survey. *Annals of Software Engineering*. 2000. Vol. 10. P. 177–205.
2. Boehm B.W., Abts C., Brown A.W. et al. Software cost estimation with COCOMO II. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 2000. 506 p.
3. Abran A. Data collection and industry standards: the ISBSG repository. *Software Project Estimation: The Fundamentals for Providing High Quality Information to Decision Makers*. IEEE, 2015. P. 161–184, DOI: 10.1002/9781118959312.ch8
4. Marco L.D., Ferrucci F., Gravino C. Approximate COSMIC Size to Early Estimate Web Application Development Effort. *Software Engineering and Advanced Applications (SEAA). 39th EUROMICRO Conference*. 2013. P. 349–356.
5. Prykhodko N.V., Prykhodko S.B. The non-linear regression model to estimate the software size of open-source Java-based systems. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. Запоріжжя: ЗНТУ, 2018. № 3(46). С. 158–166.
6. Приходько С.Б., Приходько Н.В., Фаріонова Т.А., Ворона М.В. Трьохфакторна нелінійна регресійна модель для оцінювання розміру PHP-застосунків із відкритим кодом. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського, Технічні науки*. Київ, 2020. № 1(70) Ч. 1. С. 124–131.
7. Приходько С.Б., Приходько Н.В., Ворона М.В., Беловол І.О. Нелінійна регресійна модель для оцінювання розміру веб-застосунків, що створюються з використанням фреймворку Laravel. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. Вінниця: ВНТУ, 2021. № 1(50). С. 115–121.

8. Латанська Л.О., Макарова Л.М., Кольцов А.В., Давлатова Д.Х. Нелінійна регресійна модель для оцінювання розміру веб-застосунків, що створюються з використанням PHP фреймворку Symfony. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: «Технічні науки»*. 2022. № 6, Т. 1. С. 119–124. DOI: <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-119-124>
9. Prykhodko S.B., Pukhalevych A.V., Prykhodko K.S., Makarova L.M. Nonlinear regression models for estimating the duration of software development in Java for PC based on the 2021 ISBSG data. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2022. № 3(62). P. 144–154. DOI 10.15588/1607-3274-2022-3-14
10. Макарова Л.М., Латанська Л.О., Давлатова Д.Х., Кольцов А.В. Двофакторна нелінійна регресійна модель для оцінювання розміру веб-застосунків, що створюються мовою Python з використанням Django Rest Framework. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Київ: ТНУ, 2022. Том 33 (72) № 6. С. 104–108. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/18>
11. Prykhodko S., Prykhodko N. Mathematical modeling of non-Gaussian dependent random variables by nonlinear regression models based on the multivariate normalizing transformations. *Mathematical Modeling and Simulation of Systems: 15th International Scientific-practical Conference MODS'2020*. Chernihiv, Ukraine, June 29 – July 01, 2020, selected papers. Springer, Cham, 2021, P. 166–174. (Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 1265). DOI: 10.1007/978-3-030-58124-4\_16
12. Mardia K.V. Applications of some measures of multivariate skewness and kurtosis in testing normality and robustness studies. *Sankhya: The Indian Journal of Statistics, Series B* (1960–2002), 1974. Vol. 36. Issue 2. P. 115–128.
13. Plugin Statistic for PyCharm. URL: <https://plugins.jetbrains.com/plugin/4509-statistic> (дата звернення: 24.10.2023 р.).
14. Інструкція по початку роботи з PyCharm. URL: <https://py-charm.blogspot.com/2017/09/blog-post.html> (дата звернення: 14.10.2023 р.).
15. Prykhodko S., Prykhodko N., Makarova L., Pugachenko K. Detecting outliers in multivariate non-Gaussian data on the basis of normalizing transformations, in: *Proceedings of the 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kyiv, Ukraine, 2017. P. 846–849. <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100366>
16. Prykhodko S., Prykhodko N., Makarova L., Pukhalevych A. Outlier Detection in Non-Linear Regression Analysis Based on the Normalizing Transformations. *Proceedings of the 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), IEEE*. (Lviv-Slavske, 2020). P. 407–410.
17. Макарова Л.М., Приходько Н.В., Кудін О.О. Побудова нелінійної регресійної моделі для оцінювання розміру веб-додатків, реалізованих мовою Java. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. Херсон, 2019. № 2(69). С. 145–153.

## **Makarova L.M., Latanska L.O. COMPARATIVE ANALYSIS OF NONLINEAR REGRESSION MODELS TO PREDICT THE SIZE OF WEB APPLICATIONS CREATED IN PYTHON USING THE DJANGO REST FRAMEWORK**

*Determining the size of the software in the early stages of project work is a common task in the field of software engineering. Using existing models such as, for example, COCOMO, COCOMO II, ISBSG, COSMIC and the size you can predict the effort, cost, duration of the project. Much of the developed projects are web-applications. Python is one of the most popular web development languages. There are several of frameworks exist for its, the most complete and widespread of which is Django Rest Framework.*

*The purpose of the study is to identify the highest quality and reliable nonlinear regression model for predicting the size of web- applications created by Python using Django Rest Framework.*

*To obtain nonlinear regression models and prediction intervals, a technique for building nonlinear regression models based univariate normalizing transformation was used.*

*For the analysis problem two nonlinear regression models with the prediction intervals using a decimal logarithm as a normalizing transformation were build. There was considered as predictors of such metrics: the number of classes and the number of methods. The number of classes served as a predictor for a single-factor model, the number of classes and the number of methods in the project served as a predictors for a two-factor model. A single-factor nonlinear regression model, built for web-applications, which was designed using the Java, was also used in comparison.*

*The results obtained allow you to draw the following conclusions. With the increasing number of predictors, used to construct nonlinear regression models to predict the size of web- applications created by Python using Django Rest Framework, the quality of the model is increased, namely the quality criteria became better and the width of the prediction interval is decreased. When trying to apply a nonlinear regression model built for web- applications, which are developed using the Java, to empirical data from this study, low quality and greater width of the prediction interval was obtained. This is a confirmation of the need to build regression models for each programming language and framework.*

**Key words:** estimation of software size, nonlinear regression model, normalizing transformation, software development, web application, Python, Django Rest Framework.

**Олещенко Л.М.**

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

**Трушина Д.В.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

## ПРОГРАМНИЙ МЕТОД ПРОГНОЗУВАННЯ ВАРТОСТІ НЕРУХОМОСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ТА РЕГРЕСІЙНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ

*У статті розглядаються особливості програмної реалізації регресійної моделі для прогнозування вартості нерухомості з використанням методів машинного навчання. Для вибору моделі прогнозування цін на житло проведено аналіз публікацій та існуючих програмних рішень для прогнозування вартості нерухомості. У даному дослідженні для практичної реалізації запропонованого програмного методу використано мову програмування Python, бібліотеки Pandas, Matplotlib, Seaborn, Scikit-learn, та NumPy. Для дослідження побудови моделі регресії було обрано датасет «Linear Regression – House Price Predictions», обсягом 514 KB, що містить 4601 запис. Здійснено навчання моделі, оцінку її точності та порівняння з іншими методами прогнозування з використанням технологій машинного навчання.*

*У статті наведено дослідження областей застосування моделі для прогнозування вартості нерухомості на основі регресійного аналізу даних, формування вимог до програмного забезпечення, вибір мови програмування, розробка структури та навчання алгоритму. Розглянуті технологічні підходи включають обробку та підготовку даних, вибір функцій, регресійне моделювання, навчання та оцінку моделі, інтеграцію штучного інтелекту та машинного навчання, валідацію та оптимізацію моделі.*

*У результаті дослідження створено програмний метод для прогнозування вартості нерухомості на основі регресійного аналізу даних, який надає графічне відображення переліку факторів з кількісною оцінкою їх впливу на вартість нерухомості. Переваги цього дослідження є важливими з точки зору програмної реалізації методу регресійного аналізу даних та можливості майбутнього використання запропонованого методу для прогнозування ринку нерухомості в Україні. Розробивши модель на основі регресійного аналізу даних, фахівці з нерухомості отримають надійний інструмент для прогнозування вартості нерухомості різного типу. Це дозволить їм приймати зважені рішення щодо інвестицій, цінних стратегій і проектів розвитку. Крім того, власники нерухомості краще розумітимуть фактори, що впливають на вартість їхньої нерухомості, що дозволить приймати обґрунтовані рішення щодо покращення житлових умов.*

**Ключові слова:** технології програмування систем штучного інтелекту, мова програмування Python, прогнозування, машинне навчання, ринок нерухомості, великі дані, оброблення даних, регресійний аналіз даних.

**Постановка проблеми.** У сучасному світі нерухомість визначається не лише фізичними будівлями та землею, а й даними та аналітикою. З розвитком технологій аналізу даних і машинного навчання з'явилася можливість покращити прогнозування вартості нерухомості на основі широкого спектру факторів. У прогнозуванні вартості нерухомості наявні такі проблеми, як нестабільність ринку, багатовимірність даних, проблеми з недостатньою інформацією, точність та надійність даних, а також регуляторні аспекти. Ринок нерухомості може бути вкрай нестабільним і піддаватися змінам через різноманітні фактори,

такі як економічна кон'юнктура, політичні події, зміни в законодавстві. Це ускладнює точне прогнозування вартості нерухомості. Дані про нерухомість можуть бути багатовимірними, з великою кількістю впливових факторів (земельні площі, розташування, інфраструктура тощо). Відбір найбільш важливих змінних для включення в модель є складною задачею. Деякі аспекти нерухомості досить важко або навіть неможливо виміряти чи кількісно визначити. Наприклад, атмосфера в районі, екологічна ситуація, комфортність для проживання – ці аспекти можуть впливати на ціну, їх важко врахувати в аналізі. Доступні дані можуть

бути неповними або неправильними, що може призвести до неточностей у прогнозній моделі. Важливо також враховувати якість та достовірність джерел даних. Зміни в законодавстві чи податковій політиці можуть значно вплинути на ринок нерухомості. Прогнозування вартості повинно враховувати різні регуляторні аспекти. Актуальність дослідження полягає в тому, що точне прогнозування вартості нерухомості має важливе значення для різних суб'єктів ринку: інвесторів, забудовників, споживачів, страхових компаній та інших учасників. Здатність ефективно прогнозувати ціни може сприяти прийняттю обґрунтованих рішень у галузі нерухомості, що має важливий вплив на економіку та життя людей.

Для досягнення поставленої мети необхідне виконання наступних завдань: аналіз змін цін на ринку нерухомості протягом певного періоду; вивчення впливу різних факторів, таких як площа, кількість кімнат, розташування та інфраструктура тощо на вартість нерухомості; визначення та аналіз основних тенденцій у розвитку ринку нерухомості; розробка моделі для прогнозування майбутніх цін на нерухомість на основі історичних даних; визначення та оцінка різних факторів (економічні, соціокультурні, політичні), які можуть впливати на ціни на нерухомість; оцінка точності та ефективності розробленої моделі прогнозування.

**Метою статті** є розробка програмного методу прогнозування вартості нерухомості на основі регресійного аналізу даних та сучасних технологій машинного навчання.

**Аналіз публікацій та існуючих програмних рішень для прогнозування вартості нерухомості.** Автори статті [1] використовують підхід часових рядів для аналізу факторів, що впливають на індекс реальних цін на житло в США, і застосовують комбінацію моделей оптимальності для прогнозування індексу. У роботі [2] представлено порівняльний аналіз динамічних факторних моделей та моделей LBVAR для прогнозування цін на житло. Модель динамічних факторів DFM передбачає, що ціни на житло визначаються змінами фундаментальних факторів і ринковими рухами з часом. З іншого боку, модель LBVAR включає в себе комбінацію моделей VAR Ласкіна-Бізекера (LBVAR) і моделей векторної авторегресії (VAR), щоб зафіксувати динамічний тренд і короткострокову волатильність цін на житло. Автори порівняли показники обох моделей, використовуючи дані з США за період 1995–2010 років. Стаття [3] описує дослідження між пошуковою активністю

в мережі Інтернет та змінами цін на житлову нерухомість. У дослідженні використовувалися дані Google Trends для вимірювання пошукової активності та відстежувалися зміни цін на житлову нерухомість в Остіні, штат Техас. Результати показують, що існує позитивна кореляція між пошуковою активністю в мережі Інтернет та цінами на житлову нерухомість. Це вказує на те, що пошукову активність в Інтернеті можна використовувати як прогноз майбутніх змін цін на ринку житлової нерухомості. У статті [4] результати аналізу підтвердили використання штучних нейронних мереж, опорної векторної регресії та лінійної регресії як найбільш ефективних методів для прогнозування вартості нерухомості. Стаття [5] представляє модель машинного навчання для прогнозування цін на житло. У дослідженні автори використовували дані з Шеньчженя, Китай, та комбінували статистичне моделювання та штучні нейронні мережі для прогнозування цін на житло. Автори оцінили продуктивність своєї моделі за допомогою показників середньої абсолютної відсоткової помилки MAPE і середньоквадратичної помилки RMSE, і у висновках показали багатообіцяючі результати. Дослідження [6] спрямоване на прогнозування цін на житло в Мельбурні, Австралія, за допомогою алгоритмів машинного навчання, а саме підтримки векторної регресії та штучних нейронних мереж. Дослідження використовує набір даних за 2008–2016 роки для навчання та тестування моделей і демонструє їхню ефективність у прогнозуванні цін на житло. Стаття має практичне значення для міського планування з використанням технологій машинного навчання. Дослідницька стаття [7] представляє аналіз ефективності різних алгоритмів машинного навчання для прогнозування цін на житло на китайському ринку. Автори обговорюють різні параметри та моделі та оцінюють їх продуктивність за допомогою статистичних оцінок. У статті [8] представлено гібридну регресійну техніку для прогнозування цін на житло, описано методологію та реалізацію техніки гібридної регресії, а також її продуктивність порівняно з іншими моделями регресії.

**Виклад основного матеріалу.** Для задач прогнозування в різних галузях бізнесу можуть використовуватися різноманітні комерційні рішення та платформи. Розглянемо відомі інструменти для предиктивної аналітики великих даних.

*IBM Watson Studio* надає інструменти для розробки моделей машинного навчання та прогнозування, а також інтегровані сервіси та інструменти

для візуалізації великих даних та розгортання прогностичних моделей.

*Azure ML від Microsoft* є хмарним сервісом, який дозволяє створювати, навчати та валідувати моделі машинного навчання, а також надає можливість автоматичного масштабування та розгортання моделей.

*Amazon Forecast* – це хмарний сервіс від Amazon Web Services (AWS), який дозволяє створювати прогнози на основі часових рядів. Використовується для прогнозування попиту, продажів тощо.

*Google Cloud AI Platform* надає засоби для створення, навчання та розгортання моделей машинного навчання на хмарній інфраструктурі Google Cloud. SAS є однією з провідних компаній у сфері аналітики та прогнозування. Програмне забезпечення, таке як *SAS Enterprise Miner*, надає інструменти для створення та валідації моделей прогнозування.

Oracle пропонує рішення для машинного навчання та аналітики, включаючи *Oracle Machine Learning*, що використовується для створення моделей прогнозування на основі даних Oracle.

*RapidMiner* – це платформа для аналізу великих даних та машинного навчання, яка використовується для прогнозування, класифікації та інших аналітичних завдань.

Розглянуті програмні рішення надають інструменти для розробки, навчання та використання моделей прогнозування в різних областях бізнесу. Основним недоліком наявних рішень є висока вартість сервісів для аналітики великих даних, відсутність даних для українського сегменту, що може бути проблемою для практичного використання, зокрема, для прогнозування ринку нерухомості в Україні.

Регресійний аналіз – це статистичний метод, який використовується для дослідження взаємозв'язку між однією залежною та однією чи кількома незалежними (пояснювальними) змінними. Головна мета регресійного аналізу – визначити природу і силу зв'язку між цими змінними. Наприклад, для прогнозування ціни будинку на основі його розміру будується модель лінійної регресії. Модель відповідає прямій лінії до точок даних, щоб зафіксувати основну тенденцію. Розширивши цю лінію, можна оцінити ціну для даного розміру будинку. Лінійна регресія відноситься до категорії регресійних моделей, оскільки вона передбачає числові значення, наприклад, значення ціни на житло. Для навчання моделі лінійної регресії використовується навчальний набір

даних, який складається з пар вхідних характеристик (наприклад, квадратних метрів житла) і відповідних кінцевих цільових показників (наприклад, ціна будинку).

Допустимо, що ми маємо:

$m$  – кількість навчальних прикладів;

$x$  – вхідна характеристика, що представляє конкретну властивість будинку, наприклад, його розмір;

$y$  – вихідна ціль, що представляє фактичну ціну будинку;

$i$  – індекс конкретного навчального прикладу.

Конкретний приклад навчання позначається як показано у формулі (1).

$$(x^i, y^i) \quad (1)$$

Отже навчальний набір можна записати, як у формулі (2).

$$\{(x^1, y^1), (x^2, y^2), \dots, (x^m, y^m)\} \quad (2)$$

У рівнянні (2)  $(x^i, y^i)$  представляє певний будинок у наборі даних, а  $m$  позначає кількість прикладів для навчання.

Під час навчання моделі алгоритм навчання створює функцію  $f$ , яка приймає вхідну ознаку  $x$  і виводить оцінку або прогноз  $y$ . У простій лінійній регресії функція  $f(x)$  визначається за формулою (3).

$$f_{w,b}(x^{(i)}) = wx^{(i)} + b \quad (3)$$

В цій формулі  $w$  і  $b$  – це числові значення, які визначають нахил і перетин ліній відповідно. Важливим аспектом лінійної регресії є функція втрат, яка вимірює ефективність моделі шляхом кількісного визначення різниці між прогнозованими значеннями та фактичними цільовими показниками. Ця концепція широко застосовується в машинному навчанні та відіграє життєво важливу роль у навчанні моделей штучного інтелекту.

Лінійна регресія є цінним інструментом для прогнозування цін на житло на основі конкретних характеристик. Ринок нерухомості відомий своєю нестабільністю та непередбачуваністю. Точні прогнози вартості нерухомості мають вирішальне значення для інвесторів, забудовників і власників житла. Традиційні методи прогнозування, такі як лінійна регресія, мають обмеження у відображенні складних взаємозв'язків між різними факторами, які впливають на ціну нерухомості. Дослідження пропонує більш складну модель на основі регресійного аналізу для усунення цих обмежень. Спочатку у дослідженні визначатимуться ключові фактори, які суттєво впливають на вартість нерухомості. Ці фактори включають розташування, розмір нерухомості, зручності, економічні показники та демографічні тенденції. Аналізуючи історичні дані та проводячи статистичні тести,



будуть визначені найбільш впливові змінні для включення в регресійну модель. Після визначення факторів впливу розроблятиметься регресійна модель. Ця модель використовуватиме історичні дані для встановлення зв'язків між незалежними змінними (факторами впливу) і залежною змінною (вартістю нерухомості). Потім модель буде перевірено з використанням додаткових (тестувальних) даних для забезпечення її точності та надійності.

Програмна реалізація запропонованого методу прогнозування

Для даного дослідження було обрано мову програмування Python, найпопулярнішу мову програмування для аналізу даних та машинного навчання. Для роботи з даними використовувались бібліотеки Pandas та NumPy. Бібліотека Pandas надає структури даних високого рівня, такі як DataFrame, що дозволяють ефективно маніпулювати даними та аналізувати їх. Pandas використовується для читання та запису даних, фільтрації, групування та обробки даних перед подальшим аналізом. Бібліотека NumPy надає масиви та функції для ефективної роботи з числовими даними, особливо є корисною для векторизованих операцій, виконання числових операцій та роботи з масивами даних. Для візуалізації даних використовуються бібліотеки Matplotlib та Seaborn. Для моделювання та машинного навчання використано високорівневу бібліотеку машинного навчання Scikit-learn, яка містить реалізації багатьох алгоритмів машинного навчання. Для розроблення програмного методу прогнозування вартості нерухомості у даному дослідженні використано хмарне середовище Google Colab (рис. 1).

Google Colab – це хмарне середовище для виконання коду на мові програмування Python, яке надає доступ до віртуальних машин Google з можливістю використання графічних процесорів GPU для прискорення обчислень, що особ-

ливо корисно для задач машинного навчання. Для середовища Google Colab доступні віртуальні машини з різними характеристиками пам'яті та обчислювальною потужністю. Зазвичай, базова конфігурація може включати в себе 13–14 ГБ оперативної пам'яті і процесор з 2–4 ядрами. У деяких випадках, Colab може також надавати доступ до графічних процесорів (GPU) від Nvidia, таких як Tesla K80, Tesla T4 або P100, які забезпечують додаткові обчислювальні ресурси та можуть прискорити виконання завдань, пов'язаних із штучним інтелектом або машинним навчанням. Вибір ознак прогнозувальної моделі виконується за допомогою кореляційного аналізу, визначення важливості ознак за допомогою моделей та рекурсивного вилучення ознак RFE (Recursive Feature Extraction). Кореляційний аналіз оцінює взаємозв'язок між ознаками та вибирає ті, які мають найбільший вплив на цільову змінну. RFE використовується для ранжування ознак та вилучення їх послідовно відповідно до їх важливості для моделі, ефективно визначає оптимальну кількість ознак для покращення точності прогнозувальної моделі. Інженерія ознак виконується за допомогою створення взаємодій між ознаками, створення ознак на основі доменного знання, агрегації статистики і кодування категоріальних ознак. Множинна лінійна регресія використовується для врахування різних факторів, таких як площа, кількість кімнат, розташування тощо. Регресія на основі ансамблевих методів (наприклад, випадковий ліс або градієнтний бустинг) використовує комбінації декількох моделей для покращення точності та стабільності прогнозів. Така стратегія може допомогти уникнути перенавчання та покращити прогнози. При використанні регресійних моделей важливо ретельно вибирати та налаштовувати ознаки, враховувати нелінійні взаємозв'язки та коригувати модель відповідно до особливостей даних. Також слід уникати пере-



Рис. 1. Використання хмарного середовища Google Colab

навчання, використовуючи методи регуляризації (наприклад, L1 або L2 регуляризацію). Регресійні моделі можуть бути ефективним інструментом для прогнозування вартості нерухомості, особливо при правильному виборі та обробці ознак.

Оптимізація алгоритмів та коду може значно покращити швидкодію прогностичних моделей. Використання векторизованих операцій замість циклів може допомогти прискорити обчислення в багатьох випадках. Також варто уникати циклів у Python, особливо при роботі з великими об'ємами даних. Для розпаралелювання обчислень та використання багатоядерних систем можна використовувати можливості паралельного обчислення, такі як бібліотека Multiprocessing у Python. Використання бінарних форматів для збереження та завантаження даних, такі як HDF5 або Parquet, може бути ефективнішим за використання текстових форматів. Варто уникати зайвого використання пам'яті, особливо при роботі з великими наборами даних. Доцільно підібрати гіперпараметри для отримання більшої ефективності та швидкодії, а також використовувати такі методи оптимізації гіперпараметрів, як Grid Search або Random Search. Важливим аспектом ефективності оптимізації є час виконання коду та результати прогнозування моделі. Для перевірки оцінки точності прогнозування моделі у даному дослідженні використано середньо-квадратичну помилку RMSE та коефіцієнт детермінації R-squared. Достовірність моделі оцінюється за допомогою валідації моделі та перевірки на мультиколінеарність. Дані розділяються на тренувальний та тестовий набори для перевірки стабільності моделі. Оцінюється наявність мультиколінеарності серед факторів, що впливають на ціни на нерухомість, щоб уникнути спотворень у моделі. Стабільність прогнозів оцінюється за допомогою аналізу змін в часі. Порівняння з іншими прогностичними моделями відбувається за рахунок порівняння результатів точності після їх тестування.

У даному дослідженні використовується датасет «Linear Regression – House Price Predictions», обсягом 514 KB, який містить дані про продажі нерухомості в США за три місяці в період травень-липень 2014 року. Досліджуваний датасет містить 4601 запис та колонки: date, price, bedrooms, bathrooms, sqft\_living, sqft\_lot, floors, waterfront, view, condition. Колонка date відповідає за дату, коли було отримано інформацію про нерухомість, price – ціна нерухомості, bedrooms – кількість спалень, bathrooms – кількість ванних кімнат, sqft\_living – житлова площа, sqft\_lot – площа земельної ділянки, floors – кількість поверхів, waterfront вказує, чи має нерухомість вихід до води, наприклад озера, ріки, океану (1 – є вихід до води, 0 – вихід до води відсутній), view вказує на панорамний вид з квартири чи будинку та є категорійним атри-

бутом, condition вказує на загальний стан будівлі (1 – екстримально поганий стан, 2 – дуже поганий стан, 3 – середній стан, 4 – добрий стан, 5 – відмінний стан). Спочатку ми досліджуємо та виконуємо попередню обробку набору даних, імпортуємо необхідні бібліотеки для роботи з даними, візуалізації та машинного навчання.

```

1 import pandas as pd
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 import seaborn as sns
4 from sklearn.model_selection import train_test_split
5 from sklearn.linear_model import LinearRegression
6 from sklearn.metrics import mean_squared_error, r2_score

```

Дані завантажуються з CSV-файлу в об'єкт DataFrame за допомогою бібліотеки Pandas та записуються у змінну df, потім проводиться огляд даних, розрахунок основних статистичних характеристик та перевірка відсутності пропущених значень.

```

8 # Load the dataset from CSV
9 df = pd.read_csv('house_data.csv')
10
11 # Exploratory Data Analysis (EDA)
12 # Let's take a quick look at the first few rows of the dataset
13 print(df.head())
14
15 # Summary statistics of the dataset
16 print(df.describe())
17
18 # Check for missing values
19 print(df.isnull().sum())

```

Потім створюємо кореляційну теплову матрицю для аналізу взаємозв'язків між характеристиками у вигляді кольорової картинки (рис. 2).

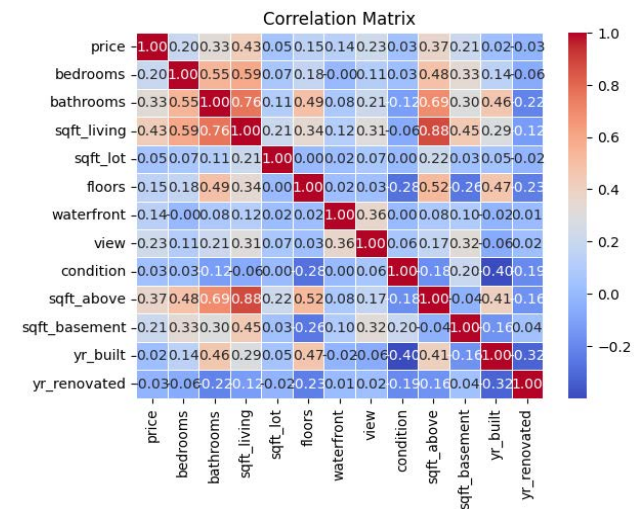


Рис. 2. Матриця кореляції для аналізу взаємозв'язків між різними ознаками

У рядках 28–29 обираємо ознаки та цільову змінну для подальшого їх використання у прогностичній моделі.

```

21 # Correlation matrix to understand feature relationships
22 correlation_matrix = df.corr()
23 sns.heatmap(correlation_matrix, annot=True, cmap='coolwarm')
24 plt.title("Correlation Matrix")
25 plt.show()

```

У рядку 32 дані розділяються на навчальний і тестовий набори для ефективного тренування та перевірки моделі.

```
31 # Splitting the dataset into training and testing sets
32 X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)
```

Будуємо модель лінійної регресії, використовуємо клас *LinearRegression* з бібліотеки *scikit-learn* та метод *.fit()* для навчання моделі на навчальних даних.

```
37 # Building the Linear Regression Model
38 model = LinearRegression()
39
40 # Fitting the model on the training data
41 model.fit(X_train, y_train)
```

*X\_train* представляє навчальні ознаки, а *y\_train* – цільову змінну (вартість нерухомості в нашому випадку). Під час навчання модель знаходить оптимальні параметри (ваги) для лінійної регресії, які найкраще відображають зв'язок між ознаками і цільовою змінною.

Побудуємо коефіцієнти регресії. Для цього використовуємо *X.columns* – атрибут *DataFrame*, який повертає імена стовпців в датафреймі *X* (в даному випадку, це назви факторів, які були вибрані для використання в моделі) та *model.coef\_* – атрибут, який містить коефіцієнти регресії, які модель призначила кожному фактору (кожен коефіцієнт показує, на скільки зміниться цільова змінна при зміні на одиницю відповідного фактора).

```
42 # Building regression coefficients
43 coefficients = pd.DataFrame({'Feature': X.columns, 'Coefficient': model.coef_})
44 print(coefficients)
```

Таким чином, створюємо новий об'єкт *DataFrame*, де об'єднуємо назви факторів (*X.columns*) і відповідні їм коефіцієнти регресії (*model.coef\_*) у два стовпці: 'Feature' та 'Coefficient'.

	Feature	Coefficient
0	bedrooms	-56797.399509
1	bathrooms	-8727.410252
2	sqft_living	285.272386
3	sqft_lot	-0.564912
4	floors	38931.386966
5	waterfront	407431.460385
6	view	55854.014776
7	condition	56771.209365

Проводимо оцінку моделі, застосовуючи навчену модель (*model*), що є об'єктом лінійної регресії, до тестового набору ознак (*X\_test*). Модель використовує навчені ваги для здійснення прогнозів вартості нерухомості на основі тестових ознак. Результат

```
47 # Model Evaluation
48 y_pred = model.predict(X_test)
49
50 # Mean Squared Error and R-squared for model evaluation
51 mse = mean_squared_error(y_test, y_pred)
52 r2 = r2_score(y_test, y_pred)
53
54 print("Mean Squared Error:", mse)
55 print("R-squared:", r2)
```

У рядку 51 використовуємо функцію *mean\_squared\_error* з бібліотеки *Scikit-learn* для обчислення середньоквадратичної помилки MSE між реальними значеннями цільової змінної (*y\_test*) і прогнозованими значеннями (*y\_pred*). У рядку 52 використовуємо функцію *r2\_score* для обчислення коефіцієнта детермінації R-squared між реальними значеннями (*y\_test*) і прогнозованими значеннями (*y\_pred*). Результати оцінки MSE і R-squared зберігаються у змінних *mse* і *r2*.

Отримуємо середню квадратичну помилку 94953,98 та R-квадрат 0,86233518995632512. Далі отримуємо прогнози та візуалізуємо їх.

Рядок 63 коду дозволяє створити точковий графік, де по горизонтальній осі розташовані фактичні ціни (*y\_test*), а по вертикальній осі – прогнозовані ціни (*y\_pred*).

```
63 plt.scatter(y_test, y_pred)
64 plt.xlabel("Actual Prices")
65 plt.ylabel("Predicted Prices")
66 plt.title("Actual Prices vs. Predicted Prices")
67 plt.show()
```

У рядках 64–65 ми описуємо позначення осей графіку. У рядку 66 вказуємо заголовок графіку. Рядок 67 відповідає за відображення графіку. Цей графік дозволяє порівняти прогнозовані та фактичні ціни на нерухомість.

```
69 # Creating a residual plot to check the model's performance
70 residuals = y_test - y_pred
71 plt.scatter(y_test, residuals)
72 plt.axhline(y=0, color='red', linestyle='--')
73 plt.xlabel("Actual Prices")
74 plt.ylabel("Residuals")
75 plt.title("Residual Plot")
76 plt.show()
```

У рядку 70 розраховуємо залишкові (*residual*) значення, що представляють різницю між фактичними цінами та прогнозованими цінами.

У рядку 71 створюємо точковий графік, де по горизонтальній осі розташовані фактичні ціни, а по вертикальній осі – залишкові значення.

У рядку 72 додаємо горизонтальну лінію на рівні 0 червоного кольору для визначення нульового рівня залишкових значень. У рядках 73–75 позначаємо осі графіку, вказуємо заголовок графіку.

Рядок 76 відповідає за відображення графіку залишкових значень, який допомагає оцінити, наскільки добре модель враховує варіацію в даних та чи є які-небудь систематичні відхилення.

```

78 # Using the trained model to make predictions on new data and visualize the results
79 new_data = [[3, 2, 1500, 4000, 1, 0, 0, 3]]
80 predicted_price = model.predict(new_data)
81
82 print("Predicted Price:", predicted_price[0])
    
```

У рядку 79 створюємо новий набір даних для прогнозування ціни. Вказуємо значення для кількості спалень, ванних кімнат, площі, розміру ділянки, кількості поверхів, наявності водойми, виду та стану.

У рядку 80 застосовуємо навчену модель для прогнозу ціни на нових даних. Рядок 82 виводить прогнозовану ціну. Отримавши візуалізацію (рис. 3), бачимо що на залишковій ділянці модель видає ближчі до реальності результати, аніж на тестовому наборі даних. Графік Actual Prices vs. Predicted

Prices дозволяє порівняти прогнозовані та фактичні ціни на нерухомість. Графік Residual Plot допомагає оцінити, наскільки добре модель враховує варіацію в даних та чи є які-небудь систематичні відхилення.

Застосування розробленої моделі в практичних умовах має ряд перспектив на ринку нерухомості України. Інвестори можуть використовувати прогнозні моделі для оптимізації своїх інвестицій у нерухомість, визначаючи об'єкти з найбільшим потенціалом зростання вартості. Забудовники можуть використовувати прогнози для оптимізації свого ресурсного планування, визначаючи ринкові тенденції та попит на певні типи нерухомості.

Областю застосування запропонованого програмного методу є прогнозування цін на житло

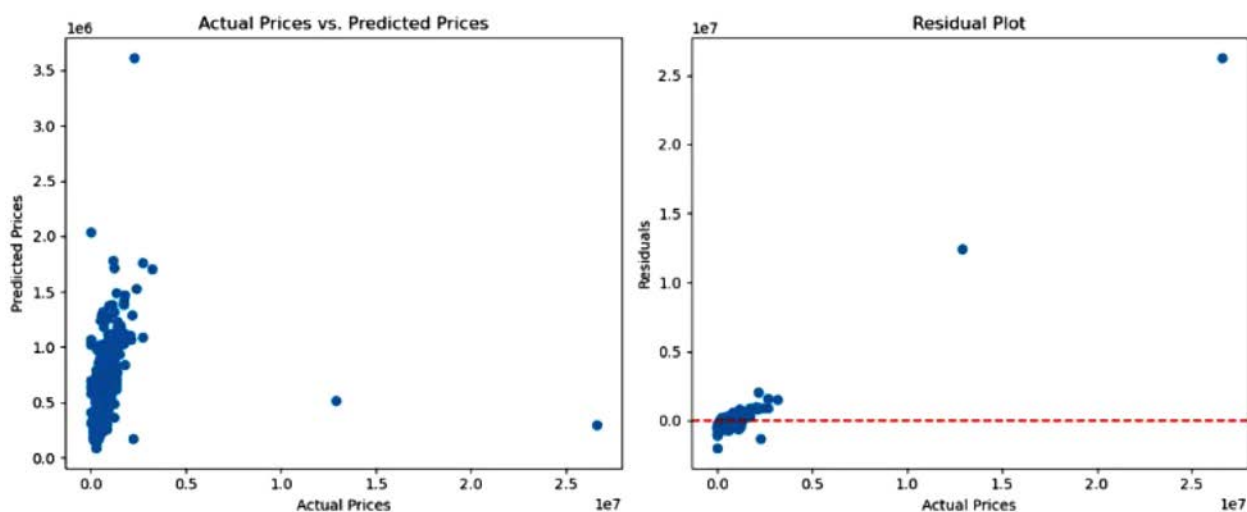


Рис. 3. Прогнози моделі на тестовому та на залишковому наборах даних

Прогнозування вартості нерухомості на основі регресійного аналізу даних

## Введіть, будь ласка, дані

Дата продажу	Ціна	Кількість спалень	Кількість ванних кімнат	Житлова площа
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Площа земельної ділянки	Кількість поверхів	Номер поверху житлового приміщення	Наявність панорамного виду	Рік будівництва будинку
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Рис. 4. Графічний інтерфейс користувача для збору та аналізу даних про продажі нерухомості в Україні

в різних регіонах України, комерційну нерухомість чи орендні ставки; прогнозування ринкових тенденцій для прийняття інвестиційних рішень; визначення вартості страхового покриття для нерухомості; аналіз впливу географічного розташування нерухомості на ціни; визначення оптимального часу для купівлі чи продажу нерухомості. Різні країни та регіони можуть мати різні ставки податку на нерухомість, які також впливають на вартість власності та інвестиційну привабливість.

Авторами було запропоновано і створено графічний інтерфейс користувача для збору та аналізу даних про продажі нерухомості України, який містить поля для введення та збереження статистичних даних про продажі житла різного типу (рис. 4).

У даному дослідженні було проаналізовано використання різних методів регресійного аналізу даних для прогнозування вартості нерухомості для обраного датасету, оскільки прогнозування вартості нерухомості є ключовим етапом у сфері нерухомості та фінансового планування. Лінійна регресія може використовуватися для моделювання простих взаємозв'язків між однією або декількома незалежними змінними та залежною змінною, такою як ціна нерухомості. Метод градієнтного бустингу, наприклад, застосовується для покращення точності прогнозування, враховуючи взаємозв'язки та нелінійність в даних. Також, регресійні моделі, побудовані за допомогою нейронних мереж, можуть ефективно моделювати складніші залежності вартості нерухомості враховуючи багатовимірні аспекти.

Регресія Lasso (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) є типом лінійної регресії, де сума значень коефіцієнтів штрафується, щоб уникнути помилок передбачення. Виходячи з досліджень спільноти Kaggle «Machine Learning Approach for House Price Prediction» бачимо, що така модель регресії дає точніші результати на 1%. Дослідження показали, що алгоритм машинного навчання SVM (Support Vector Machines) виконує свою функцію передбачення значно гірше за кла-

сичну лінійну регресію, оскільки різниця становить 58% точності. Алгоритм випадкового лісу (Random Forest) використовує кілька дерев рішень для прогнозування результату. Згідно з проведеним дослідженням, випадковий ліс є найкращим типом регресії для передбачень, оскільки точність передбачень є на 11% вищою порівняно з використанням звичайної лінійної регресії. XGBoost – це алгоритм машинного навчання, який може обробляти складні взаємодії функцій та ефективно фіксувати нелінійні зв'язки, що забезпечує точніші прогнози. Методи регуляризації, які використовуються в XGBoost, допомагають запобігти перенавчанню та підвищити ефективність моделі. Точність цього алгоритму вища на 9% від точності класичної лінійної регресії. Проте налаштування гіперпараметрів XGBoost може бути складним завданням, і неправильний вибір параметрів може призвести до перенавчання чи недонавчання моделі, що може вплинути на її ефективність.

**Висновки та подальша робота.** У даному дослідженні запропоновано програмний метод прогнозування вартості нерухомості на основі регресійного аналізу даних та методів машинного навчання з перспективою впровадження даного методу для збору та аналізу даних на ринку нерухомості України.

Подальші дослідження авторів передбачають створення відкритої інформаційної системи для збору даних про нерухомість в Україні, врахування в регресійній моделі специфічних економічних факторів, які можуть впливати на ціни нерухомості в регіонах України, таких як попит і пропозиція, процентні ставки, інфляція та економічне зростання. Фінансові аспекти, включаючи варіанти фінансування та іпотечні ставки, а також державна політика відіграють вирішальну роль у прогнозуванні вартості нерухомості в Україні, що також потрібно враховувати і аналізувати при побудові прогнозних моделей на основі регресійного аналізу даних.

#### Список літератури:

1. Plakandaras V., Gupta R., Gogas P., Papadimitriou T., 2015. Forecasting the U.S. real house price index, *Economic Modelling*, Elsevier, vol. 45(C), pages 259–267. DOI: 10.1016/j.econmod.2014.10.050.
2. Li Y., Leatham D. Forecasting housing prices: dynamic factor model versus LBVAR model. *2011 Annual Meeting, Pittsburgh, Pennsylvania, Agricultural and Applied Economics Association*, July 24–26, 2011, 103667. DOI: 10.22004/ag.econ.103667.
3. Beracha E., Wintoki B. Forecasting residential real estate price changes from online search activity. *Journal of Real Estate Research*, 35(3). July 2013. DOI: 10.1080/10835547.2013.12091364.
4. M. Jagan Chowhaan, D. Nitish, G. Akash, Nelli Sreevidya and Subhani Shaik. Machine Learning Approach for House Price Prediction. *Asian Journal of Research in Computer Science*, Volume 16, Issue 2, pages 54–61, 2023. DOI: 10.9734/ajrcos/2023/v16i2339.

5. Fan C., Cui Z., Zhong X. House Prices Prediction with Machine Learning Algorithms. *Proceedings of the 2018 10th International Conference on Machine Learning and Computing – ICMLC 2018*. doi:10.1145/3195106.3195133.
6. Phan T.D. Housing Price Prediction Using Machine Learning Algorithms: The Case of Melbourne City, Australia. *2018 International Conference on Machine Learning and Data Engineering (ICMLDE) 2018*. doi:10.1109/icmlde.2018.00017.
7. Mu J., Wu F., Zhang A. Housing Value Forecasting Based on Machine Learning Methods. *Abstract and Applied Analysis 2014*; 2014:1–7. doi:10.1155/2014/648047.
8. Lu S., Li Z., Qin Z., Yang X. A hybrid regression technique for house prices prediction. *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM) 2017*. doi:10.1109/ieem.2017.8289904.

#### **Oleshchenko L.M., Trushyna D.V. PREDICTIVE SOFTWARE METHOD FOR REAL ESTATE VALUATION USING MACHINE LEARNING AND REGRESSION ANALYSIS**

*The article considers the features of the software implementation of the regression model for forecasting the value of real estate using machine learning methods. To select a housing price forecasting model, an analysis of publications and existing software solutions for real estate price forecasting was conducted. In this research, the Python programming language, Pandas, Matplotlib, Seaborn, Scikit-learn, and NumPy libraries were used for the practical implementation of the proposed software method. The "Linear Regression – House Price Predictions" dataset, with a volume of 514 KB, containing 4601 records, was chosen for the study of building a regression model. The model was trained, its accuracy was evaluated and compared with other forecasting methods using machine learning technologies.*

*The article provides a study of the areas of application of the model for forecasting the value of real estate based on regression analysis of data, the formation of software requirements, the choice of a programming language, the development of a structure and the training of an algorithm. The technological approaches covered include data processing and preparation, feature selection, regression modeling, model training and evaluation, integration of artificial intelligence and machine learning, and model validation and optimization.*

*As a result of the research, a software method was created for forecasting the value of real estate based on regression analysis of data, which provides a graphical display of a list of factors with a quantitative assessment of their impact on the value of real estate. The advantages of this study are important from the point of view of the software implementation of the method of regression analysis of data and the possibility of future use of the proposed method for forecasting the real estate market in Ukraine. By developing a model based on regression analysis, real estate professionals will have a more reliable tool for predicting real estate values. This will allow them to make informed decisions about investments, pricing strategies and development projects. In addition, property owners will have a better understanding of the factors that affect their property's value, allowing them to make informed decisions about home repairs and improvements.*

**Key words:** *programming technologies of artificial intelligence systems, Python programming language, forecasting, machine learning, real estate market, big data, data processing, data regression analysis.*

*Петросян А.Р.*

Державний університет «Житомирська політехніка»

## ОРГАНІЗАЦІЯ ТЕСТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БОРТОВОГО КОМП'ЮТЕРА БЕЗПЛОТНОГО ПОВІТРЯНОГО СУДНА

*Останнім часом безпілотні повітряні судна демонструють значне технологічне зростання, що викликає інтерес не тільки у пересічних громадян, а й у військовій, промисловій та цивільній сферах діяльності.*

*Проектування та розробка програмного забезпечення управління орієнтацією безпілотного повітряного судна у просторі потребує тривалого часу, включаючи час на відлагодження, тестування, проведення льотних випробувань. Помилки, допущені при розробці програмного забезпечення, можуть спричинити виникнення аварійних ситуацій або інших непередбачених збоїв у процесі експлуатації, що може привести до руйнування апарату та загрози шкоди людям та навколишньому середовищу. Відлагодження та тестування програмного забезпечення безпілотного повітряного судна є складним завданням, тому застосовують спеціальні програмні та апаратні засоби.*

*Проаналізовано останні дослідження підходів до тестування програмного забезпечення вбудованих систем з виявленням переваг і недоліків. Аналіз показав, що розробляють як механічні випробувальні стенди, так і використовують імітаційне моделювання (симуляцію) у 3D-середовищі: SIL та HIL. Механічний випробувальний стенд дозволяє перевіряти і калібрувати параметри моделі та виконувати керування в реальному часі багатороторним безпілотним повітряним судном, а також забезпечує рух по тангажу, крену та ризику. SIL-симуляція дозволяє легко організувати тестування, оскільки не потребує додаткового обладнання, тому її можна використати на ранніх етапах розробки програмного забезпечення ще до того, як воно буде інтегровано в цільове обладнання. HIL-симуляція включає використання цільового обладнання, що максимально наближає роботу системи до реальних умов.*

*Обґрунтовано важливість та запропоновано удосконалений варіант HIL-симуляції. Основу даного варіанту складає симулятор датчиків та актуаторів, який забезпечує роботу оригінальної прошивки безпілотного повітряного судна та дозволяє організувати взаємозв'язок бортового комп'ютера та персонального комп'ютера. Для перевірки ідеї, система була реалізована на практиці. Також розроблено утиліту конфігурування симулятора датчиків та актуаторів.*

**Ключові слова:** БПС, безпілотні повітряні судна, бортовий комп'ютер, тестування програмного забезпечення, HIL-симуляція, 3D-середовище, симулятор датчиків та актуаторів.

**Постановка проблеми.** Безпілотні повітряні судна (БПС), які є літаючими роботами, становлять важливу частину наукових досліджень у військовій, промисловій та цивільній сферах діяльності: аерофотозйомка та картографування, оперативне отримання інформації про наслідки надзвичайних ситуацій, моніторинг за об'єктами промисловості та природних комплексів, доставка товарів, у розважальних цілях тощо. Проектування та розробка програмного забезпечення управління орієнтацією БПС у просторі (автопілота) потребує тривалого часу, включаючи час на відлагодження, тестування, проведення льотних випробувань. Помилки, допущені при розробці програмного забезпечення БПС, можуть спричинити виникнення аварійних ситуацій або інших непередбачених збоїв у процесі експлуатації. У зв'язку з цим постає завдання перевірки надійності програм-

ного забезпечення бортового комп'ютера БПС, що дозволить спростити супровід, модернізацію та оптимізацію програмного забезпечення.

Відлагодження та тестування програмного забезпечення БПС є складним завданням. Проблема полягає у складності формування повного набору сигналів датчиків та неможливості створення на реальному БПС позаштатних ситуацій.

Для розробки, тестування та відлагодження програмного забезпечення БПС застосовують спеціальні програмні та апаратні засоби. Вони мають обмежені сфери застосування та функціональні можливості, тому створення засобів комплексного тестування програмного забезпечення бортового комп'ютера БПС з використанням моделей є актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Насамперед, зупинимося на розгляді сучасних

підходів, які використовуються для перевірки надійності програмного забезпечення при розробці – тестуванні. За ступенем ізолюваності коду існує 4 рівні тестування [1]: модульне тестування; інтеграційне тестування; системне тестування; приймальне тестування.

Модульне тестування – рівень, у якому окремі модулі чи компоненти програми (функції, методи чи класи) тестуються незалежно від решти програми. Цей рівень тестування має перевірити, чи працює кожен компонент коректно. Важливим аспектом модульного тестування є ізоляція компонента, що тестується, від інших компонентів програми для впевненості у тому, що виявлення та виправлення помилок відбувається локально в межах даного компонента.

Інтеграційне тестування – рівень, який спрямований на перевірку взаємодії між різними модулями чи компонентами програми. Під час інтеграційного тестування перевіряється, як компоненти взаємодіють один з одним і як вони взаємодіють із зовнішніми системами, якщо такі є. Цей рівень тестування зазвичай слідує за модульним тестуванням, щоб забезпечити правильне функціонування всієї системи.

Системне тестування – рівень, який проводиться на завершальній стадії розробки, коли всі компоненти програми вже інтегровані разом та готові для тестування у реальних умовах перед випуском програми в експлуатацію. Цей рівень забезпечує перевірку всієї системи як єдиного цілого для впевненості у тому, що вона відповідає специфікаціям та вимогам користувачів.

Приймальне тестування – рівень, який спрямований на перевірку відповідності програми вимогам замовника чи кінцевого користувача. Воно зазвичай виконується замовником чи його представниками.

Завдяки тестуванню забезпечується:

- якість коду;
- відповідність заявленим вимогам;
- оптимізація обчислювальних ресурсів;
- безпека та цілісність даних;
- економія часу (пошук помилок може займати багато часу);
- тощо.

Застосування тестування під час розробки, наприклад, прикладного програмного забезпечення для комп'ютера (software) у багатьох випадках достатньо, щоб забезпечити необхідний рівень надійності програми, однак для програмного забезпечення вбудованих систем (firmware) – ні.

Для ефективного та дієвого тестування вбудованого програмного забезпечення використовується велика кількість методів тестування, підходів, інструментів, тому в роботі [2] проведено огляд та виконано систематизацію літературних джерел у цьому напрямку.

Вбудовані системи часто повинні працювати у взаємодії із навколишнім середовищем, використовуючи датчики для отримання вхідних даних (температури, тиску тощо) [3] і БПС не є винятком. У роботі [4] основною ідеєю є розробка тестової платформи для механічного моделювання польоту та кращої стабілізації багатороторних БПС за допомогою різних алгоритмів керування зі зворотним зв'язком, включаючи ПІД-регулятори [5, 6]. Даний стенд дозволяє перевіряти і калібрувати параметри моделі та виконувати керування в реальному часі багатороторним БПС. Більш функціональний стенд для навчальних цілей наведено у роботі [7]. Як і в попередній роботі, тестовий стенд являє собою гіроскопічну конструкцію з трьома ступенями свободи, який забезпечує рух по тангажу, крену і ризканню квадрокоптера. Однак, на відміну від попереднього тестового стенда, дозволяє здійснювати поступальний рух, хоча і з обмеженнями (рис. 1).

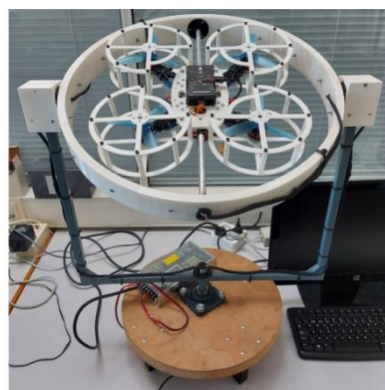


Рис. 1. Експериментальний прототип із 3 ступенями свободи для перевірки алгоритмів керування у квадрокоптері

Одним із дієвих методів тестування вбудованих систем є імітаційне моделювання. Імітаційне моделювання (симуляція) – метод дослідження, який використовує моделі, що описують процеси реального світу. Використовуючи такі моделі, можна провести випробування реальної системи, не наражаючи її на небезпеку. До імітаційного моделювання найчастіше вдаються, коли неможливо провести експеримент на реальному об'єкті або необхідно симулювати поведінку реальної системи в часі.

Тест прошивки при симуляції БПС можна виконати у трьох місяцях: на хост-комп'ютері, викорис-



товуючи компіляцію коду під вихідну платформу; в емуляторі на хост-комп'ютері, наприклад, QEMU; на реальному польотному контролері, використовуючи крос-компіляцію коду для цільового обладнання. Перші два варіанти використовуються при виконанні симуляції SIL (Software in the Loop) [8, 9]. Перевага SIL в тому, що його легко організувати, оскільки не потрібно додаткового обладнання. SIL дозволяє розробникам виконати симуляцію прошивки на ранніх етапах розробки ще до того, як вона буде інтегрована в цільове обладнання. Третій варіант використовується при виконанні симуляції HIL (Hardware in the Loop) [8, 10]. HIL-симуляція включає використання цільового обладнання, що максимально наближає роботу системи до реальних умов.

**Постановка завдання.** Процес тестування програмного забезпечення БПС може призвести до руйнування апарату внаслідок нештатних ситуацій. Для забезпечення безпечного тестування БПС використовуються випробувальні стенди. Метою статті є організація системи тестування програмного забезпечення БПС із використанням віртуального середовища. Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити наступні завдання: провести порівняльний аналіз існуючих підходів тестування з виявленням переваг і недоліків; організувати взаємозв'язок між бортовим комп'ютером та віртуальним середовищем на персональному комп'ютері; зробити висновки щодо отриманих результатів.

**Виклад основного матеріалу.** Для забезпечення надійності програмного забезпечення вбудованих систем, як було зазначено вище, використовуються різні методи тестування та інструменти. Основну складність викликає тестування апаратних вузлів вбудованої системи, тому розробляють додаткові апаратні та/або програмні інструменти. На рис.1 показано тестовий стенд, який забезпечує перевірку функціонування алгоритмів у мікроконтролері, роботу датчиків, двигунів тощо. Однак, очевидно, що він обмежує переміщення БПС у просторі. Інший підхід, який дозволяє перевірити повноцінний політ БПС – це використання HIL-симуляції. Політ здійснюється в 3D-середовищі на комп'ютері (наприклад, jMavSim або інший). На рис. 2 показано схему такої системи HIL-симуляції програмного забезпечення автопілота PX4 [11].

Вочевидь, що такий підхід дозволяє протестувати лише роботу мікроконтролера, інші апаратні вузли є віртуальними. Взаємодія цих віртуальних вузлів із бортовим комп'ютером відбувається

з використанням протоколу MAVLink [12]. Для забезпечення тестування прошивки мікроконтролера потрібно використати mock-об'єкти. Призначення mock-об'єктів полягає в заміні об'єктів, що тестуються у програмному коді, на відлагоджувальні еквівалентні об'єкти. Створення mock-об'єктів може бути пов'язане з деякими труднощами, наприклад, використання переривань від конкретного інтерфейсу зв'язку, по якому працює реальний датчик. Недолік такого підходу в тому, що прошивка мікроконтролера під час тестування не буде відповідати кінцевій її реалізації.

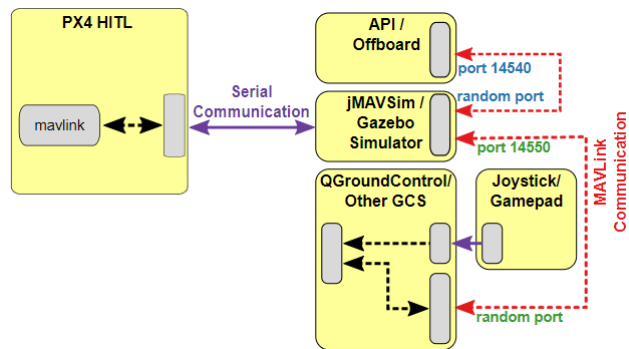


Рис. 2. Структурна схема HIL-симуляції у PX4

Для усунення зазначених недоліків пропонується реалізувати такий апаратний симулятор, який використовує реальну прошивку для мікроконтролера. У цьому випадку бортовий комп'ютер звертатиметься до реальних апаратних вузлів. З іншого боку необхідно використати 3D-середовище як при HIL-симуляції для організації безпечних польотів при тестуванні алгоритмів БПС. Очевидно, що необхіден вузол, який пов'язуватиме бортовий комп'ютер із 3D-середовищем для передачі навігаційної інформації та інформації управління БПС. З вище сказаного випливає, що потрібен симулятор датчиків і актуаторів, у якого програмна модель відповідає апаратним вузлам. Також він повинен з одного боку обмінюватися інформацією з бортовим комп'ютером з використанням реальних інтерфейсів, а з іншого боку обмінюватися інформацією з 3D-середовищем на комп'ютері. Структурна схема такого симулятора показана на рис. 3.

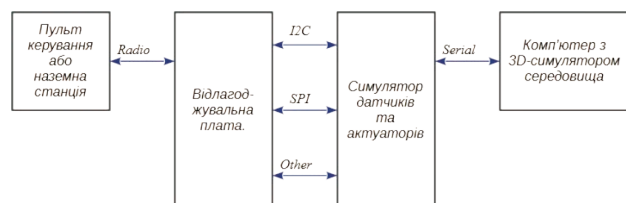


Рис. 3. Структурна схема апаратної симуляції

Для симуляції БПС необхідна відлагоджувальна плата. Найбільш популярні мікроконтролери для бортового комп'ютера STM32F405RGT6 та STM32F722RET6. Нажаль STMicroelectronics не випускає відлагоджувальну плату на базі мікроконтролера STM32F405RGT6, тому можливі 2 варіанти виходу з цього положення: скористатися відлагоджувальною платою стороннього виробника, наприклад, Core405R від Waveshare; використати відлагоджувальну плату NUCLEO-64 від STMicroelectronics, змінивши мікроконтролер на STM32F405RGT6 (це можливо, тому що у STMicroelectronics мікроконтролери з однаковим корпусом мають однакове розташування виводів). Відлагоджувальну плату NUCLEO-F722ZE можна використати для симуляції бортового комп'ютера на базі мікроконтролера STM32F722RET6. Симулятор датчиків та актуаторів (СДА) може бути виконаний на будь-якій відлагоджувальній платі, що має по три інтерфейси I2C та SPI (кількість інтерфейсів обумовлена їх кількістю у вище згаданих мікроконтролерах). В нашому випадку використовувалась NUCLEO-F767ZI. Налаштування СДА для кожного датчика виконується аналогічно його прототипу, а регістри даних заповнюються інформацією, яка поступає від 3D-середовища.

Для перевірки відповідності реалізації програмної моделі СДА датчика та оригінального датчика було застосовано наступну структурну схему (рис. 4).

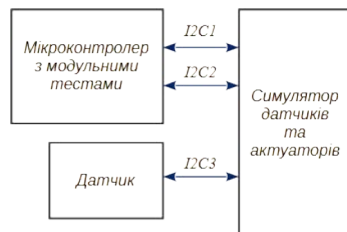


Рис. 4. Структурна схема перевірки ідентичності датчика та симулятора

Через інтерфейс I2C1 надходить інформація від СДА датчика, а через інтерфейс I2C2 надходить інформація від оригінального датчика. Сам датчик підключається до I2C3. При запиті на отримання інформації з регістру даних оригінального датчика вона також записується в регістр даних СДА датчика. Якщо налаштування СДА

датчика та оригінального датчика збігаються, то результати запитів будуть повністю збігатися. На даний час реалізовано лише один датчик СДА – MPU-6500.

Для конфігурування СДА розроблено просту утиліту мовою C++ з використанням фреймворку QT (рис. 5). Для кожного каналу налаштовується модель датчика, інтерфейс та варіативна частина адреси.

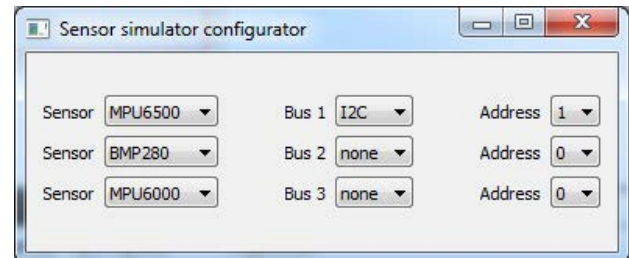


Рис. 5. Зовнішній вигляд конфігуратора симулятора датчиків та актуаторів

**Висновки.** У статті проведено розгляд організації тестування програмного забезпечення бортового комп'ютера безпілотного повітряного судна. Для забезпечення надійності програмного забезпечення вбудованих систем використовуються різні методи тестування та інструменти. Основну складність викликає тестування апаратних вузлів вбудованої системи, тому розробляють додаткові апаратні та/або програмні інструменти.

Для виконання поставленої задачі було проведено порівняльний аналіз існуючих підходів тестування з виявленням переваг і недоліків. Аналіз показав, що розробляють як механічні випробувальні стенди, так і використовують імітаційне моделювання (симуляцію) у 3D-середовищі: SIL та HIL. Механічний випробувальний стенд має велику вагу та обмежує переміщення БПС у просторі. Існуючі симулятори SIL та HIL не потребують додаткового обладнання, однак вони не враховують реальну роботу апаратних вузлів.

Запропоновано удосконалений варіант HIL-симуляції. Основу даного варіанту складає СДА, який забезпечує роботу оригінальної прошивки БПС та дозволяє організувати взаємозв'язок бортового комп'ютера та персонального комп'ютера. СДА було виконано на базі відлагоджувальної плати NUCLEO-F767ZI. Розроблено для конфігурування СДА просту утиліту мовою C++ з використанням фреймворку QT.

#### Список літератури:

1. Aniche M. Effective Software Testing: A Developer's Guide. Manning Publications Co., 2022. 328 p.
2. Garousi V., Felderer M., Karapicak CM., Yilmaz U. Testing embedded software: A survey of the literature. *Information and Software Technology*. 2018. Vol. 104. P. 14–45. DOI: 10.1016/j.infsof.2018.06.016.

3. Banerjee A., Chattopadhyay S., Roychoudhury A. On testing embedded software. *Advances in Computers*. Elsevier, 2016. Vol. 101. P. 121–153. DOI: 10.1016/bs.adcom.2015.11.005.
4. Hancer M., Bitirgen R., Bayezit I. Designing 3-DOF Hardware-In-The-Loop Test Platform Controlling Multirotor Vehicles. *IFAC-PapersOnLine*. 2018. Vol. 51, № 4. P. 119–124.
5. Petrosian R.V., Pilkevych I.A., Petrosian A.R. Algorithm for optimizing a PID controller model based on a digital filter using a genetic algorithm. *Proceedings of the 3rd Edge Computing Workshop*. 2023. Vol. 3374. P. 97–111. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3374/paper07.pdf>.
6. Research on improved sparrow search algorithm for PID controller parameter optimization / Zhang M. et al. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. P. e147344.
7. Quadcopters Testing Platform for Educational Environments / U. Veyna et al. *Sensors*. 2021. Vol. 21, № 12. P. 4134. DOI: 10.3390/s21124134.
8. Coopmans C., Podhradský M., Hoffer N. Software-and hardware-in-the-loop verification of flight dynamics model and flight control simulation of a fixed-wing unmanned aerial vehicle. *2015 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS), November 23–25, 2015*. Mexico, 2015. P. 115–122.
9. Nguyen K.D., Ha C., Jang J.T. Development of a new hybrid drone and Software-in-the-Loop simulation using PX4 code. *Intelligent Computing Theories and Application: 14th International Conference, ICIC 2018, Wuhan, China, August 15–18, 2018, Proceedings, Part I*. Springer, 2018. P. 84–93. DOI: 10.1007/978-3-319-95930-6\_9.
10. Nguyen K.D., Ha C. Development of Hardware-in-the-Loop simulation based on Gazebo and Pixhawk for unmanned aerial vehicles. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*. 2018. JASS 19. P. 238–249. DOI: 10.1007/s42405-018-0012-8.
11. Hardware in the Loop Simulation (HITL). *PX4 Autopilot User Guide*. URL: <https://docs.px4.io/main/en/simulation/hitl.html> (date of access: 07.11.2023).
12. Protocol Overview. *MAVLink Developer Guide*. URL: <https://mavlink.io/en/about/overview.html> (date of access: 07.11.2023).

### **Petrosian A.R. ORGANIZATION OF TESTING THE SOFTWARE OF THE ON-BOARD COMPUTER OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE**

*Recently, unmanned aerial vehicles have demonstrated significant technological growth, which is of interest not only to ordinary citizens but also to military, industrial, and civilian sectors.*

*Designing and developing software for controlling the orientation of an unmanned aerial vehicle in space takes a long time, including time for debugging, testing, and flight tests. Errors made during software development can cause emergencies or other unforeseen failures during operation, which can lead to the destruction of the vehicle and harm to people and the environment. Debugging and testing the software of an unmanned aerial vehicle is a complex task, so special software and hardware tools are used.*

*The latest studies of approaches to software testing of embedded systems are analyzed with the identification of advantages and disadvantages. The analysis showed that they are developing both mechanical test benches and using simulation modeling (simulation) in a 3D environment: SIL and HIL. The mechanical test bench allows you to test and calibrate model parameters and perform real-time control of a multi-rotor unmanned aerial vehicle, as well as provide pitch, roll and yaw motion. SIL simulation makes it easy to organize testing because it does not require additional equipment. therefore, it can be used in the early stages of software development before it is integrated into the target hardware. HIL simulation includes the use of target equipment, which brings the system's operation as close as possible to real conditions.*

*The importance is substantiated and an improved version of HIL simulation is proposed. The basis of this option is a simulator of sensors and actuators, which ensures the operation of the original firmware of the unmanned aerial vehicle and allows you to organize the relationship between the on-board computer and the personal computer. To test the idea, the system was implemented in practice. A configuration utility for the simulator of sensors and actuators has also been developed.*

**Key words:** UAV, unmanned aerial vehicle, on-board computer, software testing, HIL simulation, 3D environment, sensor and actuator simulator.

**Пилипенко Ю.М.**

Київський національний університет технологій та дизайну

**Куприсенко П.Д.**

Київський національний університет технологій та дизайну

**Кисельов В.Б.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

## КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА ВИРОЩУВАННЯ РОСЛИН В БЕЗҐРУНТОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ

*Клімат Землі змінюється з кожним роком, що суттєво впливає на способи вирощування сільськогосподарських рослин. Жодна людина не може передбачити ті природні катаклізми, що відбудуться на протязі наступних років. Для того, щоб не залежати від примх природи потрібно забезпечити сталі умови вирощування рослин – тобто створити штучне середовище – теплицю, яка забезпечить оптимальні умови для вирощування сільськогосподарських культур. При цьому потрібно створити систему, яка б контролювала і регулювала умови, які б були оптимальними для вирощування тієї чи іншої рослини.*

*Зрозуміло, що створення таких штучних умов дасть перевагу у прогнозованості результату, але навряд чи фінансування побудови та обслуговування тисяч гектар теплиць може бути економічно вигідним. В той же час, площі, які відведені під теплиці, можна використовувати ефективніше відмовившись від ґрунтового середовища на користь альтернативних, безґрунтових, методів вирощування рослин. Одна з основних переваг при цьому те, що ми можемо розташувати рослини в декілька ярусів, тобто використовуючи третій вимір простору, «розтягнувши» теплицю по вертикалі. Це дозволяє в рази збільшити «площу посівної», краще використовувати енергетичну складову проекту, спростити систему слідкування та регулюванням параметрів для оптимізації умов вирощування рослин.*

*Одною з ключових у створенні системи моніторингу і керування є інтелектуальна та технічна складова проекту. Сучасний рівень програмного забезпечення (soft) та матеріальна база проекту (hard) дозволяють створити комп'ютерно-інтегровану систему, яка в лічені секунди реагує на зовнішні впливи і приводить систему в стаціонарний рівень роботи для кожного з параметрів, що розглядаються.*

*В даній роботі створена комп'ютерно-інтегрована модель системи аеропонного вирощування рослин у теплиці.*

**Ключові слова:** безґрунтове вирощування рослин, аеропонний тип безґрунтового вирощування рослин, алгоритм, автоматизована система, комп'ютерно-інтегрована система керування проектом, мікропроцесорна платформа Arduino, програмне забезпечення проекту.

**Постановка проблеми.** Сучасні методи вирощування рослин, такі як гідропоніка та аеропоніка, мають кілька переваг порівняно з традиційними системами на ґрунті. Ось деякі з них:

– **Ефективність використання ресурсів.** Гідропоніка та аеропоніка споживають менше води, оскільки вода циркулює і використовується більше одного разу. Вони також потребують менше площі для вирощування, оскільки можуть бути організовані у вертикальній або горизонтальній системах.

– **Контрольовані умови.** У цих системах можна детально контролювати рівень поживних речовин, вологість, температуру та інші фактори, що впливають на ріст рослин. Це сприяє оптимальному розвитку та врожаю.

– **Менше використання добрив.** У системах гідропоніки та аеропоніки добрива використовуються ефективніше, тому що вони безпосередньо доставляються до кореневої системи рослин.

– **Стійкість до шкідників.** Оскільки рослини вирощуються в контрольованому середовищі, менше ймовірність поширення шкідників та хвороб, що дозволяє зменшити застосування пестицидів.

– **Високий врожай та якість:** Контрольовані умови дозволяють досягати кращого врожаю та вищої якості продукції.

Ці методи стають все популярнішими через їхню ефективність, економічну вигідність та екологічну дружність.

Створення моделі комп'ютерно-інтегрованої системи, що відслідковує та налаштовує параметри догляду за рослинами в теплиці, дозволяє автоматизувати та управляти всіма аспектами росту рослин. Це включає контроль за рівнем вологості, кислотності розчину, температурою та освітленням.

Побудована модель забезпечує постійне спостереження за рослинами і дозволяє оперативно реагувати на будь-які зміни та проблеми, що можуть при цьому виникнути.

**Аналіз останніх джерел.** Гідропоніка та аеропоніка – це дві основні технології безгрунтового вирощування рослин у теплицях. Гідропоніка використовує водні розчини з поживними речовинами для культивування рослин. Вона може використовувати спеціальні субстрати, такі як камінь, пісок, волокно, перліт чи кокосова койра, для підтримки рослин. Ці субстрати не надають життєво важливих поживних речовин, а лише фізичну підтримку (рис. 1) [1].

Аеропоніка ж, натомість, не використовує субстрати. Рослини у аеропоніці вирощують у повітрі, а корені зазвичай знаходяться у вологому середовищі, де їх зрошують або розпилюють живильний розчин [2, 3].

Обидва підходи мають свої переваги та недоліки, і обираються залежно від конкретних умов та типу вирощуваних рослин. Гідропоніка може бути більш легкодоступною для рослин, а аеропоніка забезпечує кращий доступ до кисню та вологи для кореневої системи.

У теплицях, де рослини не піддаються впливу зовнішнього середовища, за винятком світла, необхідно створювати оптимальні умови за допомогою спеціального обладнання. Для підтримання температурного режиму використовується опалювальне обладнання, проте при досягненні температури 40°C у приміщенні рослини втрачають життєву силу та загинуть, що вимагає встановлення системи провітрювання для уникнення цієї проблеми. Сучасні системи вентиляції поєднують систему обігріву та провітрювання, що ефективно забезпечує підтримку заданого температурного режиму, незалежно від зовнішніх погодних умов [4].

Зменшення світлового потоку восени негативно впливає на рослини, тому в цей період штучне освітлення використовується активніше. У промислових теплицях включають освітлення, коли природного світла недостатньо для рослин, тим самим продовжуючи тривалість світлового дня [5].

Головна відмінність між аеропонікою та гідропонікою в тому, як подається живильний розчин



Рис. 1. Приклад гідропонного вирощування рослин



Рис. 2. Приклад вертикальної аеропонної ферми

до коренів рослин. У гідропоніці корені занурені у живильний розчин, а в аеропоніці корені періодично звожуються живильним розчином, перебуваючи у повітрі.

Зволоження здійснюється через форсунки, які розпилюють розчин і перетворюють його у туман над коренями рослин [6].

Аеропонні системи дозволяють зекономити до 98% води, добрив – до 60% і пестицидів – майже на 100%, при цьому досягаючи максимального збільшення врожайності. «Аеропонні» рослини поглинають більше мінералів і вітамінів, що сприяє здоровому зовнішньому вигляду рослин. Ще однією перевагою є легкість пересадки рослин, які не відчувають трансплантаційного стресу [7].

В системі аеропоніки маємо підвищений рівень доставки кисню до коренів рослин, що сприяє стимулюванню росту та запобігає формуванню патогенів [8].

Розробка, що розглядається, спрямована на створення моделі комп'ютерно-інтегрованої системи управління теплицею при аеропонному методі вирощування рослин. Це дозволить не лише ефективно використати простір теплиці, а й зменшить фінансові витрати на переоблад-

нання у порівнянні з гідропонікою. Аеропоніка є оптимальним вибором для створення вертикальних ферм, оскільки коренева система безпосередньо контактує з необхідними поживними речовинами, також забезпечується багате кисневе середовище, що сприяє активному зростанню рослин. Це дозволить очікувати отримання кількох врожаїв протягом року, забезпечуючи продуктивний річний цикл.

**Мета роботи** – створення моделі комп’ютерно-інтегрованої системи керування теплицею при аеропонному способі вирощування рослин на базі мікропроцесорної платформи Arduino.

**Виклад основного матеріалу.** Розробка тестової моделі механізму – це ключовий етап у вирішенні будь-якої виробничої задачі. Створивши експериментальний макет, що відображає можливе апаратне втілення запропонованого проекту, тестова модель дозволяє визначити, наскільки ефективно працює розроблений алгоритм та який результат можна очікувати при його застосуванні в реальних умовах. Це важливий крок у впровадженні інновацій та розробці нових технологій, який дозволяє перевірити концепцію та виправити можливі недоліки до фактичного впровадження промислового втілення задачі.

Для створення тестової моделі необхідний ряд елементів. Серед основних можна виділити: систему вводу/виводу інформації, групу датчиків, виконавчий механізм та керуючий пристрій. Найбільш складним та важливим можна вважати саме керуючий пристрій, який і буде здійснювати управління всією схемою. Зазвичай, керуючий пристрій – це логічний контролер, який програмується за допомогою певних мов програмування. Для вирішення поставленої задачі було обрано мікропроцесорну платформу Arduino (рис. 3), яка буде використана для побудови макетної, не промислової, схеми [9, 10]. Її завданням буде перевірити можливість реалізації розробленого підходу і показати як саме буде працювати запропонована система автоматизації.

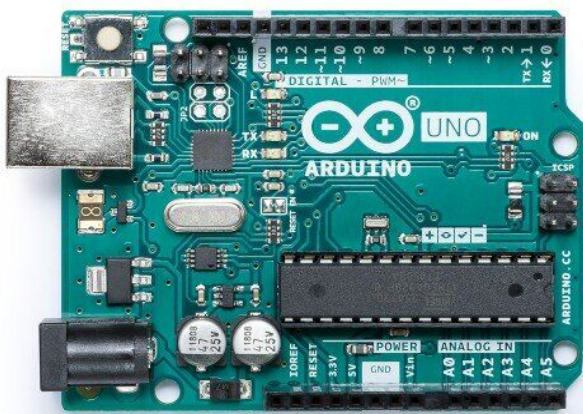


Рис. 3. Мікропроцесорна плата Arduino UNO

**Температурний контроль.** Датчиком температури обрано DS18B20. Двигун постійного струму буде моделювати роботу вентилятора. На схемі зображені індикатори, що сигналізують про регулярний (зелений) або нерегулярний (червоний) стани системи.

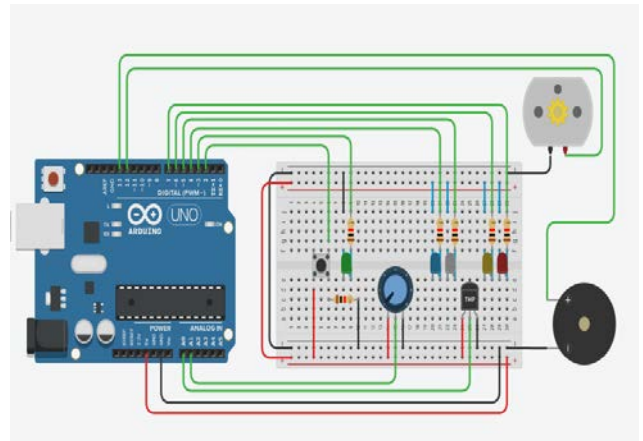


Рис. 4. Схема підключення датчика та виконавчих елементів

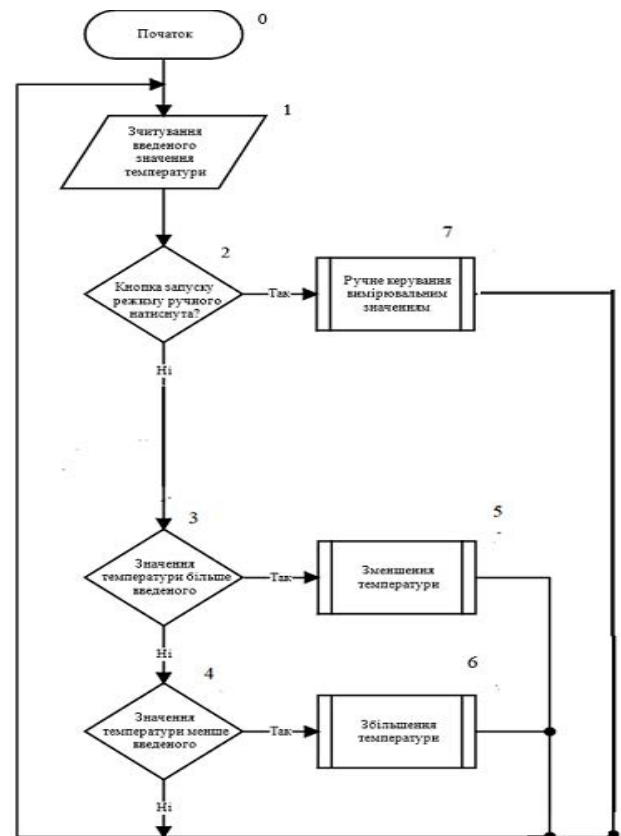


Рис. 5. Блок схема роботи контуру клімат-контролю

**Розробка та побудова контуру рівня наповненості ємності.** Потрібний рівень заповнення ємності для рідини, використаної у аеропонній системі, є важливим для стабільного функціонування та забезпечення рослин оптимальними умовами.

Недостатня кількість рідини в ємності може вплинути на розвиток рослин через недостатнє зволоження кореневої системи. Це може призвести до стресу для рослин, вплинути на їхній ріст, врожайність та якість продукції. Крім того, в екстрених ситуаціях, якщо рівень рідини виявиться недостатнім, це може призвести до пошкодження частини врожаю або навіть загибелі рослин.

Навпаки, переповнення ємності може призвести до проблем з вентиляцією та забезпеченням киснем кореневої системи рослин. Це може спричинити задушення коренів або розвиток грибків та інших проблем, які впливають на здоров'я рослин.

Отже, точний контроль та підтримання оптимального рівня заповнювання ємності є ключовими для забезпечення стабільного та здорового росту рослин у системі аеропоніки.

Для відслідковування рівня наповненості ємності в розчині встановлений датчик рівня. Вся ємність розділена на зони точками, що відображають ступінь наповнення резервуара рідиною. Ці контрольні точки допомагають автоматично керувати рівнем наповнення, уникаючи можливих проблем з переповненням або недостатнім рівнем рідини. Точка № 1, яка є критичною, може означати, що ємність майже заповнена. Це важливо для уникнення переповнення, яке може пошкодити систему або призвести до втрати рідини.

Точка № 4, також критична, показує, що рівень рідини дуже низький, що може бути проблемою для системи, яка потребує рідини для свого нормального функціонування. Точки № 2 та № 3 характеризують нормальний рівень наповненості: діапазон між ними – те, що потрібно при правильній роботі системи. При досягненні точки № 3 потрібно запустити систему набору рідини, і зупинити її в точці № 2.

Ці контрольні точки дозволяють системі реагувати автоматично, вмикаючи засоби сповіщення при досягненні критичних рівнів, що сприяє уникненню можливих негативних наслідків для системи або рослин, які знаходяться в ємності.

Інтервал між точками 1 та 2 служить резервуванням для рідини, яка не була поглинута рослиною, а транспортується назад у ємність для повторного використання. Це дає можливість ефективно використовувати розчин та уникнути його втрати, оптимізуючи використання поживних речовин.

Розділення ємності на зони за допомогою контрольних точок дозволяє створити систему індикації, яка легко читається. Зелений світлодіод, який обирається для індикації у безпечній зоні (між точками 1 та 3), передає інформацію про те, що рівень наповненості є оптимальним та безпечним. Це дає операторам чітку візуальну змогу відстежувати стан системи безпосередньо через індикатори.

Система індикації за допомогою світлодіодів допомагає оперативно виявляти зміни в рівні розчину. Жовтий світлодіод сигналізує про небажану зону, коли рівень розчину опустився нижче половини. Червоний світлодіод показує критично низький рівень, що важливо вчасно виявити, оскільки це може вплинути на вирощування рослин. Синій світлодіод вказує на небезпечний рівень наповненості, що також є важливим сигналом для оператора системи. Ця система індикації допомагає уникнути критичних ситуацій та швидко реагувати на зміни рівня розчину в ємності.

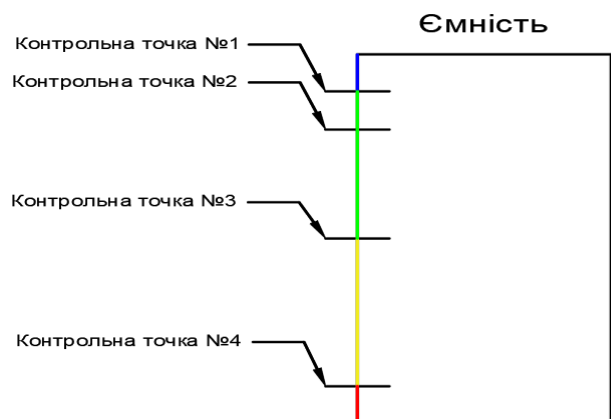


Рис. 6. Спрощена схема зон ємності

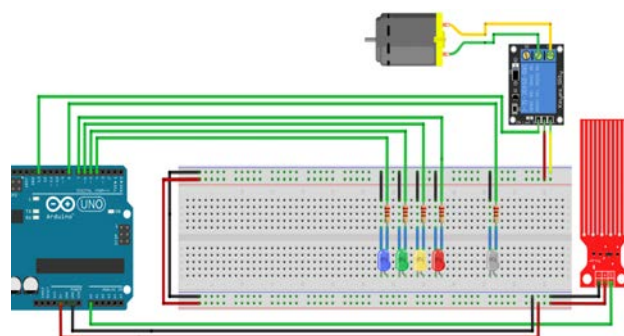


Рис. 7. Схема підключень компонентів до плати Arduino

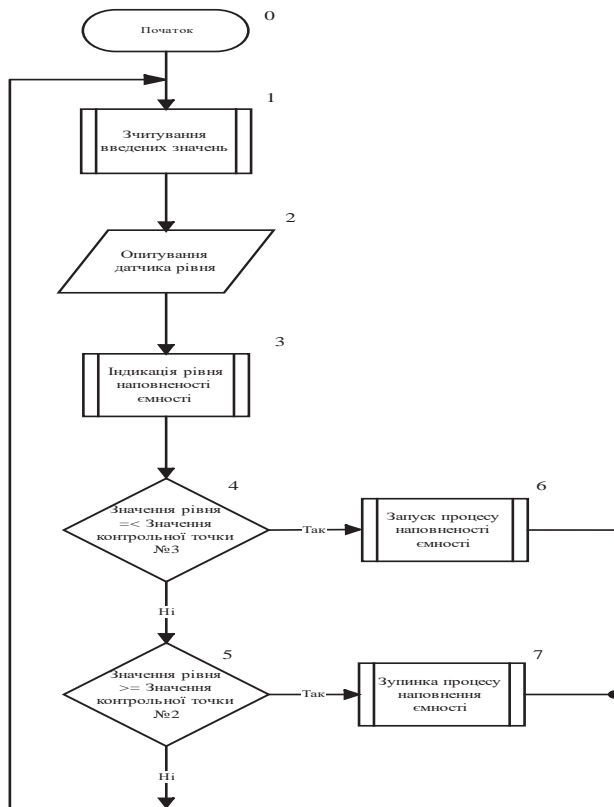


Рис. 8. Блок-схема роботи контуру підтримання рівня

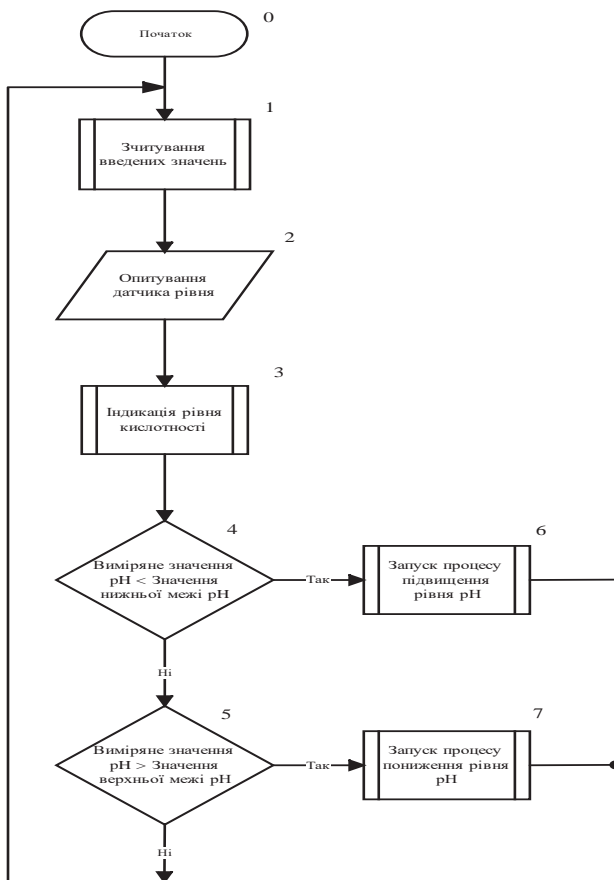


Рис. 9. Блок-схема роботи контуру підтримки рівня pH

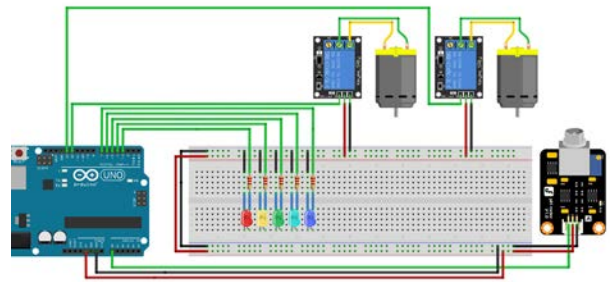


Рис. 10. Схема підключення компонентів до плати Arduino

Розробка алгоритму побудови підтримки заданого рівня кислотності в середовищі. Рівень кислотності або pH грає важливу роль у здоров'ї та рості рослин. Рівновага pH у середовищі впливає на доступність поживних речовин для рослин. Зміни в рівні pH можуть впливати на здатність рослин поглинати необхідні елементи живлення, такі як азот, фосфор, калій та інші мікроелементи.

Наприклад, якщо рівень pH занадто кислий або лужний, це може призвести до того, що деякі поживні елементи стають недоступними для рослин. Це може вплинути на їхній зріст, розвиток та врожайність. Оптимальний рівень pH допомагає рослинам максимально ефективно використовувати доступні поживні речовини для забезпечення їхнього здоров'я та виросту.

Для побудови такої системи потрібно правильно підключити компоненти до мікроконтролера або платформи, що керує системою (рис. 10). Аналоговий датчик підключається до аналогового входу «0» мікроконтролера. Насоси RS-360SH та світлодіоди підключаються до цифрових виходів та входів 13, 12 відповідно. Код, написаний для мікроконтролера, буде контролювати рівень кислотності за допомогою зчитування аналогового сигналу від датчика і включення/виключення насосів чи індикацію за допомогою світлодіодів відповідно до цього рівня (п'ять світлодіодів до цифрових входів з 3 по 7).

Розробка та побудова контуру підтримки заданого діапазону вологості середовища. Аеропоніка відрізняється від традиційного ґрунтового способу вирощування рослин саме завдяки цьому особливому середовищу. У аеропоніці корені рослин знаходяться у закритому повітряному середовищі, де вони не підкріплюються ґрунтом чи іншим середовищем. Замість цього, корені звисають у повітрі або в спеціальному контейнері, і звожуються за допомогою розпилення водного розчину.

Цей метод дозволяє рівномірно розподіляти вологу навколо коренів рослин, оскільки вод-



ний розчин розпилюється форсунками в повітрі, утворюючи туманну дисперсію, яка надає кореням доступ до необхідних поживних речовин. Це дозволяє оптимально забезпечити рослини вологою, поживними речовинами та киснем, сприяючи їхньому здоров'ю та росту.

Ефективне використання водних ресурсів є однією з ключових переваг аеропоніки порівняно з традиційним ґрунтовим вирощуванням. Система зрошення у аеропоніці регулюється в залежності від вологості середовища, де знаходяться корені рослин. Це дозволяє економити воду, оскільки процес зрошення починається або припиняється, коли це дійсно потрібно для збереження оптимального рівня вологості.

Проте, важливо дотримуватися оптимальних значень вологості, оскільки недостатній рівень вологи може загрожувати здоров'ю коренів рослин та призводити до втрат у врожаї. Розробка контуру для підтримки потрібного рівня вологості - це важлива складова аеропонного процесу, що дозволяє підтримувати оптимальні умови для здоров'я рослин та максимізації врожаю.

Датчик вологості підключений до цифрового виходу 2 плати, що дозволяє отримувати від нього дані про рівень вологості. Група світлодіодів, які індикують цей рівень, підключена до відповідних виходів 4–7 плати Arduino, що дає візуальну інформацію про поточний стан; індикації роботи насосу відображається світлодіодом, що підключено до виходу 8, а підключення самого насосу йде через реле, підключеного до виходу плати.

Зрозуміло, що для всіх блок-схем нашої системи керування були написані та відлагоджені коди програм, що дозволяють зробити діючим наш проєкт.

**Висновки.** В роботі розглянуті безґрунтові способи та вирощування рослин і описані їх переваги та недоліки у порівнянні зі звичними методами вирощування рослин. Визначені основні контури, по яким буде йти аналіз процесу аеропонного способу вирощування рослин, та оптимальні значення параметрів, що вимірюються та контролюються під час роботи системи керування. Створена модель комп'ютерно-інтегрованої системи керування теплицею при аеропонному способі вирощування рослин на базі мікропроцесорної платформи Arduino.

Для кожного вимірювального параметру описані датчики вимірювання та методика їх інтегрування у систему. Розроблені алгоритми та написаний і відлагоджений програмний код, за яким працює розглянута система керування. Розро-

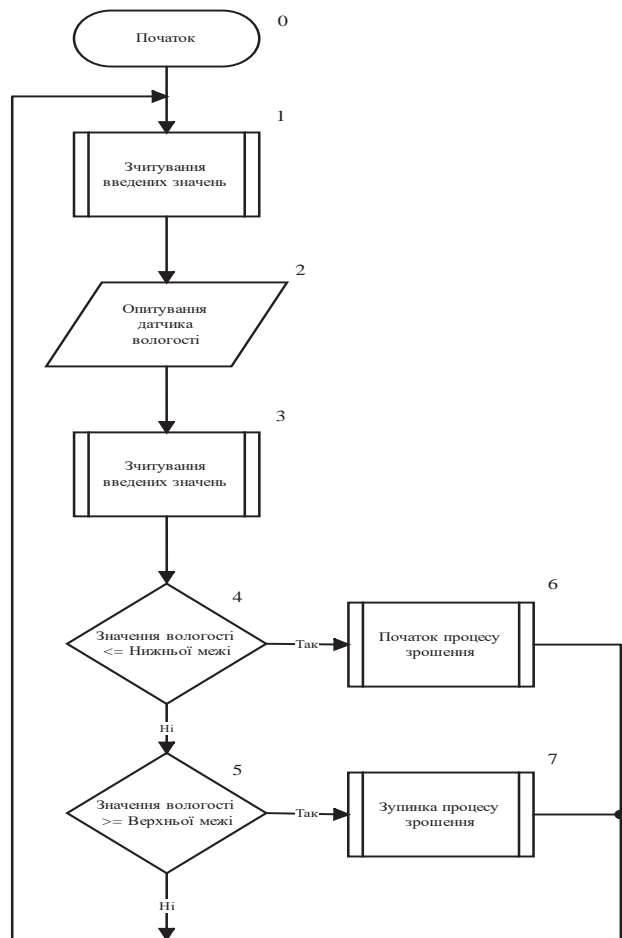


Рис. 11. Блок-схема роботи контуру зрошення

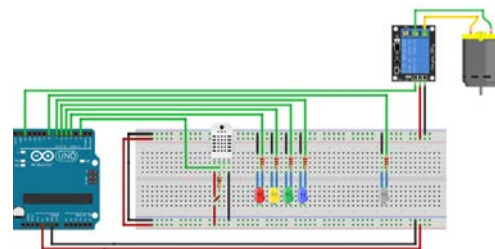


Рис. 12. Схема підключень компонентів до плати

блена імітаційна модель схеми роботи автоматичної системи керування теплицею та протестована її робота.

Для промислового використання комп'ютерно-інтегрована система на базі Arduino недоцільна. Вибір повноцінного програмованого логічного контролера (ПЛК) для керування системою керування теплицею з безґрунтовим вирощуванням рослин у наближених до промислових умовах – це розумне рішення. ПЛК здатний керувати великою кількістю виконавчих елементів та оптимально забезпечити збір, обробку та відповідь на дані, отримані від вимірювальних датчиків.

Один з головних плюсів використання ПЛК полягає у його надійності та стабільності роботи в умовах високого навантаження та промислових умовах. Це сприяє підтримці стабільної роботи системи і знижує ризик виникнення непередбачених ситуацій. Також, можливість налаштування за допомогою комп'ютера полегшує процес управління та дозволяє зручно налаштувати і вдосконалити роботу системи.

**Засоби, що дозволяють створити систему автоматизації для безгрунтового вирощування врожаю в реальному житті.** ПЛК160 від фірми «ОВЕН» – відмінний вибір для побудови системи автоматичного керування (рис. 130). Завдяки його дискретним та аналоговим входам/виходами ви зможете ефективно контролювати та взаємодіяти з різноманітними пристроями та сенсорами, що потрібні для вашої системи.

Цей ПЛК має значні можливості для програмування та налаштування, а це означає, що ви зможете гнучко адаптувати його до потреб вашого проекту. Крім того, важливо враховувати документацію та підтримку, яку надає виробник, щоб забезпечити вашу систему всім необхідним.

Обраний контролер ПЛК160 від фірми «ОВЕН» має дуже потужний функціонал для автоматизації та керування системою. Деякі з його характеристик:

- Дискретні та аналогові входи/виходи: Це дозволить вам збирати та керувати сигналами різних типів, що є важливим для автоматизації різних процесів.
- Швидкісні входи для оброблення енкодерів: Це корисно для точного визначення позицій та руху різних механізмів.
- Можливість ведення архіву роботи: Це дозволить вам зберігати та аналізувати дані про роботу системи в реальному часі.
- Програмування у системі Codesys v. 2: Це середовище програмування є потужним та досить популярним для автоматизації. Воно має широкі можливості та допоможе створити потрібні для вас алгоритми.
- Можливість передавання даних через Ethernet або GSM-мережі: Це дозволить вам віддалено керувати та отримувати дані з контролера.
- Послідовні порти (RS-232, RS 485): Для зв'язку з різними пристроями або системами це може бути дуже корисно.
- Дві системи живлення (220 В та 24 В): Це дасть вам гнучкість вибору джерела живлення для ваших пристроїв.

Ці характеристики роблять обраний контролер потужним та гнучким інструментом для автоматизації та керування вашою системою.



Рис. 13. Програмований логічний контролер ПЛК160

Вимірювальні прилади є також важливою частиною в реалізації розроблюваної системи автоматичного керування. Тому в додачу до обраного програмованого логічного контролера компанії «ОВЕН» також було розглянуто їх вимірювальну продукцію.

Компанія має широкий вибір датчиків для вимірювання температури, тому для розроблюваної системи обраний термометр опору ДТС034 з кабельним виводом (рис. 14).



Рис. 14. Термоопір з кабельним виводом ДТС034

Розглядаючи вимірювальну продукцію компанії «ОВЕН» разом з обраним програмованим логічним контролером, можна додати цілий список датчиків для різних характеристик об'єктів.

Датчик температури типу ДТС034 (рис. 14) може бути використаним для вимірювання температури в системі автоматичного керування. Цей опорний термометр, як правило, має хорошу точність і може бути надійним для вимірювання температурних параметрів у різних умовах.

Кабельний вивід такого типу дозволить вам легко підключити датчик до системи, розташували його у відповідному місці для точного вимірювання температури.

Будь ласка, зверніть увагу на рекомендації щодо правильного підключення та калібрування цього датчика відповідно до вимог вашої системи керування. Також важливо врахувати особливості електричного підключення та умови експлуатації для досягнення найкращих результатів вимірювання температури.

Інтегруючи цей датчик з датчиком вологості, ви зможете отримувати актуальні дані про вологість середовища, що є критично важливим для оптимального росту та розвитку рослин. Дані вологості

забезпечують повнішу картину умов середовища, яка допоможе у вирішенні проблем та забезпеченні оптимальних умов для росту рослин.

Основні характеристики даного датчику:

діапазон:  $-50...+150^{\circ}\text{C}$ ;

допустимі відхилення:  $\pm 0,30^{\circ}\text{C}$

ступінь захисту: IP54;

Датчик вологості ПВТ100 (рис. 15) від компанії «ОВЕН» є корисним інструментом для вимірювання вологості середовища. Він конвертує відносну вологість у стандартні сигнали струму 4–20 мА, які можна передавати через інтерфейс RS-485 за протоколом Modbus RTU. Ця можливість передачі даних через цифровий інтерфейс дає змогу зручно і точно збирати дані та інтегрувати їх у систему керування.

Датчик рівня VEGASON 62 від компанії Vega (рис. 16) є корисним для вимірювання рівня рідини в ємностях. Його діапазон вимірювання від 0,4 до 8 метрів і точність  $\pm 10$  мм забезпечує надійні дані про рівень заповнення ємності. Це дозволяє точно контролювати рівень рідини в ємності, що є важливим для підтримання оптимальних умов у системі аеропоніки.



Рис. 15. Датчик вологості ПВТ100



Рис. 16. Ультразвуковий рівнемір VEGASON 62

Точне вимірювання рівня рідини допомагає уникнути переповнення або недостатнього заповнення ємності, що може вплинути на ефективність та стабільність вирощування рослин в системі аеропоніки.

#### Список літератури:

1. Lara Darling. Hydroponics, Aquaponics, Aeroponics (3 Books In 1) / Lara Darling // Amazon Digital Services LLC – KDP Print US, 2020 – 38 с.
2. Руденко М. Чудова гідропоніка / М. Руденко // Vivat 2017. – 143 с.
3. Аеропоніка. 2020. URL: <https://www.renovablesverdes.com/uk/aeroponia/>
4. Обігрів теплиці. 2021. URL: <https://plastok.com.ua/obihriv-teplitsi-v-zimovii-period-vidi-ta-osoblivosti>
5. Освітлення в теплицях. 2019. URL: <https://polikarbonatvs.com.ua/ua/articles/article9-htm/>
6. Cerreto Rossouw. Automating Hydroponics: The Complete Guide To Food Security At Home. CreateSpace 2018. 64 с.
7. Thomas W. Gurley Aeroponics: Growing Vertical. CRC Press, 2020. 221 с.
8. Howard M. Resh Hydroponic Food Production. CRC Press, 2022. 39 с.
9. Петин В. А., Биняковский А. А., Практична енциклопедія Arduino / В. А. Петин, А. А. Биняковский – вид. Balka-Book, 2017. 158 с.
10. Пилипенко Ю.М. Електроніка, мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації. Робота з мікропроцесорною платформою Arduino. К.: КНУТД, 2021, 59 с.

#### Pylypenko Yu.M., Kupryienko P.D., Kyselov V.B. COMPUTER INTEGRATED SYSTEM GROWING OF PLANTS IN A SOILLESS ENVIRONMENT

*The Earth's climate changes every year, which significantly affects the methods of growing agricultural plants. No one can predict the natural cataclysms that will occur in the coming years. In order not to depend on the vagaries of nature, it is necessary to provide stable conditions for growing plants - that is, to create an artificial environment – a greenhouse, which will provide optimal conditions for growing agricultural crops. At the same time, it is necessary to create a system that would control and regulate the conditions that would be optimal for growing this or that plant.*

*It is clear that the creation of such artificial conditions will give an advantage in the predictability of the result, but it is unlikely that financing the construction and maintenance of thousands of hectares of greenhouses can be economically profitable. At the same time, the areas set aside for greenhouses can be used more effectively by abandoning the soil environment in favor of alternative, soilless, methods of growing plants. One of the main advantages is that we can arrange plants in several tiers, that is, using the third dimension of space, «stretching» the greenhouse vertically. This makes it possible to increase the «sowing area» several times, to better use the energy component of the project, to simplify the monitoring system and to adjust the parameters to optimize the conditions for growing plants.*

*One of the key elements in the created monitoring and control system is the intellectual and technical component of the project. The modern level of software (soft) and the material base of the project (hard) make it possible to create a computer-integrated system that reacts to external influences in a matter of seconds and brings the system to a stationary level of work according to each of the considered parameters.*

*In this work, a computer-integrated model of the system of aeroponic cultivation of plants in a greenhouse was created.*

**Key words:** soilless plant cultivation, aeroponic type of soilless plant cultivation, algorithm, automated system, computer-integrated project management system, Arduino microprocessor platform, project software.

**Рувінська В.М.**

Національний університет «Одеська політехніка»

**Тройніна А.С.**

Національний університет «Одеська політехніка»

## ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ (МЕТОДИКА) РОЗРОБКИ НАВЧАЛЬНИХ КОМБІНАТОРНИХ ІГОР: ПЕРШІ КРОКИ

Робота присвячена створенню комп'ютерних навчальних комбінаторних ігор; до їх числа відносяться як ігри з високою комбінаторною складністю: шахи, шашки, Го, так і більш прості ігри: «Хрестики-нулики», «НІМ», «Дати» та інші. В наш час розроблені програмні системи лише для найбільш популярних комбінаторних ігор, а також існуючі рішення з інтеграції навчального процесу в ігровий контекст, як правило, обмежені можливістю застосування в одному продукті і не можуть бути напряму перенесені на розробку нових. У зв'язку з цим в роботі запропонована узагальнена методика (ІТ) розробки систем для навчання простим комбінаторним іграм на прикладі «НІМ» «НІМ з обмеженнями» і «Дати». Запропонована методика передбачає чотири етапи: 1) формулюються вимоги до системи за допомогою узагальнених діаграм прецедентів, дизайн-документу, MDA-структури; 2) на етапі проектування створюється узагальнена схема алгоритму комбінаторної гри, проектується сховище даних для збереження результатів проведених ігор з метою аналізу успішності навчання, проводиться архітектурне проектування у вигляді узагальненої діаграми компонентів, проектування узагальненого інтерфейсу користувача у вигляді прототипів для вікон; проектування конкретних комбінаторних ігор на базі узагальнених підходів; 3) на етапі реалізації проводиться створення гри відповідно до проектних рішень; 4) на етапі тестування – аналіз гри на предмет відповідності вимогам. Докладно описані початкові етапи створеної технології, а саме, аналіз вимог за допомогою узагальнених діаграм прецедентів та дизайн-документу, а також такі етапи проектування, як узагальнені схема алгоритму гри, діаграма компонентів та прототип вікна для основної сцени гри.

**Ключові слова:** методика розробки комп'ютерних навчальних комбінаторних ігор, математична теорія комбінаторних ігор, «НІМ», «Дати».

**Постановка проблеми.** Зараз в процесі навчання активно впроваджуються комп'ютерні технології, застосовувані для передачі учневі навчального матеріалу та контролю ступеня його засвоєння [1]. За останні роки з'явилася досить велика кількість навчальних систем, в тому числі, і автоматизованих, які охоплюють різні предметні області і покликані вирішувати завдання з навчання на різних етапах життя людини. В іграх застосовуються наступні переваги сучасних комп'ютерних засобів: швидкість, автоматизація рутинних обчислень, зберігання великих об'ємів інформації; точність дій, наочність представленої інформації; здатність до виконання логічних операцій, можливість діалогового режиму роботи, імітація зовнішніх впливів.

Теорія комбінаторних ігор – область математики, що активно розвивається в даний час і ставить метою дослідження комбінаторними методами математичних ігор [2, с. І-3–І-5]. До їх числа відносяться як ігри з високою комбінаторною

складністю: шахи, шашки, Го, так і більш прості ігри: «Хрестики-нулики», «НІМ», «Дати» та інші [3].

Вчені постійно розробляють і пропонують до впровадження нові, більш досконалі методи, що дозволяють істотно підвищити якість і інтенсифікувати процес навчання. Однак існуючі рішення з інтеграції навчального процесу в ігровий контекст, як правило, обмежені можливістю застосування в одному продукті і не можуть бути напряму перенесені на розробку нових продуктів.

Тому актуальним напрямком є розробка узагальнюючих підходів для створення навчальних систем для деяких предметних областей. У зв'язку з цим в роботі запропонована узагальнена методика розробки системи для навчання простим комбінаторним іграм на прикладі ігор «НІМ» [4, с. 2–7] і «Дати» [5].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Теорія комбінаторних ігор – це математична теорія, що вивчає ігри двох сторін, в яких в кожний

момент часу є позиція, яку гравці по черзі змінюють певним чином або ходом, щоб досягти певної умови перемоги [6, с. 3–8]. В цій теорії не вивчаються ігри, які зв'язані з випадковостями, тобто включають ігри з випадковими ходами (ігри в кості чи карточні ігри), а тільки ігри, в яких позиція і всі можливі ходи однаково відомі обом гравцям. В комбінаторних іграх не допускаються одночасні і таємні ходи.

Комбінаторна гра – це гра, в якій присутні: два гравці; множина можливих позицій гри (зазвичай скінченна); правила гри, що визначають для кожної позиції та кожного гравця множину дозволених ходів; гравці ходять по черзі; обидва гравці знають всі ходи, зроблені у грі; при досягненні позиції, в якій для гравця немає можливих ходів, гра закінчується [7, с. 1–2]. Наступні правила також застосовують в комбінаторних іграх: виграє гравець, що зробив останній хід; або гра закінчується за скінченне число ходів. Якщо виграє гравець, що зробив останній хід, то така гра називається нормальною, інакше – мізер. Умова закінчення гри виключає ситуації, коли фіксується нічия. Також немає відмінностей між гравцями, тобто в кожній позиції обидва гравці мають однакові можливі ходи (так звана, неупереджена гра). Множина позицій гри зазвичай кінцева, але нерідко зустрічаються ігри з нескінченною кількістю позицій. Комбінаторна гра – це гра з повною інформацією, тобто кожен гравець повністю володіє всією інформацією про поточну позицію гри, про всі попередні позиції, про всі зроблені ходи. В цій роботі розглядаються неупереджені нормальні ігри зі скінченною кількістю позицій. Комбінаторних ігор існує досить велика кількість, нижче наведені деякі з них [8, с. 14–15].

«НІМ» – одна з найстаріших комбінаторних ігор. Окрім того, «НІМ» – фундамент, на якому будується математична теорія комбінаторних ігор [9]. Два гравці по черзі беруть предмети з купок. Позиція гри може містити довільне число купок та предметів, а також формується вона до початку гри. За один хід гравець може взяти будь-яку кількість предметів з будь-якої купки: навіть всю купку повністю, але хоча б один предмет необхідно взяти, і брати предмети потрібно з однієї купки. Гравець, що взяв останній предмет – перемагає.

«НІМ з обмеженнями». У грі НІМ за один хід можна було брати будь-яку ненульову кількість предметів з однієї купки. Тепер нехай за один хід можна брати не будь-яку кількість предметів, а, наприклад, 3 або 5. Гра змінилась незначно, проте рішення, що було застосоване до класичного НІМ,

вже не працює. Теорія Шпрага-Гранді дозволяє звести нову гру до класичного НІМ.

Гра «Дати». Грають двоє. На вході задається якась дата. Кожен гравець на своєму ході називає пізнішу дату, збільшуючи на 1 або 2 або день у місяці, або місяць, але не те й інше відразу. При цьому поєднання дня та місяця має залишатися датою. Гравець, який не може зробити хід, програє. Обидва гравці грають якнайкраще. Виходячи із зазначеної дати, вивести, хто виграє. Наприклад, якщо на вході дата 30.12, то перший гравець почне ходити, і він може збільшити початкову дату тільки на 1 день. Таким чином, він одержує 31.12, тому виграє, бо другий гравець вже не зможе ходити, тобто програє.

В наш час розроблені програмні системи лише для найбільш популярних комбінаторних ігор. Основні особливості таких ігор – це можливість вибору рівня гри, наявність системи підказок, аналіз, зберігання та експорт/імпорт партій, ведення статистики ігор, налаштування інтерфейсу програми, а також додавання свого контенту. Існує ряд програм, які реалізують гру «НІМ», тобто користувач може грати з комп'ютером, проте на цьому функціонал подібних ігор закінчується. Аналоги демонструють підхід до навчання та засоби розвитку і контролю навичок гри користувача. Але вони не торкаються саме комбінаторної теорії ігор. І що важливо, оскільки ігри, що розглядаються, відносяться до одного класу, то вони мають набір спільних характеристик, тому і розробка таких ігор має спільні особливості, в тому числі, і на етапі проектування та реалізації програмної системи, що дозволяє створити універсальну методику розробки подібних навчальних комбінаторних ігор.

**Метою дослідження** є розробка узагальненої методики створення комп'ютерних навчальних комбінаторних ігор, що спрощує подальшу розробку.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** В роботі представлені ідеї щодо узагальненої інформаційної технології (методики) розробки різних навчальних комбінаторних ігор; об'єднання комбінаторних ігор в одній методиці розробки можливе за рахунок того, що комбінаторні ігри мають схожі правила та умови гри, які представлені вище. Методика дозволяє скоротити час на розробку ігор за рахунок використання узагальнених алгоритмів гри, структури програмної системи гри, макетів інтерфейсу, тощо. Маючи такі загальні властивості, комбінаторні ігри дають можливість і їх створювати схожим чином.

Нижче представлена *узагальнена методика (IT) розробки комп'ютерних комбінаторних ігор*.

1. На етапі *аналізу вимог* проводиться дослідження комбінаторних ігор взагалі, формулюються вимоги до системи за допомогою:

- *узагальненої діаграми прецедентів* (рис. 1);
- *дизайн-документу* (детальний опис представлено нижче);
- *MDA-структури*.

2. На етапі *проекткування* розробляється проектна документація, а саме:

- створюється *узагальнена схема алгоритму комбінаторної гри* (рис. 2);
- проектується *сховище даних* для збереження результатів проведених ігор, які можуть бути використані під час аналізу успішності навчання;
- проводиться *архітектурне проектування* у вигляді узагальненої діаграми компонентів (рис. 3);
- *проекткування узагальненого інтерфейсу користувача* у вигляді прототипів для вікон (рис. 4);
- *проекткування конкретних комбінаторних ігор* на базі узагальнених елементів, вказаних в п. 2 вище.

3. На етапі *реалізації* – створення гри відповідно до проектних рішень.

4. На етапі *тестування* – аналіз гри на предмет відповідності вимогам.

Далі детально розглянемо *основні етапи* представленої *методики*, більшою мірою *початкові*.

1.1. *Діаграма прецедентів* визначає, як буде працювати з будь-якою навчальною комбінаторною грою користувач, тобто функції системи,

а саме, реєстрація, авторизація, вибір гри та її параметрів, сама гра та навчання теорії гри, перегляд результатів, кращих гравців, тощо.

1.2. В *дизайн-документі* гри описуються правила і особливості, і таким чином геймдизайнер виробляє цілісне бачення гри [10, с. 38–41]. Нижче представлені створенні узагальнені структурні елементи для опису вимог.

*Схема гри*. Ігровий процес полягає в тому, що гравець повинен робити ходи на ігровому полі та чергувати ходи з програмною системою для досягнення перемоги. Для комбінаторних ігор, зокрема, в грі «НІМ» під ходами мається на увазі вилучення ігрових об'єктів, зокрема у нашій грі «НІМ» – це рибки, з ігрового поля, у будь-якій кількості, лише з однієї купки, представленої рядком. Для «НІМ з обмеженнями» можна брати лише певну кількість (кількості) предметів, що задається заздалегідь, також лише з одного ряду. Рибки розташовані в декілька рядів від 2 до 5. Перемога досягається, коли в опонента немає можливості походити. Для ретроспективного аналізу, зокрема у грі «Дати», задається певна дата і кожен гравець збільшує на 1 або 2 день або місяць, але не те і інше водночас. Гравець, що не може зробити хід, програє.

*Сюжет*. Подія гри розгортається на локації в вигаданому світі, подібному людському, наприклад, біля озера, але в якості людей виступають ігрові персонажі, наприклад, коти. Початок гри презентується вступним роликem, що складається з розкадровки у вигляді коміксу. Кот йде на риболовлю, ловить рибу з містка і по дорозі додому

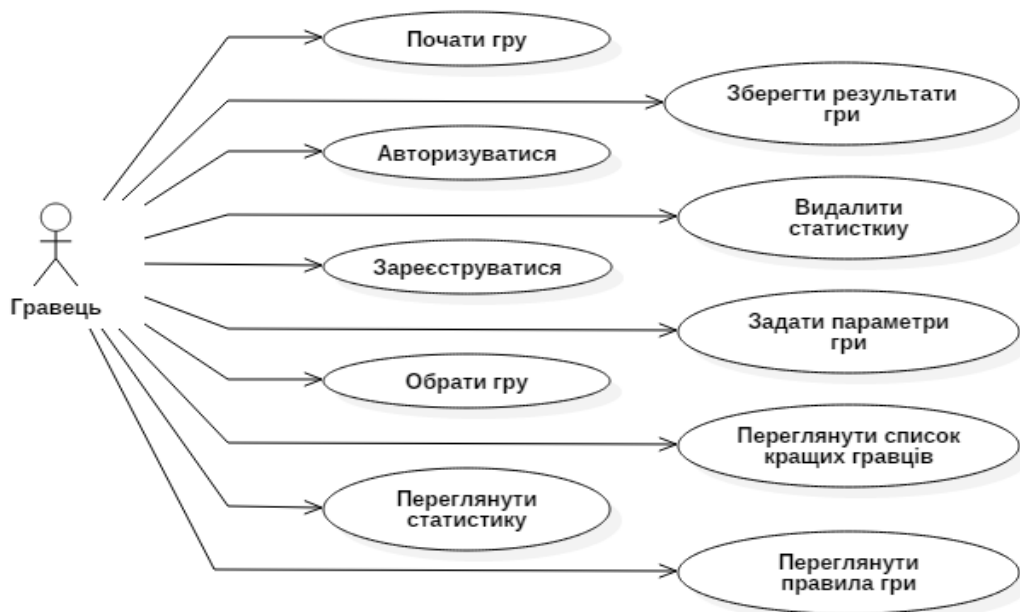


Рис. 1. Діаграма прецедентів для навчальних комбінаторних ігор

зустрічає іншого kota, який також збирається додому. Наш кіт вирішує поговорити з ним і в ході розмови пропонує зіграти в комбінаторну гру. За умовою що той, хто виграє, забирає весь улов, а той, хто програв залишається з нічим. Далі безпосередньо починається гра з виграшною позицією для нашого kota. Ходи підсвічуються, і гравець повинен ходити саме як показано. Отже, він перемагає і щасливий йде з подвійним уловом додому. Далі система розповідає про основні елементи інтерфейсу, включаючи меню, і акцент ставиться на навчання, яке дозволить граючі вигравати.

*Інтерфейс користувача.* Усе управління відбувається за допомогою миші або Touchpad. На клавіатурі тільки клавіша «Esc» для виходу з кожної сцени і стрілки вправо-вліво для переходу назад або вперед по етапам навчання.

Першим, що бачить гравець – це меню зпектами: «Гра», «Навчання», «Тренування», «Статистика» і «Вихід», а також іконки-кнопки «Реєстрація» і «Авторизація» користувача для статистики ігор та тренувань.

Інтерфейс гри складається з ігрового поля, ігрових об'єктів, за допомогою яких відбувається гра, їх можна видаляти тільки з одного із рядків і тільки потрібну гравцеві і можливу (згідно правил) кількість. Кнопка для завершення свого ходу і передачі ходу опонентів розташована праворуч посередині. Іконки з попередніми ходами розташовані зліва від ігрового поля, при наведенні курсора миші на які з'являтиметься відповідний стан гри. Кнопка з можливістю поставити гру на паузу в правому верхньому куті. При натисканні на кнопку паузи виводиться вікно з можливістю вийти з гри або продовжити гру. В правому нижньому кутку розташувати блокнот з можливістю проводити підрахунки в двійковій системі для визначення виграшної стратегії.

Вікно вибору налаштувань гри містить поля для визначення параметрів. Однаковими для всіх ігор є такі параметри: складність гри та власник першого ходу. Вони розміщуються першими у переліку параметрів гри. Складність гри може приймати наступні значення: легка, середня, складна. В якості власника першого ходу користувач може обрати себе, віддати перший хід системі або визначається випадково, хто буде ходити першим. Далі слідує унікальний набір параметрів, що відноситься до конкретної гри. У вікні параметрів слід реалізувати список, який випадає для вибору значення з перелічування, наприклад, для вибору складності. Для зміни числових значень слід організувати поле для вводу числа або кнопки для

переходу на інше число. Також у вікні повинна міститись кнопка початку гри.

У режимі навчання є пункти меню, які потрібно в певній послідовності пройти: «Теоретичні відомості», «Ретроспективний аналіз», «НІМ», «НІМ з обмеженнями», «Дати». Для нового користувача доступно тільки два пункти, решта будуть відкриватися в міру проходження попередніх. У навчальній грі інтерфейс схожий зі звичайною грою, на різних етапах з'являються підказки, кнопки для вибору наступних дій, поля для вводу, щоб навчальній системі «стало відомо», що гравцеві зрозуміло, чому і як відбувається та чи інша дія. При невдачах повертаємо гравця до попереднього етапу.

*Ігрова механіка.* Для ігрових об'єктів треба обробляти натискання на них за допомогою миші або Touchpad і відтворювати анімацію, яка буде вказувати що вони вибрані. Лапа kota повинна взаємодіяти з об'єктами (у вигляді рибок), і при торканні вони зникають. Після кожного ходу треба створювати стан гри і виводити в поле з іконкою «минулих ходів», що розташовано зліва від ігрового поля. При наведенні миші або Touchpad-а на іконку має бути показано стан, який був на той момент гри. Забрані рибки повинні відрізнитися по гамі від тих, що залишалися. При відведенні миші або Touchpad-а з іконки повертати гру у поточний стан. Виводити текст навчання в спеціальному вікні, імітуючи мовлення ігрового персонажа, який навчає, і представлений він у вигляді іконки з зображенням kota. По кнопках «Кінець ходу», «Пауза» і «Блокнот», а також пунктах меню обробляється подія натискання миші і викликаються відповідні сцени, вікна або дії. При натисканні на кнопку «Вихід» закривати гру.

*Програмні механізми і алгоритми.* Основним механізмом виступає взаємодія 2D-об'єктів між собою та їх реагування на дії користувача через інтерфейс вводу – комп'ютерну миш або Touchpad. Програмна система виступає, по-перше, в якості суперника в грі і має 3 рівня складності: легкий, середній, складний, а по-друге, в якості вчителя та помічника.

Алгоритм визначення дій програмної системи відповідно вибраній складності: на третьому рівні система завжди робить оптимальний хід, на другому та третьому – хід не завжди оптимальний, в середньому на другому рівні – кожен третій оптимальний, на третьому рівні – кожен сьомий. Алгоритм знаходження XOR-суми: у циклі робимо XOR усіх купок, що не є пустими. Алгоритм визначення правильного ходу комп'ютера:

знаходимо купку, у якій старша одиниця співпадає по місцю зі старшою одиницею визначеної XOR-суми усіх купок; робимо операцію XOR між нею і XOR-сумою усіх купок; результат – кількість рибок, що треба залишити в знайденій купці.

**Графіка.** У грі повністю будемо використовувати 2D-графіка з елементами анімації і текстового подання інформації. Стилїстика гри – під піксельну казуальну гру. Текст, персонажі, меню, основна ігрова сцена – у піксельній графіці. Атмосфера гри повинна емоційно чіпляти гравця, щоб йому хотілося грати в гру і навчитися виграшній стратегії. Палїтра основної сцени приємна і в одній гамі, сцена з меню і вікнами сувора і чітко виражена. Колір тексту чітко видно на фоні. Анімація: вступний ролик, анімовані рибки, анімовані лапи котів, анімований процес навчання.

**Звуки і музика.** Музика вступного ролика повинна відповідати сюжету гри; при перегляді меню – легка музика; під час гри – легкі звуки природи біля озера; коли вибираємо рибок, спрацьовує звук плескоту риби; звукові доріжки в кінці гри сигналізують про перемогу або поразку.

2.1. Узагальнену схему алгоритму для комбінаторної гри можливо побудувати завдяки наявності загальних правил для такого роду ігор, що представлені вище (рис. 2).



Рис. 2. Схема алгоритму для комбінаторних ігор

2.2. Архітектуру програмної системи для гри (рис. 3) зручно розділити на компоненти, що відповідають за роботу з даними та організацію ігрового процесу.

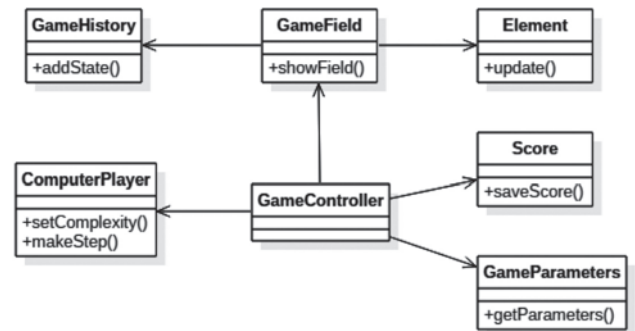


Рис. 3. Узагальнена діаграма класів для комбінаторних ігор

Основний компонент GameController організовує розрахунки та слідкує за циклом гри; GameField відповідає за відображення ігрового поля, що заповнене об'єктами класу Element; Element представляє взаємодію ігрових об'єктів з користувачем; GameParameters має обов'язковий параметр зі значенням складності гри; ComputerPlayer відповідає за розрахунок ходу комп'ютера і залежить від складності гри; Score організує збереження результатів завершеної партії; GameHistory відповідає за збереження позицій гри після кожного ходу.

2.3. На етапі проектування інтерфейсу користувача розробнику необхідно зробити прототипи всіх вікон, зокрема, сцену самої гри (рис. 4).



Рис. 4. Інтерфейс сцени гри

У центрі сцени розміщується область ігрового поля, де система генерує ігрові об'єкти, з якими взаємодіє користувач. Для ігор «НІМ» цими об'єктами будуть виступати предмети, розділені на декілька рядів, для гри «Дати» – комірки, позначені датами. У лівій частині знаходиться



## Загальні відомості для запропонованих навчальних комбінаторних ігор

Характеристики	Клас	Підклас
Аудиторія гравців	Вік > 11 Тип = загальний	–
Призначення гри	Гра як трансляція освітнього повідомлення	–
Ринок збуту	Розвага, освіта	–
Цілі гравця	Потреба гравця в дії, інформації	Навчання, розгадування загадок, планування подальших дій
Наявність ігрового сюжету	Ludology-game [6]	–
Кількість гравців	Гра для одного гравця	–
Засіб передачі ходу між гравцями	Гра реального часу	–
Інтерфейс користувача з отримання ігрової інформації	2D-графіка	–
Інтерфейс користувача при передачі даних до гри	Штучний інтерфейс, Механічний НСІ	Позиційний пристрій – маніпулятор типу «миша» або або Touchpad
Платформа запуску гри	Персональний комп'ютер з ОС, смартфони	–

панель для виводу попередніх ходів. Розробник повинен реалізувати почергове додавання попередніх позицій гри на панель та організувати їх збереження на час гри. У правій частині можуть бути розміщені такі елементи інтерфейсу: кнопка для відкриття вікна паузи, кнопка для відкриття правил гри, кнопка передачі ходу, поле з часом гри та інші інформаційні поля. Кнопка паузи розміщується у звичному для користувача місці – верхній правий кут.

**Висновки.** Створена узагальнена методика, тобто, інформаційна технологія розроблення навчальних програмних комбінаторних ігор із чотирьох пунктів та семи підпунктів, що дозволяє

проходити всі кроки при розробці такого роду ігор схожим чином і зменшувати необхідні ресурси на всіх етапах. В табл. 1 представлено загальні характеристики для запропонованих навчальних комбінаторних ігор.

Далі в ході наступних досліджень треба конкретизувати ще один пункт для етапу аналізу вимог, а саме, MDA-структуру; один пункт в проектуванні, а саме, як необхідно виконувати кожний етап загальної методики при розробці конкретної навчальної комбінаторної гри. Також треба створити конкретні комбінаторні ігри та проаналізувати, чи значно запропонована технологія скоротила час на їх розробку.

## Список літератури:

1. Serious Game Classification – URL: <http://serious.gameclassification.com/>
2. Thomas S., Ferguson A. Course in Game Theory – 2020 – pp. 46
3. Crash Course on Combinatorial Game Theory for the Mathcamp 2019 Qualifying Quiz – URL: <https://www.mathcamp.org/files/yearly/2019/quiz/cgt.pdf>
4. Theory of Impartial Games. The Mathematics of Toys and Games – pp. 20 – URL: <http://web.mit.edu/sp.268/www/nim.pdf>
5. Гра «Дати» – URL: <https://www.eolymp.com/uk/problems/860>
6. John H., Peters A. K. Conway. On Numbers and Games. CRC Press; 2nd edition. – December 11, 2000 – pp. 242
7. Jennifer Yuan and Shreya Sinha. Game Theory – URL: [https://math.mit.edu/research/highschool/primes/circle/documents/2021/Yuan\\_Sinha.pdf](https://math.mit.edu/research/highschool/primes/circle/documents/2021/Yuan_Sinha.pdf)
8. Berlekamp E., Conway J., Guy R. Winning ways for your mathematical plays. 2nd edition. – ISBN 1-56881-130-6 (alk.paper) – 2001 – pp. 297
9. Exploring the Game of Nim. – URL: <https://iq.opengenus.org/game-of-nim/> (дата звернення 24.09.2023).
10. Лугова Т.А., Блажко О.А. Проектування комп'ютерних ігор для навчання: навчальний посібник. Одеса: ФОП «Побута». 2018. – с. 212. – URL: <https://bit.ly/3NPa0XZ> (дата звернення 24.09.2023).

**Ruvinska V.M., Troynina A.S. INFORMATION TECHNOLOGY FOR THE DEVELOPMENT OF TRAINING COMBINATOR GAMES: FIRST STEPS**

*The work is devoted to the creation of computer educational combinatorial games; they include games with high complexity: chess, checkers, Go, as well as simpler games: "Tic Tac Toe game", "NIM", "Dates" and others. Nowadays, software systems are developed only for the most popular combinatorial games, as well as existing solutions for integrating the learning process into the game context, as a rule, are limited to the possibility of application in one product and cannot be directly transferred to the development of new ones. The paper proposes a generalized information technology (IT) for educational systems developing on base of simple combinatorial games such as "NIM", "NIM with restrictions" and "Data" which also allow studying the theory of combinatorial games in parallel. The method involves four stages: 1) requirements for the system are formulated using generalized diagram of precedents, play-design document, MDA structure; 2) at the design stage, a generalized scheme of the algorithm for the combinatorial game is created, a data store is designed to save the results of the played games for the purpose of training success analysis, architectural design is carried out in the form of a generalized diagram of components, and the design of a generalized user interface in the form of prototypes for windows; design of specific combinatorial games based on generalized approaches; 3) at the stage of implementation, the games is created in accordance with project decisions; 4) at the testing stage analysis of the game for compliance with the requirements is conducting. The initial stages of the created technology are described in detail, namely, requirements analysis using a generalized case diagram and the play-design document, as well as design stages such as a generalized scheme of the game algorithm, the component diagram, and the window prototype for the main game scene.*

**Key words:** *technology for development of computer educational combinatorial games, mathematical theory of combinatorial games, "NIM", "Dates".*

UDC 004.8

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/22>

**Sukhaniuk I.S.**

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
<https://orcid.org/0009-0000-4949-8549>

**Potapova K.R.**

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
<https://orcid.org/0000-0002-3347-6350>

**Nalyvaichuk M.V.**

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
<https://orcid.org/0000-0002-8942-9844>

**Vovk L.B.**

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
<https://orcid.org/0000-0002-3098-8078>

## TEXT SUMMARIZATION BASED ON TOPICRANK METHOD AND TEXT-TO-TEXT TRANSFORMER NEURAL NETWORK

*The proposed text summarization system introduces a novel approach by combining the TopicRank method and the Text-to-Text transformer neural network to optimize the process of generating concise yet accurate summaries from large volumes of textual data. The primary goal of this research is to find an effective balance between processing speed and result accuracy in the context of handling extensive information datasets.*

*The problem addressed by this system lies in the complex interplay between the need for fast processing of large data volumes and the requirement for high precision in extracting information to create meaningful summaries. Both components of the system, namely TopicRank and the Text-to-Text transformer neural network, interact to achieve an optimal outcome.*

*Experiment results demonstrate the system's success in generating short summaries of large text documents within a limited time frame. This is achieved using the graph based TopicRank method to identify key sentences in the text. The obtained key sentences are then fed into the Text-to-Text transformer neural network, which, using deep learning, transforms them into informative summaries.*

*It is important to note that the system's performance depends on the quality of the input text and computational resources. Clean and structured input text yields better results, and high-performance computational resources enable faster processing of large data volumes. This underscores the importance of optimizing both input and computational processes to achieve optimal system performance.*

*The proposed system serves as an effective tool for text summarization in conditions involving the processing of large volumes of information. Its success in generating short and meaningful summaries indicates potential applications in areas where the speed of text processing and the preservation of a certain level of accuracy are crucial for obtaining meaningful information. Such an approach may find applications in fields where rapid analysis of extensive documentation is required, such as in scientific research, medical diagnostics, or intelligent information processing systems.*

**Key words:** *natural language processing, text analysis with neural networks, transformer neural networks, TopicRank method, graph algorithm, text summarization.*

**Formulation of the Problem.** The main problem addressed in this work is the need to enhance the summarization process for large volumes of textual data. Contemporary information processing methods strive to strike a balance between processing speed and the accuracy of results, but challenges exist in resolving this issue.

One of the key difficulties is the necessity for processing speed when dealing with substantial amounts of text in situations where time is a critical factor. Specifically, in domains with massive information flows, such as scientific research or medical diagnostics, it is crucial to provide efficient and rapid text summarization methods. However, it

is important to avoid compromising the accuracy and relevance of the summarized information.

Another problem is the selection of an optimal method to achieve this balance. In the context of this work, two primary components are employed: the TopicRank method and the Text-to-Text transformer neural network. Addressing how these two approaches can interact optimally to ensure effective summarization is a crucial aspect explored in this work.

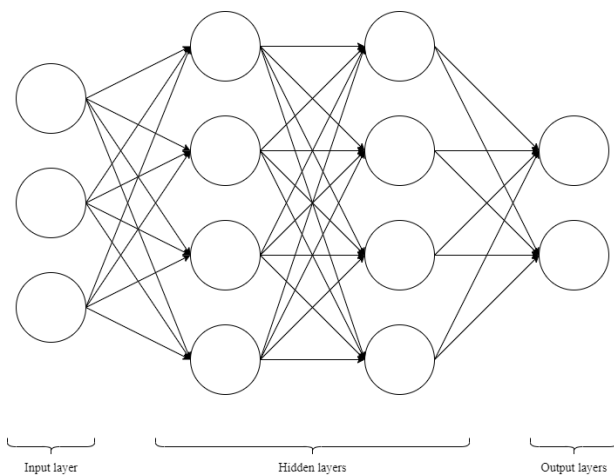
Therefore, the problem statement in this research is defined by the need for an efficient summarization system that ensures the processing speed of large volumes of data without sacrificing the accuracy and relevance of the summarized information. Finding the optimal balance between these aspects in the context of combining the TopicRank method and the Text-to-Text transformer neural network becomes a key task that defines the direction of the research.

**Analysis of recent research and publications.**

This section discusses three key architectures: Convolutional Neural Networks (CNN), Recurrent Neural Networks (RNN), and Transformers. Each of these architectures is used for summarizing textual information, but they differ in their structure and approach to processing sequential data.

Analyzing these architectures in the context of automatic text summarization will help identify their advantages and limitations, as well as determine the optimal choice for specific tasks.

*1. Using CNN for text summarization:*



**Fig. 1. Schematic representation of CNN**

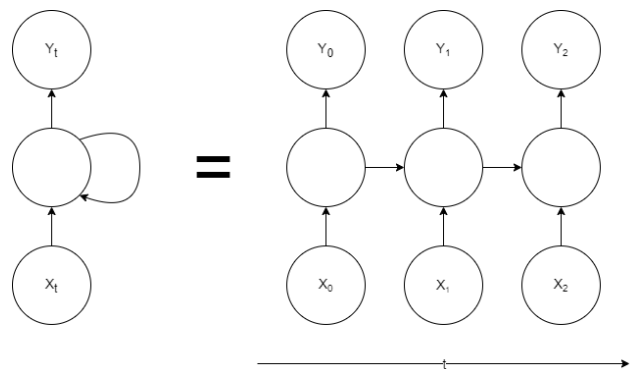
In this approach, a deep learning network known as Convolutional Neural Network (CNN) is utilized for the automatic summarization of textual information. The fundamental idea is to use

convolutional layers to extract key features from the text, followed by fully connected layers for generating the actual summary.

Research [6] in this direction includes the LSTM-CNN model, which implements abstractive text summarization. This model employs CNN to extract “semantic phrases” from sentences. Following this, it uses a Long Short-Term Memory (LSTM) network to create the final summary of the text. The particularity of this method lies in its simplicity and efficiency. However, it is worth noting that it may not consider the context and nuances of the original text.

Therefore, the use of CNN for text summarization becomes an attractive strategy, especially when the semantic aspect of the text is crucial. Still, its limitations in understanding a broader context or details of the text should be considered [2, c. 233].

*2. Using RNN for text summarization:*



**Fig. 2. Schematic representation of RNN**

This approach to automatic text summarization is based on the use of Recurrent Neural Networks (RNN). The fundamental concept involves modeling sequences of words in the text to effectively interact with the context and create a compact representation of the text.

In the examined research [7], an Encoder-Decoder RNN model was introduced for the task of text summarization. In this model, the RNN acts as an encoder responsible for transforming the input text into a compact representation that retains key information. Additionally, using another RNN as a decoder, the summary is generated.

This approach emphasizes sequential analysis of the text, allowing for the creation of more comprehensive summaries by considering the relationships between words. However, it is important to note that RNN may encounter the issue of “vanishing gradients” with lengthy text, which can affect the quality of the summaries [3, c. 67].

3. Using transformer neural network for text summarization:

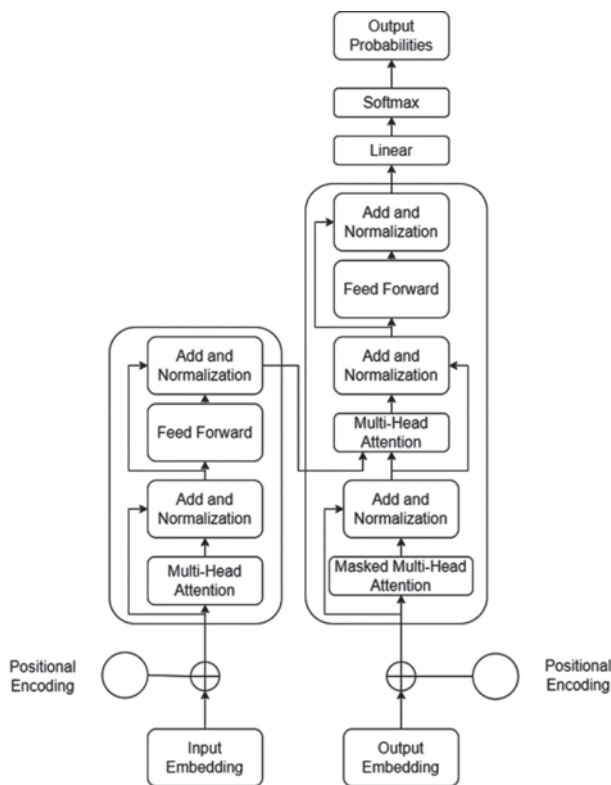


Fig. 3. Schematic representation of the transformer neural network model

This approach to automatic text summarization employs transformers. The main idea is that transformers use attention mechanisms to model the context of words, sentences, and even entire documents. This enables them to effectively consider interactions and the importance of different parts of the text when generating a summary.

In the discussed research [5], the Text-to-Text Transfer Transformer (T5) model is mentioned, which is used for abstractive text summarization. This model has been trained on a large amount of textual data, allowing it to deeply understand language patterns and relationships. Transformers are capable of highly efficient modeling of sequences and context, and their attention mechanisms enable effective handling of text summarization tasks.

This approach is particularly important when working with large volumes of textual data, as transformers can detect deep dependencies and complex relationships in the text. Regarding limitations, it's important to note that the use of transformers may require significant computational resources [1, c. 10].

4. Comparison of architectures

Each architecture has its strengths and weaknesses. CNNs excel in processing structured data such as

images but may overlook the context and nuances of text. RNNs are proficient in tasks related to sequences and can model relationships between words, yet they encounter the issue of “vanishing gradients” in long texts. Transformers, particularly T5, exhibit impressive versatility and the ability to model contextual information in text but require significant computational resources.

Comparing these architectures, the choice of a specific one depends on the task at hand and the nature of the input data. CNNs may prove effective for processing structured data, RNNs for sequences, and transformers for tasks where context and a large volume of training data are crucial [2, c. 238; 3, c. 71].

**The purpose of the article.** The aim of the research is to develop a text summarization system that combines the TopicRank method [4] and the Text-to-Text transformer neural network [5].

Presenting main material

1. TopicRank method

The main idea of the method is to use a graph structure to analyze and highlight key topics from the text. This process can be clearly illustrated in the flowchart below.

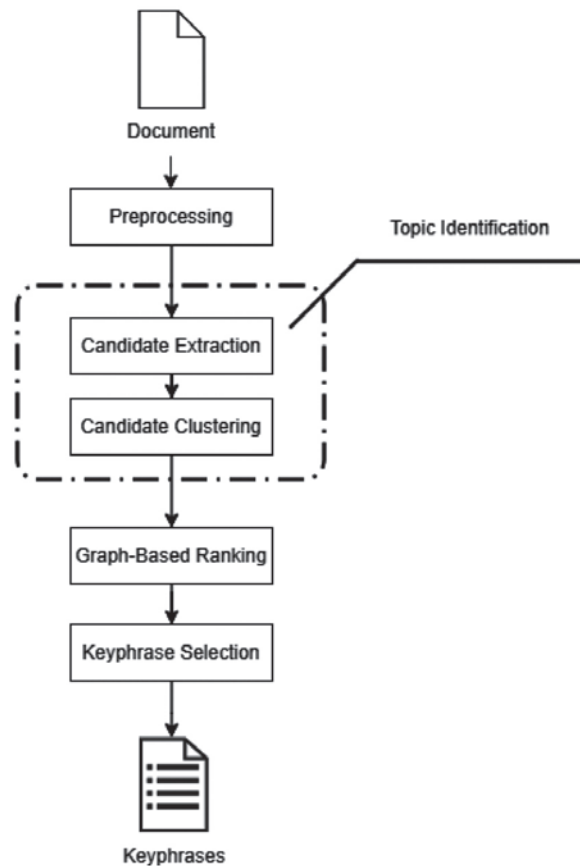


Fig. 4. Schematic representation of the stages of TopicRank method

1.1. Topic identification

The first stage in the TopicRank method is the identification of key themes and phrases that represent them. To achieve this, an method for identifying candidate key phrases is employed, aiming to best reflect the document's topics. Method follows the approach proposed by Wan and Xiao (2008), selecting the longest sequences of nouns and adjectives from the document as candidate key phrases. Other methods may utilize syntactically filtered n-grams containing the highest number of candidates corresponding to references to key phrases. However, the limited length of n-grams can be problematic, as they may not always capture as much information as the longest sequences of nouns. Additionally, they are less likely to correspond to grammatically correct text.

1.2. Graph-Based Ranking

The TopicRank method represents a document as a complete graph, where vertices correspond to topics, and edges have weights based on the strength of semantic connections between vertices. Subsequently, a graph-based ranking model, TextRank, is employed to assign significance to each topic.

1.3. Graph construction

Formally defining, let  $G = (V, E)$  be a complete and undirected graph, where  $V$  is the set of vertices, and  $E$  is a subset of  $V \times V$ . The vertices correspond to topics, and the edge between two topics  $t_i$  and  $t_j$  has a weight determined by the strength of the semantic connection between the vertices. The weight  $w_{i,j}$  of the edge between  $t_i$  and  $t_j$  is calculated as follows:

$$w_{i,j} = \sum_{c_i \in t_i} \sum_{c_j \in t_j} dist(c_i, c_j) \quad (1)$$

The inverse distances  $dist(c_i, c_j)$  between the positions of keyword candidates  $c_i$  and  $c_j$  in the document are computed by the formula:

$$dist(c_i, c_j) = \sum_{p_i \in pos(c_i)} \sum_{p_j \in pos(c_j)} \frac{1}{|p_i - p_j|} \quad (2)$$

Here,  $dist(c_i, c_j)$  denotes the inverse distances between the positions of keyword candidates  $c_i$  and  $c_j$ , and  $pos(c_i)$  includes all positions of keyword candidates  $c_i$ .

The approach to constructing the graph differs from the TextRank method. Graph  $G$  is a complete graph, leading to interconnected topics. The completeness of the graph has an advantage over exploring relationships between topics. Additionally, computing weights based on distances avoids the need for manual parameter definition, such as the window size used in recent methods (TextRank, SingleRank, etc.)

1.4. Keyphrases selection

The final step in TopicRank is the selection of a single representative from the key phrase candidates for each topic. This selection helps avoid duplication and ensures comprehensive coverage of the document's topics.

To choose the candidate that best represents the topic, three strategies are proposed. The first strategy involves selecting the key phrase candidate that appears first in the document. The second strategy assumes that the most commonly used form of the topic is the most representative and selects the key phrase candidate that is used most frequently. The third strategy chooses the centroid of the cluster. The centroid is a key phrase candidate that is most similar to other candidates in the cluster.

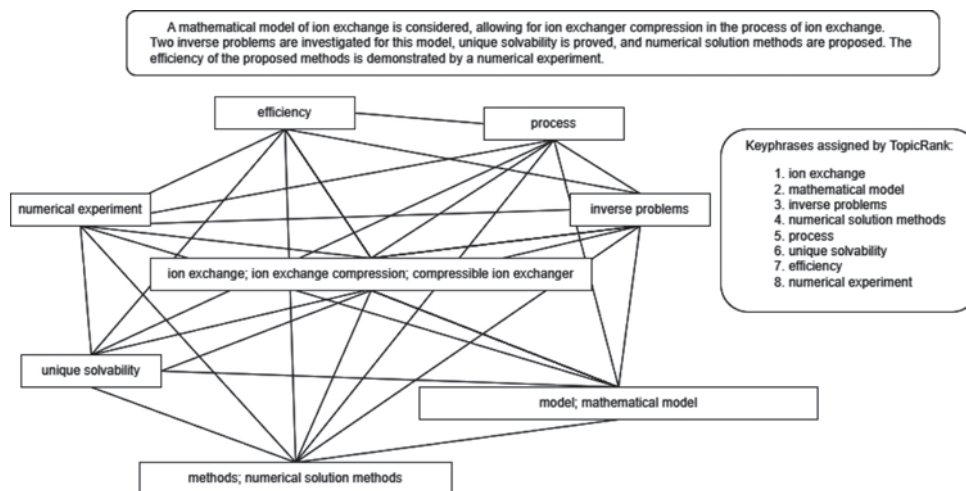


Fig. 5. Sample graph build by TopicRank [4]

```

def LoadT5Tokenizer(self):
    self.logger.info("Loading T5Tokenizer")
    self.tokenizer = T5Tokenizer.from_pretrained('t5-base', model_max_length=MAX_LENGTH)
    self.logger.info("Loaded T5Tokenizer")

def LoadT5ForConditionalGeneration(self):
    self.logger.info("Loading T5ForConditionalGeneration")
    self.model = T5ForConditionalGeneration.from_pretrained('t5-base')
    self.logger.info("Loaded T5ForConditionalGeneration")

```

Fig. 6. Initialization of T5 model and tokenizer

```

def GetSummarizedText(self, input_article: str, length_penalty: float, num_beams: int) -> str:
    inputs = self.tokenizer.encode(
        "summarize: " + input_article,
        return_tensors="pt",
        max_length=MAX_LENGTH,
        truncation=True
    )
    outputs = self.model.generate(
        inputs,
        max_length=MAX_LENGTH,
        min_length=16,
        length_penalty=length_penalty,
        num_beams=num_beams,
        early_stopping=True
    )
    return self.tokenizer.decode(outputs[0], skip_special_tokens=True)

```

Fig. 7. Usage of T5 model and tokenizer

## 2. Нейронна мережа Text-To-Text (T5)

The second key component of our method is the Text-To-Text (T5) neural network from Hugging Face. The uniqueness of T5 lies in its ability for abstractive text summarization, as well as in its transformation of all tasks into a text-to-text format.

### 2.1. Text Preprocessing

Text preprocessing is a key stage in addressing the Text-To-Text task using transformer neural networks such as T5. At this stage, the text undergoes a comprehensive set of operations to prepare it for further processing by the model.

- *Tokenization*: The first step is tokenization, which involves dividing the text into individual tokens (e.g., words or subwords). This is necessary for representing the text as a sequence of tokens, simplifying its handling for the model.

- *Cleaning and normalization*: After tokenization, text cleaning and normalization are performed. Cleaning includes removing unnecessary characters, such as punctuation and numbers, which could introduce noise into the model. Normalization may involve transforming the entire text to lowercase for

uniformity and avoiding unnecessary variations in form.

- *Stop-word removal*: For effective representation of the text in the model, stop words, such as "and," "the," "of," which often carry little significant information, may be removed, reducing data volume.

- *Vectorization*: In the final stage of preprocessing, the input text is transformed into a numerical form that can be understood by the model. This may include using vectorization techniques like Word Embeddings to obtain numerical embeddings of tokens.

The overall goal of preprocessing is to simplify and optimize the representation of the input text for further processing by the T5 model, ensuring the separation of essential informational elements from unnecessary noise and providing clear data presentation for the model.

### 2.2. Encoding

The encoding stage plays a crucial role in preparing the input text for further processing by a transformer neural network, such as T5. This stage involves transforming the text or sequence of tokens

into vector representations that can be understood and processed by the model.

– *Token Embedding*: The central element of encoding is the creation of embeddings for each token in the text. Embeddings are vector representations of tokens that convey the semantic meaning of words. A pretrained model, such as BERT or T5, which has embedded knowledge of the semantics of words based on a broad corpus of textual data, can be used for this purpose.

– *Positional Encoding*: In addition to embeddings, the model can use information about the position of tokens in the text. Since transformers do not consider the order of words in the input sequence, positional information is added to determine where the tokens are located in the text.

Encoding creates an input matrix where each row represents an embedding for a specific token and includes additional vectors to account for the positions of tokens. This stage provides a temporary and spatial representation of the input text, which can be presented to a transformer neural network for further processing and generation of the output text.

### 2.3. Decoding

Decoding is a crucial stage in addressing Text-To-Text tasks, as it is during this stage that the model generates the output text based on the encoded vector representation of the input text.

– *Autoregression*: At the beginning of decoding, the model uses prepared embeddings and information about encoded tokens to generate the first token of the output text. After generating the first token of the output text, the obtained result is used as partial input for generating the next token, and so on. This process is known as autoregression, where each new token is generated based on the previous one.

– *Attention Mechanisms*: During decoding, attention mechanisms are employed to consider the context and dependencies between tokens in the input text. This helps the model focus on important parts of the text while generating each token of the output text. Attention mechanisms can be implemented in various ways, such as the Transformer attention mechanism.

Decoding is completed when the model generates a token indicating the end or maximum length of the output text. The result obtained is the generated output text, which can be used to address a specific task, such as translation or answering a question. Decoding requires careful management of text generation to ensure logical, grammatical, and contextually relevant output text.

### 2.4. Post-processing

Post-processing is an important final stage in working with the results generated by the neural

network in the preceding Text-To-Text processing stages. This stage is designed to enhance the readability, correctness, and logical coherence of the output text.

– *Error Correction*: One of the main aspects of post-processing is error correction. Neural networks, including transformers, may occasionally generate incorrect or ungrammatical text. Error correction mechanisms may involve automatic corrections of grammatical or structural mistakes.

– *Removal of Redundant Code*: During text generation, the model may add unnecessary tokens or symbols that do not provide additional information and may impact the clarity of the text. The post-processing stage may involve removing such redundant elements from the output text.

– *Optimization of Text Structure*: The model may generate text that is not perfectly organized or does not adhere to acceptable structural conventions. Post-processing may include restructuring or optimizing the text to achieve greater clarity and logical coherence.

– *Refinement of Style*: Models may also have limitations in understanding specific speech styles, tone, or terminology. Post-processing may involve refining the stylistic aspects of the text to align with a particular context or audience expectations.

– *Logical Consistency Check*: The final aspect of post-processing is checking the logical consistency and coherence of the text. This may involve analyzing the interaction between different parts of the text and correcting any illogical statements.

Post-processing aims to improve the generated text by ensuring its relevance to the task and maximizing its clarity and acceptability for the end user.

### 3. Combination of methods

The combination of the TopicRank method and the T5 neural network ensures greater efficiency in text summarization. The TopicRank method helps identify key phrases and important sentences, while T5 uses this information to generate an abstractive summary that incorporates the main themes and ideas of the original text. This combination enables the neural network to focus on the key text, reducing the time required to create summaries.

Thus, employing the TopicRank method to extract key elements of the text and subsequently utilizing them in the T5 neural network provides enhanced efficiency in the task of text summarization. This approach not only automates the summarization process but also ensures the preservation of accuracy and relevance in summaries while reducing the time required for their creation. Such an approach can be beneficial in various fields where the processing of large amounts of textual information is crucial.



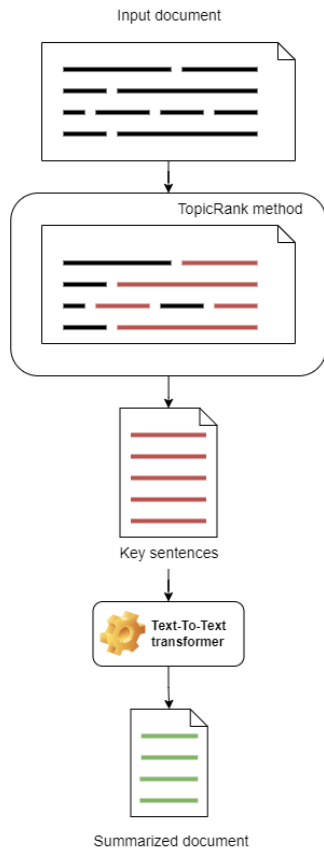


Fig. 8. Combination of methods

4. Results

Without using compression using the TopicRank method. Execution time: 46.831591844558716 seconds.

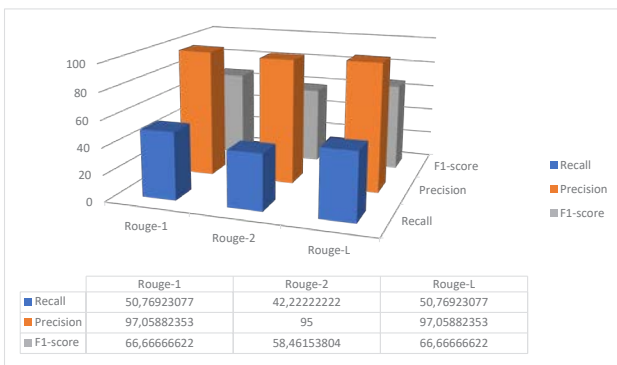


Fig. 9. Rouge metric without using compression using the TopicRank method

Using 40 keywords compression. Execution time: 38.91822385787964 seconds.

**Conclusion.** The research conducted aimed to find an optimal balance between time efficiency and accuracy in text summarization, employing a combination of the TopicRank method and the T5

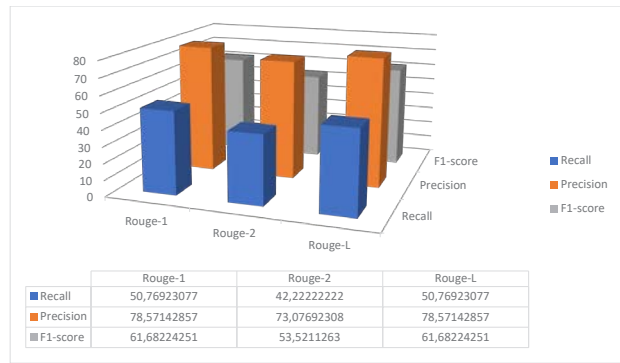


Fig. 10. Rouge metric Using 40 keywords compression

Using 20 keywords compression. Execution time: 33.35249924659729 seconds.

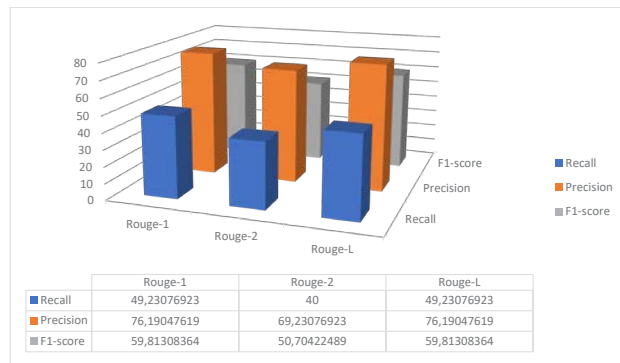


Fig. 11. Rouge metric Using 20 keywords compression

neural network. Without TopicRank compression, method executed in 46.83 seconds. Introducing 40 keywords for compression reduced the execution time to 38.92 seconds, and further compression to 20 keywords resulted in an execution time of 33.35 seconds.

The ROUGE metric values revealed a trade-off between time optimization and result accuracy. The use of 40 keywords for compression led to a decrease in ROUGE-1, ROUGE-2, and ROUGE-L compared to the uncompressed variant. Moreover, the use of 20 keywords further exacerbated this reduction in metrics.

Despite the decrease in accuracy in percentage terms, the integration of the TopicRank method for extracting key elements from the text, followed by their utilization in the T5 neural network, demonstrated significant efficiency in text summarization. The heightened speed in text processing can be pivotal in handling large datasets where system speed and responsiveness are of paramount importance.

**References:**

1. Суханюк І. С., Івасенко Д. В., Потапова К. Р. Використання нейронних мереж для аналізу текстів // Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». 2023. № 13. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2023-13-9036>
2. Sukhaniuk I. S., Potapova K. R. USAGE OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS IN NATURAL LANGUAGE PROCESSING. p. 233. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2023/09/SCIENTIFIC-RESEARCH-IN-THE-MODERN-WORLD-21-23.09.23.pdf>
3. Sukhaniuk I. S., Potapova K. R. USAGE OF RECURRENT NEURAL NETWORKS IN NATURAL LANGUAGE PROCESSING. p. 67. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2023/09/MODERN-RESEARCH-IN-SCIENCE-AND-EDUCATION-14-16.09.23.pdf>
4. Adrien Bougouin, Florian Boudin, Beatrice Daille. TopicRank: Graph-Based Topic Ranking for Keyphrase Extraction. URL: <https://aclanthology.org/I13-1062.pdf>
5. Colin Raffel, Noam Shazeer, Adam Roberts, Katherine Lee, Sharan Narang, Michael Matena, Yanqi Zhou, Wei Li, Peter J. Liu. Exploring the Limits of Transfer Learning with a Unified Text-to-Text Transformer. URL: <https://arxiv.org/pdf/1910.10683v4.pdf>
6. Shengli Song, Haitao Huang, Tongxiao Ruan. Abstractive text summarization using LSTM-CNN based deep learning. URL: <https://sci-hub.se/10.1007/s11042-018-5749-3>
7. Shaik Rafi, Ranjita Das. RNN Encoder And Decoder With Teacher Forcing Attention Mechanism for Abstractive Summarization. URL: <https://doi.org/10.1109/INDICON52576.2021.9691681>

**Суханюк І.С., Потапова К.Р., Наливайчук М.В., Вовк Л.Б. УЗАГАЛЬНЕННЯ ТЕКСТУ НА ОСНОВІ МЕТОДУ TOPICRANK ТА TEXT-TO-TEXT ТРАНСФОРМЕРНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ**

*Запропонована система підсумовування тексту представляє новий підхід, поєднуючи метод TopicRank та Text-to-Text трансформерну нейронну мережу для оптимізації процесу генерації коротких, але точних підсумків з великих обсягів текстових даних. Головною метою цього дослідження є пошук балансу між швидкістю виконання та точністю результатів у контексті обробки об'ємних інформаційних наборів.*

*Проблема, яку вирішує ця система, полягає у комплексній взаємодії між необхідністю швидкої обробки великих обсягів даних і необхідністю точності виділення інформації для створення змістовних підсумків. Обидва компоненти системи, а саме TopicRank і Text-to-Text трансформерна нейронна мережа, взаємодіють для досягнення оптимального результату.*

*Результати експериментів свідчать про ефективність системи у генерації коротких підсумків великих текстових документів в обмеженій часовий проміжок. Це досягається завдяки використанню графового алгоритму TopicRank для виділення ключових речень у тексті. Отримані ключові речення передаються Text-to-Text трансформерній нейронній мережі, яка, використовуючи глибоке навчання, перетворює їх в інформативні підсумки.*

*Важливо відзначити, що продуктивність цієї системи залежить від якості вхідного тексту та обчислювальних ресурсів. Чистий і структурований вхідний текст забезпечує кращі результати, а високопродуктивні обчислювальні ресурси дозволяють швидше обробляти великі обсяги даних. Це підкреслює важливість оптимізації як введення, так і обчислювального процесу для досягнення оптимальної продуктивності системи.*

*Запропонована система являється дієвим інструментом для підсумовування тексту в умовах обробки великих обсягів інформації. Її позитивний результат в генерації коротких і змістовних підсумків вказує на потенційне застосування в сферах, де важлива швидкість обробки тексту та збереження певної точності для отримання значущої інформації. Такий підхід може знайти застосування в областях, де потрібно швидко аналізувати великі обсяги документації, наприклад, у наукових дослідженнях, медичинській діагностиці або інтелектуальних системах обробки інформації.*

**Ключові слова:** обробка природної мови, аналіз тексту за допомогою нейронних мереж, трансформерні нейронні мережі, метод TopicRank, графовий алгоритм, узагальнення тексту.

**Темчур В.С.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Баган Т.Г.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## МЕТОДИ ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

*Враховуючи зростаючу кількість промислових об'єктів, а також кількість даних, яка отримується від різноманітного обладнання у всьому світі, рішення глибокого навчання стали популярними для прогнозного обслуговування, які відстежують активи для оптимізації завдань обслуговування. На сьогоднішній день саме прогнозне обслуговування стає найбільш пріоритетним методом обслуговування, оскільки він дозволяє суттєво підвищити загальну ефективність обладнання. Вибір найбільш підходящої архітектури для кожного випадку використання складний, враховуючи кількість прикладів, що застосовуються в подібних дослідженнях. Стаття спрямована на полегшення цього завдання шляхом огляду найсучасніших архітектур глибокого навчання, і те, як вони інтегруються з етапами прогнозованого технічного обслуговування для задоволення вимог промислових компаній. Це дає можливість виявити аномалії, аналізувати першопричини, оцінювати залишковий термін служби.*

*У статті викладено методологію для оцінки застосування моделей глибокого навчання в прогностичному обслуговуванні. Вона містить огляд і пояснення найбільш актуальних методів, керованих даними, зосереджуючись на найсучасніших архітектурах глибокого навчання, які застосовуються для прогнозного обслуговування. Це надає можливість огляду доступних методів у спрощеній та структурованій формі. Досліджується придатність моделей глибокого навчання для прогнозного обслуговування та порівнюються їхні переваги та недоліки зі статистичними та класичними моделями машинного навчання. Аналізуються поточні тенденції в публікаціях про прогнозне технічне обслуговування, визначаються недоліки, представляються проблеми дослідження та визначаються можливості та перспективи для подальшого дослідження.*

*Спершу виконано огляд контексту та різних застосувань прогнозного обслуговування. Після цього проведено ретельне дослідження різних типів моделей прогнозного обслуговування. Також виконано комплексний аналіз керованих даними моделей. Нарешті, реалізовано детальний огляд моделей глибокого навчання. Такий підхід дозволив отримати цілісне розуміння масштабів, перш ніж заглиблюватися у конкретні галузі досліджень.*

**Ключові слова:** прогнозне технічне обслуговування, глибоке навчання, моделі керовані даними, штучні нейронні мережі, архітектура мережі.

**Постановка проблеми.** Технології штучного інтелекту та машинного навчання останніми роками привернули до себе значну увагу, завдяки їхній здатності створювати автоматизовані моделі для обробки великих обсягів даних, які зараз збираються і зростають в геометричній прогресії. Дослідницька тенденція машинного навчання переключилася на більш складні моделі, такі як ансамблеві методи та глибоке навчання, враховуючи їхню вищу точність при роботі з більшими наборами даних. Розвиток цих методів в основному пов'язаний з розвитком технологій, а саме зі збільшенням обчислювальних ресурсів та розвитком графічних процесорів. Ці методи дають

відмінні результати у багатьох галузях, таких як система виявлення вторгнень, комп'ютерне бачення чи обробка мови.

Технічне обслуговування можна трактувати як набір технічних, адміністративних та управлінських дій на протязі всього життєвого циклу об'єкта, спрямованих на підтримання або відновлення такого стану, в якому буде працездатним та виконуватиме необхідні функції. Також можна виділити три типи технічного обслуговування: «покращувальне» технічне обслуговування – направлене на підвищення надійності обладнання, ремонтпридатність і безпеку; «профілактичне» технічне обслуговування – зазвичай таке обслуго-

вування виконується періодично, за встановленим графіком; «коригувальне» технічне обслуговування – виконується вже після виходу обладнання з ладу і передбачає заміну пошкоджених частин частини. На сьогоднішній день найбільш розповсюдженим підходом є «профілактичне» технічне обслуговування.

У наш час відбувається перехід до четвертої промислової революції, так званої Industry 4.0. Ця революція зосереджена навколо конвергенції кіберфізичних систем і промислового Інтернету речей. Тут поєднується програмне забезпечення, обладнання фізичного рівня та інтелектуальні методи керування для вдосконалення промислових процесів. Такий підхід дозволяє удосконалити функції прогнозного технічного обслуговування, шляхом аналізу величезної кількості процесів і пов'язаних з ними даних за допомогою моніторингу стану (*Condition monitoring – CM*). Прогнозне технічне обслуговування (*Predictive maintenance – PdM*) визнано найбільш економічно ефективним підходом до техобслуговування через його потенціал для досягнення загальної ефективності обладнання (*Overall Equipment Effectiveness – OEE*) понад 90% шляхом передбачення потреб у техобслуговуванні і прогнозує значну віддачу від інвестицій, яка потенційно може досягати 1000%. Для передових компаній одним з головних завдань є удосконалення технічного обслуговування, оскільки саме цей крок може скоротити затрати до 60% [1]. Зокрема, *PdM* подовжує термін експлуатації компонентів, використовуючи їхній невикористаний потенціал, одночасно мінімізуючи час простою та витрати на заміну завдяки попереджувальній заміні компонентів до того, як виникнуть збої. Такий підхід запобігає дорогим поломкам і втратам часу виробництва через несподівані зупинки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідження прогнозного технічного обслуговування (*PdM*) можна розділити на три основні підходи: на основі фізичної моделі, на основі даних і гібридні методи. Підходи, засновані на фізичних моделях, використовують знання про системи для створення математичного представлення їх деградації [2, 3]. Хоча ці методи мають чітку фізичну інтерпретацію, їх може бути важко реалізувати в складних системах. Методи, керовані даними, з іншого боку, оцінюють системи шляхом моніторингу їх стану з використанням інформації, отриманої з історичних даних [4, 5]. Ці рішення охоплюють статистичні методи, функції надійності та методи штучного інтелекту. Вони добре підхо-

дять для складних систем, оскільки не вимагають повного розуміння того, як ці системи працюють. Однак пов'язати їх результат із фізичним контекстом може бути складніше. Гібридний підхід поєднує в собі елементи підходів, заснованих на фізичній моделі, і підходів, керованих даними [6]. В останні роки методи керовані даними та методи глибокого навчання набули популярності в промисловості завдяки збільшенню доступності машинних даних. Ця велика кількість даних дозволила розробити високоточні моделі *PdM* для складних систем.

У роботі [7] окреслено десять бажаних атрибутів для системи прогнозного технічного обслуговування: здатність швидко виявляти та діагностувати проблеми, диференціювати різні типи відмов, підтримувати надійність, ідентифікувати нові проблеми, оцінювати помилки класифікації, адаптуватися до мінливих умов, надавати пояснення, мати мінімальні вимоги до моделювання, ефективно обробляти обчислення та зберігання в реальному часі та виявляти велику кількість несправностей.

Дві основні проблеми в промислових сценаріях виникають через поведінку та мінливість даних. Навіть, якщо активи мають схожі характеристики, такі фактори, як механічні допуски, налаштування кріплення, зміни умов експлуатації та інші змінні можуть призвести до відмінностей. Ці фактори ускладнюють повторне використання моделей *PdM* на різних машинах і ресурсах. Додаткові виклики, які заслуговують на увагу, включають отримання високоякісних даних, правильну їх попередню обробку та виконання ефективного проєктування функцій для створення репрезентативного набору даних для проблеми. Крім того, кожне спостереження пов'язане з попередніми та має аналізуватися разом, що збільшує розмірність даних і ускладнює моделювання. Збір даних про несправності також є проблематичним, оскільки машини розроблені та керовані таким чином, щоб вони працювали правильно та запобігали збоєм, через це поломки виникають дуже рідко.

Зазвичай використовувані методи моніторингу стану обладнання включають різноманітні підходи, до них відносяться механічний ультразвук [12], аналіз вібрації [8], випробування частинок зносу [9], термографія, аналіз струму сигналу двигуна та неруйнівний контроль. Крім того, існують додаткові методи, такі як крутний момент, напруга та аналіз огинаючої, акустична емісія, вимірювання тиску і моніторинг температури. Статті [10, 11] розглядають ці методи, обговорюючи типи несправностей,

які вони можуть ідентифікувати, та їх практичне застосування. Вони підкреслюють потенціал включення даних про основні робочі умови для підвищення ефективності цих методів у комплексному аналізі прогностичного технічного обслуговування. Цей підхід передбачає збір даних із різних джерел, включаючи фізичні характеристики, продуктивність обладнання та робочі параметри.

### Виклад основного матеріалу

**Етапи прогнозованого обслуговування на основі даних.** Багато з моделей глибокого навчання, використовуваних для прогностичного обслуговування (*PdM*), дотримуються тих же принципів, що й інші підходи до машинного навчання та статистики. Зокрема, більшість методів, що базуються на аналізі даних, проходять чіткі кроки, які описано в наступній послідовності: по-перше, виявлення аномалій, по-друге, проведення діагностики, по-третє, складання прогнозів і, нарешті, впровадження стратегій пом'якшення.

Як правило, ще дві дії виконуються передвищезгаданими в процесі підготовки даних для прогностичного обслуговування, який узгоджується із загальним аналітичним життєвим циклом даних [12]. Ці початкові етапи передбачають попередню обробку даних і розробку функцій та мають вирішальне значення для підвищення точності моделей прогностичного обслуговування шляхом формування репрезентативного набору даних. Важливо відзначити, що всі етапи прогностичного обслуговування повинні бути налаштовані, скориговані й реалізовані відповідно до вимог конкретних випадків використання та характеристик доступних даних. Крім того, розробка систем *PdM* є поступовим процесом, і методи, алгоритми та рішення, прийняті на кожному етапі, матимуть значний вплив на наступні етапи.

Розглянемо детальніше основні етапи створення системи *PdM*.

#### 1. Попередня обробка

На цьому етапі відбувається підготовка зібраних даних для подальшої обробки. Важливо зазначити, що кожна модель має свої специфічні вимоги, які слід враховувати при виборі відповідного методу попередньої обробки для покращення продуктивності моделі. Нижче наведено огляд найпоширеніших методів: перевірка даних датчика забезпечує правильність зібраних даних; синхронізація використовується для збору сигналів, відібраних у різні часові мітки, з метою отримання керованих часових рядів/періодів даних; очищення даних видаляє або інтерполірує недоступні або відсутні

значення; повторна вибірка використовується для обробки незбалансованих даних, часто для підвищення точності дефіцитних класів даних про несправності або для обробки невеликих наборів даних, тоді як кодування або дискретизація проектує їх у новий простір у моделі, який легше обробляти, і змінює їхні типи характеристик; сегментація розділяє дані і дозволяє розпаралелювати їх для аналізу великих наборів даних; масштабування ознак, таке як нормалізація та стандартизація, масштабує всі ознаки до однакового або подібного простору і дозволяє порівнювати їх.

#### 2. Розробка функцій

На цьому етапі виконується вилучення певної підмножини функцій, яка буде використовуватися як вхідні дані для моделей на подальших етапах. Ця процедура може позитивно вплинути на результати статистичних моделей і моделей машинного навчання. Хоча цей крок не є обов'язковим для моделей глибокого навчання, вони також можуть автоматично вивчати нові репрезентативні функції для вирішення завдань. Найпоширеніші підходи можна поділити на наступні категорії: виділення ознак в часовій та частотній областях, що враховують відношення ознак у часі та частоті [13]; проекція в новий простір, наприклад, за допомогою аналізу головних компонент [14], яка зменшує розмірність, зберігаючи важливу інформацію; методи конкатенації та об'єднання, які створюють нові функції шляхом поєднання існуючих; відбір ознак, що зменшує розмірність шляхом вилучення ознак з низькою дисперсією, зайвими або некорельованими, оскільки вони можуть ускладнювати модель, не додаючи додаткової інформації.

#### 3. Виявлення аномалій

Основна мета полягає в визначенні, чи функціонує система в нормальних умовах. Ця задача може бути вирішена за допомогою трьох різних підходів, які базуються на моделях, побудованих на основі даних: класифікація, однокласова класифікація та кластеризація. Вони використовуються відповідно до наявності позначених даних різних класів під час навчання, наявності лише невідомих даних або наявності непозначених даних.

Для отримання уявлення про можливі типи відмов, базуючись на експертних знаннях, корисно використовувати аналіз режимів і наслідків відмов (*FMEA*) [15] і його покращений варіант, який включає аналіз критичності (*FMECA*). Це допомагає визначити пріоритети типів відмов або аномалій, які необхідно виявити, і розробити життєвий цикл аналізу даних.

Методи виявлення аномалій вимагають попередньої обробки даних, і деякі з них також можуть потребувати інженерних даних для ефективної роботи. Після попередньої обробки наступним кроком є вибір, навчання та оптимізація відповідної моделі для конкретного сценарію використання. Вибір методу виявлення аномалій та дані про сценарій використання визначатимуть подальші етапи прогнозування відмови обладнання.

#### 4. Діагностика

Після виявлення аномалії, наступним кроком є проведення діагностики, щоб визначити, чи аномалія свідчить про несправний стан та чи існує ризик її подальшого розвитку. В іншому випадку може вказувати на недолік у моделі виявлення аномалій, і, можливо, її слід переглянути або перетренувати. Діагноз, зазвичай, ґрунтується на методах аналізу кореневої причини проблеми (*RCA*), які спрямовані на встановлення справжньої причини аномалії. Метод діагностики обирається в залежності від конкретної проблеми, яку необхідно вирішити. Існують різні підходи до цього етапу, і вони вибираються в залежності від методу виявлення аномалій та характеристик даних навчання. Наприклад, багатокласова класифікація, бінарна класифікація, класифікація одного класу та кластеризація можуть застосовуватися в залежності від того, чи містять дані різні типи відмов, або ж тільки спостереження відмовного класу, чи навіть не контролюються. Додатковим методом, який часто використовується разом з *RCA*, є вимірювання аномалій за допомогою індексу здоров'я (*HI*). Цей підхід спрямований на вимірювання збитків активів шляхом порівняння поточних робочих даних із історичними даними, які контролюються або не контролюються. *HI* може показувати відсоток відхилення від нормальних робочих даних або рівень погіршення на числовій шкалі, де вищий показник вказує на більше пошкодження або несправність, а найнижчий – відсутність пошкоджень. Етап діагностики спрощується, коли є більше інформації про дані та їхні мітки.

#### 5. Прогнозування

Після виявлення та діагностики аномалії можна спостерігати за процесом деградації, використовуючи поточні умови роботи та стан машини на даний момент. Цей моніторинг концентрується на найважливіших чинниках для виявлення та діагностики аномалій, що сприяють виявленню потенційних поломок. Зазвичай цей етап виконується з використанням моделей залишкового терміну служби, які оцінюють залишковий час

або цикли до відмови, при наявності достатніх історичних даних для конкретного типу відмови. З іншого боку, якщо немає даних про погіршення, оцінку погіршення можна провести, спостерігаючи зміни індексу здоров'я (*HI*) або різниці між новими умовами роботи та добре встановленими нормальними умовами роботи. Обидві ці моделі також можуть надати певну впевненість у своїх прогнозах. Моделі прогнозу на основі даних можна розділити на чотири категорії в залежності від методів, на яких вони ґрунтуються. У наведеному нижче списку перераховані найбільш поширені методи, розділені на ці категорії для прогнозування деградації:

- на основі схожості (*Similarity-based*): порівнюється поточна продуктивність з минулою поведінкою до відмови, щоб зробити прогноз [17];

- статистичний: використовується історична статистика для оцінки деградації, така як моніторинг терміну служби у поєднанні з часом до відмови [4] або використання моделей виживання [19] для оцінки очікуваного терміну служби;

- аналіз часових рядів: використовуються методи, такі як *ARIMA* [17] на основі попередніх даних, фільтр Калмана для оцінки вектора стану, використовуючи неповні та зашумлені дані [20], а також методи Фур'є та генетичного програмування для створення поліноміальної функції шляхом оптимізації функції пристосованості;

- класифікація: діагностуються дані за відомим типом відмови або подібними даними про працездатність, а потім прогнозується деградація на основі історичних даних про цей клас. Поширені класифікатори, що використовуються в літературі, включають нейронні мережі прямого поширення (*NN*) [21], методи опорних векторів (*SVM*) [21], байєсівські мережі (*BN*) [22], приховані марківські моделі (*HMM*), методи на основі нечіткої логіки та випадкові ліси (*RF*) [23];

- регресія: прямо оцінюється індекс здоров'я (*HI*), аномалії або термін служби (*RUL*), що залишився, на основі вхідних даних. Сучасні алгоритми включають лінійні функції, нелінійні функції для обліку нелінійних взаємозв'язків, регресори на основі методів опорних векторів, адаптовані для регресії, регресію на основі релевантних векторів (*RVR*) на основі байєсівської регресії [17], згорткові нейронні мережі (*CNN*), процеси Вінера для моделювання деградації як безперервних стохастичних процесів та рекурентні нейронні мережі, такі як *LSTM* та *GRU* [5], які зберігають актуальну історичну інформацію для прогнозування при кожному спостереженні.

## 6. Пом'якшення

Після виявлення аномалії, визначення її основної причини та прогнозування терміну служби, що залишився, доступна достатня інформація для вживання заходів з технічного обслуговування, спрямованих на зменшення ймовірності збоїв на ранніх стадіях і, таким чином, запобігання виходу активів з ладу. Ця фаза передбачає планування та виконання необхідних заходів для відновлення належного робочого стану активів до того, як виникнуть будь-які поломки, тим самим зменшуючи витрати як на впровадження, так і на простой. Технічні спеціалісти з технічного обслуговування несуть відповідальність за виконання заходів із зменшення наслідків, які є невід'ємною частиною процесів управління технічним обслуговуванням і виробничими операціями. Моделі прогнозованого обслуговування на основі даних (*PdM*) повинні надавати підтримку, пропонуючи статистичну інформацію [16] та рекомендації експертам у галузі. Як наслідок, більш просунута форма пом'якшення досягається шляхом поєднання експертних знань у галузі та очікуваної деградації активів.

**Огляд методів глибокого навчання.** У наш час моделі глибокого навчання перевершують статистичні та традиційні моделі *ML* у багатьох сферах, включаючи *PdM*, коли існує достатньо історичних даних. Глибоке навчання – це частина широкого сімейства методів машинного навчання, яка ґрунтується на штучних нейронних мережах (*ANN*). Успіх глибокого навчання безпосередньо залежить від потужності техніки. На момент появи нейронних мереж потужності комп'ютерів були низькими, через що і самі мережі були досить слабкими. Саме тому в той час неможливо було створити велику кількість шарів нейронних мереж, а саме від кількості шарів залежать можливості мережі. Але з появою потужних станцій *GPU* (*Graphics Processing Unit*) і *TPU* (*Tensor Processing Unit*) все змінилося. Сучасний *Deep Learning* здатен упоратися з великими розмірами мереж.

У *ANN* нейрони обчислюють лінійну регресію вхідних даних з використанням вагових коефіцієнтів, а потім застосовують нелінійні функції активації, такі як сигмоїда, ректифікована лінійна одиниця (*ReLU*) або гіперболічний тангенс (*tanh*), для отримання вихідних значень. Параметри мережі зазвичай ініціалізуються випадковим чином, а потім налаштовуються шляхом порівняння вхідних даних з вихідними даними, використовуючи навчальний набір даних. Цей процес навчання здійснюється за допомогою алгоритму градієнтного спуску та алгоритму зворотного

поширення помилки, що дозволяють коригувати параметри кожного нейрона для зменшення помилки, яку мережа робить, використовуючи користувальницьку функцію вартості для обчислення помилки.

Розглянемо основні методи глибокого навчання в області прогнозного обслуговування.

- Нейронна мережа з архітектурою “*Feed-forward/MLP*” є однією з найбільш поширених та простих структур. Вона складається з нейронів, які організовані у шари, де всі нейрони в одному шарі пов'язані з усіма нейронами у наступному шарі, передаючи свій вихід як вхід іншим. Проте відсутні зв'язки між нейронами в одному шарі або між нейронами з різних попередніх шарів. Шари у цій архітектурі називаються: вхідний шар, приховані шари та вихідний шар. Нейронна мережа отримує набори спостережень, які поєднують вхідні та цільові функції, і навчається встановлювати зв'язки між ними шляхом мінімізації помилок, які вона генерує, порівнюючи вхідні дані з вихідними.

- Згорткова нейронна мережа (*CNN*) представляє собою тип прямої мережі, яка підтримує взаємозв'язок нейронів через застосування згорткових фільтрів. Ця архітектура знаходить широке застосування в задачах розпізнавання зображень, обробки сигналів, системах рекомендацій і обробці природної мови, серед інших сфер. Згортковий шар зазвичай має лінійну структуру та супроводжується застосуванням функції активації для отримання нелінійних відповідей. Після цього може використовуватися максимальний або середній шар об'єднання для зменшення розмірності. Крім того, більшість архітектур мають крок зведення, щоб отримати репрезентативні характеристики вхідних даних, які можна використовувати з іншими моделями машинного навчання або глибокого навчання для рішення різних завдань. Ваги в згорткових шарах розподіляються, що полегшує процес навчання.

- Рекурентна нейронна мережа (*RNN*) використовується для моделювання часових даних, зберігаючи стан, отриманий з попередніх вхідних даних мережі. Алгоритм зворотного розповсюдження в часі адаптує традиційний метод зворотного розповсюдження помилки для часових даних, що дозволяє впливати на попередні моменти в часі під час навчання. Проте цей підхід може призвести до проблеми зникнення або вибуху градієнту, яка робить нейронні мережі нездатними вивчати довгострокові залежності в даних. Для вирішення цієї проблеми були

розроблені спеціалізовані архітектури *RNN*, такі як довгокороткочасна пам'ять (*LSTM*) і стробований рекурентний блок (*GRU*), які використовують ворота для ефективного керування інформацією та забезпечення здатності моделі працювати з довгостроковими зв'язками в даних.

- Мережа глибоких переконань (*DBN*) і обмежена машина Больцмана (*RBM*) – це дві важливі архітектури в глибокому навчанні. *RBM* – це двовимірна, повністю зв'язана стохастична нейронна мережа з видимим та прихованим шаром, яка може вивчати розподіли ймовірностей в даних. Цю мережу можна навчати як з наглядом, так і без нагляду, і її головні застосування включають зменшення розмірності та класифікацію даних. З іншого боку, *DBN* – це стек *RBM*, де кожен два послідовні шари розглядаються як *RBM*. Спочатку *DBN* навчається без нагляду для зменшення розмірності даних, і після цього її можна перенавчити з використанням відповідних даних для виконання завдань класифікації.

- Автоенкодер (*AE*) [24] ґрунтується на ідеї розкладання сингулярних значень для виділення нелінійних характеристик, які найкраще репрезентують вхідні дані в меншому просторі. Він складається з двох компонентів: енодера, який перетворює вхідні дані в прихований простір, і декодера, який перетворює дані з прихованого простору назад в простір, що відтворює вхідні дані з тим самим розміром. Мережа навчається мінімізувати помилку відтворення, яка представляє собою втрату між входом і виходом. Автоенкодери можуть бути розділені на недоповнені та надповні в залежності від розмірності їхнього латентного простору, який відповідає меншому або більшому (або рівному) розміру вхідних даних. Ці прості архітектури можуть бути розширені та модифіковані для вирішення різних завдань та проблем.

- До модифікацій автоенкодерів відноситься дешумний автоенкодер (*DAE*), який використовується для відновлення пошкоджених даних. Це тип надповного автоенкодера, де навчання контролюється для уникнення «функції ідентичності». Він навчається на парах даних з вхідними сигналами, які мають шум, і їх чистими виходами, з метою зменшення втрат між ними.

- Ще однією модифікацією є розріджений автоенкодер (*SAE*) [18], який обмежується в процесі навчання за допомогою штрафу за розрідженість, який базується на концепції дивергенції Кульбака-Лейблера. Ця архітектура ставить за мету зробити кожен нейрон розрідженим, щоб легше виділяти структурну інформацію з даних, у порівнянні

з звичайним автоенкодером і бути більш корисною для практичних застосувань.

- Генеративні моделі: варіаційний автокодер (*VAE*) і генеративна змагальна мережа (*GAN*). Обидві ці моделі розроблені для роботи без нагляду. *VAE* є генеративною моделлю і, отже, недетермінованою модифікацією звичайного автокодера, де латентний простір є безперервним. Зазвичай розподіл в латентному просторі є гаусовим, і декодер відтворює вихідні дані на основі випадкових вибірок та їхньої інтерполяції. *VAE* використовується для оцінювання розподілу даних, навчання представлення зразків даних і генерування синтетичних зразків серед іншого.

- *GAN* – це ще один тип генеративної нейронної мережі, яка складається з двох частин: генератора і дискримінатора. Генератор навчено створювати вихідні дані, які належать певному розподілу даних, використовуючи вектор представлення як вхідні дані. Дискримінатор навчений класифікувати свої вхідні дані незалежно від того, чи належать вони до певного розподілу даних. Вихід генератора підключається до входу дискримінатора, і вони навчаються разом, конкуруючи один з одним. Мета генератора полягає в тому, щоб перевершити дискримінатор, генеруючи вихідні дані з випадкових вхідних даних і намагаючись змусити дискримінатор класифікувати їх як належність до конкретного навченого розподілу. Роль дискримінатора полягає в тому, щоб відрізнити синтетичні, згенеровані дані від реальних, несинтетичних даних з навченого розподілу. Обидві частини навчаються разом, конкуруючи за перевагу одна над іншою, що відображається в теорії ігор. *GAN* може бути розширена на інші завдання машинного навчання, такі як контрольоване або навчання з підкріпленням.

- Самоорганізуюча карта (*SOM*) – це метод неконтрольованої організації внутрішнього представлення даних на основі штучних нейронних мереж. Вона використовує конкурентне навчання, у відмінну від типових штучних нейронних мереж, які використовують зворотне поширення та градієнтний спуск для створення нового простору, який зазвичай представляється у вигляді карти, зазвичай двовимірної. *SOM* базується на функціях сусідства для збереження топологічних властивостей вхідного простору в новому просторі, який представлений у вигляді клітинок. Серед інших застосувань, *SOM* може бути використана для кластеризації даних.

**Висновки.** Фізичні моделі та моделі, засновані на статичних даних для *PdM* широко використо-



увалися 15 років тому, але сьогодні вони менш поширені через складність або неможливість моделювання складних систем. Зараз, з приходом Industry 4.0, збільшенням обчислювальної потужності та автоматизації збору даних про машини та активи, все більшої популярності набуває глибоке навчання. Тим не менш, його двома основними недоліками є високі вимоги до навчальних даних і труднощі з поясненням моделі. Більше того, ці моделі повинні бути модифіковані та адаптовані для промислових характеристик і вимог до даних *PdM*. Таким чином, вибір типу моделі для програми *PdM* слід робити ретельно, проаналізувавши потреби кожного випадку використання. Можливо, його вимоги не задовольняються тенденцією дослідження машинного навчання, яка зараз є глибоким навчанням, і інші типи моделей є більш доцільними.

Незважаючи на те, що моделі глибокого навчання можуть досягти задовільних результатів, їх проектування, розробка та оптимізація мають досить багато складностей, найпоширенішими з яких є: вибір типу архітектури та структури, кількість прихованих шарів і нейронів, функції активації, умови регуляризації для запобігання переобладнанню та оптимізація параметрів навчання. З вищезазначених причин весь процес створення моделі *DL* не такий автоматичний, як може здатися на перший погляд. Крім того, щоб отримати конкурентоспроможні результати, необхідно здійснювати попередню обробку даних. Це може підвищити продуктивність моделі, але в той же час видалити релевантну інформацію. Крім того, ці кроки зазвичай можуть виконувати лише спеціалісти з обробки даних, що в свою чергу потребує додаткових витрат.

Більшість промислових компаній, які покладаються на стратегії коригувального та періодичного технічного обслуговування, можуть оптимізувати витрати шляхом інтеграції автоматичних моделей прогнозованого технічного обслуговування на основі даних. Ці моделі відстежують стан машин і компонентів, дослідження яких еволюціонували від статистичних до більш складних методів машинного навчання. Зараз їхні основні дослідження зосереджені на моделях глибокого навчання. Промислові компанії, які хочуть оптимізувати свої операції з технічного обслуговування, повинні перейти до прогнозного технічного обслуговування. Однак цю автоматизацію слід охоплювати від простіших до складніших моделей, завжди вибираючи ті, які краще відповідають їхнім конкретним потребам. У розробці та перевірці структури *PdM* повинні співпрацювати як експерти в галузі, так і дослідники даних. Ця гібридна модель може скористатися перевагами як підходів, заснованих на статичних даних, так і підходів, керованих даними, що призведе до отримання точної, але інтерпретаційної моделі.

Сучасні промислові компанії збирають багато даних шляхом моніторингу активів у нормальних робочих умовах і майже без даних про збої. Таким чином, дослідження неконтрольованих та однокласових алгоритмів класифікації є актуальними для галузі прогнозного обслуговування. Конкретно, такі архітектури, як автокодері, мережі глибокої *LSTM* або *CNN* є одними з найбільш досліджених типів архітектур, які дозволяють виконувати моделювання часових рядів даних. Тим не менш, розробка та оптимізація архітектур *DL* в основному керуються попереднім досвідом та методом проб і помилок.

#### Список літератури:

1. Balbir S Dhillon. 2002. Engineering maintenance: a modern approach. cRc press. 1–224 pages.
2. Ling Li, Min Liu, Weiming Shen, and Guoqing Cheng. 2017. An expert knowledge-based dynamic maintenance task assignment model using discrete stress-strength interference theory.
3. Y. Li, T. R. Kurfess, and S. Y. Liang. 2000. Stochastic prognostics for rolling element bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing* 14, 5 (2000), 747–762.
4. Marcia Baptista, Shankar Sankararaman, Ivo P. de Medeiros, Cairo Nascimento, Helmut Prendinger, and Elsa M.P. Henriques. 2018. Forecasting fault events for predictive maintenance using data-driven techniques and ARMA modeling. *Computers and Industrial Engineering* 115 (2018), 41–53.
5. Mei Yuan, Yuting Wu, and Li Lin. 2016. Fault diagnosis and remaining useful life estimation of aero engine using LSTM neural network. In *AUS 2016 - 2016 IEEE/CSAA International Conference on Aircraft Utility Systems*. IEEE, 135–140.
6. Chong Zhang, Pin Lim, A. K. Qin, and Kay Chen Tan. 2017. Multiobjective Deep Belief Networks Ensemble for Remaining Useful Life Estimation in Prognostics. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems* 28, 10 (2017), 2306–2318.
7. Venkat Venkatasubramanian, Raghunathan Rengaswamy, Kewen Yin, and Surya N. Kavuri. 2003. A review of process fault detection and diagnosis part I: Quantitative model-based methods. *Computers and Chemical Engineering* 27, 3 (2003), 293–311.

8. Gopi Krishna Durbhaka and Barani Selvaraj. 2016. Predictive maintenance for wind turbine diagnostics using vibration signal analysis based on collaborative recommendation approach. In 2016 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics, ICACCI 2016. 1839–1842.
9. M. Woldman, T. Tinga, E. Van Der Heide, and M. A. Masen. 2015. Abrasive wear based predictive maintenance for systems operating in sandy conditions. *Wear* 338-339 (2015), 316–324.
10. Fausto Pedro García Márquez, Andrew Mark Tobias, Jesús María Pinar Pérez, and Mayorkinos Papaefias. 2012. Condition monitoring of wind turbines: Techniques and methods. *Renewable Energy* 46 (2012), 169–178.
11. Sule Selcuk. 2017. Predictive maintenance, its implementation and latest trends. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 231, 9 (2017), 1670–1679.
12. Samir Khan and Takehisa Yairi. 2018. A review on the application of deep learning in system health management. *Mechanical Systems and Signal Processing* 107 (2018), 241–265.
13. Weiting Zhang, Dong Yang, and Hongchao Wang. 2019. Data-Driven Methods for Predictive Maintenance of Industrial Equipment: A Survey. *IEEE Systems Journal* 13, 3 (2019), 2213–2227.
14. Mikel Canizo, Enrique Onieva, Angel Conde, Santiago Charramendieta, and Salvador Trujillo. 2017. Real-time predictive maintenance for wind turbines using Big Data frameworks. In 2017 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management, ICPHM 2017. 70–77.
15. Claudio Passarella. 2018. Failure modes and effects analysis. *Control* 31, 10 (2018), 72–73.
16. Raji Murugan and Raju Ramasamy. 2015. Failure analysis of power transformer for effective maintenance planning in electric utilities. *Engineering Failure Analysis* 55 (2015), 182–192.
17. Partha Adhikari, Harsha Gururaja Rao, and Dipl.-Ing Matthias Buderath. 2018. Machine Learning based Data Driven Diagnostics & Prognostics Framework for Aircraft Predictive Maintenance. 10th International Symposium on NDT in Aerospace, October 24-26, 2018, Dresden, Germany MI (2018), 1–15.
18. Zhenyu Wu, Hao Luo, Yunong Yang, Xinning Zhu, and Xiaofeng Qiu. 2018. An unsupervised degradation estimation framework for diagnostics and prognostics in cyber-physical system. In *IEEE World Forum on Internet of Things, WF-IoT 2018 - Proceedings*, Vol. 2018-January. 784–789.
19. Zhongju Zhang and Pengzhu Zhang. 2015. Seeing around the corner: an analytic approach for predictive maintenance using sensor data. *Journal of Management Analytics* 2, 4 (2015), 333–350.
20. Wlamir Olivares Loesch Vianna and Takashi Yoneyama. 2018. Predictive Maintenance Optimization for Aircraft Redundant Systems Subjected to Multiple Wear Profiles. *IEEE Systems Journal* 12, 2 (2018), 1170–1181.
21. Mona Khatami Rad, Mohammadsan Torabizadeh, and Amin Noshadi. 2011. Artificial neural network-based fault diagnostics of an electric motor using vibration monitoring. In *Proceedings 2011 International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering, TMEE 2011*. IEEE, 1512–1516.
22. Dongjin Lee. 2019. Evaluating reliability of complex systems for Predictive maintenance.
23. Clemens Gutsch, Nikolaus Furian, Josef Suschnigg, Dietmar Neubacher, and Siegfried Voessner. 2019. Log-based predictive maintenance in discrete parts manufacturing. *Procedia CIRP* 79 (2019), 528–533.
24. Samira Pouyanfar, Saad Sadiq, Yilin Yan, Haiman Tian, Yudong Tao, Maria Presa Reyes, Mei Ling Shyu, Shu Ching Chen, and S. S. Iyengar. 2018. A survey on deep learning: Algorithms, techniques, and applications. *Comput. Surveys* 51, 5 (2018), 92.

## Temchur V.S., Bahan T.H. PREDICTIVE MAINTENANCE TECHNIQUES USING DEEP LEARNING ALGORITHMS

*Given the growing number of industrial facilities, as well as the amount of data being collected from various equipment around the world, deep learning solutions have become popular for predictive maintenance that track assets to optimize maintenance tasks. Today, predictive maintenance is becoming the most priority method of maintenance, as it allows you to significantly increase the overall efficiency of the equipment. Choosing the most appropriate architecture for each use case is difficult given the number of examples used in similar studies. The article aims to facilitate this task by reviewing state-of-the-art deep learning architectures and how they integrate with predictive maintenance phases to meet the requirements of industrial companies. This makes it possible to detect anomalies, analyze the root causes, and estimate the remaining service life.*

*The article describes the methodology for evaluating the use of deep learning models in predictive maintenance. It provides an overview and explanation of the most relevant data-driven techniques, with a focus on state-of-the-art deep learning architectures applied to predictive maintenance. This provides an overview of the available methods in a simplified and structured form. The suitability of deep learning models for predictive maintenance is investigated and their advantages and disadvantages are compared with statistical and classical machine learning models. Current trends in predictive maintenance publications are analyzed, gaps are identified, research challenges are presented, and opportunities and perspectives for future research are identified.*

*First, an overview of the context and different applications of predictive maintenance is performed. This is followed by a thorough study of different types of predictive maintenance models. A comprehensive analysis of data-driven models was also performed. Finally, a detailed overview of deep learning models is implemented. This approach allowed for a holistic understanding of the scope before delving into specific areas of research.*

**Key words:** predictive maintenance, deep learning, data-driven models, artificial neural networks, network architecture.

UDC 004.05

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/24>

**Yue Zheng**

Yancheng Polytechnic College, Yancheng, China

**Robotko S.P.**

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

**Chenjian Dong**

School of Automobile and Transportation, Yancheng Polytechnic College, Yancheng, China

**Jianjun Wang**

Yunzhou (Yancheng) Innovation Technology Co., Ltd, China

**Ravliuk V.V.**

Bohdan Khmelnytskyi National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine

**Topalov A.M.**

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

## CLOUD-BASED GPS SIGNAL PROCESSING OF THE DRONE USING RASPBERRY PI AND PIXHAWK 6C FLIGHT CONTROLLER

*Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are rapidly evolving, finding applications across various sectors like aerial photography, agricultural monitoring, and scientific research. Central to their functionality is the precision and reliability of GPS data, crucial for accurate navigation and task execution. This article focuses on integrating two renowned hardware components – the Pixhawk 6C flight controller and the Raspberry Pi Zero W computer – for the efficient acquisition and transmission of GPS data to the Amazon Cloud environment. Emphasizing real-time data handling, this system notably enhances UAV capabilities in both scientific and commercial projects. The Pixhawk 6C is renowned for its robustness, managing different UAV types with ease, while the Raspberry Pi Zero W, despite its compact size, efficiently processes and transmits the GPS data. This combination not only ensures precise UAV positioning but also optimizes cost by reducing the need for extensive onboard processing capabilities. The utilization of Amazon Cloud for data storage and processing provides a scalable, secure, and accessible environment, crucial for analyzing flight patterns and environmental data effectively. This setup enables real-time monitoring and control of UAVs, significantly improving their operational safety and efficacy. Furthermore, this integration opens up new possibilities for advanced UAV applications. By leveraging cloud computing, it allows for more complex data analytics and machine learning algorithms to be applied to the GPS data, offering insights that can improve flight paths and operational strategies. This system's architecture, combining reliable hardware with advanced cloud-based capabilities, signifies a major step forward in UAV technology, enhancing their application in increasingly sophisticated and demanding environments.*

**Key words:** cloud data processing, GPS telemetry, mini-computer, unmanned aerial Vehicles, controller.

**Formulation of the problem.** The technological development of robotics in recent years has led to the widespread use of mobile robots and unmanned aerial vehicles (UAVs). Among the main development trends, we should highlight: intelligent technologies, big data processing, energy saving, hardware and software, etc. [1–3]. UAVs are actively used in various fields: from commercial tasks, such as delivery of goods and aerial photography, to specific scientific research and environmental monitoring. The basis of UAVs' success lies in their reliability, autonomy, and

precision in navigation, where GPS systems play a significant role. GPS data are a key element for UAVs, as they ensure the accuracy of flights, navigation safety, and efficiency in task execution. However, with the increasing amount of data comes the need for their rapid processing, analysis, and storage.

UAVs have experienced a sharp decrease in cost and improvements in technical aspects in recent years, significantly expanding their application in various fields of activity. However, regardless of the tasks set for UAVs – from simple photography to complex

scientific missions – the accuracy and reliability of their movement remain paramount. The core of such accuracy is Global Positioning Systems (GPS). In this context, with the constantly increasing volume of data and the need for their processing, traditional storage and processing systems may not meet modern requirements. This has led to the need for the use of new technologies, in particular, cloud solutions for data storage and processing.

#### Analysis of recent research and publications.

A review of the literature demonstrates the activity of researchers in this area. In the work [4] by Masataka Kan and his colleagues “Development of Drone Capable of Autonomous Flight Using GPS”, the experience of creating an experimental UAV capable of autonomous flight using Raspberry Pi 2.0 (Model B) for flight control and a GPS sensor on AR.Drone 2.0 was studied. The authors conducted GPS calibration by measuring the deviation between the position where the GPS sensor was installed and the data collected using GPS. The experimental UAV was able to autonomously fly according to planned routes, demonstrating the potential and importance of further research in this area. A significant contribution to the field of autonomous Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) was made in the article [5] "VAGADRONE: Intelligent and Fully Automatic Drone Based on Raspberry Pi and Android" by authors Saifeddine Benhadhria, Mohamed Mansouri, Ameni Benkhelifa, Imed Gharbi, and Nadhem Jlili. In this research, the authors discuss the creation of an intelligent and fully autonomous UAV based on Raspberry Pi and Android. Considerable attention in the article is given to how to ensure autonomy and intelligence in UAVs. The use of the Android operating system allows for the integration of a large number of applications that can be used directly by UAVs depending on the context of the mission. This opens up opportunities for the implementation of tasks such as object identification, facial recognition, and counting of objects (e.g., signs, people, etc.).

The literature sources listed propose numerous solutions for managing UAVs, but the combination of Pixhawk 6C with Raspberry Pi Zero W opens new possibilities for efficient collection, processing, and transmission of GPS data to cloud services. This not only allows for the optimization of local system resources but also provides access to data from any point in the world, using cloud resources for their analysis and processing. Thus, the integration of hardware components with cloud technologies in the context of UAVs is a relevant topic for research. It opens new horizons for improving the efficiency,

safety, and flexibility of UAV-based systems, and provides a wide range of possibilities for commercial, scientific, and personal applications.

**The goal of this work** is the development of an approach for wireless transmission of GPS data from an unmanned aerial vehicle to a cloud environment in real time.

#### Presentation of the main research material.

In this case, integration of the Pixhawk 6C flight controller, popular in the UAV community, with the Raspberry Pi Zero W mini-computer for processing and transmitting GPS data (Fig. 1) is implemented. The central aspect of the study will be the use of cloud technologies, specifically Amazon Cloud, for storage, analysis, and real-time reproduction of these data. This combination of technologies has the potential to change the approach to data processing and analysis in the UAV field, making this process more efficient, flexible, and accessible.

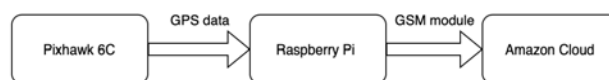


Fig. 1. Functional structure of the system

*Flight controller: Pixhawk 6C:* Pixhawk 6C is one of the latest models in the Pixhawk flight controller line, known for its reliability, flexibility, and openness. This controller provides advanced capabilities for managing various types of [6, 7] UAVs, including quadcopters, fixed-wing, and many others. Main features:

- Processor: H7 microcontroller (480 MHz) with high performance, ensuring fast data processing and response to commands.
- Interfaces: A set of ports for connecting various sensors, including GPS, gyroscopes, accelerometers, etc.
- External appearance: Compact size and light weight, making it ideal for use in various UAV configurations.

*M8N GPS:* The M8N GPS from Holybro is a high-quality GPS module that offers high precision positioning and reliability. This module provides rapid positioning and can operate in various conditions, including high-altitude and urbanized areas.

Main features:

- Accuracy: High positioning accuracy thanks to simultaneous data reception from various satellite systems.
- Compatibility: Direct compatibility with Pixhawk controllers, ensuring easy connection and integration.

*Raspberry Pi Zero W:* Raspberry Pi Zero W [8] is one of the most compact versions of the popular

Raspberry Pi single-board computer line. Despite its small size, it offers enough power for processing and transmitting GPS data.

Main features:

- Processor: ARM core that provides sufficient performance for data processing.
- Wireless Connection: Built-in Wi-Fi module, allowing for data transmission to the cloud or other devices.
- Interfaces: Multiple ports for connecting a variety of equipment, including USB, GPIO, etc. The fusion of Pixhawk 6C capabilities with the power of Raspberry Pi Zero W creates an efficient solution for collecting, processing, and transmitting GPS data in real-time.

*Cloud environment:* Cloud technologies have become an essential tool in the modern world for storing, processing, and analyzing large volumes of data. Thanks to their flexibility, scalability, and global accessibility, cloud platforms provide an ideal solution for working with UAV data.

Amazon Web Services (AWS) is one of the largest and most popular cloud platforms on the market. AWS offers a wide range of services, among which:

- Amazon S3: Object storage that can be used for storing large volumes of GPS data. S3 provides high availability, long-term storage, and easy access to data from any point in the world.
- Amazon EC2: Virtual servers that can be customized for specific needs. EC2 can be used for real-time processing of GPS data, running analysis algorithms, and other tasks.
- AWS Lambda: Serverless computing service that allows automatically running code in response to certain events, such as uploading new data to S3.
- Amazon RDS: Relational database in the cloud that can be used for structured storage and querying of GPS data. Using AWS for processing GPS data from UAVs offers numerous advantages, such as flexibility, scalability, reliability, and global accessibility. AWS also provides a wide range of tools for security, analysis, and optimization, making it an ideal choice for such tasks.

Connecting the Pixhawk 6C to the Raspberry Pi is a key step in creating an efficient system for collecting and transmitting GPS data to the cloud. This connection (Fig. 2) allows the Raspberry Pi to receive real-time data from the Pixhawk, process it, and transmit it to the cloud environment.

Physical connection:

1. UART connection: The simplest way to connect the Pixhawk to the Raspberry Pi is through UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter). The Pixhawk has several UART ports that can be used for

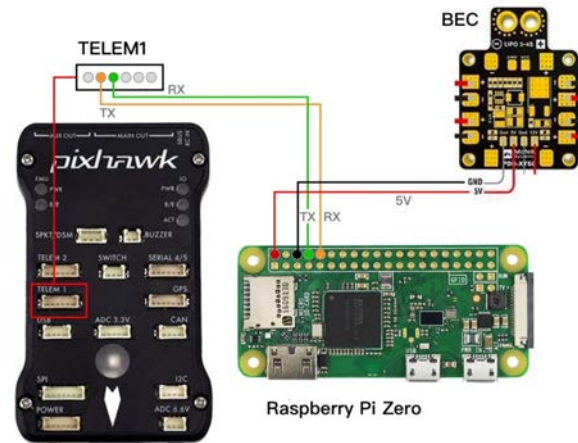


Fig. 2. Connecting the flight controller to the Raspberry Pi

this connection. Specifically, the TELEM1/2 port is commonly used for such tasks.

2. Power supply: This is an important point. The Raspberry Pi and Pixhawk must be connected to a power source that can provide sufficient power to both devices.

*Software setup:*

1. MAVLink protocol: The Pixhawk uses the MAVLink protocol for communication. To enable the Raspberry Pi to understand and interpret these data, an appropriate library (e.g., pymavlink) should be installed on it.

2. Pixhawk configuration: Using QGroundControl or another GCS (Ground Control Station), the Pixhawk can be configured to transmit the required data to the Raspberry Pi.

3. Data processing on Raspberry Pi: After receiving data from the Pixhawk, the Raspberry Pi can process this data (e.g., filtering, converting formats) before transmitting it to the cloud. The connection of Pixhawk 6C with Raspberry Pi forms the basis for creating a powerful system for collecting and transmitting GPS data. During this process, it is important to pay attention to the correct settings to ensure the stability and reliability of the system.

*3G Modem Huawei E173:* The Huawei E173 3G modem is a portable USB modem that provides connectivity to third-generation (3G) networks. It is part of the widely known Huawei product series aimed at providing mobile internet connectivity for various devices. Main features:

- Frequency range: The Huawei E173 supports various frequency bands, allowing it to work in many networks around the world.
- Data: The modem supports data transmission speeds of up to 7.2 Mbps for download and up to 5.76 Mbps for upload.

- **Connection:** The device connects via a standard USB interface, making it compatible with a large number of devices, including the Raspberry Pi. Using with Raspberry Pi: Thanks to the USB interface, the Huawei E173 modem can be easily connected to the Raspberry Pi. After installing the necessary drivers and configuring network settings, the Raspberry Pi can use the modem for instant data transmission to the cloud or for receiving data from the Internet.

Thus, adding the 3G Huawei E173 modem to the system not only provides instant Internet access in various locations without a stationary connection but also expands the system's capabilities, allowing for more complex real-time data scenarios.

To receive data from the M8N GPS module, it first passes through the Pixhawk 6C controller, where preliminary processing or filtering can occur. After that, the Raspberry Pi reads these data through the established connection. At this stage, the 3G Huawei E173 modem comes into play: the collected GPS data [9] can be instantly transmitted through mobile internet to the cloud environment thanks to this modem. This is particularly useful in situations where it is necessary to quickly transmit data to the cloud or when the device is in motion and does not have access to stationary networks. Once successfully transmitted to the cloud, the data are stored on services such as Amazon S3, where they can be further processed, analyzed, or used in other applications. The advantage of such a configuration is the instant data transmission provided by the 3G modem, which allows for almost real-time updating of information in the cloud and ensures the reliability of data transmission even in unstable connection conditions.

#### *Receiving GPS data:*

1. **Processing on Raspberry Pi:** The data received from Pixhawk through the MAVLink protocol are converted into a format convenient for further processing. For example, the data can be transformed into JSON or another standard format.

2. **Data buffering:** Raspberry Pi can use its built-in memory for temporary data storage before sending it to the cloud. This is useful in cases where the internet connection may be unstable.

#### *Transmitting data to the cloud:*

1. **Using API:** Most cloud platforms, including AWS, provide APIs for uploading data. Raspberry Pi can use these APIs to automatically transmit GPS data to the appropriate cloud storage.

2. **Encryption:** To ensure data security during transmission to the cloud, it is recommended to use encryption.

#### *Storing data in the cloud:*

1. **Amazon S3:** Amazon S3 can be used to store large volumes of GPS data. It is a reliable and scalable solution that allows easy storage, retrieval, and access to your data.

2. **Storage optimization:** Using cloud services such as AWS Lambda, processes of compression, archiving, and deletion of old data can be automated to optimize storage costs.

Receiving and storing GPS data in the cloud not only makes the processes of working with these data more efficient but also provides an additional level of security, accessibility, and reliability compared to traditional methods of storage on local servers or devices. In the event of unexpected hardware failure of the UAV, the collected data will be preserved for further use or analysis of the cause of the malfunction.

GPS data received from the controller are stored in the cloud database in the table "gps\_telemetry" (Fig. 3). This table has the following structure:

1. **id:** A unique identifier for each entry. Typically, this is an auto-incrementing value that aids in managing and referencing records in the table.

2. **coordinates:** A geometric data type representing a point on the map with specified longitude and latitude coordinates. For example, an entry like "POINT(40.964775369364396 -99.88747515830926)" indicates a specific geographic location.

3. **temperature:** The temperature value at the specified location. This is a real number that indicates the temperature conditions at the GPS module's location at the time of data retrieval. For example, "29.23097597363496" indicates a temperature of 29.23°C.

4. **time:** Reflects the exact time of each coordinate's storage.

With this table structure, telemetric data received from the controller can be efficiently stored and managed. Each record in the table represents a separate set of GPS data, containing information about location and temperature conditions, which can be expanded and supplemented with data from any sensors and additional devices.

This study is financially supported by the National High Level Foreign Experts Introduction Project, China (G2022014116L).

**Conclusions.** At the current stage of technological development, real-time processing and transmission of GPS data are gaining increasing significance, especially in the context of autonomous systems, monitoring, and remote control of objects. The use of a combination of Pixhawk 6C controller, M8N

coordinates_text	temperature	time
POINT(40.964775369364396 -99.88747515830926)	29.23097597363496	2023-08-21 15:06:10
POINT(40.964324832374835 -99.88766344796434)	29.14113869764017	2023-08-21 15:06:10
POINT(40.96394051499084 -99.8878155230256)	29.033715574102214	2023-08-21 15:06:10
POINT(40.96435962458763 -99.88789770564027)	28.865473741074535	2023-08-21 15:06:10
POINT(40.964264963297246 -99.88836628656236)	29.306553032534712	2023-08-21 15:06:10
POINT(40.964376102551526 -99.8886338281346)	29.13542743924579	2023-08-21 15:06:10
POINT(40.96482309933252 -99.88838546741903)	29.536240704857036	2023-08-21 15:06:10
POINT(40.96458208354459 -99.88829298612477)	29.221694570706873	2023-08-21 15:06:10
POINT(40.96423190902177 -99.88860022030568)	29.236047265339685	2023-08-21 15:06:10
POINT(40.9647253750684 -99.88867594812568)	28.877010056168782	2023-08-21 15:06:10
POINT(40.96465737251328 -99.88843884924302)	28.766512165559934	2023-08-21 15:06:10
POINT(40.96489358644298 -99.88842628589192)	28.620687162616	2023-08-21 15:06:10
POINT(40.96462677140573 -99.88882288603861)	28.938131571689745	2023-08-21 15:06:10
POINT(40.96490379392188 -99.88889010665436)	29.270960975225048	2023-08-21 15:06:10
POINT(40.965269602817536 -99.88855955035591)	29.326315811207813	2023-08-21 15:06:10
POINT(40.96505470813283 -99.88830008825661)	29.768310392525336	2023-08-21 15:06:10
POINT(40.96498629477226 -99.88846813877271)	29.633297924542145	2023-08-21 15:06:10
POINT(40.96531538401134 -99.88891765514262)	29.898448388463304	2023-08-21 15:06:10
POINT(40.96548968547142 -99.88934159920325)	29.75582373585163	2023-08-21 15:06:10
POINT(40.96554839442095 -99.889120180467)	30.186790599196023	2023-08-21 15:06:10
POINT(40.96553897255967 -99.88896019033267)	30.515006885412156	2023-08-21 15:06:10
POINT(40.96553897255967 -99.88896019033267)	30.515006885412156	2023-08-21 15:06:10

Fig. 3. Part of the data stored in the cloud

GPS module, Raspberry Pi Zero W, and Huawei E173 3G modem indicates new possibilities in this field. Integration of Equipment: The combination of these components not only allows for the collection and transmission of GPS data but also creates a platform for more complex data operations, such as processing, filtering, and real-time analysis. Instant Data Transmission: The Huawei E173 3G modem ensures the speed and reliability of data transmission. In situations where connectivity is critically important, this component can be a solution to ensure system stability. Cloud Storage: The advantages of cloud technologies have long been evident in many industries. In the context of GPS data, Amazon Cloud offers reliable and fast solutions for their storage, as well as for subsequent access and processing from anywhere in the world. Structured Storage: The

detailed structure of the “gps\_telemetry” table simplifies the process of data analysis and interpretation. The orderly and systematic organization of information always contributes to its more qualitative use. System Flexibility: Thanks to its modular structure, the system can be easily adapted or modified for different tasks. This can include adding new equipment, integrating with other systems, or adapting to new tasks. Data Security: The use of cloud technologies also provides an additional level of security. Automatic backup, data encryption, and secure transmission protocols ensure that the collected information will be protected from loss or damage. Considering these aspects, it becomes clear that the combination of these technologies creates an advanced platform for processing and transmitting GPS data. Such a system is not only efficient but also has the potential for further expansion and modernization in the future.

#### Bibliography:

1. Wang J., Dong C., Wang K., Chen Z., Xie R., Zhu W., Susak O., Povorozniuk O., Topalov A. Microprocessor system for monitoring the energy consumption of mobile robot servo motors. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2022. № 3–4 (59). P. 70–80.
2. Wang J., Dong C., Wang K., Chen Z., Xie R., Zhu W., Topalov A., Povorozniuk O. Software analysis for mobile robots control programs. Management of Development of Complex Systems, 2023, 53, p. 111–119.
3. Dong C., Povorozniuk O., Topalov A., Wang K., Chen Z. Development of the control system for LEGO Mindstorms EV3 mobile robot based on MATLAB/Simulink elements. Technology audit and production reserves 2023. Vol. 1 No. 2(69) Information and control systems, p. 30–35.
4. Топалов, А.М., Поворознюк, О.С., Роботько, С.П. Технічна реалізація мікропроцесорної системи контролю енергоспоживання серводвигунів мобільного робота. Всеукраїнська науково-технічна конф. «Сучасні проблеми автоматики та електротехніки». Миколаїв: НУК, 2023, с. 20–21.

5. Kan M., Okamoto S., Lee J. H. Development of Drone Capable of Autonomous Flight Using GPS, Proc. of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, 2018, Vol II, p. 665–669.
6. Benhadhria S., Mansouri M., Benkhelifa A., Gharbi I., Jlili N. VAGADRONE: Intelligent and Fully Automatic Drone Based on Raspberry Pi and Android. Appl. Sci. 2021, 11, 3153, p. 1–15.
7. Chamayou G., A theory of the drone. –New York, London, The New Press, 2015. P. 305.
8. Derek Molloy. Exploring Raspberry Pi: Interfacing to the Real World with Embedded Linux 1st Edition. Wiley. 2016, p. 720.
9. Jacobson L. Flying For GPS, Xlibris, 2014. P. 172.

**Чженг Ю., Роботько С.П., Донг Ч., Ванг Ц., Равлюк В.В., Топалов А.М.  
ОБРОБКА GPS СИГНАЛІВ ДРОНУ У ХМАРНОМУ СЕРЕДОВИЩІ  
ЗА ДОПОМОГОЮ RASPBERRY PI ТА ПОЛІТНОГО КОНТРОЛЕРУ PIXHAWK 6C**

*Безпілотні літальні апарати (БЛА) стрімко розвиваються, знаходячи застосування в різних секторах, таких як аерофотозйомка, моніторинг сільського господарства та наукові дослідження. Основним для їх функціональності є точність та надійність GPS-даних, що є критичними для точної навігації та виконання завдань. Ця стаття зосереджується на інтеграції двох відомих апаратних компонентів – контролера польоту Pixhawk 6C та комп'ютера Raspberry Pi Zero W – для ефективного збору та передачі GPS-даних у середовище Amazon Cloud. З акцентом на обробці даних у реальному часі, ця система значно покращує можливості БЛА в наукових та комерційних проєктах. Pixhawk 6C відомий своєю надійністю, легко керуючи різними типами БЛА, в той час як Raspberry Pi Zero W, незважаючи на свій компактний розмір, ефективно обробляє та передає GPS-дані. Це поєднання не лише забезпечує точне позиціонування БЛА, але й оптимізує витрати, зменшуючи потребу у великих обчислювальних потужностях на борту. Використання Amazon Cloud для зберігання та обробки даних забезпечує масштабоване, безпечне та доступне середовище, що є важливим для ефективного аналізу польотних шляхів та екологічних даних. Це налаштування дозволяє проводити моніторинг та керування БЛА у реальному часі, значно покращуючи їхню оперативну безпеку та ефективність. Крім того, ця інтеграція відкриває нові можливості для розширеного використання БЛА. Використовуючи обчислення в хмарі, вона дозволяє застосовувати більш складні алгоритми аналітики даних та машинного навчання до GPS-даних, надаючи інсайти, які можуть покращити польотні шляхи та оперативні стратегії. Архітектура цієї системи, що поєднує надійне апаратне забезпечення з передовими хмарними можливостями, є важливим кроком уперед у технології БЛА, підвищуючи їх застосування в все більш складних та вимогливих умовах.*

**Ключові слова:** хмарна обробка даних, GPS-телеметрія, міні-комп'ютер, безпілотні літальні апарати, контролер.



**Chumachenko S.M.**

Tawrijski Uniwersytet Narodowy im. Władimira Wiernadskiego

**Popel V.A.**

Państwowy Instytut Badawczego Technologii Cyberbezpieczeństwa i Ochrony Informacji

## UZASADNIENIE NAUKOWE METOD WYKORZYSTYWANIA BEZZAŁOGOWYCH KOMPLEKSÓW LOTNICZYCH W ZAPOBIEGANIU SYTUACJI AWARYJNEJ

*В останні роки істотного значення набуло використання безпілотних літальних апаратів та пов'язаних з ними технологій для подолання наслідків техногенних аварій, катастроф, терористичних актів на об'єктах критичної інфраструктури. Безпілотні літальні апарати широко застосовуються для розвідки обстановки на об'єктах, пошуку постраждалих, визначення збитків, виявлення пожеж, руйнувань, мін, а також інших додаткових факторів та загроз, що мають значення для вибору способів подолання наслідків надзвичайних подій, визначення необхідних сил та засобів, оптимізації витрат у разі ліквідації наслідків аварій на об'єктах критичної інфраструктури. Мета цієї публікації – дослідити вплив якості управління безпілотним літальним апаратом на загальну ефективність виконання ним поставленого завдання. Оцінка ефективності виконується з використанням математичного апарату нечітких множин. Цей математичний апарат дозволяє формалізувати експертні оцінки, що застосовуються для формування безлічі критеріїв, що використовуються для оцінки безлічі параметрів реалізованої задачі, на основі яких визначається інтегральний (консолідований) критерій, який може використовуватися для оцінки ефективності виконання поставлених завдань. На основі вибору та оцінки безлічі критеріїв може бути побудована функція корисності. Така функція може бути побудована на основі методу ієрархічного аналізу (МІА), який є математичним підходом до прийняття рішень і може бути використаний для визначення максимуму корисності. Застосування методу, розглянутого у статті, дозволяє розробляти стратегії використання безпілотних літальних апаратів для багатьох практичних завдань, які враховують витрати на задіяння сил і засобів при виконанні практичних завдань та дозволяють максимізувати ефективність їх виконання.*

**Ключові слова:** критична інфраструктура, ефективність, рівень результативності, управління ризиками, безпілотний літальний апарат, автоматизація, критерій, ваговий коефіцієнт, модель.

1. Znaczenie zarządzania kompleksami bezzałogowych statków powietrznych

Znaczenie zagadnień zarządzania bezzałogowymi systemami statków powietrznych w celu zapewnienia operacyjnego pokrycia przestrzenno-czasowego dużych obszarów podczas monitorowania parametrów środowiskowych w kontekście zapobiegania wypadkom (ES). Po pierwsze wynika to z ograniczonych możliwości pokrycia sieci sensorowej, a po drugie z konieczności ciągłej koordynacji działań zespołów poszukiwawczo-ratowniczych, ratowników indywidualnych oraz bezzałogowych systemów latających (UAV) [1, 2].

Problem trwałego zapewnienia zarządzania i przekazywania użytecznych informacji z bezprzewodowych sieci sensorowych podczas działań prewencyjnych przez jednostki Państwowego Pogotowia Ratunkowego wymaga naukowego uzasadnienia struktury i elementów funkcjonalnych

bazy ich organizacji dla różnych wariantów kompleksowego zastosowania BPAK i WSS. Dziś poświęca się temu problemowi znaczną uwagę w związku ze znaczną liczbą sytuacji kryzysowych na obszarze działania Sił Zjednoczonych.

Zapewnienie stabilności i łączności zarządzania wymaga wdrożenia BSM, z uwzględnieniem w każdym konkretnym przypadku możliwości wykorzystania BSP Państwowego Pogotowia Ratunkowego. Jeśli rozważymy bardziej szczegółowo możliwe opcje kompleksowego zastosowania BPAK, to w zależności od scenariusza rozwoju sytuacji konieczne jest wdrożenie określonych środków telekomunikacji i zarządzania operacyjnego jednostkami Państwowego Pogotowia Ratunkowego.

Aby wybrać alternatywną wersję systemu sterowania UAV, konieczne jest przeprowadzenie ich ekspertyzy. Jednym ze sprawdzonych podejść przy wyborze rozwiązań alternatywnych jest zastosowanie

metody analizy hierarchii. W zagranicznej i krajowej literaturze naukowej znajdują się odniesienia do przykładów zastosowania tej metody w różnych dziedzinach nauki i techniki.

2. Zadanie wielokryterialnej oceny charakterystyk użytkowych UAV

Rozważmy zadanie oceny wielokryterialnej, gdy czynniki i cechy oceny są podane niejasno, ale dla których funkcja użyteczności kryterium integralnego jest wyraźnie podana.

Do rozwiązania zadania oceny należy określić i zmaksymalizować funkcję użyteczności kryterium całkowego dla rozważanych obiektów oceny:

$$\max \{U(z_1, z_2, \dots, z_k)\},$$

gdzie  $z_i = f_i(y \in S)$ ,  $i = 1 \dots k$  jest złożeniem wektora kryteriów,  $S$  jest zbiorem dopuszczalnych oszacowań.

Głównymi trudnościami, które pojawiają się przy rozwiązywaniu zadania, jest problem uzyskania matematycznego opisu funkcji użyteczności  $U$  kryterium całkowego. W teorii użyteczności funkcja użyteczności  $U$  jest rozważana i obliczana jako wartość prawdopodobieństwa, jednak dla wielu złożonych niesformalizowanych zadań oszacowanie wielowymiarowego rozkładu prawdopodobieństwa jest bardzo trudne, a nawet niewykonalne.

Funkcję użyteczności będziemy traktować nie jako wartość probabilistyczną, ale jako wartość rozmytą, a funkcje przynależności zbiorów rozmytych uważane są za subiektywne pomiary ekspertów.

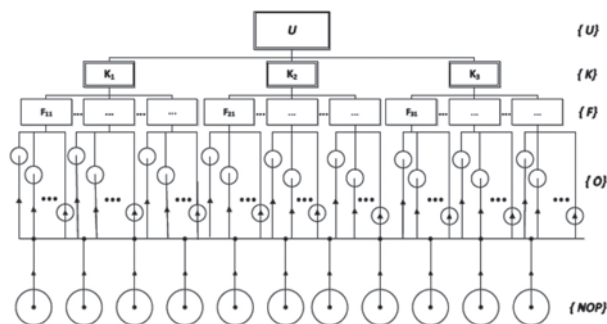
wielokryterialnej można przedstawić w formie hierarchicznej dekompozycji (rys. 1), gdzie zbiór kryteriów oceny to  $\{K\}$ , zbiór czynników oceny to  $\{F\}$ , zbiór cech oceny to  $\{O\}$ , a zbiór obiektów oceny to  $\{NOP\}$ .

Jeżeli kryterium integralne (cel oceny) wydaje się zbyt złożone, można je przedstawić w postaci hierarchii prostszych kryteriów podrzędnych.

Elementy hierarchii, czyli czynniki oceny i jej cechy oceny są zbiorami rozmytymi.

Metoda analizy hierarchii (MAH), będąca metodą rozwiązywania problemów wielokryterialnych w złożonym środowisku ze strukturami hierarchicznymi zawierającymi elementy nieformalizowane [2], jest w tym przypadku wykorzystywana jako pośrednia metoda wyznaczania funkcji przynależności rozmytych zestawy.

Funkcje przynależności zbiorów rozmytych, które formalizują każde kryterium (złożone, przedstawione w formie hierarchii lub proste) są określone na zbiorach czynników i cech oceny, natomiast zbiory zdefiniowane są podstawowe dla zbiorów rozmytych kryteriów.



Rys. 1. Hierarchiczna dekompozycja zadania oceny eksperckiej

Na każdym poziomie mamy różne odrębne uporządkowane zbiory, które składają się z elementów rozmytych (jakościowych) i zdefiniowanych przez własną funkcję przynależności. Elementy każdego poziomu są rozmytymi podzbiorami dobrze uporządkowanego zbioru i są dokładnie zdefiniowane w tym kontekście.

Procedury oceny eksperckiej z wykorzystaniem rozmytej metody analizy hierarchii pozwalają na zwiększenie wiarygodności i jakości oceny eksperckiej alternatywnych opcji wykorzystania BSM przy prowadzeniu prac lotniczych w celu zapobiegania awariom.

3. Wymagania dotyczące sposobów zastosowania i charakterystyki ruchu UAV w profilaktyce i likwidacji awarii

W celu uzasadnienia podstawowych wymagań dotyczących sposobów stosowania i charakterystyki ruchu UAV podczas ostrzegania o sytuacjach awaryjnych (monitoring, rozpoznanie lotnicze), głównym zakresem ich zastosowania będzie:

- 1) badanie operacyjne dużych obszarów i długich odcinków powierzchni ziemi, wody, morza i lodu;
- 2) monitorowanie sieci gazowych i naftowych, kontrola stanu rurociągów naftowych i gazowych, wykrywanie nieszczelności, nieautoryzowanych cięć w celu zapobiegania awariom spowodowanym przez człowieka w liniowych obiektach dalekiego zasięgu;
- 3) monitorowanie ruchu, kontrola stanu torów kolejowych, autostrad i dróg gruntowych, węzłów komunikacyjnych, mostów i innych drogowych obiektów inżynierskich w celu zapobiegania awariom spowodowanym przez człowieka na obiektach liniowych dalekobieżnych;
- 4) badanie terytoriów w celu szybkiego ostrzegania o pożarach (leśnych i miejskich), ochrony lasów i kontroli strefy szelfowej w celu zapobiegania awariom spowodowanym przez człowieka na dużych płaskich obiektach;

5) kontrola stanu linii elektroenergetycznych w celu zapobiegania awariom spowodowanym przez człowieka na długich obiektach liniowych.

Na podstawie analizy możliwych obszarów zastosowania UAV można sformułować listę przewidywanych warunków eksploatacji UAV.

BSP powinien być używany:

- w prostych i trudnych warunkach atmosferycznych;

- w różnych regionach geograficznych i klimatycznych globu, nad powierzchnią lądu, wody i morza;

- w warunkach terenu górskiego o wysokości stoków o zmiennej stromości do 4,5 km i kącie nachylenia stoku do 30°;

- dzień, noc i zmierzch;

- w temperaturze od minus 40 do plus 50°C,

- o wilgotności powietrza do 98%;

- przy prędkości wiatru przy powierzchni ziemi do 15 m/sw dowolnym kierunku.

Na podstawie podanej liczby sposobów wykorzystania UAV do realizacji ewentualnych zadań UAV z zakresu działania Państwowego Pogotowia Ratunkowego w odniesieniu do zapobiegania wypadkom, sformułujemy sformalizowane warunki dotyczące wykazu obszarów zastosowania, obiektów obserwacji, zadania do rozwiązania, przy rozwiązywaniu których charakterystyka ruchu UAV będzie adekwatna do charakterystyk podczas efektywnej aplikacji (tab. 1).

Analiza materiałów przedstawionych w tabeli. 1 można określić (wybierając najtrudniejsze z punktu widzenia kształtowania podstawowych wymagań dotyczących charakterystyk ruchu) możliwe zadania UAV:

1) obserwacja na lądzie (w tym górzystym), powierzchni wody, morza i lodu na dużym

obszarze lub długości, poszukiwanie i wykrywanie obiektu, rozpoznawanie i precyzyjne wyznaczenie jego współrzędnych. Najważniejszym wskaźnikiem podczas obserwacji jest brak przerwy w obserwacji, a podczas przeszukiwania – brak nieobserwowanych („wypadłych”) obszarów powierzchni;

2) obserwację obiektów stacjonarnych w długim okresie czasu;

3) obserwację poruszających się obiektów z okresowym (w razie potrzeby) wyznaczaniem ich współrzędnych.

Najważniejszym wskaźnikiem przy rozwiązywaniu zadań określonych w punktach 2 i 3 jest brak przerwy w obserwacji obiektów.

Uzasadnimy wymagania dotyczące charakterystyk ruchu UAV dla hipotetycznych UAV, których podsystemy ładunku mają wymienione powyżej charakterystyki. Dodatkowo, uzasadniając wymagania dotyczące charakterystyki ruchu UAV, rozważymy prowadzenie monitoringu z pionowym położeniem osi optycznej sprzętu monitorującego, co zapewnia najlepszą jakość obrazu.

Rozważmy osobliwości wyboru optymalnych charakterystyk trasy i profilu lotu UAV podczas badań operacyjnych długich obszarów powierzchni ziemi, wody, morza i lodu.

Zgodnie z Tabelą 1 rozważymy sposoby wykorzystania UAV w badaniach operacyjnych długich obszarów powierzchni ziemi, wody, morza i lodu, które występują podczas badania terytoriów w celu operacyjnego ostrzegania przed pożarami (las i miejskich), ochrona lasów i kontrola strefy szelfowej w celu zapobiegania awariom natury sztucznej na dużych obiektach płaskich.

Tabela 1

Obszary zastosowania UAV

Zakres zastosowania	Rozwiązane zadania	Obiekty obserwacji
Operacyjne badanie długich obszarów lądu, wody, morza i lodu	obserwacja	duży obszar powierzchni lądowej, wodnej, morskiej i lodowej
Monitoring dużych przedsiębiorstw przemysłowych, stacji kolejowych, portów itp. Kontrola stanu obiektów technicznych (mosty, zapory, wieżowce telewizyjne, wieżowce itp.)	obserwacja precyzyjne wyznaczenie współrzędnych części składowej złożonego obiektu,	kompleksowy obiekt monitoringu
Stały i długoterminowy monitoring obiektów stacjonarnych (obiekt pod ochroną, kontrola nad wykonaniem złożonej operacji inżynierskiej itp. )	obserwacja precyzyjne wyznaczenie współrzędnych	skomplikowany przedmiot prosty (punktowy) obiekt
Ciągły i długoterminowy monitoring obiektów ruchomych (transport kolejowy, drogowy, rzeczny, morski itp.)	obserwacja eskorta, precyzyjne wyznaczenie współrzędnych, prędkości i kierunku ruchu	prosty obiekt



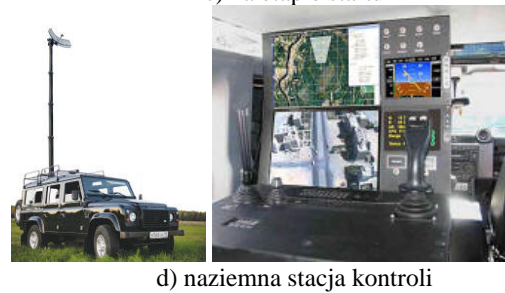
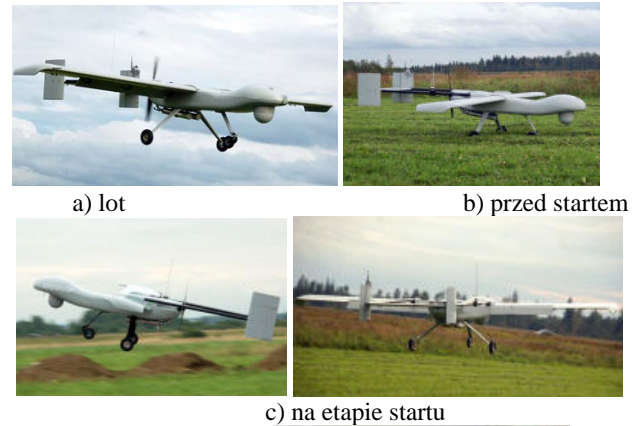
Rys. 2. UAV klasy 1

Klasa 2 – UAV typu samolotowego o masie startowej do 100 kg, 100 km/h silnikiem spalinowym mogą być wykorzystywane do monitorowania obiektów dalekiego zasięgu zgodnie z zasięgiem lotu takiego UAV. Kamera cyfrowa o wysokiej rozdzielczości lub kompleks fotogrametryczny, kamera termowizyjna, radiometr, analizator gazów są instalowane jako ładunek. Z obliczeń wynika, że wykorzystanie UAV klasy 2 może być najbardziej efektywne i ekonomicznie uzasadnione. UAV klasy 2 są zdolne do lotów trwających do 8–10 godzin, zapewniając do 100 000 zdjęć 500 km na lot. UAV o wadze do 100 kg są wystarczająco mobilne i kompaktowe oraz zdolne do szybkiej pracy bez specjalnej bazy lotniskowej z minimalnym zestawem infrastruktury naziemnej.

W celu prowadzenia działań monitoringu wizyjnego operator wstępnie planuje trasę lotu UAV, która uzależniona jest od przydzielonego zadania monitorowania danego obszaru i charakteru terenu. Za pomocą typowego algorytmu trybu obserwacji z powietrza obszaru terenu lub przeszukiwania obiektu, UAV jest kierowany na obszar monitorowania i leci tam zgodnie z programem ustawionym przez operatora. Podczas lotu w danym obszarze UAV w czasie rzeczywistym przesyła obrazy wideo obszaru i znajdujących się na nim obiektów do naziemnej stacji kontroli (GSC). Operator UAV ocenia napływające informacje, w razie potrzeby dostosowuje trasę lotu UAV i kontroluje pokładowe obciążenie docelowe (na przykład kamera wideo, kamera termowizyjna, kamera lotnicza lub inny ładunek).

Najważniejszą cechą nadzoru z wykorzystaniem UAV jest możliwość wielokrotnego powtarzania czynności na obiekcie lub jego poszczególnych elementach oraz uzyskanie obrazu wideo obiektu o określonej porze dnia.

Trasa lotu powinna być tak zaplanowana, aby zapewnić przegląd całego obszaru obserwacji roboczej (rys. 4).



Rys. 3. UAV klasy 2

#### 4. Zalecenia dotyczące budowy trasy lotu

Zalecenia dotyczące budowy trasy lotu:

1) jako punkty zwrotne zaleca się stosowanie charakterystycznych punktów lub liniowych punktów orientacyjnych, które nadają się do nawigacji w locie (zakręty, skrzyżowania dróg, pojedyncze budynki, drogi, granice lasów itp.);

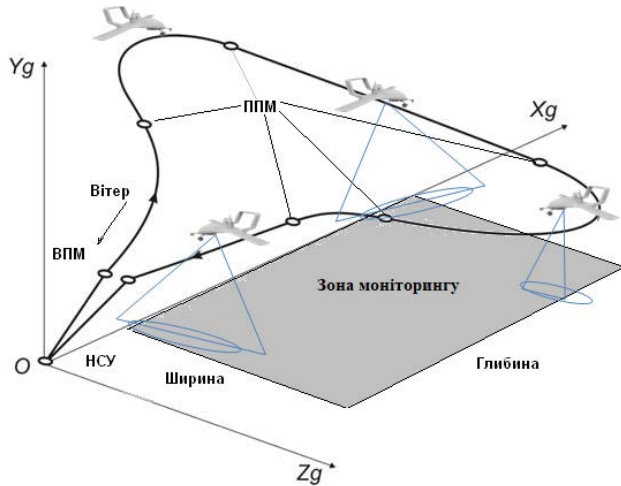
2) pierwszy punkt zwrotny trasy (punkt początkowy trasy (VPM) znajduje się obok punktu początkowego);

3) głębokość strefy pracy powinna mieścić się w granicach stabilnego odbioru sygnału wizyjnego i informacji telemetrycznych z UAV. (Głębokość strefy pracy to odległość od położenia anteny NSU do najbardziej odległego punktu zwrotnego na trasie. Strefa pracy to terytorium, na którym UAV wykonuje dany program lotu);

4) w miarę możliwości linie torowe nie powinny przebiegać w pobliżu linii elektroenergetycznych (linie elektroenergetyczne) dużej mocy oraz innych obiektów o wyższym poziomie promieniowania elektromagnetycznego niż w UAV (stacje radarowe, anteny odbiorcze -nadawcze itp.);

5) przewidywany czas lotu nie powinien przekraczać 2/3 maksymalnego czasu trwania deklarowanego przez producenta;

6) na start i lądowanie należy zapewnić co najmniej 10 minut czasu lotu.



Rys. 4. Schemat lotu UAV

Aby uzyskać ogólny przegląd terytorium, najbardziej odpowiednia jest zamknięta trasa okrężna. Główne zalety tej metody to pokrycie dużego obszaru, wydajność i szybkość monitoringu, możliwość badania trudno dostępnych obszarów terenu, stosunkowo proste planowanie zadania lotu oraz szybkie przetwarzanie otrzymanych wyników. Trasa lotu powinna zapewniać widok na cały obszar roboczy. W celu racjonalnego wykorzystania zasobów energetycznych UAV wskazane jest ułożenie trasy lotu z takimi obliczeniami, aby pierwsza połowa lotu UAV odbywała się pod wiatr.

Zdjęcia lotnicze terenów terenowych należy wykonywać rano i wieczorem, kiedy nie ma

wznoszących i opadających prądów powietrza wpływających na lot poziomy BSP.

Wnioski.

Biorąc pod uwagę kwestię praktycznego wykorzystania UAV, można wysnuć następujące wnioski:

- ekonomiczna opłacalność korzystania z BPAK wynika z łatwości obsługi, możliwości startu z dowolnego niezagospodarowanego miejsca, odmowy użycia materiałów paliwowych i smarnych, możliwości lądowania na dowolnym wybranym terytorium;

- kompleksy bezzałogowe są bezpieczne dla osób pracujących na ziemi w strefie przestrzeni powietrznej kompleksu;

- dowództwo operacyjne otrzymuje rzetelną informację wideo i fotograficzną, co pozwala na efektywne zarządzanie siłami oraz środkami lokalizacji i likwidacji sytuacji kryzysowych;

- możliwość przesyłania informacji wideo i zdjęć w czasie rzeczywistym oraz tworzenia map cyfrowych umożliwia szybkie wpływanie na zmiany sytuacji i podejmowanie właściwych decyzji zarządczych;

- możliwość ręcznego i automatycznego wykorzystania systemów bezzałogowych pozwala zwiększyć obszar działania do 50 kilometrów.

Dotychczasowy rozwój gamy modelowej bezzałogowych statków powietrznych pozwala wnioskować o możliwości ich wykorzystania przez organy zarządzania terenowego Państwowego Pogotowia Ratunkowego do prowadzenia rozpoznania stref zagrożenia, zwłaszcza w miejscach trudno dostępnych (nieдоступnych). promieniowanie i zanieczyszczenia chemiczne, silny dym, na duże odległości itp.).

#### Literatura:

1. Modele zastosowań technologii informacyjnych i telekomunikacyjnych opartych na bezzałogowych kompleksach powietrznych w sytuacjach awaryjnych [Tekst]: Mongr. / I. S. Romanchenko, O. I. Łysenko, S. M. Chumachenko. – K.: NAU, 2016. 335 s.

2. Saati T. Akceptacja rozwiązania. Metoda analizy hierarcha – M.: Radio i łączność, 1993. 320 s.

#### Chumachenko S.M., Popel V.A. SCIENTIFIC JUSTIFICATION OF THE METHODS OF USING UNMANNED COMPLEXES FOR PREVENTING EMERGENCY SITUATIONS

*In recent years, the use of unmanned aerial vehicles and related technologies to overcome the consequences of man-made accidents, catastrophes, and terrorist acts at critical infrastructure facilities has gained significant importance. Unmanned aerial vehicles are widely used for reconnaissance of the situation at objects, searching for victims, determining damage, detecting fires, destruction, mines, as well as other additional factors and threats that are important for choosing ways to overcome the consequences of emergency events, determining the necessary forces and means, cost optimization in case of liquidation of the consequences of accidents at critical infrastructure facilities. The purpose of this publication is to investigate the influence of the quality of control of an unmanned aerial vehicle on the overall effectiveness of its task performance. The evaluation of efficiency is performed using the mathematical apparatus of fuzzy sets. This mathematical apparatus allows you to formalize expert evaluations used to form a set of criteria used to evaluate a set of parameters of the implemented task, on the basis of which an integral (consolidated) criterion is determined, which can be*

*used to evaluate the effectiveness of the tasks. A utility function can be constructed based on the selection and evaluation of a set of criteria. Such a function can be constructed based on the Hierarchical Analysis (MIA) method, which is a mathematical approach to decision making and can be used to determine utility maximization. The application of the method discussed in the article makes it possible to develop strategies for the use of unmanned aerial vehicles for many practical tasks, which take into account the costs of using forces and means when performing practical tasks and allow to maximize the efficiency of their execution.*

**Key words:** *critical infrastructure, efficiency, level of effectiveness, risk management, unmanned aerial vehicle, automation, criterion, weighting factor, model.*

## ЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.577 : 697.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/26>

### **Безродний М.К.**

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

### **Тесленко О.І.**

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

### **Притула Н.О.**

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

### **Дерій В.О.**

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

### **Сліжевський К.Д.**

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

## ТЕХНІЧНІ БАР'ЄРИ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕПЛОНАСОСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У СИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

*Проаналізовано існуючий стан та перспективи впровадження теплових насосів у системах централізованого теплопостачання. Наведено світовий досвід використання відновлювальної енергії та прогнози трансформації паливно-енергетичного комплексу як у світі, так і Україні. Використання відновлювальних джерел енергії світова спільнота розглядає як один із найбільш перспективних шляхів вирішення зростаючих проблем енергозабезпечення. Відмічено важливість переходу до будівництва житла із системами відновлюваної енергії та технологіями з низьким вмістом вуглецю для забезпечення теплопостачання. Наведено економічно доступний енергетичний потенціал виробництва теплової енергії тепловими насосами в системах централізованого теплопостачання України від різних джерел низькопотенційної теплоти природного та антропогенного походження. Наведено класифікацію технічних бар'єрів. Технічні бар'єри для впровадження теплонасосних систем було поділено на чотири основні групи, які обумовлені технічними та технологічними особливостями складових даних систем, а саме: безпосередньо теплові насоси, джерела низькопотенційної теплоти, теплові та електричні мережі, а також умови споживання теплової енергії. Показано шляхи їх подолання для забезпечення широкого використання теплових насосів в Україні. Виконано порівняння теплонасосних схем опалення в оптимальних умовах їх роботи з традиційними системами (з водогрійними та конденсаційними котлами). Визначено, що впровадження теплонасосних систем теплопостачання за оптимальних умов їх використання є конкурентоспроможними порівняно не тільки з традиційними котельнями, а й з конденсаційними котлами. При використанні теплонасосними установками джерел низькопотенційної теплоти природного походження слід також враховувати перешкоди, які обумовлені розбіжністю добових та сезонних графіків теплових навантажень (споживання) теплової енергії і можливостей теплового насоса.*

**Ключові слова:** централізоване теплопостачання, тепловий насос, впровадження, бар'єри, джерела низькопотенційної теплоти.

**Постановка проблеми.** Енергія є джерелом життя сучасного суспільства. За останні десятиліття світове споживання енергії та пов'язані з ним викиди парникових газів (ПГ) швидко зросли через збільшення населення та потреби людей у комфорті. Опалення, вентиляція та кондиціонування складають значну частину кінцевого споживання енергії у світі, особливо в житловому секторі. Наприклад, на цей сектор припадає 39% та 40% споживання енергії та 38% та 36% викидів ПГ у США та Європі, відповідно [1]. Виникає актуальна задача знаходження нових джерел енергії та низьковуглецевих технологій їхнього використання. Основною метою вирішення цієї задачі є зменшення залежності від традиційних викопних паливних джерел енергії, поліпшення екологічної ситуації, стабільне постачання енергії та сприяння сталому розвитку країни [2].

Міжнародною агенцією з відновлювальної енергії (англ. The International Renewable Energy Agency – IRENA) прогнозується суттєва трансформація паливно-енергетичного комплексу (ПЕК) світу на періоди до 2030 р. та до 2050 р. у напрямі сталого розвитку людської цивілізації з всеохоплюючим залученням відновлювальних джерел енергії [3, 4]. В секторі теплопостачання вже відбувається революційне впровадження технологій четвертого та п'ятого поколінь, насамперед інноваційних теплонасосних (ТН) технологій з ефективним використанням низькопотенційної теплоти довкілля [5–8]. В країнах Європейського Союзу розроблена дорожня карта низьковуглецевого розвитку систем централізованого теплопостачання (СЦТ) до 2050 р. (HRE 2050), очікуваний результат якої показано на рис. 1 [9, 10]. Планується збільшення частки виробництва теплової енергії із використанням ТН до 24% від загального обсягу СЦТ Європи.

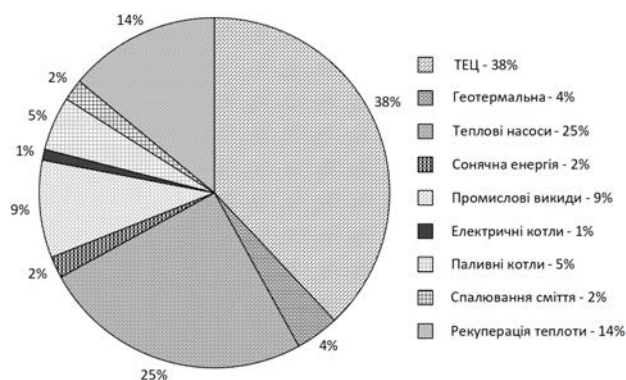


Рис. 1. Частки джерел централізованого теплопостачання в HRE 2050

Традиційні СЦТ, які притаманні для України, мають низьку енергетичну і екологічну ефективність, великі втрати теплоти в системах теплових мереж (досягають 20% і більше, коли норма становить 8%) [11]. Також важливо враховувати низький ексергетичний коефіцієнт корисної дії використання хімічної енергії палива, який для систем опалення становить 6–10% [12]. Серйозні проблеми можуть виникати під час реконструкції існуючих об'єктів теплопостачання та будівництва нових у міських районах із щільною забудовою. У цих випадках під'єднання нових споживачів до районної теплової мережі та діючих ТЕЦ обмеженої теплової потужності призводить до зниження температури теплоносія, що подається до існуючих об'єктів.

За структурою споживання первинної енергії перше місце займає природний газ, ціни на який постійно зростають [13]. Таким чином, ми спостерігаємо постійну тенденцію: потреба в енергії зростає, ціни на енергоносії збільшуються, а запаси органічного палива вичерпуються, отже одним із перспективних напрямків є технології використання відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), таких як теплонасосні системи (ТНС) та створення комплексних (гібридних) систем теплопостачання і холодопостачання.

З точки зору енергоефективності, нині Україна відстає від інших європейських країн у зв'язку з застарілими технологіями, що використовуються в багатьох галузях економіки та, відповідно, неекономним використанням енергії. Перехід до будівництва житла із системами відновлюваної енергії та технологіями з низькими викидами ПГ для забезпечення теплопостачання є важливим стратегічним завданням для України [11].

В роботах провідних наукових організацій України визначено суттєвий техніко-економічний та енергетичний потенціал використання ТН технологій в секторі теплопостачання ПЕК України [12, 14–20]. Зокрема, в роботах фахівців Інституту загальної енергетики [21] визначено економічно доступний енергетичний потенціал виробництва теплової енергії ТН в СЦТ від різних джерел низькопотенційної теплоти (ДНТ) як за регіонами України, так і для країни в цілому. Станом на 2020 р. цей енергетичний потенціал для СЦТ України дорівнює 62,601 млн Гкал/рік (262,1 ПДж/рік): 22,2% забезпечується природними ДНТ (теплота повітря (2,2%), води річок (16,9%) та ґрунту і ґрунтових вод (3,1%)) та 77,8% забезпечується антропогенними ДНТ (теплота вентиляційних викидів будівель (43,0%), які



приєднані до СЦТ, стічних каналізаційних вод (9,7%), димових газів котельень та ТЕЦ (14,3%), води охолодження технологічних процесів (10,8%).

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Нині у світі спостерігаються зміни у підходах до формування енергетичної політики держав. Здійснюється перехід від моделі функціонування енергетичного сектору, в якому домінувало використання традиційних викопних палив, неефективного транспортування теплоносія тепловими мережами, нерівна конкуренція на ринках природного газу, електроенергії, вугілля – до нової моделі. Ця модель створює більш сприятливе конкурентне середовище, надаються рівні можливості для розвитку й мінімізується домінування одного з видів виробництва енергії або джерел та/або шляхів постачання палива. Разом з цим, віддається перевага підвищенню енергоефективності й використанню енергії із відновлюваних та альтернативних джерел [11]. Окрім цього, глобальний розвиток енергетики націлений на впровадження заходів з протидії зміні клімату. Це стає одним із пріоритетів, щоб зменшити негативні наслідки глобального потепління та інших екологічних проблем. У цілому, ці тенденції в енергетичній політиці держав сприяють створенню більш стійкого, ефективного та екологічно чистого енергетичного сектору, що сприятиме забезпеченню сталого розвитку світової економіки та добробуту населення [2].

ТН технологія є найбільш перспективною серед нетрадиційної енергетики для вирішення проблем енергозбереження, однак питання вибору типу ТН, масштабів й сфер їх раціонального використання в різних країнах є далеко не однозначними, оскільки їхнє виробництво в кожній країні орієнтоване насамперед на задоволення потреб внутрішнього ринку, на кліматичні та географічні особливості країни, рівень розвитку економіки, паливно-енергетичний баланс, співвідношення цін на основні види палива та електроенергію, рівень будівельних технологій та архітектурно-планувальних конструкцій, особливості систем теплопостачання об'єктів житлово-комунального господарства, використовувани технології та рівень виконання монтажних і сервісних робіт [12].

В Європі спостерігається широке застосування ТН для обігріву (разом з постачанням гарячої води) та охолодження. За звітом Європейської асоціації теплових насосів (англ. The European Heat Pump Association – ЕНРА) [22] у сукупному вираженні за період 1996–2022 рр. в країнах Європи було встановлено 19,79 млн ТН загальною

тепловою потужністю 173,6 ГВт. Ці ТН виробили 325,0 ТВт·год корисної енергії (для обігріву та охолодження), з яких залучено 205,2 ТВт·год від ВДЕ. Використання такого обсягу ТН заощадило за цей період 262,6 ТВт·год енергоресурсів у кінцевому їх споживанні та 117,6 ТВт·год первинних енергоресурсів. Ці майже 20 млн ТН забезпечують опалення приблизно 16% житлових і комерційних будівель у Європі. Загальна встановлена потужність ТН у Європі дозволила уникнути 52,5 Мт  $\text{CO}_{2\text{-екв}}$  викидів ПГ, що приблизно дорівнює річним викидам Греції. У 2022 році в країнах Європи встановлено ТН загальною тепловою потужністю 28,18 ГВт, які виробляють прибіл. 45,45 ТВт·год корисної енергії для обігріву та охолодження із залученням 28,39 ТВт·год від ВДЕ, уникаючи при цьому 7,24 Мт  $\text{CO}_{2\text{-екв}}$  викидів ПГ.

У Швеції та інших скандинавських країнах наявність дешевої електроенергії та розповсюдження СЦТ призвели до створення ТНС великої потужності. Серед діючих великих ТНС СЦТ необхідно відзначити станції, що споруджені в містах Бурленге (24 МВт), Умеа (34 МВт), Ужала (39 МВт), Еребру (40 МВт) та Стокгольмі (320 МВт). Для цих станцій як джерела низькопотенційної теплоти (НПТ) використовуються міські стічні води, промислові водяні стоки та вода Балтійського моря.

Світовий ринок теплових насосів можна сегментувати за такими напрямками діяльності [12, 14–21]:

- повітряні реверсивні ТН кімнатного типу та пакетні системи середньої та великої потужності (Японія, Китай, Південна Корея, Італія);

- повітряні реверсивні ТН для використання у системах центрального кондиціонування повітря (США);

- реверсивні ТН типу «вода – повітря» та «грунт – повітря» невеликої потужності та системи на їх основі (США);

- ТН тільки нагріву для водяних систем опалення типів «вода – вода», «грунт – вода», «повітря – вода» (Європа);

- надпотужні ТН та теплонасосні станції районного централізованого опалення (Європа);

- районні станції комбінованого тепло- та холодопостачання на базі абсорбційних та газомоторних ТН (Японія).

Щодо використання ТН у світовій практиці, можна зробити такі беззаперечні висновки: використання ТН забезпечує економію первинних енергетичних ресурсів і у всіх випадках вигідно державі; найбільший ефект використання ТН

є в умовах жаркого клімату, коли установка працює на виробництво теплоти і холоду, або за умови тривалого опалювального сезону, коли забезпечується значна економія палива; заміна безпосереднього електричного опалення на ТН економічно та енергетично доцільно за будь-яких умов; основним напрямом використання ТН є комбінування з піковими підігрівачами інших типів.

**Постановка завдання.** Метою даного дослідження є визначення та аналіз технічних бар'єрів, перешкод та обмежень для впровадження ТН технології в СЦТ України та відповідно формування запобіжних заходів та рекомендацій по їх усуненню. Надати розгорнуту класифікацію технічних бар'єрів та висвітлити стратегічні напрями їх подолань.

**Виклад основного матеріалу.** Технічні перешкоди для впровадження ТНС можна поділити на наступні основні групи, які обумовлені технічними та технологічними особливостями складових даних систем, а саме: безпосередньо теплові насоси, джерела НПП, теплові та електричні мережі, а також особливості споживання теплової енергії. Розглянемо всі їх послідовно.

**Теплові насоси.** Енергетична ефективність парокомпресійного ТН визначається коефіцієнтом трансформації теплоти ТН (coefficient of performance COP), який являє собою відношення теплової продуктивності до електричної потужності, що споживається установкою та обчислюється за виразом [12]

$$\varphi = COP = Q_k / L_k, \quad (1)$$

де  $Q_k$  – тепловий потік, відведений від конденсатора ТН, кВт;  $L_k$  – затрати енергії на роботу компресора ТН, кВт.

Співвідношення (1) демонструє той факт, що енергія  $Q_k$ , яка віддається споживачу на задоволення потреб в опаленні, вентиляції та гарячому водопостачанні, більша за енергію, яка витрачена на цикл  $L_k$ . Рівень COP ТН в значній мірі визначається раціональним поєднанням параметрів джерела теплоти низького потенціалу достатньої енергоємності і необхідних параметрів теплоти споживача.

З іншого боку, величина реального COP ТН може бути оцінена як

$$\varphi = COP = \eta_{ТН} \varphi_T, \quad (2)$$

де  $\eta_{ТН}$  – коефіцієнт втрат або ККД ТН, який враховує відхилення реального циклу від ідеального циклу Карно, а також всі втрати в ТН. Для ТНУ, які відбирають теплоту з повітря, присутні великі необоротності, тому слід приймати

$\eta_{ТН} = 0,5 \dots 0,55$ , а для випадку подачі у випарник ТН рідин –  $\eta_{ТН} = 0,6 \dots 0,7$  [12].

Теоретичний коефіцієнт трансформації ТН можна визначити зі зворотного циклу Карно за рівнянням

$$\varphi_T = \frac{T_k^{ТН}}{T_k^{ТН} - T_b^{ТН}} = \left[ 1 - \frac{T_b^{ТН}}{T_k^{ТН}} \right]^{-1} = \left[ 1 - \frac{273 + t_t^{вих} - \Delta t_{вип}}{273 + t_k + \Delta t_k} \right]^{-1}, \quad (3)$$

де  $T_b^{ТН}$  – температура випаровування робочого агента у випарнику ТН, К;  $T_k^{ТН}$  – температура конденсації робочого агента в конденсаторі ТН, К;  $t_t^{вих}$  – температура теплоносія на виході з випарника ТН відповідно, °С;  $\Delta t_{вип}$  – різниця температур теплоносія та робочого тіла ТН на виході з випарника ТН, °С;  $t_k$  – температура води на виході з конденсатора ТН, °С;  $\Delta t_k$  – різниця температур робочого тіла ТН та теплоносія на виході із конденсатора ТН, °С.

Гранична (теоретична) ефективність роботи ТН обмежується другим законом термодинаміки (теоремою Карно) і визначається виключно температурами вилучення та віддачі теплоти. Залежність теоретичних коефіцієнтів ефективності парокомпресійних ТН від температур вилучення та віддачі теплоти, зображена графічно на рис. 2.

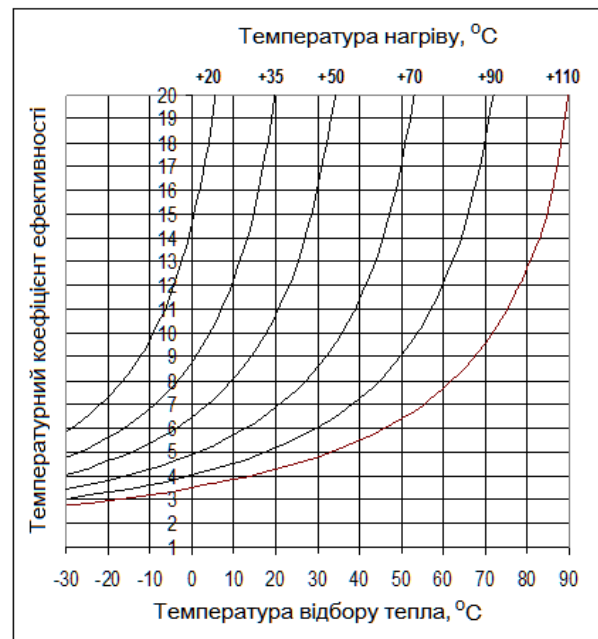


Рис. 2. Теоретична ефективність теплового насоса

Існує обмеження температури теплоносія на виході з ТН і максимальна температура, яку може забезпечити ТН, зазвичай, становить 65 °С, у окремих моделях до 75 °С. Для того, щоб ТН міг працювати протягом усього опалювального періоду та максимально реалізувати свій енергозберігаючий потенціал, необхідно забезпечити використання

низькотемпературних систем опалення з максимальними температурами у подавальній та зворотній лініях не вище 70 і 50°C, відповідно. Однак для низькотемпературних систем потрібна збільшена площа опалювальних приладів порівняно з традиційними опалювальними системами, розрахованими на температурний графік 95/70°C. Це тягне за собою додаткові витрати.

Запобіжним заходом для наведених вище обмежень може бути зменшення температури вихідного теплоносія: наприклад, нагрівання зворотної води в тепломережі (для зменшення витрат викопного палива на догрів води паливними котлами до нормативних вимог) або зменшення нормативних вимог до температури подавальної води в тепломережі, що може призвести до збільшення поверхні теплообміну нагрівальних пристроїв в помешканнях.

ТНС повинна бути спроектована так, щоб коефіцієнт сезонного перетворення досягав свого найбільшого значення. В табл. 1 наведені мінімальні та розрахункові значення середнього за сезон коефіцієнта перетворення SPF для опалення приміщень і системи гарячого водопостачання (ГВП), а також для систем, орієнтованих тільки на системи ГВП [23].

Обмеження щодо рівня енергоефективності ТНУ визначаються витратами первинного палива, які у свою чергу залежать від ККД виробництва і транспортування електроенергії. Якщо прийняти кінцевий ККД виробництва електроенергії у споживача на рівні 0,3, то тоді середньо сезонний коефіцієнт трансформації енергії в ТНУ не повинен бути менше 3. При цьому необхідно враховувати споживання електроенергії не тільки безпосередньо ТН, а також допоміжним обладнанням ТНУ – нагнітачами (насос, вентилятор тощо).

Таким чином, одне з основних питань, яке в значній мірі визначає вибір тієї чи іншої системи теплопостачання, може бути вирішене на основі енергетичного аналізу, що зводиться до зіставлення витрат первинної енергії палива. Тому необхідно визначити енергетичну ефективність ТНУ опалення порівняно з традиційними систе-

мами з точки зору споживання первинної енергії палива. У зв'язку з цим на основі отриманих даних [12] оптимальної глибини використання джерел НПТ в ТНС теплопостачання за умов мінімальних затрат енергії як на підвищення потенціалу цієї теплоти, так і на переміщення теплоносія в нижньому контурі ТН, нижче розглянуто енергетичні показники різних систем опалення задля визначення умов ефективного використання ТНС опалення на противагу традиційним системам з використанням як джерела теплоти опалювальної котельні та конденсаційного котла.

Коефіцієнт використання первинної енергії палива опалювальною котельнею визначаються за залежністю

$$\eta_{ок} = \eta_{ку} \eta_{тм}, \quad (4)$$

де  $\eta_{ку}$  – ККД котельної установки;  $\eta_{тм}$  – ККД теплової мережі.

Коефіцієнт використання первинної енергії палива ТНУ буде рівним

$$\eta_{тну} = \eta_{кес} \eta_{тн} \eta_{т}, \quad (5)$$

де  $\eta_{кес}$  – ККД електростанції.

Для визначення ефективності ТНУ як теплогенеруючого джерела порівняно з теплопостачанням від опалювальної котельні (як з традиційними водогрійними котлами, так і з конденсаційними котлами) використаємо відносний енергетичний ККД, який являє собою відношення коефіцієнтів використання первинної енергії палива для вказаних систем (4) і (5) та записується у такому вигляді

$$\eta_{тну}^0 = \frac{\eta_{кес} \eta_{тн} \eta_{т}}{\eta_{ку} \eta_{тм}}. \quad (6)$$

*Поточні розрахунки проводимо за умови таких даних:* ККД водогрійного котла  $\eta_{ку} = 0,85$ ; ККД конденсаційного котла при віднесенні його до нижчої теплоти згорання палива  $Q_n^p$   $\eta_{ку} = 1,05$ ; коефіцієнт корисної дії теплової мережі  $\eta_{тм} = 0,95$ , а у разі використання конденсаційного котла  $\eta_{тм} = 1$ ; ККД конденсаційної електростанції  $\eta_{кес} = 0,37$ ; коефіцієнт втрат ТН  $\eta_{тн} = 0,6$ .

Теоретичний коефіцієнт трансформації ТН, який з урахуванням теплових необоротностей у випарнику та конденсаторі ТН визначається за

Таблиця 1

**Мінімальні та розрахункові значення середнього за сезон коефіцієнта перетворення теплового насоса**

Джерело НПТ / відведення теплової енергії	Опалення і ГВП для нових будинків		Опалення і ГВП для оновлених будинків		Система ГВП	
	Мінімальне	Розрахункове	Мінімальне	Розрахункове	Мінімальне	Розрахункове
Повітря / вода	2,7	3,0	2,5	2,8	2,3	2,8
Ґрунт/вода	3,5	4,0	3,3	3,7	3,0	3,5
Вода/вода	3,8	4,5	3,5	4,2	3,2	3,8

виразом (3) при цьому температура теплоносія на вході до випарника ТН  $t_t^{вх}$  приймається з урахуванням вибраного нижнього джерела теплоти відповідно для: атмосферного повітря  $-20^{\circ}\text{C} \dots 15^{\circ}\text{C}$ ; вентиляційних викидів споруд  $20^{\circ}\text{C}$ ; природної та скидної води  $8^{\circ}\text{C}$ ; ґрунту з температурою теплоносія  $3^{\circ}\text{C}$ .

Температура теплоносія на виході із випарника ТН визначається з урахуванням оптимальної різниці температур за співвідношенням [12]

$$\Delta t_t^{opt} = \sqrt{\frac{A(273 + t_k + \Delta t_k)}{\eta_t^{зб.р} \eta_{пп}}} \left[ \eta_{тн} - 1 + \frac{273 + t_t^{вх} - \Delta t_{вип}}{273 + t_k + \Delta t_k} \right]. \quad (7)$$

Температура теплоносія, що подається в низькотемпературну систему водяного опалення, залежно від зміни температури навколишнього середовища визначається за виразом [12]

$$t_k = t_n + (t_t^p - t_n) \left[ \frac{t_n - t_0}{t_n - t_0^p} \right]^{\frac{1}{(1+n)}}. \quad (8)$$

При виконанні розрахунків розглядалась низькотемпературна система опалення з температурою гріючого теплоносія  $t_t^p = 40^{\circ}\text{C}$ ; розрахункова температура в опалювальному приміщенні  $t_n = 20^{\circ}\text{C}$ ; середня розрахункова температура на опалення по Україні  $t_0^p = -20^{\circ}\text{C}$ .

За описаним вище алгоритмом розрахунку встановлено основні показники роботи теплонасосної системи опалення та, як наслідок, визначено ефективності її роботи. ТНС опалення буде раціонально використовувати у всіх випадках, коли відношення коефіцієнтів використання первинної енергії палива для вказаних систем буде більшим за одиницю, тобто у всіх точках, які розміщені вище умовної прямої  $\eta_{тнс}^0 = 1$ .

З наведених графічних залежностей на рис. 3 видно, що при забезпеченні оптимального ступеня охолодження теплоносія (атмосферного пові-

тря, ґрунту та води) у випарнику ТН відносний енергетичний ККД для всіх наведених випадків більший за одиницю ( $\eta_{тнс}^0 > 1$ ), крім порівняння конденсаційного котла з ТНС, яка працює за рахунок використання теплоти атмосферного повітря. В цьому випадку поле графіка на рис. 3, б поділяється на дві характерні зони, в яких використання ТНС є ефективним ( $\eta_{тнс}^0 > 1$ ) або неефективним ( $\eta_{тнс}^0 < 1$ ) з точки зору величини коефіцієнта використання первинної енергії палива порівняно з конденсаційним котлом.

Джерела НПП. Перешкодами, обумовленими джерелами НПП, для впровадження ТН технологій у СЦТ є мала загальна потужність цих джерел, незначна питома щільність теплоти від джерел НПП (на  $\text{м}^2$  або на  $\text{м}^3$  джерела), їх сезонність (зміна температури повітря, води у водоймищах, ґрунту до надмірного охолодження) та віддаленість джерел від теплових мереж СЦТ (споживача) та мереж електропостачання. В таблиці 2 представлені питомі потреби в нижньому джерелі НПП для ТН.

Також слід відмітити, що у випадку використання теплоти ґрунту за допомогою горизонтальних колекторів для ТНУ, тепловіддача різних ґрунтів змінюється в діапазоні  $10\text{--}35 \text{ Вт/м}^2$  (для оціночних розрахунків прийнято  $20 \text{ Вт/м}^2$ ), а для вертикальних ґрунтових зондів –  $45\text{--}50 \text{ Вт/м}$  довжини, глибина свердловин сягає до  $200 \text{ м}$ , відстань між ними становить  $5\text{--}15 \text{ м}$ . Для ТН тепловою потужністю  $1 \text{ МВт}$  горизонтальний колектор буде займати площу  $500000 \text{ м}^2$ , а для вертикальних зондів знадобиться  $200$  стометрових свердловин, які займуть площу близько  $44000 \text{ м}^2$ . Безумовно, що в умовах щільної забудови великих міст та дефіциту вільних майданчиків викорис-

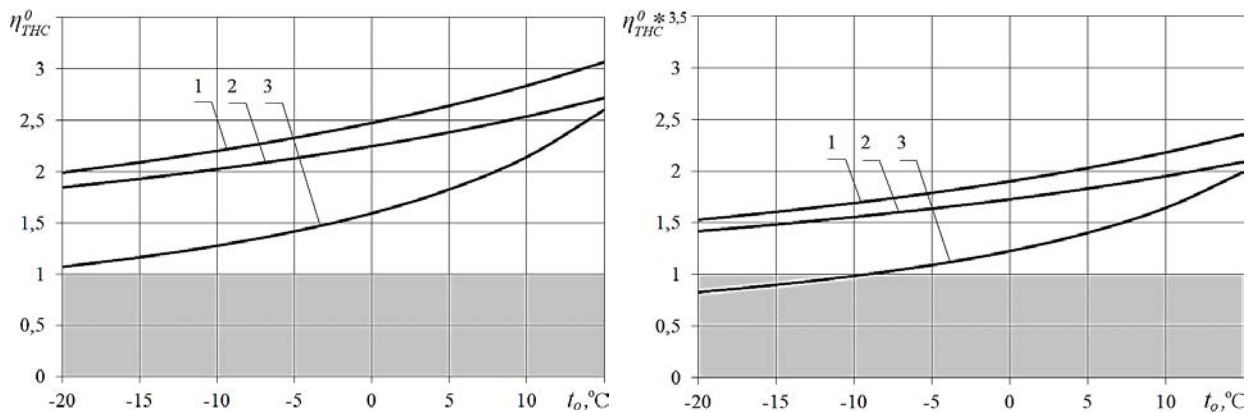


Рис. 3. Залежності відносного енергетичного ККД від температури навколишнього середовища при порівнянні ТНУ з використанням теплоти: 1 – атмосферного повітря; 2 – ґрунту; 3 – води; а) з традиційними водогрійними котлами, б) з конденсаційними котлами

Питомі потреби в нижньому джерелі НПТ для ТН приведені до 1 МВт джерела теплоти для теплового насосу

Джерело теплоти	Температурний потенціал, °С	Розрахунковий температурний потенціал, °С	Доступне оптимальне охолодження, °С	Питома витрата, м <sup>3</sup> /год	Теплоносій зі сторони випарника
Шахтна вода	14..30	25	10	86	забруднена шахтна вода
Скид очисних споруд	14..18	16	7	123	стоки або антифриз
Скидна теплота градирень	25..45	35	20	43	вода градирень
Вентиляційні викиди метро	18..25	20	10	360	вода або антифриз
Системи охолодження датацентрів	35..40	40	20	43	антифриз
Морська вода	14..25	16	6	143	антифриз 20-30%
Річкова вода	4..8	5	3	287	антифриз 30-45%
Озерна вода	3..5	4	2,5	344	антифриз 30-45%
Ґрунт	-2..3	0	2	430	антифриз 30-45%
Геотермальні води	40..90	80	50	17	вода

тання ґрунтових джерел НПТ буде дуже проблематичним [17, 20].

Найбільш привабливими джерелами НПТ для усунення наведених перешкод є промислове або каналізаційне скидне тепло, однак джерела НПТ від навколишнього середовища можуть бути ефективно використані для гібридних умовно централізованих систем тепlopостачання для закладів освіти, охорони здоров'я, культури та спорту, а також адміністративних та житлових будівель для гарячого водopостачання в неопалювальний період року з розташуванням ТН безпосередньо поблизу цих будівель та закладів.

Теплові та електричні мережі. Обмеження по вихідній температурі ТНУ зі сторони тепломереж, які експлуатуються за температурним графіком 150/90°С в опалювальний період, є основною перешкодою для впровадження ТН технологій в СЦТ. Запобіжним заходом для усунення цього обмеження може бути зменшення температури вихідного теплоносія: наприклад, нагрівання зворотної води в тепломережі (для зменшення витрат викопного палива на догрів води паливними котельнями до нормативних вимог).

Другим суттєвим обмеженням для впровадження ТН технологій є високовартісні заходи з під'єднання ТНУ до електромережі. Запобіжним заходом для усунення цієї перешкоди є засто-

сування державної компенсації частки витрат на під'єднання ТНУ до електромережі.

Споживання теплової енергії. Невідповідність графіка теплового навантаження і можливого підводу – відводу теплоти від ТНУ. Необхідність забезпечення змінних навантажень на СЦТ обумовлене наступними факторами: максимальне навантаження опалення на 50–100% вище середньосезонного показника, а максимальне навантаження гарячого водopостачання у 2–5 разів вище середньодобового, що є основними перешкодами впровадженню ТН у СЦТ.

Перешкоди, обумовлені розбіжністю графіка необхідних теплових навантажень генерації та споживання теплової енергії і можливостей підведення чи відведення теплоти з циклу ТНУ, можуть бути усунені для добового вирівнювання графіку роботи ТН шляхом використання теплових акумуляторів, а для сезонного вирівнювання – використанням паливних котлів у гібридних системах.

В таблиці 3 узагальнено вище перераховані технічні бар'єри впровадження ТН технологій у СЦТ та наведені запобіжні заходи по їх усуненню або зменшенню негативного впливу.

**Висновки.** Неминуче постійне підвищення ціни на викопні палива, в тому числі і на природний газ призводить до зростання конкурентоздатності ТН порівняно з існуючими традиційними

Технічні бар'єри та заходи з їх усунення

Технічні бар'єри:	Запобіжні заходи:
Обмеження щодо рівня енергоефективності ТН	Вибір ТН з високим коефіцієнтом перетворення (COP > 3,5)
Обмеження температури на виході з ТН (65–75°C)	Планування використання низькотемпературного обігріву під час будівництва нових житлових масивів. Приспівання ТН до зворотного трубопроводу СЦТ.
Перешкоди, обумовлені властивостями джерел низькопотенційної теплоти	Вибір відповідного джерела низькопотенційної теплоти. Часткове покриття теплового навантаження іншими теплогенеруючими технологіями (гібридні СЦТ).
Висока вартість під'єднання до електромережі	Часткова державна компенсація витрат на під'єднання ТН до електромереж
Перешкоди, обумовлені розбіжністю добових та сезонних графіків теплових навантажень (споживання) теплової енергії і можливостей ТН	Використанням теплових акумуляторів та резервних теплогенеруючих технологій

системами теплогенерації, що має привести до їх широкого впровадження в Україні. Використання ТН дозволить зменшити витрати на опалення, зменшити залежність від імпортованого природного газу, сприятиме екологічно чистому теплопостачанню і загальному зменшенню викидів шкідливих та парникових газів. Таким чином, однією з найбільш очікуваних змін у структурі енергетичного балансу України є активне впровадження ТН технологій у теплопостачання, оскільки їх використання приносить значні економічні, енергозберігаючі та екологічні переваги.

Ідентифіковано та систематизовано основні групи технічних бар'єрів, які перешкоджають широкому впровадженню ТН в СЦТ: безпосередньо спричиненні самим тепловим насосом; джерелами низькопотенційної теплоти; підключенням до теплових та електричних мереж; умовами споживання теплової енергії кінцевим споживачем. Переважані запобіжні заходи по усуненню або змен-

шенню їх, які повинні бути враховані ще на етапі проектування об'єктів, а саме вибір ТН з високим коефіцієнтом трансформації теплоти (COP > 3,5), використання низькотемпературної системи опалення; визначенні можливі заходи щодо зниження енергетичних навантажень традиційними способами: аналіз структури споживання енергії (теплової та електричної) з врахуванням добові та сезонних графіків споживання теплової й електричної енергії (використанням теплових акумуляторів та резервних теплогенеруючих технологій).

Крім високої ефективності використання енергії, робота ТН має також інші важливі переваги, такі як екологічна безпека, надійність, адаптивність до різних потужностей і джерел НПТ, безпечність та повна автоматизація робочих режимів. Все це підкреслює перспективність ТН і значний потенціал їх впровадження у системах теплопостачання, що підтверджується світовим досвідом їхнього використання.

#### Список літератури:

1. Kadir Amasyali, Nora M. El-Gohary A review of data-driven building energy consumption prediction studies // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 81 (2018) 1192-1205. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.095>
2. European Commission (2022), REPowerEU Plan. – URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0230&from=EN>
3. IRENA (2023), *World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway*, Volume 1, International Renewable Energy Agency. URL: <https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>
4. IRENA (2020), *Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050* (Edition: 2020), International Renewable Energy Agency. URL: <https://www.irena.org/Publications>
5. Lund H., Werner S., Wiltshire R., Svendsen S., Thorsen J.E., Hvelplund F., Mathiesen B.V. (2014). 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy*. V. 68, Pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>
6. Revesz A., Jones P., Dunham C., Davies G., Marques C., Matabuena R., Scott J., Maidment G. (2020). Developing novel 5th generation district energy networks. *Energy*. V. 201, 117389. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117389>
7. Buffa S., Cozzini M., D'Antoni M., Baratieri M., Fedrizzi R. (2019). 5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. V. 104, Pp. 504-522. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.059>
8. Wirtz M., Heleno M., Moreira A., Schreiber T., Müller D. (2023). 5th generation district heating and cooling network planning: A Dantzig–Wolfe decomposition approach. *Energy Conversion and Management*. V. 276, 116593. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116593>

9. Heat Roadmap Europe. Quantifying the Impact of Low-carbon Heating and Cooling Roadmaps. URL: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5be2fd8fb&appId=PPGMS>
10. Susana Paardekooper. Heat Roadmap Europe – a Vision for 2050. Brussels, February 13th, 2019. URL: [https://heatroadmap.eu/wp-content/uploads/2019/04/Susana-Paardekooper\\_Aalborg-University.pdf](https://heatroadmap.eu/wp-content/uploads/2019/04/Susana-Paardekooper_Aalborg-University.pdf)
11. Енергетична стратегія України на період до 2035 р. Схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 № 605-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p#Text>
12. Безродний М.К. Термодинамічна та енергетична ефективність теплонасосних схем теплопостачання: монографія / М. К. Безродний, Н. О. Притула. – К. : НТУУ «КПІ», 2016. – 272 с.
13. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. URL: <https://www.nerc.gov.ua/monitoring-rinku-prirodnogo-gazu/rezultati-monitoringu-rinku-prirodnogo-gazu>
14. Енергоефективність та відновлювальні джерела енергії/ під заг. ред. А.К. Шидловського. Київ: Українські енциклопедичні знання. 2007. 560 с.
15. Снежкін Ю.Ф. Енергоефективні теплонасосні технології: стан та перспективи їх впровадження в Україні. Промышленная теплотехника. 2017. Т. 39, № 2. С. 18–24.
16. Відновлювані джерела енергії: монографія / За заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. 392 с.
17. Карп І.М. Стан та шляхи розвитку систем централізованого теплопостачання в Україні / І.М. Карп, Є.Є. Нікітін, К.Є. П'яних. – Київ: Наукова думка. 2021. 264 с.
18. Derii V.O., Teslenko O.I., Sokolovska I.S. (2023) Methodical approach to estimating the potential of thermal energy production by heat pump plants in case of their implementation in regional district heating systems. Energy Technologies & Resource Saving. №2. Pp. 44-56. DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.2.2023.03>
19. Ткаченко С.Й. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання: монографія / С.Й. Ткаченко, О.П. Остапенко. – Вінниця: ВНТУ, 2009. 176 с.
20. Лобунець Ю.М. Застосування термоелектричних теплових насосів у системах централізованого теплопостачання. Енерготехнології та ресурсозбереження. 2020. № 2. С. 14–19. DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.2.2020.02>
21. Дерій В.О., Соколовська І.С., Тесленко О.І. Огляд джерел низькопотенційної теплоти для теплонасосних установок систем централізованого теплопостачання. Проблеми загальної енергетики. 2022. Вип. 1-2 (68-69). С. 30–41. DOI: <https://doi.org/10.15407/page2022.01-02.030>
22. EHPA market report 2023 Executive-Summary. European Heat Pump Association. <https://www.ehpa.org/news-and-resources/press-releases/market-report-2023/>
23. ДСТУ Б В.2.5-44:2010 Інженерне обладнання будинків і споруд. Проектування систем опалення будівель з тепловими насосами (EN 154550:2007, MOD) [Текст]. – Чинний від 2010-09-01. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. IV, 57 с.

## **Bezrodny M.K., Teslenko O.I., Prytula N.O., Derii V.O., Slizhevskiy K.D. TECHNICAL BARRIERS TO IMPLEMENTATION OF HEAT PUMPS TECHNOLOGY IN CENTRALIZED HEAT SUPPLY SYSTEMS**

*The current state and prospects for the introduction of heat pumps in centralized heat supply systems are analyzed. The world experience of using renewable energy and forecasts of transformations of the fuel and energy complex both in the world and in Ukraine are presented. The world community considers the use of renewable energy sources as one of the most promising ways to solve the growing problems of energy supply. The importance of the transition to housing construction with renewable energy systems and low-carbon technologies to ensure heat supply is noted. The economically available energy potential of heat energy production by heat pumps in the centralized heat supply systems of Ukraine from various sources of low-potential heat of natural and anthropogenic origin is presented. The classification of technical barriers is presented. Technical barriers to the implementation of heat pump systems were divided into four main groups, which are determined by the technical and technological features of the components of these systems, namely: heat pumps directly, low-potential heat sources, heat and electrical networks, as well as the conditions of heat energy consumption. Ways to overcome them to ensure widespread use of heat pumps in Ukraine are shown. A comparison of heat pump heating schemes under optimal operating conditions with traditional systems (with water heating and condensing boilers) was made. It was determined that the introduction of heat pump systems of heat supply under optimal conditions of their use are competitive compared not only to traditional boiler houses, but also to condensing boilers. When heat pump installations use sources of low-potential heat of natural origin, one should also take into account the obstacles caused by the discrepancy between the daily and seasonal schedules of heat loads (consumption) of thermal energy and the capabilities of the heat pump.*

**Key words:** centralized heat supply, heat pump, implementation, barriers, low-potential heat sources.

УДК 681.5.015

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/27>

**Волощук В.А.**

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

**Некрашевич О.В.**

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

**Богза М.С.**

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

**Гікало П.В.**

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

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОАСОСНОЇ УСТАНОВКИ ТИПУ «ВОДА-ВОДА»

Теплонасосні установки мають широкі перспективи як для систем тепло- та холодозабезпечення будинків так і для промислового застосування. Для впровадження систем керування такими системами є потреба в дослідженні їх динамічних характеристик. Це можна реалізувати шляхом проведення експериментів або за рахунок створення та реалізації відповідних моделей. У другому випадку часто використовується підхід, у якому фізичні процеси описуються диференціальними рівняннями збереження маси, енергії та, за потреби, моменту імпульсу.

В роботі, на основі математичного опису фізичних явищ в комп'ютерному пакеті Matlab, розроблено та реалізовано модель динамічних процесів у теплонасосній установці типу «вода-вода» з установленою потужністю 25 кВт та використанням фреону R-134a як робочого тіла. Вхідними змінними моделі є температура і витрата води на вході у випарник, температура і витрата води на вході в конденсатор та частота обертання на валу компресора. Вихідним параметром реакції об'єкта є температура води на виході із конденсатора.

Перевірка точності моделі для двох випадків показала, що у порівнянні з експериментальними даними похибка з визначення параметрів об'єкта у динамічних процесах за розробленою моделлю не перевищує 10,5% (варіант № 1 – 10,5 %, варіант № 2 – 8,3%). Модель використано для дослідження динамічних характеристик об'єкта шляхом нанесення ступеневих збурень. Виявлено, що досліджувані перехідні процеси можна апроксимувати аперіодичними ланками першого порядку. Визначено їх коефіцієнти передачі, постійні часу, які змінюються в межах 8...10 с, та час запізнювання, який змінюється в межах 1...4 с.

Показано, що зміна температури та витрати води на вході у конденсатор мають більший вплив на вихідний параметр, ніж зміна температури та витрати води на вході у випарник. Визначено, що при різних початкових умовах коефіцієнти передачі більшості перехідних процесів змінюються, що свідчить про нелінійність об'єкта керування.

Отриману модель буде використано для її інтеграції із динамічною моделлю системи тепло- та холодозабезпечення будинку з подальшим застосуванням у задачах синтезу систем автоматичного керування та предиктивного обслуговування таких систем.

**Ключові слова:** математична модель, ступеневе збурення, перехідний процес, динамічні характеристики, теплонасосна установка.

**Постановка проблеми.** Для синтезу системи автоматичного керування теплонасосних установок (ТНУ) необхідні дані щодо динамічних характеристик цього об'єкта, які можна отримати за

допомогою математичних та комп'ютерних моделей, де враховано перехідні процеси. Складністю моделювання перехідних процесів ТНУ є необхідність формалізації процесів тепло- та масообміну



в компонентах та те, що теплообмінники працюють в умовах фазових переходів робочих тіл.

Моделі можуть створюватися на основі розгляду фізичних процесів, що відбуваються в об'єктах, та шляхом обробки експериментальних даних [1], [2], [3]. У найпростішому підході об'єкт розглядається як такий, де його характеристики не змінюються по координатах. Складніші та точніші підходи передбачають дискретизацію компонентів об'єкта, що дає можливість врахувати зміну параметрів у просторі. Для врахування динаміки зміни зон фазових переходів використовується так званий метод рухомих границь [4].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Автори [5] запропонували модель динаміки чилера на основі методу рухомих границь для врахування перехідних процесів під час фазових перетворень. У моделях компресора та розширювального вентиля інерційність не враховувалася через незначний вплив. Точність моделі було оцінено шляхом проведення експериментів (похибка не перевищувала 10%).

Автори [6] запропонували методологію моделювання перехідних процесів пароконденсійних установок на основі методу скінченних об'ємів. Показано підвищення точності розрахунку за умови збільшення кроку дискретизації. Визначено, що точність моделювання може бути підвищено шляхом врахування зміни масової витрати в розширювальному клапані та компресорі під час пуску установки; оцінювання залежності коефіцієнтів теплопередачі в теплообмінниках від фазового стану та врахування втрат тиску в конденсаторі та випарнику.

В роботі [7] на базі комп'ютерного пакету Matlab реалізовано модель динамічних процесів у ТНУ типу «повітря-вода» з установленою потужністю 10 кВт та використанням фреону R-134a як робочого тіла. Вхідними змінними моделі є температура і витрата повітря на вході у випарник, температура і витрата води на вході в конденсатор та частота обертання на валу компресора. Вихідним параметром реакції об'єкта є температура води на виході з конденсатора. Виявлено, що досліджувані перехідні процеси можна апроксимувати аперіодичними ланками першого порядку. Визначено їх коефіцієнти передачі, постійні часу, які змінюються в межах 3...5 с, та час запізнювання, за наявності, який змінюється в межах 0,5...3 с. Показано, що зміна температури та витрати води на вході у конденсатор мають більший вплив на вихідний параметр, ніж зміна температури та витрати повітря на вході у випарник. Визначено, що об'єкт керування є нелінійним.

Літературний аналіз показав, що моделювання динаміки ТНУ з достатньою точністю можна здійснювати без врахування перехідних процесів у компресорі й розширювальному вентилі та динамічні режими роботи ТНУ суттєво визначаються перехідними процесами у випарнику та конденсаторі.

**Метою роботи** є визначення динамічних характеристик ТНУ типу «вода-вода» шляхом розроблення та реалізації математичної та комп'ютерної моделей такого об'єкта.

**Виклад основного матеріалу.** В роботі досліджувалася ТНУ типу «вода-вода», розрахункова схема, якої наведена на рис. 1. Конструктивні характеристики досліджуваної ТНУ наведено у табл. 1. У проектному режимі вода із температурою  $+6^{\circ}\text{C}$  надходить у випарник (EV) і охолоджується до температури  $+3^{\circ}\text{C}$ . Відібрана від вода теплота ( $\dot{Q}_{in}$ ) передається на випаровування робочого тіла (фреон R134-a), яке потім подається у компресор (CM), де стискається за рахунок роботи ( $\dot{N}$ ). Після цього робоче тіло надходить у конденсатор (CD) і віддає енергію у формі теплоти воді системи опалення, забезпечуючи її нагрівання від  $+55^{\circ}\text{C}$  до  $+69^{\circ}\text{C}$ . Проектна теплова потужність ( $\dot{Q}_{out}$ ) ТНУ становить 25 кВт. Після конденсатора робоче тіло рухається у розширювальний вентиль (EXV) для зниження тиску та температури з подальшим надходженням у випарник.

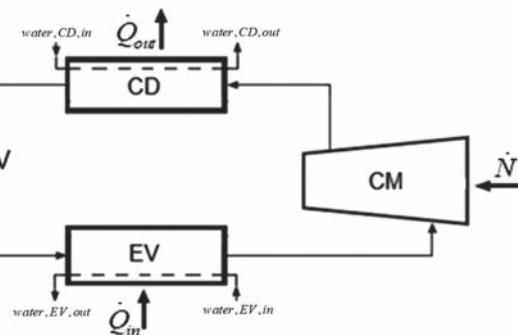


Рис. 1. Розрахункова схема ТНУ

Розроблення моделі здійснювалося за умови наступних спрощень:

- припускається, що розширення робочого тіла у дросельному вентилі є ізоентальпійним;
- масова витрата робочого тіла є незмінною у компонентах ТНУ;
- маса робочого тіла в конденсаторі та випарнику є незмінною під час перехідного процесу;
- температури теплоносіїв низькопотенційного джерела та споживача теплоти змінюються лінійно;

Таблиця 1  
Конструктивні характеристики досліджуваної ТНУ

Конденсатора	
Еквівалентний діаметр для руху води, м	0,0008
Об'єм води, що міститься у конденсаторі, м <sup>3</sup>	0,0050
Площа поперечного перерізу для проходження води, м <sup>2</sup>	0,004
Площа теплообмінної поверхні зі сторони води, м <sup>2</sup>	2,67
Об'єм робочого тіла у рідкому стані, що міститься у конденсаторі, м <sup>3</sup>	0,0042
Площа теплообмінної поверхні зі робочого тіла, м <sup>2</sup>	1,7807
Маса теплообмінної поверхні конденсатора, кг	6,37
Питома теплоємність матеріалу конденсатора, Дж/(кг·К)	880
Випарник	
Еквівалентний діаметр для руху води, м	0,0008
Об'єм води, що міститься у випарнику, м <sup>3</sup>	0,0031
Площа поперечного перерізу для проходження води, м <sup>2</sup>	0,004
Площа теплообмінної поверхні зі сторони води, м <sup>2</sup>	1,83
Об'єм робочого тіла у рідкому стані, що міститься у випарнику, м <sup>3</sup>	0,0021
Площа теплообмінної поверхні зі робочого тіла, м <sup>2</sup>	1,29
Маса теплообмінної поверхні випарника, кг	4,47
Питома теплоємність матеріалу випарника, Дж/(кг·К)	880

– оболонки теплообмінників (конденсатора і випарника) є об'єктами із зосередженою температурою;

– температура перегріву газоподібного робочого тіла після випарника та переохолодження після конденсатора приймається незмінними в перехідному процесі.

Рівняння енергетичного балансу робочого тіла в конденсаторі має вигляд:

$$c_{wf,CD} M_{wf,CD} \frac{dT_{wf,CD}}{d\tau} = G_{wf} (h_{CD,in} - h_{CD,out}) - \alpha_{wf,CD} A_{wf,CD} (T_{wf,CD} - T_{wall,CD}), \quad (1)$$

де  $c_{wf,CD}$  – теплоємність робочого тіла в області конденсатора, Дж/(кг·К);

$M_{wf,CD}$  – маса робочого тіла в області конденсатора, кг;

$T_{wf,CD}$  – температура робочого тіла в області конденсатора, К;

$G_{wf}$  – витрата робочого тіла через конденсатор, кг/с;

$h_{CD,in}$ ,  $h_{CD,out}$  – питома ентальпія робочого тіла на вході та виході із конденсатора, відповідно, Дж/кг;

$\alpha_{wf,CD}$  – коефіцієнт тепловіддачі в конденсаторі зі сторони робочого тіла, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$A_{wf,CD}$  – площа тепловіддачі в конденсаторі зі сторони робочого тіла, м<sup>2</sup>;

$T_{wf,CD}$  – температури робочого тіла в конденсаторі, К;  
 $T_{wall,CD}$  – температури стінки конденсатора, К.

Рівняння енергетичного балансу води, що нагрівається в конденсаторі, має вигляд:

$$\frac{1}{2} c_{water,CD} M_{water,CD} \frac{d(T_{water,CD,in} + T_{water,CD,out})}{d\tau} = G_{water,CD} (h_{water,CD,in} - h_{water,CD,out}) + \alpha_{water,CD} A_{water,CD} \left( T_{wall,CD} - \frac{T_{water,CD,in} + T_{water,CD,out}}{2} \right), \quad (2)$$

де  $c_{water,CD}$  – теплоємність води в області конденсатора, Дж/(кг·К);

$M_{water,CD}$  – маса води в області конденсатора, кг;

$T_{water,CD,in}$ ,  $T_{water,CD,out}$  – температура води на вході та виході із конденсатора, К;

$G_{water,CD}$  – витрата води через конденсатор, кг/с;

$h_{water,CD,in}$ ,  $h_{water,CD,out}$  – питома ентальпія води на вході та виході із конденсатора, відповідно, Дж/кг;

$\alpha_{water,CD}$  – коефіцієнт тепловіддачі в конденсаторі зі сторони води системи опалення, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$A_{water,CD}$  – площа тепловіддачі в конденсаторі зі сторони води системи опалення, м<sup>2</sup>;

$T_{wall,CD}$  – температури стінки конденсатора, К.

Рівняння енергетичного балансу теплообмінної поверхні конденсатора, має вигляд:

$$c_{wall,CD} M_{wall,CD} \frac{dT_{wall,CD}}{d\tau} = \alpha_{wf,CD} A_{wf,CD} (T_{wf,CD} - T_{wall,CD}) - \alpha_{water,CD} A_{water,CD} \left( T_{wall,CD} - \frac{T_{water,CD,in} + T_{water,CD,out}}{2} \right), \quad (3)$$

де  $c_{wall,CD}$  – теплоємність теплообмінної поверхні конденсатора, Дж/(кг·К);

$M_{wall,CD}$  – маса теплообмінної поверхні конденсатора, кг.

Рівняння енергетичного балансу робочого тіла у випарнику має вигляд:

$$c_{wf,EV} M_{wf,EV} \frac{dT_{wf,EV}}{d\tau} = G_{wf} (h_{EV,in} - h_{EV,out}) + \alpha_{wf,EV} A_{wf,EV} (T_{wall,EV} - T_{wf,EV}), \quad (4)$$

де  $c_{wf,EV}$  – теплоємність робочого тіла в області випарника, Дж/(кг·К);

$M_{wf,EV}$  – маса робочого тіла в області випарника, кг;

$T_{wf,EV}$  – температура робочого тіла в області випарника, К;

$G_{wf}$  – витрата робочого тіла через випарник, кг/с;

$h_{EV,in}$ ,  $h_{EV,out}$  – питома ентальпія робочого тіла на вході та виході із випарника, відповідно, Дж/кг;

$\alpha_{wf,EV}$  – коефіцієнт тепловіддачі у випарнику зі сторони робочого тіла, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$A_{wf,EV}$  – площа тепловіддачі випарника зі сторони робочого тіла, м<sup>2</sup>;

$T_{wall,EV}$  – температури стінки випарника, К;

$T_{wf,EV}$  – температури робочого тіла в у випарнику, К.

Рівняння енергетичного балансу теплоносія низькотемпературного джерела, що охолоджується у випарнику має вигляд:

$$\frac{1}{2} c_{water, EV} M_{water, EV} \frac{d(T_{water, EV, in} + T_{water, EV, out})}{d\tau} = G_{water, EV} (h_{water, EV, in} - h_{water, EV, out}) - \alpha_{water, EV} A_{water, EV} \left( \frac{T_{water, EV, in} + T_{water, EV, out}}{2} - T_{wall, EV} \right), \quad (5)$$

де  $c_{water, EV}$  – теплоємність води в області випарника, Дж/(кг·К);

$M_{water, EV}$  – маса води в області випарника, кг;

$T_{water, EV, in}$ ,  $T_{water, EV, out}$  – температура води на вході та виході із випарника, К;

$G_{water, EV}$  – витрата води через випарник, кг/с;

$h_{water, EV, in}$ ,  $h_{water, EV, out}$  – питома ентальпія води на вході та виході із випарника, відповідно, Дж/кг;

$\alpha_{water, EV}$  – коефіцієнт тепловіддачі у випарнику зі сторони води низькотемпературного джерела, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$A_{water, EV}$  – площа тепловіддачі випарника зі сторони води низькотемпературного джерела, м<sup>2</sup>;

$T_{wall, EV}$  – температури стінки випарника, К.

Рівняння енергетичного балансу теплообмінної поверхні випарника, має вигляд:

$$c_{wall, EV} M_{wall, EV} \frac{dT_{wall, EV}}{d\tau} = \alpha_{water, EV} A_{water, EV} \left( \frac{T_{water, EV, in} + T_{water, EV, out}}{2} - T_{wall, EV} \right) - \alpha_{wf, EV} A_{wf, EV} (T_{wall, EV} - T_{wf, EV}), \quad (6)$$

де  $c_{wall, EV}$  – теплоємність теплообмінної поверхні випарника, Дж/(кг·К);

$M_{wall, EV}$  – маса теплообмінної поверхні випарника, кг.

Для конденсатора та випарника передбачено пластинчасті теплообмінники. Коефіцієнти тепловіддачі зі сторони робочого тіла в області випарника та конденсатора визначалися за формулами:

$$\alpha_{wf, CD} = C_{CD} (T_{wf, CD} - T_{wall, CD})^{n_{CD}}; \quad (7)$$

$$\alpha_{wf, EV} = C_{EV} (T_{wall, EV} - T_{wf, EV})^{n_{EV}}, \quad (8)$$

де  $C_{CD}$ ,  $C_{EV}$ ,  $n_{CD}$ ,  $n_{EV}$  – емпіричні коефіцієнти, взяті із [8].

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі зі сторони теплоносіїв в області випарника і конденсатора використовувалося критеріальне рівняння [9]:

$$\alpha_w = 0,2536 \frac{\lambda_w}{d_e} \text{Re}_w^{0,65} \text{Pr}_w^{0,4}; \quad (9)$$

$$\text{Re}_w = \frac{G_w D_h}{\mu_w}; \quad (10)$$

$$D_h = 2b, \quad (11)$$

де  $\lambda_w$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);

$d_e$  – еквівалентний діаметр каналу, м;

$\text{Re}_w$ ,  $\text{Pr}_w$  – число Рейнольдса та Прандтля.

$G_w$  – витрата теплоносія, кг/с;

$D_h$  – гідравлічний діаметр, м

$\mu_w$  – динамічна в'язкість теплоносія,

$b$  – відстань між пластинами, м.

Витрата робочого тіла у тепловому насосі визначалася із залежності:

$$G_{wf} = V_s \rho_{CM, in} N \eta_{vol}, \quad (12)$$

де  $V_s$  – робочий об'єм компресора, м<sup>3</sup>;

$N$  – частота обертання компресора;

$\eta_{vol}$  – об'ємний ККД компресора;

$\rho_{CM, in}$  – густина робочого тіла на вході у компресор, кг/м<sup>3</sup>.

Приймається, що у компресорі відсутній перекрідний процес. Тоді енергетичний баланс цього компонента буде мати вигляд [10], [11]:

$$W_{CM} = G_{wf} (h_{CM, out} - h_{CM, in}), \quad (13)$$

де  $G_{wf}$  – витрата робочого тіла через компресор, кг/с;

$h_{CM, in}$  – питома ентальпія робочого тіла на вході у компресор, Дж/кг;

$h_{CM, out}$  – питома ентальпія робочого тіла на виході із компресора і визначалася за формулою:

$$h_{CM, out} = h_{CM, in} + \frac{h_{CM, out, is} - h_{CM, in}}{\eta_{is}}, \quad (14)$$

де  $h_{CM, out, is}$  – питома ентальпія робочого тіла на виході із компресора після ізоентропійного стиснення, Дж/кг;

$\eta_{is}$  – ізоентропійний ККД компресора.

Об'ємний  $\eta_{vol}$  та ізоентропійний  $\eta_{is}$  ККД компресора розраховувалися на основі використання кореляційних залежностей та методики [12], [13]:

$$\eta_{vol} = k_1 \cdot \left( 1 + k_s \cdot \frac{t_{CM, in} - 18}{100} \right) \cdot \exp \left( k_2 \cdot \frac{p_{CM, in}}{p_{CM, out}} \right); \quad (15)$$

$$\frac{\eta_{vol}}{\eta_{is}} = \left( 1 + k_e \cdot \frac{t_{CM, in} - 18}{100} \right) \cdot \exp \left( a \cdot \frac{T_1}{T_2} + b \right), \quad (16)$$

де  $t_{CM, in}$  – температура робочого тіла на вході у компресор, °С;

$p_{CM, in}/p_{CM, out}$  – степінь стиснення робочого тіла в компресорі;

$T_1/T_2$  – відношення абсолютних температур конденсації та випаровування;

$k_1$ ,  $k_s$ ,  $k_2$ ,  $k_e$ ,  $a$  та  $b$  – коефіцієнти, які прийняті рівними 1.04, 0.15, -0.07, -0.1, -2.40, та 2.88, відповідно.

Розширювальний вентиль розраховано за умови незмінної ентальпії:

$$h_{EXV, in} = h_{EXV, out}, \quad (12)$$

де  $h_{EXV, in}$  та  $h_{EXV, out}$  – питома ентальпія робочого тіла на вході та виході із розширювального вентиля, відповідно, кДж/кг.

Теплофізичні властивості робочих тіл, що використовуються у досліджуваній ТНУ, визначалися за допомогою програми Coolprop [14].

Точність запропонованої моделі оцінювалася на основі експериментальних даних, що наведено в [15]. Конструктивні та експлуатаційні характеристики установки є ідентичними до даних з [15].

В якості показника точності моделі з оцінювання динамічних процесів використовувався показник, який визначався за формулою [3]:

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\Delta Y_{m,i} - \Delta Y_{exp,i}}{\Delta Y_{exp,i}} \right| \times 100\%, \quad (12)$$

де  $\Delta Y$  – зміна досліджуваного параметра порівняно з його початковим значенням; індекси “m” та “exp” позначають результат моделі та експерименту, відповідно;  $i$  –  $i$ -й розрахунковий або експериментальний результат у заданий момент часу;  $N$  – загальна кількість розрахункових та експериментальних результатів під час динамічного процесу.

Збурення під час моделювання в точності відповідають експериментальним даним взятих з [15] (рис. 2).

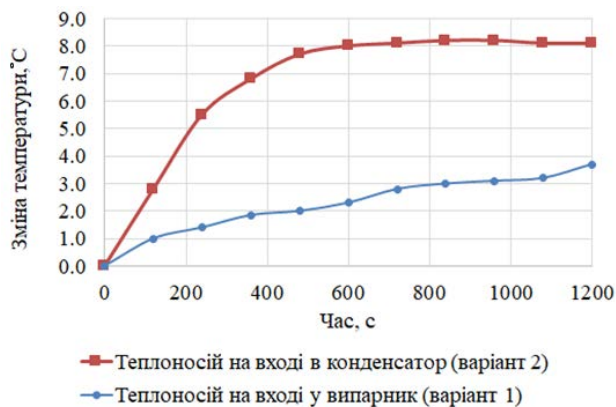


Рис. 2. Динаміка нанесення збурень під час експериментів для оцінки точності розробленої моделі [15]

Експериментальні дані з рис. 3 показують, що точність розробленої моделі задовільна (похибка MAPE рівна 10.5%).

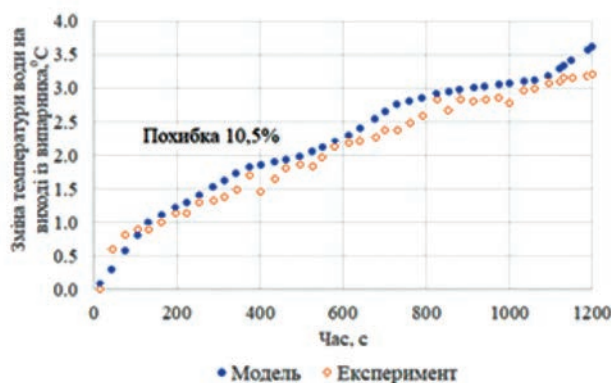


Рис. 3. Порівняння результатів розрахунків з визначення динаміки зміни температури теплоносія низькопотенційного джерела на виході із випарника за розробленою моделлю із експериментальними даними, що наведено в [15] (варіант 1 з рис. 2)

Відповідно до рис. 4 очевидно, що збільшення температури теплоносія на вході в конденсатор

приведе до зростання температури конденсації і зменшення холодопродуктивності випарника. Як наслідок, температура теплоносія на виході з випарника зростає. Середня похибка MAPE результатів моделювання порівняно з експериментальними даними для випадку 2 становить 8,3%, що на достатньому рівні підтверджує точність розробленої динамічної моделі ТНУ.

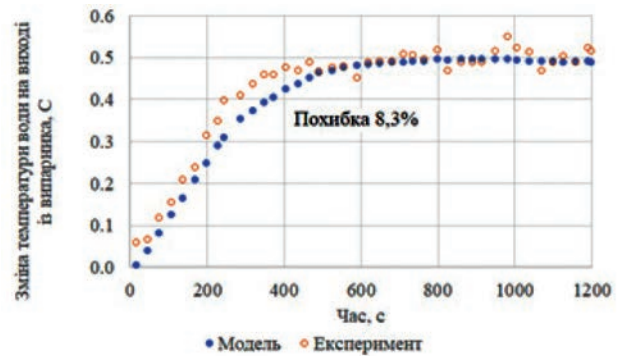


Рис. 4. Порівняння результатів розрахунків з визначення динаміки зміни температури теплоносія низькопотенційного джерела на виході із випарника за розробленою моделлю із експериментальними даними, що наведено в [15] (варіант 2 з рис. 2)

Результати. У випадку експлуатації ТНУ найбільш значущим регульованим параметром є температура теплоносія на виході із конденсатора.

Динаміка зміни температури води на виході із конденсатора  $T_{water,CD,out}$  ТНУ за умови ступеневих збурень наведена на рис. 5.

Як видно із рис. 5, збурення зі сторони конденсатора, а саме зміна температури  $T_{water,CD,in}$  та витрати  $G_{water,CD}$  води на вході у конденсатор мають більший вплив на вихідний параметр, ніж зміна температури  $T_{water,EV,in}$  та витрати  $G_{water,EV}$  води на вході у випарник. Можна зробити висновок, що досліджувані перехідні процеси в об'єкті можна апроксимувати аперіодичними ланками першого порядку з або без запізнювання (див. табл. 2).

На основі розробленої моделі було досліджено вплив початкових умов на перехідні процеси у ТНУ при трьох варіантах початкових умов:

1) початкові значення температури води на вході у випарник приймалися рівними +6, +8 та +10°C.

Як видно із рис. 6(a) коефіцієнт передачі по каналу  $T_{water,CD,in} - T_{water,CD,out}$  не залежить від початкової температури води на вході у випарник. Коефіцієнт передачі між температурою води на виході із конденсатора та температурою води на вході у випарник, витратою води системи опалення, витратою води через випарник, а також частотою

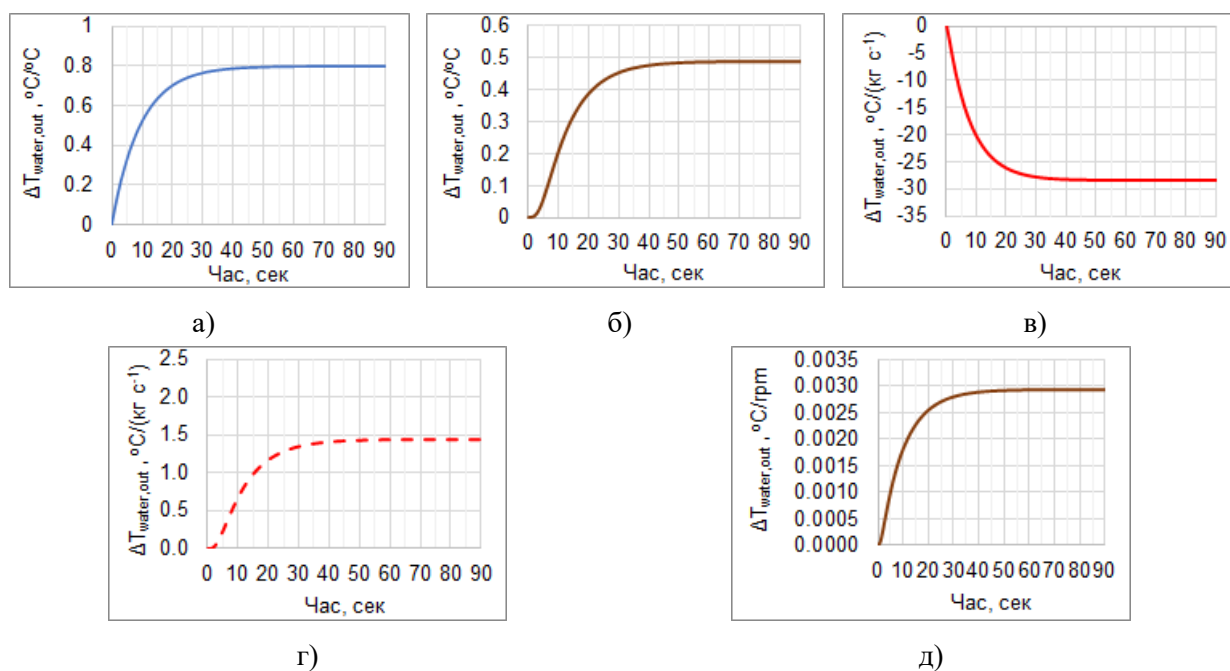


Рис. 5. Перехідні процеси зміни температури води на виході із конденсатора після нанесення ступеневого збурення: а) температури води на вході в конденсатор, б) температури води на вході у випарник, в) витрати води системи опалення, г) витрати води через випарник, д) частоти обертання валу компресора

Таблиця 2

Параметри об'єкта за наведеними каналами

Канал	Коефіцієнт передачі	Постійна часу, с	Час запізнення, с
$T_{water,CD,in} - T_{water,CD,out}$	0,8 °C/°C	9	0
$T_{water,EV,in} - T_{water,CD,out}$	0,48 °C/°C	10	4,1
$G_{water,CD} - T_{water,CD,out}$	- 28,5 °C/(кг·c <sup>-1</sup> )	8	0
$G_{water,EV} - T_{water,CD,out}$	1,4 °C/(кг·c <sup>-1</sup> )	10	3,4
$N - T_{water,CD,out}$	0,0029 °C/(об/хв)	9	1

обертання валу компресора у перехідному процесі зростає зі збільшенням початкової температури води на вході у випарник. З рис. 6 (г) для заданих початкових значень температури води на вході у випарник коефіцієнт передачі між температурою води на виході із конденсатора та витратою води через випарник рівний 1,44, 1,75 та 1,98 °C/°C;

2) початкові значення частоти обертання валу компресора були рівними 3000, 3500, 4000 об/хв.

З рис. 7 видно, що початкова частота обертання валу компресора не має впливу на перехідний процес зміни температури  $T_{water,CD,out}$  у випадку ступеневого зростання температури води на вході в конденсатор (рис. 7 (а)). Для всіх інших видів збурень частота обертання валу компресора

впливає на коефіцієнт передачі каналів збурень. Зокрема, із рис. 7 (б, в, г) можна побачити, що коефіцієнти передачі по каналам  $T_{water,EV,in} - T_{water,CD,out}$ ,  $G_{water,CD} - T_{water,CD,out}$  та  $G_{water,EV} - T_{water,CD,out}$  збільшуються у випадку зростання частоти обертання компресора. Разом з тим, коефіцієнт передачі по каналу  $N - T_{water,CD,out}$  зменшується відповідно до значень 0,0031, 0,0029, 0,0027 °C/рпм у випадку зростання частоти обертання  $N$  відповідно 3000, 3500 та 4000 рпм (рис. 7(д));

3) початкові значення температур води на вході в конденсатор становили +45, +50 та +55°С.

З рис. 8 бачимо, що на відміну від попередніх варіантів, у цьому випадку початкова температура води на вході в конденсатор або взагалі не впливає

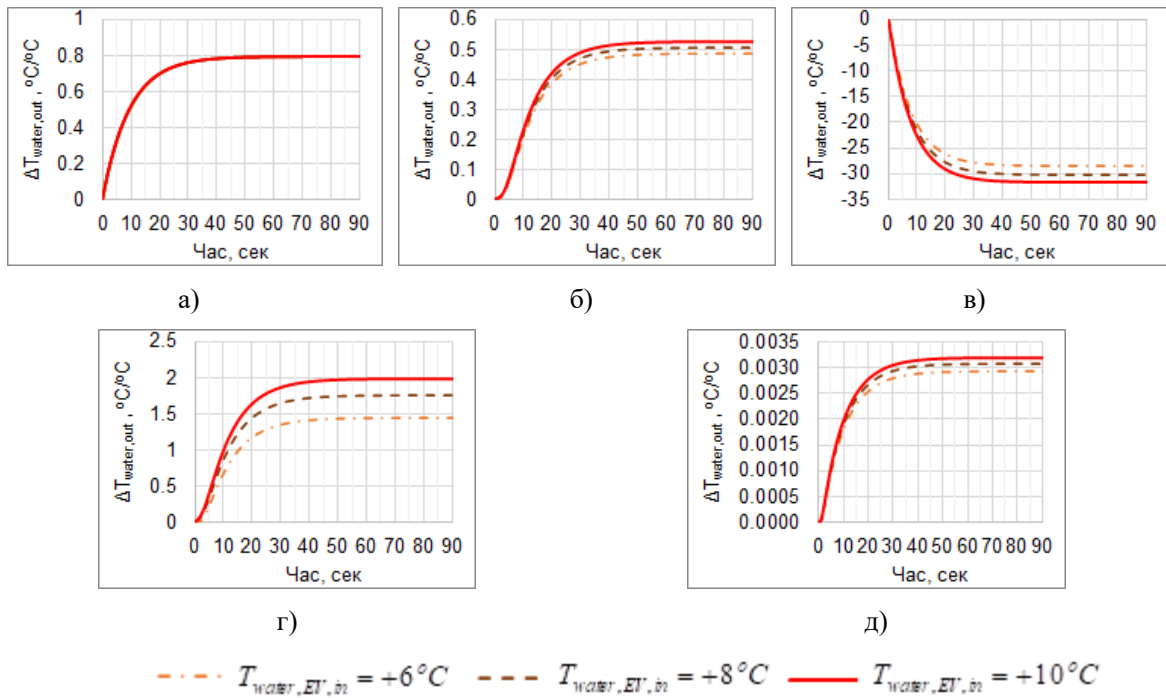


Рис. 6. Перехідні процеси зміни температури води на виході із конденсатора ТНУ для варіанту 1: а) температури води на вході в конденсатор на 1 °С, б) температури води на вході у випарник на 1 °С, в) витрати води системи опалення на 1 кг/с, г) витрати води через випарник на 1 кг/с, д) частоти обертання валу компресора на 1 грт

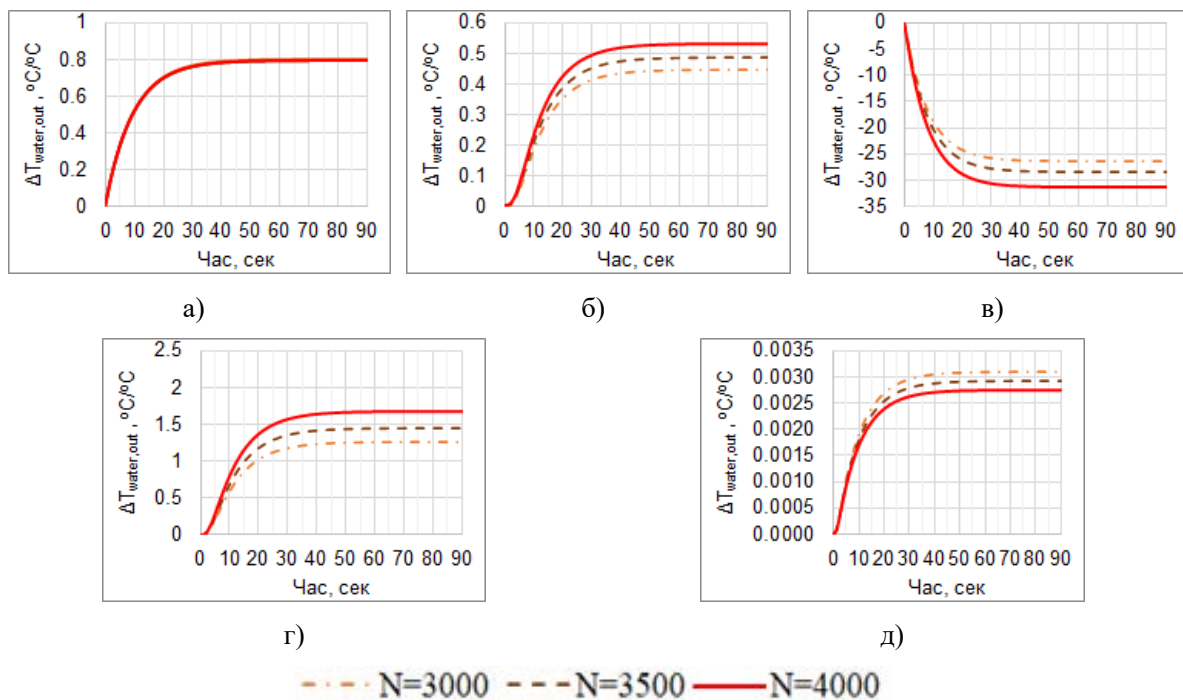
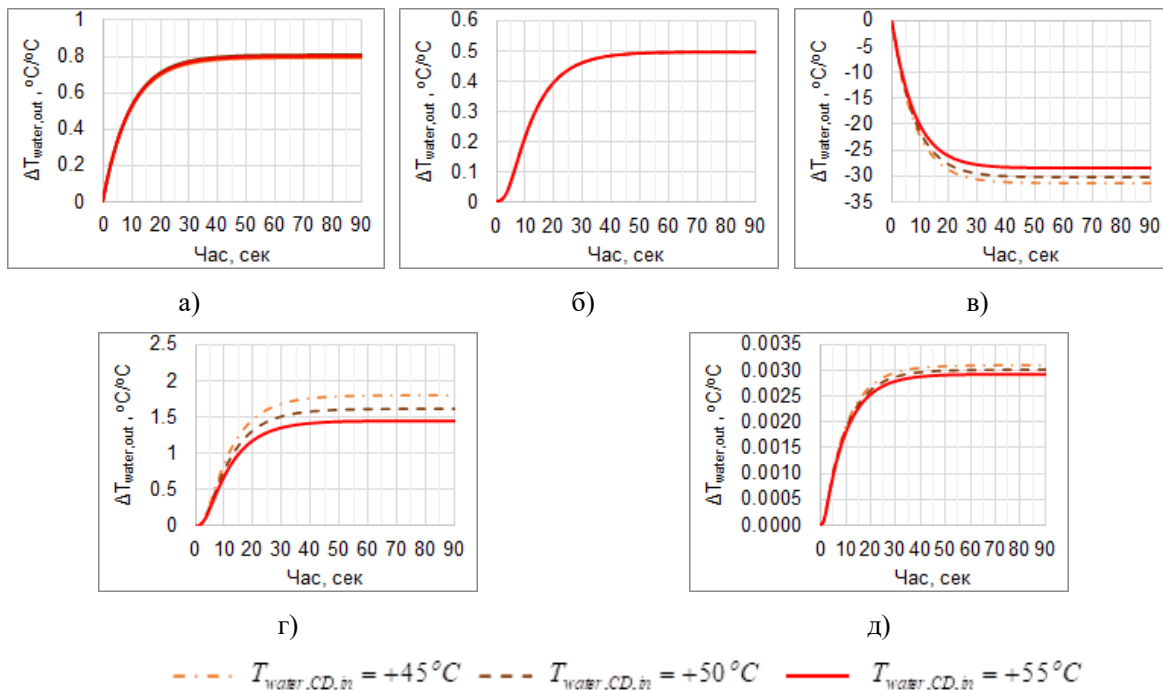


Рис. 7. Перехідні процеси зміни температури води на виході із конденсатора ТНУ для варіанту 2: а) зміна температури води на вході в конденсатор на 1 С, б) зміна температури води на вході у випарник на 1 С, в) зміна витрати води системи опалення на 1 кг/с, г) зміна витрати води через випарник на 1 кг/с, д) зміна частоти обертання валу компресора на 1 грт



**Рис. 8.** Перехідні процеси зміни температури води на виході із конденсатора ТНУ для варіанту 3: а) зміна температури води на вході в конденсатор на 1 °С, б) зміна температури води на вході у випарник на 1 °С, в) зміна витрати води системи опалення на 1 кг/с, г) зміна витрати води через випарник на 1 кг/с, д) зміна частоти обертання компресора на 1 грм

(рис. 8 (а, б)), або несуттєво змінює (рис. 8 (в, г, д)) коефіцієнт передачі у перехідних процесах між вхідним збуренням та вихідним параметром.

**Висновки.** Розроблено та реалізовано динамічну модель для дослідження перехідних процесів у парокompресійній ТНУ «вода-вода». Вхідними змінними моделі є температура і витрата води на вході у випарник, температура і витрата води на вході в конденсатор та частота обертання валу компресора. Вихідним параметром реакції об'єкта є температура води на виході із конденсатора.

Перевірка на адекватність показала, що, як порівняти з експериментальними даними, похибка з визначення параметрів об'єкта у динамічних процесах за розробленою моделлю не перевищує 10%.

Використавши розроблену модель, було змодельовано перехідні процеси ТНУ у випадку різних збурень та початкових умов, що дало можливість дослідити динамічні характеристики об'єкта. Виявлено, що досліджувані перехідні процеси можна апроксимувати аперіодичними ланками першого порядку. Показано, що зміна температури та витрати води на вході у конденсатор мають більший вплив на вихідний параметр, ніж зміна температури та витрати води на вході у випарник. Визначено, що при різних початкових умовах кое-

фіцієнти передачі більшості перехідних процесів змінюються.

Виявлено, що апроксимовані аперіодичними ланками першого порядку перехідні процеси зміни температури води на виході із конденсатора, зумовлені ступеневим зростанням температури та витрати води на вході в конденсатор, мають постійні часу 9 та 8 с. Перехідні процеси зміни температури води на виході із конденсатора, зумовлені ступеневими збуреннями температури та витрати води на вході у випарник, можна апроксимувати аперіодичною ланкою першого порядку із постійною часу 10 с та часом запізнення 4,1 та 3,4 с. У випадку ступеневого зростання частоти обертання валу компресора апроксимований перехідний процес характеризується постійною часу 9 с та часом запізнення 1 с.

Отриману модель буде використано для її інтеграції із динамічною моделлю системи теплозабезпечення будинку з подальшим застосуванням у задачах синтезу систем автоматичного керування та предиктивного обслуговування.

Стаття підготовлена в рамках виконання проекту «Ексергетичне обґрунтування нестаціонарних режимів та характеристик комбінованого тепло- та холодозабезпечення енергоефективних будівель на основі теплонасосних систем» (номер державної реєстрації НДР 0122U001750).

Список літератури:

1. Goyal, A.; Staedter, M.A.; Garimella, S. A Review of Control Methodologies for Vapor Compression and Absorption Heat Pumps. *Int. J. Refrig.* 2019, *97*, 1–20, doi:10.1016/j.ijrefrig.2018.08.026.
2. Rasmussen, B.P. Review Article Dynamic Modeling for Vapor Compression Systems–Part I: Literature Review. 2012, *18(5)*, 934–955, doi:10.1080/10789669.2011.582916.
3. Afram, A.; Janabi-Sharifi, F. Review of Modeling Methods for HVAC Systems. *Appl. Therm. Eng.* 2014, *67*, 507–519, doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.03.055.
4. Grald, E.W.; MacArthur, J.W. A Moving-Boundary Formulation for Modeling Time-Dependent Two-Phase Flows. *Int. J. Heat Fluid Flow* 1992, *13*, 266–272, doi:10.1016/0142-727X(92)90040-G.
5. Yao, Y.; Wang, W.; Huang, M. A State-Space Dynamic Model for Vapor Compression Refrigeration System Based on Moving-Boundary Formulation. *Int. J. Refrig.* 2015, *60*, 174–189, doi:10.1016/j.ijrefrig.2015.07.027.
6. Sanama, C.; Xia, X. Transient State Modelling and Experimental Investigation of the Thermal Behavior of a Vapor Compression System. *Math. Probl. Eng.* 2021, *2021*, 1–14, doi:10.1155/2021/9941451.
7. Voloshchuk, V.A.; Nekrashevych, O.V.; Bohza, M.S.; Hikalo, P.V. DYNAMIC CHARACTERISTICS OF AN AIR-SOURCE HEAT-PUMP SYSTEM. *Sci. Notes Taurida Natl. VI Vernadsky Univ. Ser. Tech. Sci.* 2023, *2*, 36–44, doi:10.32782/2663-5941/2023.3.2/07.
8. Yao, Y.; Wang, W.; Huang, M. A State-Space Dynamic Model for Vapor Compression Refrigeration System Based on Moving-Boundary Formulation. *Int. J. Refrig.* 2015, *60*, 174–189, doi:10.1016/j.ijrefrig.2015.07.027.
9. Muley, A.; Manglik, R.M. Experimental Study of Turbulent Flow Heat Transfer and Pressure Drop in a Plate Heat Exchanger With Chevron Plates. *J. Heat Transf.* 1999, *121*, 110–117, doi:10.1115/1.2825923.
10. Kinab, E.; Marchio, D.; Rivière, P.; Zoughaib, A. Reversible Heat Pump Model for Seasonal Performance Optimization. *Energy Build.* 2010, *42*, 2269–2280, doi:10.1016/j.enbuild.2010.07.007.
11. Sanaye, S.; Chahartaghi, M.; Asgari, H. Dynamic Modeling of Gas Engine Driven Heat Pump System in Cooling Mode. *Energy* 2013, *55*, 195–208, doi:10.1016/j.energy.2013.03.074.
12. Mateu-Royo, C.; Sawalha, S.; Mota-Babiloni, A.; Navarro-Esbrí, J. High Temperature Heat Pump Integration into District Heating Network. *Energy Convers. Manag.* 2020, *210*, 112719, doi:10.1016/j.enconman.2020.112719.
13. Mateu-Royo, C.; Navarro-Esbrí, J.; Mota-Babiloni, A.; Amat-Albuixech, M.; Molés, F. Thermodynamic Analysis of Low GWP Alternatives to HFC-245fa in High-Temperature Heat Pumps: HCFO-1224yd(Z), HCFO-1233zd(E) and HFO-1336mzz(Z). *Appl. Therm. Eng.* 2019, *152*, 762–777, doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.02.047.
14. Bell, I.H.; Wronski, J.; Quoilin, S.; Lemort, V. Pure and Pseudo-Pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2014, *53*, 2498–2508, doi:10.1021/ie4033999.
15. Yao, Y.; Huang, M.; Chen, J. State-Space Model for Dynamic Behavior of Vapor Compression Liquid Chiller. *Int. J. Refrig.* 2013, *36*, 2128–2147, doi:10.1016/j.ijrefrig.2013.05.006.

**Voloshchuk V.A., Nekrashevych O.V., Bohza M.S., Hikalo P.V. DYNAMIC CHARACTERISTICS OF AN AIR-SOURCE HEAT-PUMP SYSTEM**

*Heat pump systems are regarded with great promise for further increased applications in heating and cooling systems. For implementation of automated control systems dynamic characteristics of such systems should be determined. This can be achieved with experiments or with development of mathematical and computer models. In the last case physical processes are described with differential equations of mass, energy and momentum conservation.*

*In this work a model expressing dynamic processes in a water-to-water heat pump system with an installed capacity of 25 kW and R-134a was developed and implemented in a software application. The input variables of the model were the temperature and flow rate of water at the evaporator inlet, the temperature and flow rate of water at the condenser inlet, and the compressor speed. The output parameter of the plant's response was the water temperature at the condenser outlet.*

*The comparison of the model results with the experimental data during the transient response process has shown that the average errors of the calculated results don't exceed the experimental ones more than 10.5% (experimental case 1 – 10.5%, experimental case 2 – 8.3%). The model was used to study the dynamic characteristics of the plant by applying step disturbances. It was found that the studied transient responses could be identified with first order models. The values of process gains, time constants, which changed within the range 8...10 s, and time delays – the range 1...4 s.*

*It was shown that disturbances of the temperature and water flow rate at the condenser inlet had higher impact on the output parameter than the temperature and water flow rate at the evaporator inlet, which was confirmed by increasing process gains. It was found that under different initial conditions, the process gains of the most transient responses change, which indicated nonlinearity of the plant.*

*The obtained model will be used to integrate it with the dynamic model of the heating and cooling systems and further implementation in control systems and predictive maintenance.*

**Key words:** *mathematical model, step disturbance, transient response, dynamic characteristics, heat pump system.*



# ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.35

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/28>**Кривошеєва В.С.**

Комунальний заклад «Харківський ліцей № 161 «Імпульс» Харківської міської ради»

**Федоскіна С.В.**

Комунальний заклад «Харківський ліцей № 161 «Імпульс» Харківської міської ради»

**Кириленко М.І.**

Комунальний заклад «Харківський ліцей № 161 «Імпульс» Харківської міської ради»

**Майзеліс А.О.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

## УМОВИ СПІВОСАДЖЕННЯ CU, NI І ZN В ПОЛІЛІГАНДНИХ ЕЛЕКТРОЛІТАХ

Покриття сплавами системи Cu-Ni-Zn мають різні, необхідні промисловості, функціональні властивості, однак їх електроосадження обмежено значною різницею стандартних потенціалів. Стаття присвячена порівнянню катодних процесів розряду і анодних процесів розчинення міді, нікелю і цинку в пірофосфатно-цитратних і аміакатно-гліцинатних електролітах для оцінки умов їх співосадження. Об'єкт досліджень – циклічні вольтамперні залежності в пірофосфатно-цитратних і аміакатно-гліцинатних електролітах для електроосадження міді, нікелю і цинку. Залежності отримано за допомогою потенціостату MTech SPG-500fast. Виявлено, що виділення металів з пірофосфатно-цитратних електролітів відбувається з більшою на 200–700 мВ поляризацією, ніж з аміакатно-гліцинатних, а їх розчинення – в 1,5–2 рази з більш низькою припустимою анодною густиною струму. За рахунок зв'язування іонів металів в полілігандних електролітах в міцні комплекси, їх рівноважні потенціали зміщуються в бік від'ємних значень на 400–600 мВ в порівнянні зі стандартними потенціалами. Однак в пірофосфатно-цитратному електроліті різниця рівноважних потенціалів між металами зменшується лише на 20–50 мВ, тоді як в аміакатно-гліцинатному – на 170–190 мВ. Показано, що, з урахуванням ефектів деполізації при виділенні в сплав від'ємного металу і надполізації при виділенні позитивного металу в обох електролітах можливо співосадження в компактному вигляді нікелю з цинком, а також міді з нікелем – з пірофосфатно-цитратному електроліті завдяки більшій поляризованості при виділенні міді з цього електроліту в порівнянні з аміакатно-гліцинатним. Зазначено, що через значну різницю потенціалів виділення міді і нікелю з цинком в аміакатно-гліцинатному електроліті, при густинах струму нижче за граничний виділення міді, їх співосадження буде досягатися лише при більших густинах струму з розвиненням поверхні за рахунок включення дисперсної міді.

**Ключові слова:** мідь, цинк, нікель, електроосадження сплавів, аміакатно-гліцинатний електроліт, пірофосфатно-цитратний електроліт.

**Постановка проблеми.** Покриття сплавами Cu-Zn, Cu-Ni, Zn-Ni і CuNiZn використовуються у промисловості тому що, окрім міцності зчеплення, корозійної стійкості, твердості, мають певні функціональні властивості [1]. Наприклад, використовують електрокаталітичну активність, пам'ять форми покриттів сплавом Cu-Zn [2–4]. Покриття зі сплавом Cu-Ni-Zn пропонуються для захисту сталевих виробів від корозії як більш стійке

до корозії, ніж сплав Zn-Ni [5]. Пористі покриття сплавом Cu-Ni-Zn використовують як каталітичне активне в реакціях окислення глюкози [6], відновлення нітрату ( $\text{NO}_3^-$ ) [7], виділення водню при електролізі води у лужному середовищі [8].

Складність співосадження цих металів обумовлена значною різницею стандартних потенціалів, яка складає близько 1 В. Тому електроосадження покриттів подвійними і потрійним сплавом

системи Cu-Ni-Zn здійснюється з використанням комплексних сполук цих металів, які забезпечують зближення потенціалів їх розряду. Найбільш поширені ціанідні електроліти [9, 10]. Однак їх токсичність потребує використання інших електролітів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для електроосадження покриттів сплавами системи Cu-Ni-Zn використовують різні комплексні електроліти. Це амікатні [11], пірофосфатні [12], гліцерольні [13], полілігандні [14], пропонують іонні рідини [7] й глибокі евтектичні розчинники [15].

Але кожний з електролітів має, окрім переваг, ще й свої недоліки. Тому створення більш досконалих електролітів є актуальним завданням.

**Метою досліджень** було порівняння катодних процесів розряду і анодних процесів розчинення міді, нікелю і цинку в пірофосфатно-цитратних і амікатно-гліцинатних електролітах для оцінки умов їх співосадження.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**  
*Методика.* Для приготування електролітів використано хімічні реактиви кваліфікації «х.ч.» або «ч.д.а.» та дистильовану воду. Склад пірофосфатно-цитратних електролітів «Cu1», «Ni1», «Zn1» і амікатно-гліцинатних електролітів «Cu2», «Ni2», «Zn2» наведено у табл. 1.

Поляризаційні дослідження проведено з використанням потенціостату МТех SPG-500fast. Циклічні поляризаційні залежності (ЦВА) отримали починаючи з потенціалу розімкненого кола початку у катодному напрямку до досягнення густини струму 85–90 мА/см<sup>2</sup>, потім – у анодну сторону до активного виділення кисню. Швидкість розгортки потенціалів при реєстрації поляризаційних залежностей складала 10 мВ/с. Робочим електродом для поляризаційних досліджень був електрод з платинової фольги площею 1 см<sup>2</sup>. Допоміжний електрод – електрод з платинової фольги площею 2 см<sup>2</sup>. Електрод порівняння – хлорид срібний, відносно якого наведено всі потенціали.

Вихід за струмом визначали як співвідношення кількості електрики за анодний період ЦВА (до початку виділення кисню) та за катодний період.

Таблиця 1

Склад електролітів

Вміст компонента, моль/дм <sup>3</sup>	Назва електроліту					
	«Cu1»	«Ni1»	«Zn1»	«Cu2»	«Ni2»	«Zn2»
[Cu <sup>2+</sup> ]	0,5	–	–	0,35	–	–
[Ni <sup>2+</sup> ]	–	0,5	–	–	0,35	–
[Zn <sup>2+</sup> ]	–	–	0,5	–	–	0,35
[Cit <sup>3-</sup> ]	0,25	0,25	0,25	–	–	–
[P <sub>2</sub> O <sub>7</sub> <sup>4-</sup> ]	1,0	1,0	1,0	–	–	–
[Gly]	–	–	–	0,65	0,65	0,65
[NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ]	–	–	–	2,14	2,14	2,14

**Результати досліджень.** В обох полілігандних електролітах як виділення міді, так й її розчинення, протікає за складним механізмом (рис. 1). Розряд міді з амікатно-гліцинатного електроліту починається, після гальмування нуклеації, зі швидкої стадії приєднання першого електрону і виходу після приєднання другого електрону вже при –0,5 В на граничний дифузійний струм (кр. 2). На відміну від цього електроліту, в пірофосфатно-цитратному електроліті розряд міді протікає зі значною поляризацією з виходом на граничний струм змішаної природи лише при –1,2 В (кр. 1). Тобто, діапазон осадження компактних покриттів міддю в пірофосфатно-цитратному електроліті розширюється на 700 мВ в порівнянні з амікатно-гліцинатним. Розчинення осаду міді в обох електролітах гальмується продуктами розчинення, однак припустима густина струму в амікатно-гліцинатному електроліті (кр. 2) в 1,5 рази вища (див. анодні гілки ЦВА), що сприяє кращому розчиненню мідних анодів в цьому електроліті.

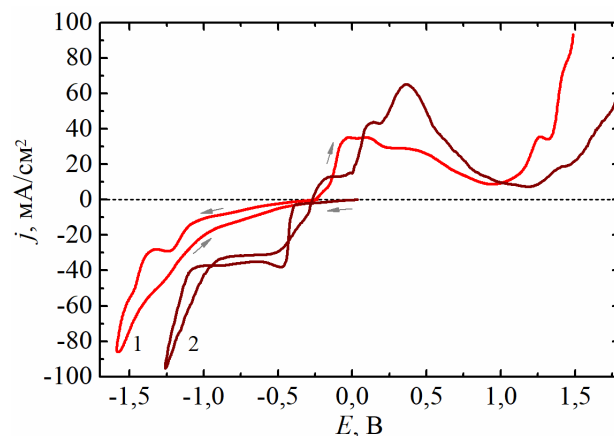


Рис. 1. ЦВА в пірофосфатно-цитратному електроліті «Cu1» (1) і амікатно-гліцинатному електроліті «Cu2» (2)

В полілігандних електролітах, що містять іони нікелю, розряд нікелю, після відновлення кисню, починається біля –0,7 В (рис. 2). На відміну від його розряду, наприклад, з сульфатного електроліту, катодні гілки ЦВА в полілігандних електролітах мають хвилі граничного струму. Розряд нікелю в пірофосфатно-цитратному електроліті значно більш утруднений (кр. 1). Анодні гілки свідчать про обмежену розчинність нікелевих осадів (вставка рис. 2) й про наявність можливості розчинення, хоча і з низькою швидкістю, нікелю в діапазоні потенціалів від 0,6 В до 0,9 В в амікатно-гліцинатному електроліті без додаткового введення хлоридів (кр. 2 рис. 2).

Цинк також з більшою поляризацією розряджається з пірофосфатно-цитратного електроліту (кр 1 рис. 3). Крім того, анодна гілка ЦВА свідчить, що розчинення цинку в цьому електроліті обмежується лише  $18 \text{ mA/cm}^2$  і потім, після пасивації продуктами розчинення, має струм пасивації  $5 \text{ mA/cm}^2$ . В амікатно-гліцинатному електроліті катодний осад цинку розчиняється повністю в подвійному анодному піку з припустимою густиною струму  $50 \text{ mA/cm}^2$  (кр. 2).

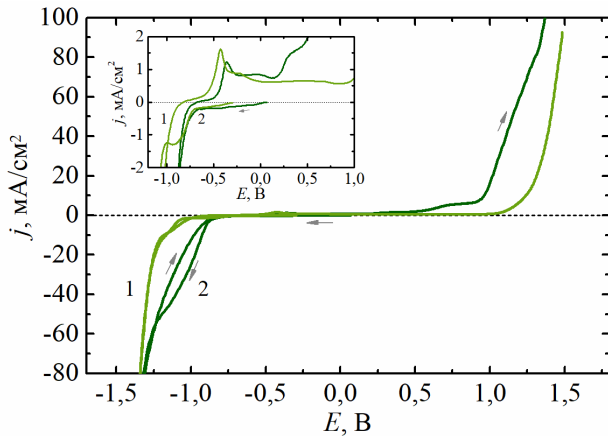


Рис. 2. ЦВА в пірофосфатно-цитратному електроліті «Ni1» (1) і амікатно-гліцинатному електроліті «Ni2» (2). Вставка – ЦВА у зменшеному масштабі

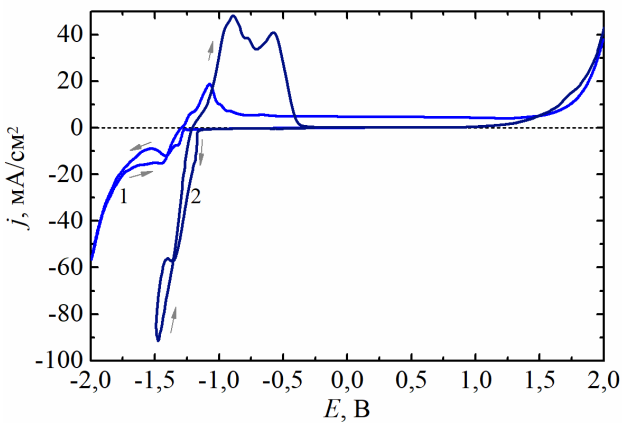


Рис. 3. ЦВА в пірофосфатно-цитратному електроліті «Zn1» (1) і амікатно-гліцинатному електроліті «Zn2» (2)

Наслідком більшої поляризації при виділенні металів з пірофосфатно-цитратних електролітів (ліві стовпчики діаграми рис. 4) є більш низький, ніж в амікатно-гліцинатних електролітах (праві стовпчики), вихід катодних осадів за струмом через сумісне виділення водню, яке прискорюється при більш від'ємних значеннях потенціалу. У випадку нікелю значення виходу за струмом лише умовно, через можливо неповне розчинення

в розрахунковому діапазоні потенціалів до виділення кисню.

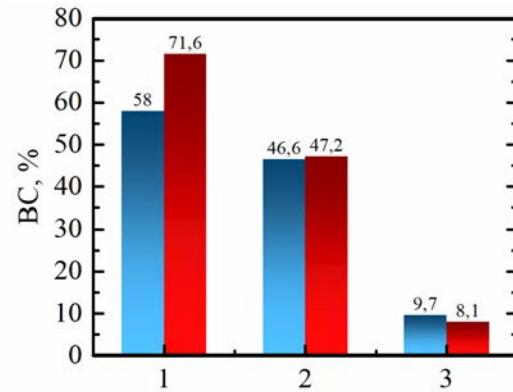


Рис. 4. Вихід за струмом в пірофосфатно-цитратних (ліві, голубі, стовпчики) і амікатно-гліцинатних (праві, червоні, стовпчики) електролітах «Zn1» і «Zn2» (1), «Cu1» і «Cu2» (2), «Ni1» і «Ni2» (3)

Оцінимо можливість співосадження Cu, Ni і Zn у полілігандних електролітах. У табл. 2 наведено порівняння значень стандартних потенціалів  $E^0$  цих металів у розчинах, які містять лише іони металів  $M^{2+}$ , і рівноважних потенціалів у полілігандних розчинах, значення яких отримали з перетину зворотного ходу катодних гілок ЦВА з віссю потенціалів (див. вставку рис. 5 для пірофосфатно-цитратного електроліту і вставку рис. 6 – для амікатно-гліцинатного).

Стандартні потенціали металів відрізняються більш ніж за  $0,5 \text{ V}$ , а стандартні потенціали міді й цинку – більш ніж за  $1 \text{ V}$  (табл. 2), через що співосадження цих металів у компактному вигляді в електролітах на основі простих гідратованих іонів металів не відбувається. В полілігандних електролітах іони усіх металів зв'язані в міцні комплекси, і рівноважні потенціали значно менші, ніж стандартні. В амікатно-гліцинатному електроліті різниця рівноважних потенціалів міді з нікелем і цинком зменшується на  $190 \text{ mV}$  і  $170 \text{ mV}$  відповідно, проте в пірофосфатно-цитратному електроліті різниця рівноважних потенціалів між металам зменшується лише на  $20\text{--}50 \text{ mV}$  (табл. 2).

Завдяки більшій поляризованості катодна гілка ЦВА в електроліті «Cu1» (кр. 3 рис. 5) наближується до катодної гілки ЦВА в електроліті «Ni1» (кр. 2), що припускає можливість їх співосадження в пірофосфатно-цитратному електроліті у широкому діапазоні потенціалів. Наприклад, різниця потенціалів при густині струму  $10 \text{ mA/cm}^2$  складає  $190 \text{ mV}$  (табл. 2), що можливо подолати за рахунок ефектів деполіризації при виділенні в сплав електронегативного металу нікелю і надполяри-

Потенціали металів при осадженні в порівнянні зі стандартними і рівноважними потенціалами

$j$ , $\text{mA}/\text{cm}^2$	$j = 0 \text{ mA}/\text{cm}^2$			$j = 10 \text{ mA}/\text{cm}^2$		$j = 40 \text{ mA}/\text{cm}^2$
	$\text{M}^{2+}$	$\text{M}^{2+}-\text{P}_2\text{O}_7^{4-}-\text{Cit}^{3-}$	$\text{M}^{2+}-\text{NH}_4^+-\text{Gly}$	$\text{M}^{2+}-\text{P}_2\text{O}_7^{4-}-\text{Cit}^{3-}$	$\text{M}^{2+}-\text{NH}_4^+-\text{Gly}$	$\text{M}^{2+}-\text{NH}_4^+-\text{Gly}$
$E(\text{Cu})$	+0,34	-0,25	-0,27	-0,98	-0,41	-1,09
$E(\text{Ni})$	-0,25	-0,82	-0,67	-1,17	-0,92	-1,10
$E(\text{Zn})$	-0,76	-1,30	-1,20	-1,38	-1,18	-1,28
$E(\text{Ni}) - E(\text{Cu})$	-0,59	-0,57	-0,40	-0,19	-0,51	-0,01
$E(\text{Zn}) - E(\text{Ni})$	-0,51	-0,48	-0,53	-0,21	-0,26	-0,18
$E(\text{Zn}) - E(\text{Cu})$	-1,10	-1,05	-0,93	-0,40	-0,77	-0,19

зації при виділенні електропозитивного металу міді. Приблизно така ж різниця потенціалів при виділенні нікелю і цинку при густині струму  $10 \text{ mA}/\text{cm}^2$ , 210 мВ. Але різниця потенціалів виділення міді й цинку складає вже 400 мВ, й їх співосадження більш вірогідно при зменшенні концентрації іонів міді і збільшенні концентрації іонів цинку в електроліті.

На відміну від пірофосфатно-цитратного електроліту мідь виділяється з амікатно-гліцинатного електроліту з низькою перенапругою (кр. 3 рис. 6), через що до досягнення її граничного струму співосадження з нікелем і цинком неможливо: наприклад, при густині струму  $10 \text{ mA}/\text{cm}^2$  різниця потенціалів складає 510 і 770 мВ відповідно. Але співосадження цинку з нікелем, за умови ефектів деполяризації і над поляризації, можливо як і в пірофосфатно-цитратному електроліті. Слід відмітити, що при густині струму вищій, ніж граничний струм виділення міді,  $50 \text{ mA}/\text{cm}^2$ , потенціали осадження усіх металів зближуються до 10–190 мВ (табл. 2). Тобто, співосадження буде досягатися, але з розвиненням поверхні за рахунок включення дисперсної міді на її граничному струмі.

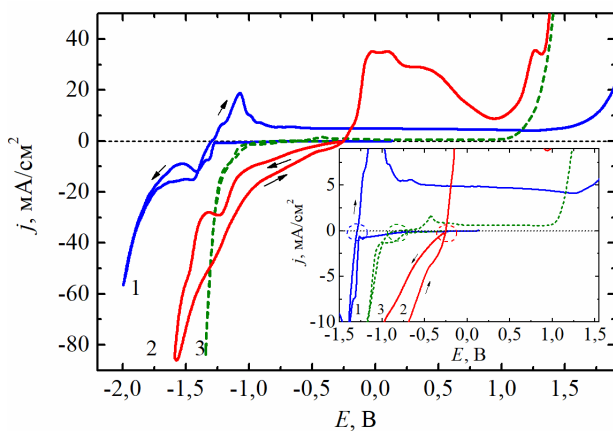


Рис. 5. ЦВА зі швидкістю розгортки потенціалів  $10 \text{ мВ}/\text{с}$  в пірофосфатно-цитратних електролітах «Zn1» (1), «Cu1» (2), і «Ni1» (3). Вставка – ЦВА в зменшеному масштабі

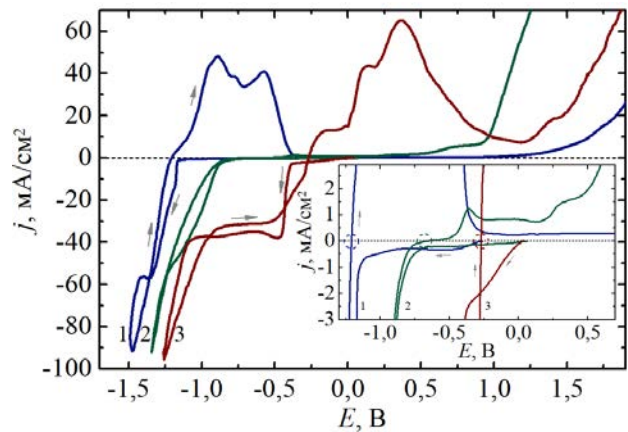


Рис. 6. ЦВА зі швидкістю розгортки потенціалів  $10 \text{ мВ}/\text{с}$  в амікатно-гліцинатних електролітах «Zn1» (1), «Cu1» (2), і «Ni1» (3). Вставка – ЦВА в зменшеному масштабі

**Висновки.** Дослідження методом циклічної вольтамперметрії розряду и розчинення міді, нікелю і цинку в пірофосфатно-цитратних і амікатно-гліцинатних електролітах показало, що:

- катодна поляризація при виділенні металів в пірофосфатно-цитратних електролітах на 200–700 мВ більша, ніж при виділенні з амікатно-гліцинатних. Розчинення катодних осадів усіх металів в обох електролітах через слабо лужне середовище гальмується продуктами розчинення, однак припустима анодна густина струму в амікатно-гліцинатних електролітах в 1,5–2 рази вища, що сприяє розчиненню анодів в цих електролітах;
- за рахунок зв'язування іонів металів в міцні комплекси в амікатно-гліцинатному електроліті різниця рівноважних потенціалів міді з нікелем і цинком зменшується на 190 мВ і 170 мВ відповідно, проте в пірофосфатно-цитратному електроліті різниця рівноважних потенціалів між металам зменшується лише на 20–50 мВ;
- мідь виділяється з амікатно-гліцинатного електроліту з низькою перенапругою, через що до досягнення її граничного струму співосадження з нікелем і цинком неможливо; завдяки більшій

поляризуємості при виділенні міді з пірофосфатно-цитратного електроліту діапазон потенціалів осадження міді у компактному вигляді наближується до потенціалів осадження нікелю; в обох електролітах можливо співосадження нікелю з цинком в компактному вигляді;

– при густині струму вищій, ніж граничний струм виділення міді, в аміакатно-гліцинатному електроліті потенціали осадження усіх металів зближуються до 10–190 мВ, й їх співосадження буде досягатися, але з розвиненням поверхні за рахунок включення дисперсної міді на її граничному струмі.

#### Список літератури:

1. Kaliaraj G.S., Vishwakarma V., Dawn S.S., Karthik A., Vigneshwaran S., Naidu G.D. Reduction of sulphate reducing bacterial survival by Cu-Ni, Zn-Ni and Cu-Zn-Ni coatings using electroless plating technique for oil/diesel pipeline applications. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 45. P. 6804–6806.
2. Özdemir R., Karahan İ. H., Karabulut O. A study on the electrodeposited Cu-Zn alloy thin films. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2016. Vol. 47. No. 11. P. 5609–5617.
3. Ballesteros J.C., Gómez-Solís C., Torres-Martínez L.M., Juárez-Ramírez I. Electrodeposition of Cu-Zn intermetallic compounds for its application as electrocatalyst in the hydrogen evolution reaction. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2015. Vol. 10. P. 2892–2903.
4. Yurdal K., Karahan İ.H. Phase Formation in Electrodeposited Cu-Zn Alloy Films Produced from Ultrasonicated Solutions. *Acta Physica Polonica A*. 2017. Vol. 132. No. 3. P. 1091–1094.
5. M. Heshmati, D. Seifzadeh, P. Shoghi, M. Gholizadeh-Gheshlaghi, “Duplex Ni-Zn-Cu-P/Ni-P electroless coating on magnesium alloy via maleic acid pretreatment. *Surf. Coat. Technol.* 2017. Vol. 328. P. 20–29.
6. Liu B., Li Z. Electrochemical treating of a smooth Cu-Ni-Zn surface into layered micro-chips of rice grain-like Cu/Ni (OH) 2 nanocomposites as a highly sensitive enzyme-free glucose sensor. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2019. Vol. 855. P. 113493.
7. Lo N. C., Yu C. L., Chen P. Y. Characterization of Nanowire-Constructed Porous CuZn and CuNiZn Nitrate-Active Electrodes Prepared via Galvanic Displacement on Electrodeposited Zn Templates in Ionic Liquids. *Journal of Electronic Materials*. 2023. Vol. 52(5). P. 2995–3007.
8. Maizelis A., Bairachniy B. Formation of multilayer metal-hydroxide electrode with developed surface for alkaline water electrolysis. *Materials Today: Proceedings*. 2019, Vol. 6. P. 227–231.
9. Fujiwara Y., Enomoto H. Electrodeposition of  $\beta'$ -Brass from Cyanide Baths with Accumulative Underpotential Deposition of Zn. *Journal of the Electrochemical Society*. 2000. Vol. 147. No. 5. P. 1840.
10. Faust C.L., Montillon G.H. The Electrodeposition of Copper-Nickel-Zinc Alloys from Cyanide Solutions, Part III. *Transactions of The Electrochemical Society*. 1938. Vol. 73(1). P. 417.
11. Ibrahim M.A., Bakdash R. S. New cyanide-free ammonia bath for brass alloy coatings on steel substrate by electrodeposition. *Int. J. Electrochem. Sci.* – 2015. Vol. 10. No. 2105. P. 9666.
12. Hacıbrahimoglu M., Yavuz A., Oztas M., Bedir M. Electrochemical and structural study of zinc-rich brass deposited from pyrophosphate electrolyte onto the carbon steel Dig. *J. Nanomater. Biostruct.* 2016. Vol. 11. P. 251–262.
13. Das S., Jena S., Bantia S., Mitra A., Das S., Das K. Novel pulse potentiostatic electrodeposition route for obtaining pure intermetallic Cu<sub>5</sub>Zn<sub>8</sub>-CuZn composite coating using glycerol-NaOH based electrolyte with advanced scratch resistance and anti-corrosive properties. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 792, P. 770–779.
14. Maizelis A. Electrochemical Formation of multilayer coatings: copper-nickel alloys and oxo-hydroxides : monograph. Lap Lambert Academic Publishing, 2021. 173 p.
15. Lo N.C., Sun I.W., Chen P.Y. Electrochemical preparation of porous ZnCuNi by electrodeposition in ethaline deep eutectic solvent followed by anodic or cathodic dealloying in alkaline aqueous solutions for higher nitrate reduction activity. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2021. Vol. 890. P. 115256.

#### **Kryvosheieva V.S., Fedoskina S.V., Kyrylenko M.I., Maizelis A.O. CONDITIONS OF Cu, Ni and Zn CODEPOSITATION IN POLYLIGAND ELECTROLYTES**

*Coatings by alloys of the Cu-Ni-Zn system have various functional properties necessary for industry, but their electrodeposition are limited by a significant difference in standard potentials. The article is devoted to the comparison of cathodic processes of discharge and anodic processes of dissolution of copper, nickel and zinc in pyrophosphate-citrate and ammonia-glycinate electrolytes to assess the conditions of their codeposition. The object of research is cyclic voltammograms in pyrophosphate-citrate and ammonia-glycinate electrolytes for the electrodeposition of copper, nickel, and zinc. The dependences were obtained using the MTech SPG-500fast potentiostat.*

*It was found that the deposition of metals from pyrophosphate-citrate electrolytes occurs with a 200–700 mV higher polarization than from ammonia-glycinate electrolytes, and their acceptable anodic current density is 1.5–2 times lower. Due to the binding of metal ions into strong complexes in polyligand electrolytes, their equilibrium potentials shift towards negative values by 400–600 mV compared to standard potentials. However, in the pyrophosphate-citrate electrolyte, the equilibrium potential difference between the metals decreases by only 20–50 mV, while in the ammonia-glycinate electrolyte, it decreases by 170–190 mV. It is shown that, taking into account the effects of depolarization during the deposition of a negative metal and under potential deposition of a positive metal, codeposition of nickel with zinc is possible in both electrolytes in a compact form. Due to greater polarizability during the discharge of copper from pyrophosphate-citrate electrolyte in comparison with ammonia-glycinate one, codeposition of copper with nickel is possible in pyrophosphate-citrate electrolyte in a compact form also. It is noted that due to the significant difference of copper potential and other metal potentials in the ammonia-glycinate electrolyte, at current densities lower than copper limiting current density, their codeposition will be achieved only at higher current densities with surface development due to the inclusion of dispersed copper.*

**Key words:** *copper, zinc, nickel, alloy electrodeposition, ammonia-glycinate electrolyte, pyrophosphate-citrate electrolyte.*

УДК 662.613.13

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/29>**Спасьонова Л.М.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Суббота І.С.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Готорук А.Є.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ВИКОРИСТАННЯ ЗОЛОШЛАКОВИХ ВІДХОДІВ ТЕПЛОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БУДІВЕЛЬНОЇ КЕРАМІКИ

Об'єктом дослідження є керамічні будівельні матеріали, які в сучасному світі залишаються одними з основних у будівельній індустрії. Перед підприємствами гостро стоїть проблема збільшення об'єму виробництва. Головною проблемою для галузі є забезпечення підприємств високоякісною сировиною, запаси якої постійно зменшуються. У зв'язку з дефіцитом глинистої сировини ця проблема не може бути розв'язана без застосування місцевої легкоплавкої глини та залучення відходів виробництва.

Розвиток теплоенергетики призвів до значного накопичення відходів, що утворюються у процесі виробництва. Відходи забруднюють довкілля і водночас є цінною мінеральною сировиною, яка може бути використана для виробництва будівельних матеріалів.

В результаті науково-дослідної роботи досліджено місцеву глинисту легкоплавку сировину з добавками золошлакових відходів, визначені раціональні склади сировинних мас, що дозволяють поліпшити технологічні властивості готової продукції. Відходи теплових станцій у вигляді золи можна використовувати без попереднього їх подрібнення, а отже без додаткових енергетичних витрат, що дозволяє розширити сферу корисного використання вторинної сировини та знизити собівартість готової продукції.

При дослідженні фізико-механічних властивостей керамічних мас на основі відходів теплоелектростанцій встановлено підвищення їх чутливості до сушіння в 2,8 разів, міцності на стиск у 1,8 разів, морозостійкості до 25 циклів. Також отримані результати свідчать, що усадка після сушіння і випалу та водопоглинання зменшилися. Проведені дослідження показали, що місцева мінеральна сировина, з відпрацюванням технологічних режимів, може бути використана для виробництва будівельної кераміки, яка буде необхідна після закінчення воєнного стану для відновлення України.

**Ключові слова:** екологічна технологія, відходи теплоелектростанцій, утилізація відходів, будівельна кераміка, легкоплавка глина.

**Постановка проблеми.** У сучасних умовах необхідно нарощувати темпи цивільного будівництва, яке супроводжується збільшенням обсягів виробництва будівельних матеріалів. Економічна ситуація, що склалася в країні, вимагає зниження витрат на усіх етапах виробництва. Одне з провідних місць на ринку будівельних матеріалів займає керамічна промисловість. Головною проблемою для галузі є забезпечення підприємств високоякісною сировиною, яка неоправно виснажується. У виробництво керамічних будівельних матеріалів залучається все більше низькосортної сировини, використання якої без кори-

гуючих добавок не дозволяє отримувати вироби з необхідними технічними характеристиками. Для регулювання властивостей кераміки, зниження собівартості виробництва застосовують в якості добавки відходи місцевої промисловості. Однією з таких добавок є відходи теплових електростанцій. Незважаючи на значний досвід у вживанні їх для виробництва будівельної кераміки об'єм цих відходів залишається значним, що приводить до необхідності подальшого вдосконалення способів їх використання. Тому актуальними є дослідження присвячені розширенню сировинної бази завдяки залученню місцевої легкоплавкої

сировини з додаванням відходів для створення керамічних будівельних матеріалів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** В роботі [1] наведені результати досліджень впливу викидів ТЕС. Показано, що близько 32% земель України забруднені викидами ТЕС. Використання промислових відходів у виробництві будівельних матеріалів дозволяє до 40% задовольнити потребу в сировині цієї галузі, на 10...30% знизити витрати на виробництво будівельних матеріалів із природної сировини, при економії капітальних вкладень до 35...50%. Дане джерело дає підґрунтя та озвучує необхідність аналізу властивостей та безпечності отриманих матеріалів. Дані дослідження в роботі проведені не були, бо стосувались саме економічних переваг використання відходів у виробництві.

У дослідженні [2] зола винесення – найдрібніші частинки потоку газів та один із основних видів відходів ТЕС при спалюванні вугілля розглядається як активна мінеральна добавка при виробництві в'язучих, силікатних та керамічних виробів. В роботі використовується підхід теоретичного розгляду складу та будови золи та отриманих з неї скломатеріалів. За результатами досліджень вміст  $\text{SiO}_2$  у золі в переважно не більше 41...54%. Вміст оксидів алюмінію, заліза, кальцію та магнію досить близькі за своїм значенням. Мінеральна частина зол ТЕС на 90...92% складається зі скла – склоподібної фази. Основним компонентом цієї фази є кремнезем, який значною мірою формує фізичні та хімічні властивості золи і бере участь як основний компонент у процесах гідратаційного твердіння та у процесах синтезу, утворюючи різні гідросилікати.

Зола складається із високозалістистого алюмосилікатного скла з домішками лужних та лужноземельних металів. У більшості природних сполук іони алюмінію та заліза знаходяться у шестерній координації. Однак за високих температур іони цих елементів можуть змінювати свою координацію з утворенням тетраедричних угруповань, чому сприяє присутність оксидів  $\text{K}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Mg}$ . В тетраедричних угрупованнях алюміній і залізо виступають поряд з кремнієм як склоутворювачі, а в октаедричних – як модифікатори.

Склофаза золи мікронеоднорідна. Природа неоднорідностей може мати як ліквіційний, і флуктуаційний характер. Ліквіційні явища можуть призводити до утворення мікроділянок, що майже повністю складаються з  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , так як іон алюмінію має більше значення електростатичного силового поля, ніж інші іони.

Навіть при несприятливих режимах горіння частка дійсно шкідливих частинок від загального вмісту горючих становитиме лише близько 8% (якщо третина частинок, що не згоріли, не встигне пройти стадію коксування). Тому навіть у золах із високим значенням частинок, що не згоріли (близько 20...30%), вміст шкідливих частинок буде невеликим (1,5...2,5%). Це свідчить, що їх додавання не може надати помітного негативного впливу на властивості отриманих матеріалів. Отже, це дає підстави стверджувати, що зола за складом може бути використана у якості добавки до керамічної маси. Автори дослідили фізико-хімічні процеси та структуру сировини та отриманих виробів, проте необхідно ще приділити увагу механічним властивостям продукту виробництва. Придільена увага теоретичній складовій, але без практичного виготовлення та випробування контрольних зразків дослідження є неповним. Такі результати не можна вважати підґрунтям для впровадження використання добавки золи в шихту без фізико-механічних досліджень.

В дослідженні авторів [3] показано, що розмір сферичних частинок золи коливається від небагатьох мікронів до 50–60 мкм. Введення у шихту 12,15% мелених золошлакових відходів Придніпровської ТЕС, 3,5% піритних огарків і 0,75–1,25% електролітів поліпшує фізико-механічні характеристики. Є не вирішені питання: не врахована усадка та пластичність зразків, а без цих параметрів важко судити про можливість використання такого продукту.

Введення до шихти золи ТЕС, що утворилася від спалювання донецького вугілля, за результатами авторів [3], збільшує віддачу вологи, скорочує термін висихання на 20–25%. Встановлено також, що оптимальна кількість зол становить 20–30%.

Для покращення якості цегли при використанні високочутливої до сушіння глини в складі шихти замість 15% тирси пропонується 30% летючої золи. Таким чином виникає можливість отримання цегли марок 125–150, з гарною морозостійкістю. Знижується собівартість одиниці продукції, але не оцінена безпечність отриманих виробів. Також у роботі залишилось невирішене питання, що могло б пояснити отримані результати. Отже, не розкрито питання завдяки яким чинникам збільшення вмісту золи у зразку покращує його властивості.

Автори [4] зазначили, що існує багато сфер застосування золи теплових електростанцій, де її можна використовувати: як теплоізоляційний



матеріал, мінеральні добрива, у будівництві доріг як асфальтобетонну основу та ін. Розглянуто достатньо способів використання корисних властивостей золи. Наприклад, отримання сухої будівельної суміші шляхом механічного подрібнення, вилучення корисних елементів хімічним шляхом. Це дає можливість отримати високоякісні комплексні мінеральні добрива. Шляхом ситового сепарування можна отримати основу для будівництва доріг на територіях ТЕС, що сприяє покращенню екологічної ситуації в районах їх розміщення.

Аналіз зразків дослідження [4] після геліотермічного хімічного впливу показує, що зі збільшенням щільності, їх маси та об'єму водопоглинання зменшуються, коефіцієнт розм'якшення золошлакових матеріалів незначний (3–4%). Різке зниження водопоглинання спостерігається у разі механохімічної активації системи за оптимальних температурних умов, що свідчить про значне зменшення капілярної та відкритої пористості структури. Токсикологічний аналіз не проводили.

В усіх використаних композиціях зразків з добавками модифікованого пластифікатора та вапна спостерігається достатньо висока морозостійкість, що відповідає вимогам будівельних норм, проте не підібраний оптимальний вміст додавання шлаку до шихти на основі порівняльного аналізу. Є доцільним проведення такого дослідження у майбутньому.

Автори [5] пропонують використання вугільної золи для виробництва легкого бетону з щільністю в діапазоні 1560–1960 кг/м<sup>3</sup>. Міцність на стиск такого матеріалу протягом 28 днів коливається в діапазоні 20–40 Н/мм<sup>2</sup>. Також золу пропонують використовувати як часткову заміну природних заповнювачів, а більш дрібну – як пісок.

Відсоток золи, який можна використовувати в складі суміші, залежить від її якості та необхідної міцності продукту. Включення золи має більш виражений вплив на опір розтягу, ніж на міцність на стиск, зниження міцності на розрив майже не помітно, якщо мінімальний вміст цементу становить 365 кг/м<sup>3</sup>.

Усадка при висиханні зменшилася зі збільшенням вмісту золи. Бетон із золи демонструє меншу усадку при висиханні порівняно з контрольними зразками. Через підвищену потребу у воді суміші золи має набагато більший ступінь текучості.

Зола-винесення та зола підвищують вогнестійкість матеріалів, головним чином завдяки широкому плато випаровування, яке утворює ця зола в результаті збільшення водопоглинання пористих заповнювачів.

Недоліками такого використання у дослідженні [5] є нижчий модуль пружності зольних сумішей, необхідність більшого вмісту води та збільшення часу схоплювання суміші зі збільшенням відсотка золи. Необхідне дослідження класу безпечності таких виробів та морозостійкості, для забезпечення усіх складових для використання отриманих матеріалів. Цікавим є розгляд такого застосування, що дає за аналогією застосувати схожі методики та випробування для виробництва керамічних виробів.

Автори [6] виявили, що завдяки складу температура плавлення золи-винесення відносно низька. Враховуючи ці характеристики, летючу золу можна оскловувати, і якщо її розплавити при температурах вище 1300 °С, утворюється відносно інертне скло, а контрольовану кристалізацію можна індукувати на склі на основі золи-винесення.

У роботі застосований підхід контролювання якості отриманих зразків за показниками мікротвердості. Значення мікротвердості в кераміці на основі золи зменшуються зі збільшенням часу витримки при температурі зародження, що пояснюється співвідношенням Холла-Петча. Значення твердості склокераміки, зародженої при 680 С/5 год, відповідає приблизно 7,2 за шкалою Мооса і є вищим за типові значення твердості до подряпин для плитки для підлоги (від 5 до 7 Мооса). Однак це менше, ніж значення стійкості до подряпин, зареєстровані для склокерамічних матеріалів на основі шлаку. Окрім значень мікротвердості, твердості на зношення, необхідне дослідження інших фізико-хімічних властивостей отриманого матеріалу та його безпечності. Тільки більш комплексні дослідження і їх результати можуть бути використані для гарантування якості виробів зі шлаку.

Кристалізація стеклооснові золи відбувається при температурах вище 671 °С з утворенням лише діюксидної фази в матриці вихідного скла. Склокераміка, що зародилася при температурі 680°С, мала мікроструктуру з кристалітів розміром від 0,2±0,5 мкм. Розмір кристалів збільшується з часом витримки. Збільшення розміру зерна призводить до загального зниження механічних властивостей, таких як мікротвердість і стійкість до зношування. Склокерамічний матеріал на основі легкої золи з оптимальними властивостями для дослідження [6] є матеріал, що зароджувався при 680°С протягом 5 год із мікротвердістю 907 кг/мм<sup>2</sup> і зносом близько 270 мм<sup>3</sup>/м.

Автори [7] тестували скляні, керамічні та склокерамічні вироби виготовлені із золи-винесення

ТЕС без будь-яких добавок. Було виявлено аморфну фазу зразка скла. У зразку склокераміки виявлено фазу авгіту, а в зразках кераміки – фази енстатиту та муліту. Крихітні кристалити однорідно дисперговані в мікроструктурі склокерамічного зразка, а в керамічних зразках утворилися витягнуті кристали. За токсикологічними випробуваннями виготовлені зразки можна вважати нешкідливими матеріалами. Виготовлені зразки показали високу стійкість до розчинів лугів на відміну від кислотних. Мікроструктурні, фізико-хімічні та механічні властивості отриманих зразків склокераміки кращі, ніж у виготовлених зразків скла та кераміки, що вказує на пріоритетність їх виготовлення з даної сировини. Необхідний підбір оптимальних співвідношень вмісту золи-винесення у виробках для отримання вищих експлуатаційних властивостей.

За інформацією з джерела [8] хімічний склад золи-винесення є типовим: склоподібна потрійна система ( $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--MgO}$ ) зі значною кількістю оксидів металів, які здатні діяти для зародження і кристалізації. Вказано, що зола-винесення значно зручніша за доменні та сталеварні шлаки у склокерамічному виробництві. Це досягається завдяки доступності у формі тонкого порошку, що робить його готовим для змішування інших інгредієнтів у партії та у більшій кількості, ніж шлак.

Результатами роботи [8] є виявлена закономірність впливу різної тривалості витримки при температурі кристалізації на мікроструктуру та властивості отриманих зразків склокераміки. Механічні властивості та коефіцієнт теплового розширення зразків склокераміки залежать лише від кількості кристалічної фази, а хімічна стійкість має високе значення. Також робота містить підібраний оптимальний час витримки зародження та кристалізації, але не враховано залежність даних параметрів від кількості доданої золи-винесення та безпечність продукції.

У дослідженні [9] зола-виносу теплової електростанції розглядається як сировинний матеріал для склокераміки оскільки містить  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Вказується, що таке доповнення складу знижує температуру плавлення і в'язкість розплаву. Контрольована кристалізація розплавів, що містять золу з теплових електростанцій, можлива шляхом термічної обробки кристалізації та нуклеації. Додавання  $\text{TiO}_2$  до вмісту золи-винесення позитивно впливає на кристалізацію, діючи як агент зародження. Недоліком даного використання є той факт, що вміст  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  обмежує використання летючої золи лише для кольорових продуктів, не враховує токсичність та фізико-хімічні характеристики отриманої склокераміки.

Дослідження [10] оцінює можливість використання вугільної золи (відходів теплових електростанцій) як заміну дрібного заповнювача в розчині та бетоні. Результати аналізу розчину та бетону, що містить вугільну золу при частковій і повній заміні піску, порівнювали з даними для звичайного розчину і бетону. Щільність будівельного розчину та бетону помітно зменшується зі збільшенням вмісту золи у вугільному кубі. Незважаючи на збільшення проникного пористого простору будівельних розчинів і бетонів із збільшенням вмісту вугільної золи, використання вугільної золи суттєво не впливає на міцність бетону на стиск. Зразки показали хороші теплоізоляційні властивості; значення теплопровідності значно знизилися з підвищенням зольності вугілля, а теплопровідність будівельного розчину та бетону зі 100% золи зменшилась на 68,61 та 46,91% відповідно порівняно з еталонним зразком. Не досліджено морозостійкість, клас безпечності та водопоглинання отриманого бетону.

Щодо особливостей золи теплових електростанцій як будівельного матеріалу вони досить добре вивчені та рекомендовані будівельникам для виробництва бетонів та дорожнього покриття, у меншій мірі як будівельний керамічний матеріал [1]. У всіх випадках зола використовується як добавка у відносно невеликому об'ємі.

Отже, за результатами обробки та аналізу наукових джерел близької тематики технологія потребує визначення оптимальних співвідношень класичної сировини та відходів на основі порівняння експлуатаційних властивостей контрольних зразків. А отримані матеріали мають бути досліджені на безпечність та відповідність вимогам за діючими нормативними документами.

**Мета дослідження** – розробка екологічної технології використання відходів теплових станцій для виробництва будівельних керамічних матеріалів. Це дасть можливість отримати вироби з комплексом необхідних експлуатаційних властивостей, розширити сировинну базу завдяки застосуванню місцевої легкоплавкої сировини та покращити екологічний стан в регіоні.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- підібрати склади та технологічні параметри виготовлення будівельних керамічних виробів на основі місцевої легкоплавкої сировини с залученням відходів ТЕС;
- дослідити придатність відходів ТЕС для отримання виробів будівельної кераміки;

– визначити фізико-механічні характеристики керамічних виробів з використанням відходів ТЕС у складі будівельних матеріалів.

**Виклад основного матеріалу.** Для вирішення поставлених завдань застосовували сучасні фізико-хімічні методи – рентгенофазовий, термічні (ТГ, ДТГ, ДТА) методи аналізу, хімічні методи дослідження сировинних матеріалів і мас на їх основі, що дало можливість оцінити особливості структуроутворення керамічних матеріалів. Для визначення придатності місцевої легкоплавкої глини для виготовлення керамічних виробів були проведені систематичні дослідження з розробки складів мас, а також основних характеристик виготовленої продукції.

Для визначення фазового складу матеріалів було застосовано модернізований рентгеновський дифрактометр ДРОН-3М (Burevisnyk), оснащений комп'ютерною системою для автоматичного запису даних дифракції. Було використано фільтроване  $\text{Cu} - \text{K}\alpha$  випромінювання. Аналіз отриманих даних проведено з використанням програми "Match". Ідентифікація фаз виконана згідно міжнародної бази стандартних рентгеновських дифракційних даних (PDF-2 database of ICDD). Коригування рівня фону та апроксимація піків проведена за допомогою програми "Fityk" [11].

При виконанні роботи було вивчено можливість застосування зольних відходів Трипільської ТЕС для виробництва будівельної кераміки на основі легкоплавкої глини Бучанського родовища Київської області, дифрактограма якої наведена в [12]. Хімічний склад сировинних компонентів наведено в таблиці 1.

Важливою характеристикою глин, яка визначає її пластичність, чутливість до сушіння і випалу, спіктивість, засмічення домішками, а також міцність готових виробів є гранулометричний склад [2].

Аналіз гранулометричного складу даної глинистої сировини показав, що розмір часток понад 0,25 мм складає всього 0,1%, розмір від 0,25 до 0,05 мм – 23,52%, розмір 0,05–0,01 мм складає 19,3%, 0,01–0,005 мм – 22,15%, 0,005–0,001 мм – 13,4% і менше ніж 0,001 мм – 21,53%. Згідно класифікації досліджувана сировина належить до дисперсної

глини з низьким вмістом включень. Вміст фракцій від 0,005–0,001 мм та 0,001 мм свідчить про її добру водозачинність, зв'язність та спіктивість.

Дана сировина відноситься до помірно- або середньопластичної залежно від шару залягання. Наявність значної кількості пилоподібної фракції (0,05–0,005 мм) погіршує сушильні властивості, підвищуючи чутливість до сушіння. Повітряна усадка глини знаходиться в межах 8%, а вогнева – до 3%.

Згідно хімічного складу глина за кількістю  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , знаходиться в межах 10,5–11,51%, що за класифікацією глинистої сировини відповідає групі кислих глин. За кількістю  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  та  $\text{TiO}_2$  глина відноситься до сировини з високим вмістом забарвлюючих оксидів, 4,01 та 0,57 відповідно. Сума водорозчинних солей у вихідній сировині складала 0,25 мг-екв/100 г глини, що відносить її до групи з низьким їх вмістом.

Мікроскопічне дослідження золи Трипільської ТЕС показало, що до її фазового складу входять глинисті агрегати в кількості 22%, склоподібна речовина – 50% і кристалічні фази. Склоподібна речовина золи є продуктом термохімічного впливу на мінеральну частину палива. Її частки, як правило, мають правильну сферичну форму, можуть бути суцільні або порожнисті.

Склоподібна фаза досліджуваної золи Трипільської ТЕС неоднорідна і представлена зернами неправильної форми з гострими гранями розміром від 0,3 до 10 мм. Значна частина зерен має пори різних розмірів, що утворилися в результаті різкого випаровування при попаданні шлаку в воду. Іноді зустрічаються також великі включення розміром до 40 мм. Жовтуватий колір склоподібній фазі надають присутні оксиди заліза. Основним компонентом цієї фази є кремнезем, який значною мірою формує фізичні та хімічні властивості золи і бере участь, як основний компонент, у процесах гідратаційного твердіння та у процесах синтезу, утворюючи різні гідросилікати. Вміст вуглецю в межах 8–10%.

Кристалічна фаза золи Трипільської ТЕС містить муліт, гематит, магнетит;  $\text{SiO}_2$  представлений різними модифікаціями кварцу у вигляді безбарвних кристалів розміром до 0,14 мм. Дрібні зерна

Таблиця 1

**Хімічний склад глинистої сировини Бучанського родовища Київської області та золи Трипільської ТЕС**

Зразки глини та золи	Вміст оксидів, %									В.п.п.
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{MgO}$	$\text{SO}_3$	
Глина Бучанського родовища	61,9	10,91	4,23	0,49	6,76	2,19	1,12	1,57	–	10,82
Зола Трипільської ТЕС	50,8	20,51	10,04	0,68	2,9	2,40	0,85	0,85	0,17	–

кварцу частково оплавлені і мають округлу форму. Насипна об'ємна маса кварцу – 900 кг/м<sup>3</sup>, щільність – 2180 кг/м<sup>3</sup>, питома поверхня – 3900 см<sup>2</sup>/г.

У роботі використовували пластичний спосіб підготовки сировинної суміші та формування зразків. При розробці керамічних мас для виготовлення будівельної кераміки необхідно враховувати чутливість їх до сушіння, зміну лінійних розмірів зразків під час сушіння та випалення, межу міцності на стиск та водопоглинання.

Керамічні зразки для проведення досліджень готували методом пластичного формування, використовуючи технологічний режим максимально наближений до процесу виготовлення керамічних виробів будівельного призначення. Для цього глину спочатку подрібнювали, а потім перемелювали у вальцях тонкого помелу і бігунах.

Підготовлені компоненти просіювали крізь сито, перемішували і зачиняли водою до нормальної формувальної вологості. Після вилежування протягом доби формували зразки розміром 50×50×50 мм і балок розміром 60×15×10 мм методом пластичного пресування при вологості 18–22%. Вилежування маси необхідно проводити для забезпечення протікання масообмінних процесів між глиною та цеолітом в повному обсязі. Відформовані зразки висушували до вологості 3–6%. Сушіння проводили в сушильній шафі при 100°C до постійної маси. Випал проводили в електричній печі при 950–1050°C з витримкою 2 години при максимальній температурі. Охолоджувалися зразки протягом 24 годин.

При використанні вигораючих домішок, якими є золошлакові відходи, важливо виявити вплив їх дисперсності на характеристики міцності керамічних матеріалів.

Збільшення дисперсності вигораючих домішок і температури випалення зразків зменшують розміри пор, що приводить до зменшення щільності і зміни характеристик міцності. Встановлено, що на міцність впливає не тільки дисперсність вигораючих домішок, а і співвідношення дисперсності вихідної сировини і домішок.

В роботі вивчено вплив дисперсності домішок на міцність кераміки в залежності від дисперсності вихідної сировини. Для цього досліджували міцність зразків в залежності від дисперсності вихідної сировини, дисперсності домішок і температури випалу. Дисперсність вихідної сировини становила менше 1,0; 0,8 і 0,5 мм. Результати досліджень міцності зразків залежно від дисперсності вигораючих домішок і температури випалення приведені на рис. 1–3.

З метою вивчення впливу добавки відходів ТЕС на технологічні властивості керамічних мас на основі легкоплавкої сировини були досліджені шихти для виробництва будівельної кераміки різного складу. Співвідношенням легкоплавкої глини і золи Трипільської ТЕС становили, %: № 1 – 100:0; № 2 – 90:10; № 3 – 80:20; № 4 – 70:30; № 5 – 60:40; № 6 – 50:50; № 7 – 40:60.

Результати проведених досліджень свідчать про те, що максимальна міцність характерна для зразків, співвідношення дисперсності вихідної сировини і вигораючих добавок яких становила 1:1. На міцність керамічних матеріалів істотно впливає склад шихти, методи формування, режими сушки і випалення.

З підвищенням температури випалення міцність керамічних матеріалів підвищується. Фізико-механічні показники шихти, цегли-сирцю і випаленої цегли наведені в табл. 2.

Для порівняння технологічних показників досліджуваних керамічних мас обраний склад під номером 1, який застосовується на підприємствах.

Наведені в табл. 2 дані показують, що тільки склад 7 практично не придатний для формування керамічних виробів. Результати дослідження інших складів керамічних мас показали, що їх фізико-механічні властивості не поступаються базовим показникам.

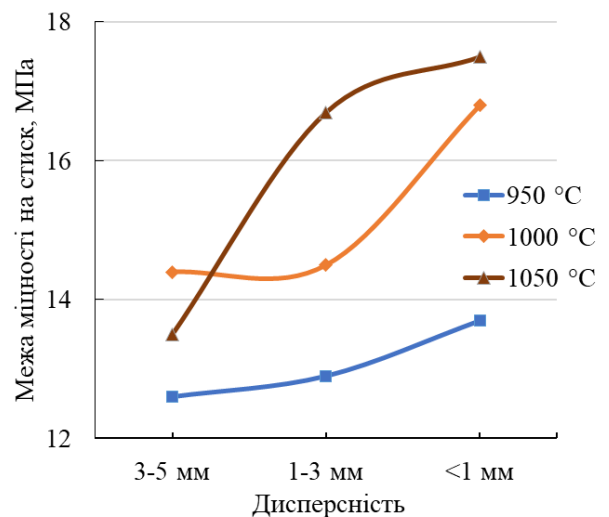


Рис. 1. Міцність зразків на стиск залежно від дисперсності домішок і температури випалення (вихідна сировина з дисперсністю < 1 мм)

Показник пластичності досліджуваних керамічних мас трохи вищий, ніж вихідної маси. Виходячи з отриманих даних, представлених в табл. 2, керамічна маса є помірно пластичною. Збільшення кількості відходів дозволило знизити

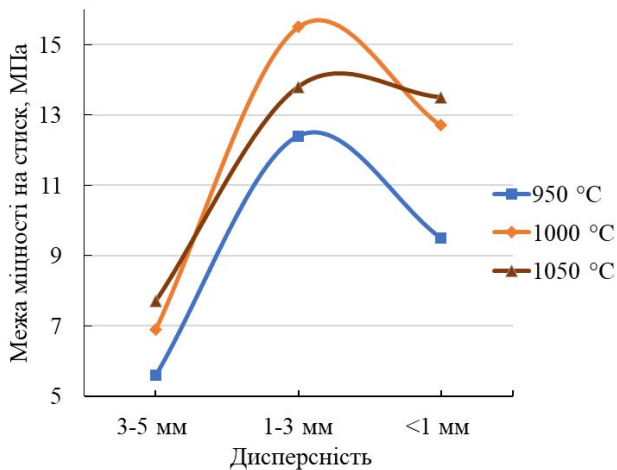


Рис. 2. Міцність зразків на стиск залежно від дисперсності домішок і температури випалення (вихідна сировина з дисперсністю < 0,8 мм)

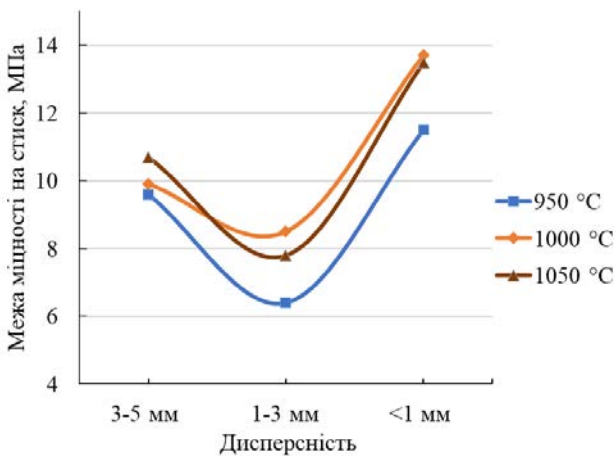


Рис. 3. Міцність зразків на стиск залежно від дисперсності домішок і температури випалення (вихідна сировина з дисперсністю < 0,5 мм)

чутливість до сушіння і поліпшити їх сушильні властивості. Це позитивно позначилося на повітряній усадці досліджуваних зразків різних складів керамічних мас. Вони стали малочутливими до сушіння, висушування відбувалося без тріщин і мали незначну повітряну усадку. Знижуючи усадку і покращуючи пластичність керамічної маси, введенням золошлакових відходів, вдалося підвищити міцність і морозостійкість керамічної цегли.

Результати досліджень отриманих зразків за водопоглинанням свідчать про підвищену їх пористість, що дає можливість отримати полегшений матеріал, який володіє високою звуко- та теплоізоляційною здатністю.

Таким чином, проведені дослідження показали можливість використання золошлакових відходів Трипільської ТЕС для виготовлення полегшеної якісної керамічної цегли, що відповідає вимогам до будівельних матеріалів. Використання золи, як наповнювача, при виробництві керамічних будівельних матеріалів дає можливість вирішувати одну з важливих екологічних задач сьогодення – утилізацію відходів виробництва, що безумовно зменшує навантаження на довкілля та сприяє поліпшенню екологічного стану регіону.

Вивчення властивостей зол ТЕС та можливості їх використання для виробництва будівельної кераміки проводилися вченими різних країн протягом багатьох років [1–10]. Однією з причин цього є те, що характеристики зол кожної ТЕЦ за хімічним та гранулометричним складом істотно відрізняються один від одного. Така неоднорідність сировини вимагає постійного вивчення

Таблиця 2

### Фізико-механічні характеристики досліджуваних керамічних мас

Показники	Номер складу керамічної маси						
	1	2	3	4	5	6	7
Характеристики шихти							
Пластичність	12	18	15	13	11	9	7
Чутливість до сушіння, с	80	110	130	160	190	230	300
Характеристики цегли-сирцю							
Повітряна усадка, %	5,8	5,2	4,8	4,5	4,3	4,2	4,0
Механічна міцність цегли-сирцю (кінцева вологість ≤8 %, МПа)							
на згин	0,8	2,0	1,8	1,5	1,2	0,9	0,7
на стиск	4,8	10,8	9,6	8,8	5,4	5,0	4,7
Характеристики випаленої цегли. Механічна міцність, МПа							
на згин	2,4	3,8	4,2	4,8	4,3	3,5	2,1
на стиск	10,4	12,4	13,4	16,8	15,7	13,1	10,2
Морозостійкість, цикли	15	20	25	30	25	20	14
Усадка, %	6,8	6,9	6,8	6,5	6,2	6,0	5,0
Водопоглинання, %	22,5	20,0	19,1	18,8	19,0	20,5	22,8
Щільність, кг/м <sup>3</sup>	1880	1990	1880	1740	1700	1540	1380

методів її підготовки та варіації сировинного складу мас.

В роботі [2] автори теоретично розглядали склад та будову золи та отриманих з неї скломатеріалів. В проведених нами дослідженнях показано, що будова та склад золи, результати дослідження яких наведені в табл. 1, залежить від цілого комплексу одночасно діючих факторів. На властивості зольних відходів впливає вид та морфологічні особливості палива. Крім цього має значення тонкість помелу в процесі його підготовки, зольність, хімічний склад мінеральної частини палива, температура в зоні горіння, час перебування частинок у цій зоні та ін. Значний вміст карбонатів у мінеральній частині вихідного палива під впливом високих температур у процесі горіння приводить до утворення силікатів, алюмінатів та феритів кальцію – мінералів, здатних до гідратації. Завдяки їх утворенню пояснюється можливість використання золи у якості добавки до кераміки, що не буде погіршувати якість виробів.

Порівняно з аналогічними дослідженнями [3, 4] вдалося отримати керамічні матеріали з максимальними показниками міцності на стиск та згин та отримати з гарними результатами морозостійкості отриманої кераміки. Особливість нашого дослідження полягає в тому, що вивчено вплив співвідношення дисперсності вихідної сировини і домішок на міцність виробів будівельної кераміки. В результаті встановлено, збільшення дисперсності вигораючих домішок та температури випалення приводить до зменшення розміру пор і щільності, і як наслідок до зростання міцності. Це було досягнуто завдяки підбору співвідношення добавки та легкоплавкої глини і порівняння експлуатаційних властивостей контрольних зразків. Отримані матеріали досліджені на безпечність та можливість використання у будівництві. Отже, дане дослідження доповнило існуючі дані про можливість використання відходів ТЕС у будівельній промисловості.

Велика кількість золи-винесення з ТЕС використовується для захоронення, що негативно впливає на довкілля. Особливо небезпечними є вимивання потенційно токсичних речовин у ґрунти та підземні води, зміна елементного складу рослинності, що росте поблизу ТЕС, та накопичення токсичних елементів по всьому харчовому ланцюгу. Питома вага переробки золи за [1] в Україні складає в межах 10%, тоді як у США цей показник сягає 20%, у Великій Британії – 60%, у Франції – 72%, у Фінляндії – 84%. Використання відходів ТЕС у виробництві будівельної кераміки

дає можливість збільшення цього відсотка в Україні у комплексі із використанням місцевої легкоплавкої сировини.

Так автори [7] досліджували застосування золи-винесення ТЕС без будь-яких добавок для виготовлення скляних, керамічних та склокерамічних виробів. На відміну від їх дослідження в даній роботі встановлено оптимальне співвідношення місцевої легкоплавкої глини і добавки золи ТЕС для отримання керамічних виробів з оптимальними експлуатаційними властивостями.

Розвиток даної технології дозволяє покращити екологічну ситуацію в районах розміщення ТЕС, виключити забруднення повітря і водного басейнів, звільнити землю, зайняту під відвали. Окрім цього, введення до 50 мас.% золи на 15–40% знижує собівартість сировини та виробництва отриманих матеріалів.

Отже, дане дослідження заповнює проблему визначення оптимальних співвідношень класичної сировини та відходів на основі порівняння експлуатаційних властивостей контрольних зразків. Дана добавка за табл. 2 покращує фізико-механічні характеристики і підходить для виробництва якісних та довговічних керамічних будматеріалів, враховуючи ключові параметри: міцність, водопоглинання, морозостійкість, усадку та щільність.

Досить високий вміст  $Fe_2O_3$  у золі-винесення, за даними табл. 1, обмежує використання летючої золи лише для кольорових продуктів, через забарвлюючу властивість цього оксиду. Отже, необхідно враховувати, що таку сировину краще застосовувати не для облицювальної кераміки.

Розвиток даного використання вугільної золи в будівництві мають бути зосереджені на сертифікації золошлаків, стандартизації щодо його використання та регулювання. Також важливим кроком може бути довгострокове дослідження впливу довговічності та міцності матеріалу з використанням вугільної золи.

Перспективним є використання золи не тільки у будівельній кераміці, а ще й в мулітовій, звичайній, побутовій, художній та у сфері полімерних композитів.

### Висновки

1. При оцінці придатності сировини для виготовлення конкретного виду будівельних матеріалів необхідно керуватися комплексною оцінкою властивостей легкоплавкої глини. До них відносяться мінералогічний, хімічний склад, вплив домішок на формування структури виробу після випалу з метою отримання необхідних фізико-технічних характеристик, що відіграє найважливішу роль.

Введення домішки золи до 50 мас.% дозволило забезпечити максимальні показники міцності на стиск, морозостійкість та водопоглинання.

2. Особливість будови золи Трипільської ТЕС полягає в тому, що до її фазового складу входять глинисті агрегати в кількості 22%, склоподібна речовина – 50% і кристалічні фази. Це дозволяє використовувати її в якості сировини для керамічного виробництва і одночасно вирішувати екологічні проблеми з захисту навколишнього середовища.

3. При дослідженні фізико-механічних властивостей керамічних мас на основі відходів ТЕС встановлено підвищення їх чутливості до сушіння в 2,8 разів, міцності на стиск у 1,8 разів, морозостійкості до 25 циклів. Також отримані результати свідчать, що усадка після сушіння і випалу та водопоглинання зменшилися.

Максимальні показники міцності на стиск та згин для запропонованих рецептур були досягнуті при температурі випалу 1050°C і характеризуються щільним, міцним керамічним черепком.

Результати проведених досліджень свідчать про те, що максимальна міцність характерна для зразків, співвідношення дисперсності вихідної сировини і відходів ТЕС становила 1:1.

Вирішення поставленого завдання дозволить створювати високоякісні будівельні матеріали, які володіють високою звуко- та теплоізоляційною здатністю на основі низькосортних глинистих порід, що забезпечить залучення у виробництво величезних ресурсів місцевої сировини. Використання відходів ТЕС як наповнювача при виробництві будівельних матеріалів дає можливість вирішувати найважливішу екологічну задачу – утилізацію відходів виробництва, що безумовно зменшує навантаження на довкілля та сприяє поліпшенню екологічного стану регіону.

Дослідження проводилось в рамках ініціативної теми «Керамічні матеріали на основі мінеральної сировини Київського регіону» (Державна реєстрація 0122U000523, дата реєстрації: 2022-01-23) без фінансової підтримки.

#### Список літератури:

1. Дворкін Л.І., Пашков І.А. Будівельні матеріали з відходів промисловості. Київ: Вища школа, 1989. 312 с. DOI <https://doi.org/10.32782/2664-0406.2021.39.5>
2. Приходько, А. П., Павленко, Т. М., & Аббасова, А. Р. Особенности зола тепловых электростанций как строительного материала. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2010. № 2-3 (143-144). С. 47-52.
3. Ковальський, В. П., Сідлак, О. С. Використання золи виносу ТЕС у будівельних матеріалах. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2014. Том 16. № 1. С. 35-40.
4. Alinazarov, A. K., Khusainov, M. A., & Gaybullaev, A. H. Applications of Coal Ash in the Production of Building Materials and Solving Environmental Problems. *Global Scientific Review*. 2022. Vol. 8. P. 89-95.
5. Abubakar, A. U., Baharudin, K. S. Potential use of Malaysian thermal power plants coal bottom ash in construction. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*. 2012. Vol. 3, № 2. P. 25-37.
6. Erol, M., Genç, A., Öveçoğlu, M. L., Yücelen, E., Küçükbayrak, S., Taptık, Y. Characterization of a glass-ceramic produced from thermal power plant fly ashes. *Journal of the European Ceramic Society*. 2000. Vol. 20, № 12. P. 2209-2214. DOI [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(00\)00099-6](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(00)00099-6)
7. Erol, M., Küçükbayrak, S., Ersoy-Mericişoyu, A. Comparison of the properties of glass, glass-ceramic and ceramic materials produced from coal fly ash. *Journal of Hazardous Materials*. 2008. Vol. 153, № 1-2. P. 418-425. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.08.071>
8. Erol, M., Demirler, U., Küçükbayrak, S., Ersoy-Mericişoyu, A., & Öveçoğlu, M. L. Characterization investigations of glass-ceramics developed from Seyitömer thermal power plant fly ash. *Journal of the European Ceramic Society*. 2003. Vol. 23. № 5. P. 757-763. DOI [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(02\)00193-0](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(02)00193-0)
9. Goga, F., Dudric, R., Cormos, C., Imre, F., Bizo, L., Misca, R. Fly ash from thermal power plant, raw material for glass-ceramic. *Environmental Engineering and Management Journal*. 2013. Vol. 12, №2. P. 337-342. DOI: 10.30638/eemj.2013.041
10. Torkittikul, P., Nochaiya, T., Wongkeo, W., & Chaipanich, A. Utilization of coal bottom ash to improve thermal insulation of construction material. *Journal of material cycles and waste management*. 2017. Vol. 19. P. 305-317. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10163-015-0419-2>
11. Wojdyr M. Fityk: a general-purpose peak fitting program. *J. Appl. Cryst.* 2010. Vol. 43, № 5-1. P. 1126-1128. DOI <https://doi.org/10.1107/S0021889810030499>
12. Спасьонова Л. М. Створення якісної кераміки з місцевої легкоплавкої сировини з високою чутливістю до сушіння. *Вчені Записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського*. 2023. Т. 34(73), № 3. С. 94-99. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.2/16>

**Spasonova L.M., Subbota I.S., Hotoruk A.Ye. USE OF ASH SLAG TYPES OF THERMAL POWER PLANTS FOR THE PRODUCTION OF BUILDING CERAMICS**

*The object of research is ceramic building materials, which remain one of the main ones in the construction industry. Enterprises face the acute problem of increasing production volumes. The main problem for the industry is providing enterprises with high-quality raw materials, the reserves of which are constantly decreasing. Due to the shortage of clay raw materials, this problem cannot be solved without the use of local low-melting clay and the involvement of production waste.*

*The development of thermal energy has led to a significant accumulation of waste generated in the production process. Waste pollutes the environment and at the same time is a valuable mineral raw material that can be used for the production of building materials.*

*As a result of the research work, local low-melting clay raw materials with additives of ash slag waste were investigated, rational compositions of raw materials were determined, which allow to improve the technological properties of finished products. The waste of thermal stations in the form of ash can be used without preliminary grinding, which allows you to expand the scope of useful use of secondary raw materials and reduce the cost of finished products.*

*When studying the physical and mechanical properties of ceramic masses based on thermal power plant waste, it was found that their sensitivity to drying increased by 2.8 times, compressive strength by 1.8 times, frost resistance up to 25 cycles. The obtained results indicate that shrinkage after drying and firing and water absorption decreased. The conducted studies showed that local mineral raw materials, with the development of technological regimes, can be used for the production of construction ceramics, which will be necessary for the restoration of Ukraine*

**Key words:** *ecological technology, thermal power plant waste, waste utilization, construction ceramics, low-melting clay.*



## ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 664-4

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/30>

**Силка І.М.**

Національний університет харчових технологій

**Кривчик М.А.**

Національний університет харчових технологій

**Матіящук О.В.**

Національний університет харчових технологій

**Ющенко Н.М.**

Національний університет харчових технологій

**Павлюченко О.С.**

Національний університет харчових технологій

### СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ БЕЗПЕЧНОСТІ ТА ЯКОСТІ ПРИГОТУВАННЯ СОУСІВ-ДРЕСІНГІВ У ЗАКЛАДАХ РЕСТОРАННОГО ГОСПОДАРСТВА

*Виробництво безпечної харчової продукції з високими споживчими властивостями є головним завданням для виробників та закладів ресторанного господарства. Однією з умов, що гарантує випуск якісної продукції є запровадження системи НАССР на підприємстві.*

*У статті розкриті основні етапи розроблення системи моніторингу безпеки та якості у закладі ресторанного господарства на прикладі технології приготування соусів-дресингів. Це салатні заправки на основі різних видів олій, які популярні серед споживачів та часто використовуються замість класичних соусів. Основною сировиною соусу-дресингу, технологія якого є предметом дослідження, виступає олія соняшникова, соус вустерський, гірчиця, спеції, прянощі, часник, лимон. Характерною особливістю даної технології є змішування всіх компонентів в емульсію та відсутність подальшої термічної обробки.*

*Визначено, що основними технологічними етапами приготування соусу-дресингу є: приймання сировини, тимчасове її зберігання, виробництво та зберігання готової продукції, реалізація. На кожному з цих етапів було здійснено ідентифікацію небезпечних чинників різного походження, визначено заходи та програми-передумови для їх врегулювання. Загалом при розробці плану управління безпекою виробництва соусу-дресингу встановлено чотири критичні контрольні точки на різних етапах: зберігання сировини (температура й вологість середовища, термін зберігання); змішування інгредієнтів (технологічні режими, санітарні норми та правила), пакування (технологічні режими та санітарні норми й правила); зберігання готової продукції (температура й вологість середовища, термін зберігання).*

*Обрано ряд програм-передумов, контроль та дотримання яких, дозволить виробляти безпечний продукт високої якості.*

*Визначено як впливає санітарно-гігієнічний стан виробничих приміщень та дотримання особистої гігієни персоналом на безпеку харчового продукту.*

**Ключові слова:** безпека харчової продукції, якість, система НАССР, соуси-дресинги.

**Постановка проблеми.** Розвиток харчової індустрії у XXI столітті вимагає кардинально нових та ефективних технологічних рішень, що стосуються виробництва харчових продуктів та

управління підприємством в цілому. Ці рішення насамперед направлені на підвищення якості та конкурентоспроможності продукції, що виробляється.

Визначальною ознакою конкурентоспроможності харчових продуктів є безпечність. Це як своєрідна гарантія того, що його вживання не нанесе жодної шкоди споживачу. Поняття «безпека» охоплює всі технологічні стадії виробництва харчової продукції від підготовки та обробки сировини до зберігання готової продукції. На кожному з цих етапів потрібно дотримуватися відповідних стандартів, норм та правил для отримання високоякісної продукції, яка не буде нести жодного ризику для споживачів [1, с. 10].

З метою забезпечення безпечності харчової продукції на підприємствах харчової промисловості та у закладах ресторанного господарства впроваджена система аналізу ризиків, небезпечних чинників та контролю критичних точок (НАССР – Hazard Analysis and Critical Control Points). Це запобіжна система контролю, що базується на послідовному та логічному оцінюванні можливих ризиків під час виробництва та зберігання харчової продукції [2, с. 7–8]. Система НАССР є міжнародно визнаною та широко впроваджена у Японії, США, Канаді, країнах Європейського Союзу та інших високорозвинених країнах [3, с. 2].

Що ж стосується України, то згідно Закону України «Про основні принципи та вимоги до безпечності та якості харчових продуктів» з вересня 2016 року усі підприємства харчової промисловості мали обов'язково впровадити на виробництві гігієнічні вимоги, так звані програми-передумови, а в подальшому – втілити процедури, які базуються на принципах НАССР. Таким чином, все це зумовлює необхідність розробки системи НАССР для харчової продукції та страв, що виробляються закладами ресторанного господарства (ЗРГ) [3, с. 4].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Переймаючи зарубіжний досвід, українські підприємці, власники ЗРГ, а також науковці досліджують та аналізують теоретичні й практичні аспекти впровадження системи НАССР на підприємствах харчування.

Ресторанний бізнес, який відповідає вимогам НАССР, гарантує своїм гостям, що його продукти не містять біологічних, хімічних і фізичних забруднень [4]. Також впровадження системи НАССР дозволяє контролювати ризики безпечності харчових продуктів у всьому ланцюгу харчування та економити кошти.

Порівняння системного підходу до безпечності харчової продукції у країнах ЄС та в Україні представлено у роботі Гавриляк М.Я. та Шестопап Г.С. [5, с. 7]. На думку авторів, для запровадження ефективної системи НАССР в Україні, необхідно

удосконалення законодавчо-нормативної бази України, що має здійснюватися на основі передового міжнародного досвіду.

На сьогоднішній день в Україні постійно ведуться дослідження практичного впровадження системи НАССР у виробництво харчової продукції, розробляються відповідні стандарти з подальшим їх застосуванням на всіх етапах технологічного процесу [6, с. 106; 7, с. 68].

Аналіз сучасних літературних джерел, демонструє активне дослідження що пов'язані з безпечністю харчової продукції, однак багато питань залишаються невирішеними. Особливої уваги потрібно надати проблемам, які пов'язані з впровадженням системи НАССР у ЗРГ [9, с. 296].

**Метою статті є** розробка системи моніторингу безпечності та якості приготування у закладах ресторанного господарства соусів на основі принципів НАССР.

**Виклад основного матеріалу.** Удосконалення існуючих чи розробка нових технологій харчової продукції повинні супроводжуватися дотриманням вимог законодавства та підтверджувати їх безпечність. Згідно з наказом ДП «УкрНДНЦ» № 340 від 31.10.2019р. в Україні вперше ухвалено низку стандартів, що окреслюють програми-передумови безпечності харчових продуктів. Таким чином з 20.09.2019 р. всі оператори ринку, діяльність яких пов'язана з харчовими продуктами повинні запровадити систему НАССР.

Розроблення та впровадження системи НАССР ґрунтується на 12 кроках та 7 принципах (табл. 1). Кроки із 6 по 12 ідентичні семи принципам НАССР. Ці кроки вважаються підготовчими, вони необхідні для отримання вхідних даних, які у подальшому будуть використані для розробки плану НАССР.

Таблиця 1

**Принципи для розробки плану НАССР\***

Принцип	Дія
1	Проведення аналізу небезпечних чинників
2	Встановлення критичних контрольних точок (ККТ)
3	Встановлення критичних меж для кожної ККТ
4	Встановлення процедур моніторингу для кожної ККТ
5	Встановлення коригувальних дій
6	Розробка процедур перевірки
7	Розробка процедур ведення протоколів та документації

\*на підставі джерела [2, 9]

У даній роботі представлено основні етапи впровадження системи НАССР у ЗРГ на прикладі технології дрсінгів, які є сучасним варіантом

соусів, що завжди були невід'ємною складовою меню ЗРГ. Сучасний споживач піклується про своє здоров'я, тому більшого споживання набувають легкі салатні соуси-дресінги. Їх асортимент розширюється та стає унікальною складовою страви, а популярність пов'язана з нескладним інгредієнтним складом, який можна змінювати щосезону та підлаштовувати до основної страви.

Основною сировиною для приготування дресінгів є різні види олій, спецій, прянощів, овочів та навіть фруктів. Характерною особливістю даної технології є змішування всіх компонентів в емульсію та відсутність термічної обробки. Останній факт особливо спонукає до впровадження принципів НАССР. Детальна форма опису соусів-дресінгів представлена у таблиці 2.

Як видно з таблиці, досліджуваний нами продукт має широку сферу застосування та користується попитом серед різних верств населення. На наступному етапі здійснювалося встановлення та ідентифікація небезпечних чинників, які можуть впливати на продукт під час його виробництва. Технологія приготування соусів-дресінгів складається з таких етапів: приймання сировини, тимчасове зберігання, виробництво продукції та її реалізація.

Вся сировина, що використовується для приготування соусів-дресінгів належить до певних груп продовольчих товарів. Зокрема соняшникова олія, вустерний соус, гірчиця «Американська» та сіль – належать до бакалійних товарів, часник – до плодоовочевих, лимон – до цитрусових.

Якість та безпечність готової продукції насамперед залежить від сировини, яка використову-

ється для її приготування, тому кожне підприємство здійснює ретельний підбір постачальників, які є офіційними операторами ринку. На етапі приймання сировини здійснюється вхідний контроль, контролюються умови транспортування, перевіряється наявність нормативної документації.

Для ідентифікації небезпечних чинників було охарактеризовано сировину, інгредієнти та пакувальні матеріали, які використовувалися для виробництва соусу (табл. 3).

Сировина, інгредієнти та пакувальні матеріали, які використовуються для виробництва соусів-дресінгів, є безпечними, оскільки мають підтверджені нормативні документи.

Причинами появи біологічних, фізичних та хімічних небезпечних чинників є порушення температурних режимів та рівня вологості, забруднення із зовнішнього середовища внаслідок порушення цілісності пакування, понаднормовий вміст пестицидів та радіонуклідів, наявність сторонніх домішок та ін.

Сировина, що постачається на підприємство, надходить на тимчасове зберігання. При цьому існує загроза виникнення фізичних, біологічних та хімічних небезпечних чинників. Виникнення небезпечних чинників на даному етапі зумовлюється ідентичними причинами як при прийманні сировини.

На етапі тимчасового зберігання було встановлено ККТ-1. Для уникнення появи біологічних чинників необхідно контролювати та регулювати температурні показники у складських приміщеннях, холодильних шафах, контролювати рівень вологості, терміни зберігання продукції, дотри-

Таблиця 2

## Форма опису соусів-дресінгів\*

Вид та офіційна назва продукції	Соуси
Категорія продукції	Салатна заправка (дресінг)
Позначення та назва законодавчих норм, документів, які встановлюють вимоги до безпечності продукції	ДСТУ 2903:2005 Концентрати харчові.
Склад продукту	Олія, гірчиця, вустерний соус, часник, лимон, сіль
Термін придатності до споживання	6 місяців
Умови зберігання	Зберігати в сухих та добре провітрюваних приміщеннях при температурі не вище 25 °С та вологості повітря не більше 75%
Пакування	Скло
Маркування стосовно безпечності продукту	Назва, об'єм, перелік інгредієнтів, мінімальний термін та умови зберігання, наявність алергенів, поживна цінність, кінцева дата споживання, зазначення виробника, країна, країна походження основного інгредієнта, рекомендації щодо споживання
Методи розповсюдження (реалізації) продукції	В мережах роздрібної торгівлі, в закладах ресторанного господарства
Вид та офіційна назва продукції	Соус на основі олії
Використання за призначенням	Як компонент інших страв (закусок, супів, салатів)
Передбачувані споживачі	Широкі маси населення

\*складено автором, на підставі аналітичних досліджень

Таблиця 3

**Характеристика сировини, інгредієнтів та матеріалів, необхідних для виготовлення соусу-дресінгу\***

Сировина	Нормативний документ	Пакувальний матеріал	Нормативний документ
Олія соняшникова	ДСТУ 4492:2017 Олія соняшникова Технічні умови	Тара з кольорових або некольорових полімерних матеріалів, тара зі скла, пакети з ламінованим покриттям	ДСТУ 4492:2005.
Гірчиця «Американська»	ДСТУ 1052:2005 Гірчиця харчова. Загальні технічні умови	Тара з кольорових або некольорових полімерних матеріалів, тара зі скла	ДСТУ 2890-94 Тара і транспортування. Терміни та визначення
Вустерний соус	ДСТУ 8017:2015	Тара з кольорових або некольорових полімерних матеріалів, тара зі скла	ДСТУ 4260:2003 Тара і пакування спожиткові. Маркування. Загальні вимоги
Часник	ДСТУ 3233:95	Сітки	ДСТУ 2108-92 Сітки всмоктувальні
Лимон	ДСТУ ЕСК ООН FFV-14:2007	Ящики	ДСТУ EN 13117-1:2008 Тара транспортна
Сіль	ДСТУ 3583:2015 Сіль кухонна харчова. Загальні технічні умови	Паперові мішки і пакети	ТУ У 00951706-002

\*складено автором, на підставі аналітичних досліджень

Таблиця 4

**ККТ приготування соусів\***

№ ККТ	Етап	Небезпечний чинник	Критична гранична величина для кожної ККТ	Процедура моніторингу ККТ
1	Зберігання сировини	При порушенні умов зберігання може початися розвиток патогенних мікро-організмів, плісняви	W=75%, t=+15...+25°C , τ=до 2 місяців	Безперервний контроль умов зберігання персоналом
2	Змішування всіх інгредієнтів	При недотриманні персоналом правил особистої гігієни, карантинного режиму може відбутися забруднення сировини/продукції	Правила гігієни, робота в рукавицях	Безперервний контроль умов змішування персоналом
3	Зберігання готової продукції	При порушенні умов зберігання може початися розвиток патогенних мікро-організмів, плісняви	W=75%, t=+15...+25°C , τ=до 2 місяців	Безперервний контроль умов зберігання персоналом
4	Всі етапи виробництва	При недотриманні персоналом правил особистої гігієни, карантинного режиму може відбутися забруднення сировини/продукції	Заміна масок та рукавичок кожні 3 год; Наявність медичних книжок, сертифікатів про вакцинацію, або негативних ПЛР тестів	Безперервний контроль за дотримання персоналом карантинних вимог

\*складено автором, на підставі аналітичних досліджень

муватися правил товарного сусідства. При порушенні умов зберігання може початися розвиток патогенних мікроорганізмів, плісняви, пероксидів, що зробить сировину небезпечною та непридатною для використання.

Наступний етап – технологія приготування соусу-дресінгу. Ідентифікація небезпечних чинників під час виробництва продукту є найбільш важливою, оскільки в більшості випадків вони виникають при порушенні дотримання технологічних умов. Саме на етапі безпосереднього виробництва можуть виникати ситуації, для яких

необхідно застосовувати коригувальні дії, з метою запобігання небезпечних чинників.

На етапі виробництва дресінгів уваги потребують процес змішування інгредієнтів, пакування/вакуумування та зберігання готової продукції. Для всіх ККТ було встановлено критичні граничні величини (табл. 4).

Було здійснено ідентифікацію небезпечних чинників на етапі приймання сировини та встановлено, що вірогідність їх появи є середньою. У якості процедур запобіжних дій визначено програми-передумови (ПП), а саме: ПП-1 «Вимоги до стану при-

## План управління безпекою приготування соусів

№ ККТ	Етап	Коригувальна дія	Протокол HACCP	Відповідальна особа
1	Зберігання сировини	Відповідальна особа регулює температуру, вологість та термін зберігання продукції та документує отримані показники	Журнал контролю умов зберігання; Журнал списання продукції	Комірник
2	Змішування всіх інгредієнтів	Відповідальна особа регулює час, температуру	Журнал контролю технологічних режимів	Кухар
3	Зберігання готової продукції	Відповідальна особа регулює температуру, вологість та термін зберігання продукції та документує отримані показники	Журнал контролю умов зберігання; Журнал списання продукції	Кухар
4	Всі етапи виробництва	Відповідальна особа регулює процес дотримання персоналом карантинних вимог	Журнал заміни масок та рукави-чок, Журнал фіксації стану здоров'я персоналу	Менеджер виробництва

міщень, обладнання, проведення ремонтних робіт, технічного обслуговування обладнання, калібрування, заходи щодо захисту харчових продуктів від забруднення та сторонніх домішок», ПП-2 «Чистота поверхонь (процедури прибирання, миття й дезінфекції виробничих, допоміжних і побутових приміщень та інших поверхонь)», ПП-3 «Здоров'я та гігієна персоналу». Застосовуючи алгоритм прийняття рішень – «Дерево прийняття рішень», визначено, що ККТ на етапі приймання сировини – відсутні, а небезпечних чинників можна позбутися дотримуючись ПП-4 «Специфікації (вимоги) до сировини та контроль за постачальниками». Розроблений план коригувальних дій у процесі контролю ККТ (табл. 5).

На безпеку харчових продуктів значним чином впливає санітарно-гігієнічний стан виробництва та дотримання особистої гігієни працівників, що підлягає під програми-передумови: «Безпечність води, льоду, пари, допоміжних матеріалів

для переробки (обробки) харчових продуктів, предметів та матеріалів, що контактують із харчовими продуктами»; «Чистота поверхонь (процедури прибирання, миття й дезінфекції виробничих, допоміжних і побутових приміщень та інших поверхонь)»; «Здоров'я та гігієна персоналу».

**Висновки.** Розроблено систему моніторингу безпеки та якості приготування соусів-дресингів у ЗРГ. На підставі опису продукту, аналізу технологічного процесу виробництва, ідентифіковано ряд небезпечних чинників, які можуть виникати на етапах зберігання сировини та виробництва продукції. При розробці плану управління безпекою виробництва дресингів було встановлено чотири ККТ на різних етапах: змішування інгредієнтів, пакування (вакуумування) та зберігання сировини й готової продукції. Обрано ряд програм-передумов, контроль та дотримання яких, дозволить виробляти безпечний продукт високої якості.

## Список літератури:

1. Матвійчук Л., Чепурда Л., Чепурда Г. Перспективи впровадження системи управління безпекою та якістю продукції ресторанного господарства. *Інновації та технології в сфері послуг і харчування* : наук. журнал, 2022. Том 2. № 6. С. 9-14.
2. Radu E, Dima A, Dobrota EM, Badea AM, Madsen DØ, Dobrin C, Stanciu S. Global trends and research hotspots on HACCP and modern quality management systems in the food industry. *Heliyon*. 2023 Jul 15;9(7):e18232.
3. Haluk Gedikoğlu, Ayça Gedikoğlu, Consumers' awareness of and willingness to pay for HACCP-certified lettuce in the United States: Regional differences, *Food Control*, Volume 130, 2021, p. 108263
4. Тітомир Л., Власюк К. Переваги системи HACCP в ресторанному бізнесі. *Економіка та суспільство* : наук. журнал, 2022. № 45.
5. Гавриляк М.Я., Шестопал Г.С. Системний підхід до безпеки харчової продукції в ЄС та Україні. *Товарознавчий вісник*, 2017. №10. С. 5-10.
6. Стукальська Н., Вархол В. Моніторинг безпеки та якості виробництва кондитерських виробів. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*, 2023. № 1. С. 104-113.

7. Колеснікова М.Б., Гринченко О.О., Юрченко С.Л., Андрєєва С.С., Черемська Т.В. Системне забезпечення харчової безпечності продукції закладів ресторанного господарства. *Таврійський науковий вісник. Серія «Технічні науки»*, 2022. № 4. С. 64-73.

8. Прохорчук С.В., Головіна Н.А. Впровадження системи контролю за безпечністю та якістю дитячого харчування: досвід та перспективи. *Науковий вісник Ужгородського національного університету : наук. журнал*, 2018. № 19 (2). С. 148-152.

9. Силка І.М. Розроблення системи моніторингу безпеки та якості приготування продукції у закладах ресторанного господарства / Силка І.М., Кривчик М. // *Матеріали 89 Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті»*, 3–7 квітня 2023 р. К.: НУХТ, 2023 р. Ч. 3. С. 296.

**Sylka I.M., Kryvchuk M.A., Matyiashchuk O.V., Yushchenko N.M., Pavliuchenko O.S.**

#### **SAFETY AND QUALITY MONITORING SYSTEM OF PREPARATION OF SAUCES-DRESSINGS IN RESTAURANT ESTABLISHMENTS**

*The production of safety food products with high consumer properties is the main task for manufacturers and restaurants. One of the conditions that guarantees the production of quality products is the introduction of the HACCP system at the enterprise.*

*The article describes the main stages of the development of a safety and quality monitoring system in a restaurant business using the technology of sauce-dressing preparation as an example. There are salad dressings based on various types of oils. They are popular among consumers and are often used instead of classic sauces. The main raw materials of the sauce-dressing, the technology of which is the subject of research, are sunflower oil, worcestershire sauce, mustard, spices, spices, garlic, lemon. A characteristic feature of this technology is the mixing of all components into an emulsion and the absence of further heat treatment.*

*It was determined that the main technological stages of sauce-dressing preparation are: reception of raw materials, temporary storage, production and storage of finished products, sale. At each of these stages, dangerous factors of various origins were identified, measures and prerequisite programs for their settlement were determined. In general, during the development of the safety management plan for the production of sauce-dressing, four critical control points are established at different stages. First, when storing raw materials, it is necessary to control the temperature and humidity of the environment, the expiration date. Secondly, mixing ingredients – technological regimes, sanitary norms and rules. third, packaging – technological regimes and sanitary norms and rules. finally, storage of finished products – temperature and humidity of the environment, expiration date.*

*Several important prerequisite programs were formulated. Control of these prerequisite programs will allow the production of a safe, high-quality product.*

*It was determined how the sanitary-hygienic condition of production premises and the observance of personal hygiene by personnel affect the safety of the food product.*

**Key words:** safety of food products, quality, safety, HACCP system, sauces-dressings.

## ТРАНСПОРТ

УДК 656.073.437

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/31>**Боровик С.С.**

Одеський національний морський університет

**Кравченко О.А.**

Одеський національний морський університет

**Стеба А.А.**

Одеський національний морський університет

### ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЕКСПОРТНОГО ВАНТАЖОПОТОКУ ФЕРОСПЛАВІВ З УКРАЇНИ МОРСЬКИМ ТРАНСПОРТОМ

У статті проведено аналіз основних експортерів та імпортерів феросплавів в світі. Визначено місце України в структурі експортерів феросплавів в світі. Хоч Україна і не входить до 5 лідерів з експорту феросплавів, але займає долю у 3%, що є досить суттєвою для нашої країни. Охарактеризовано сучасний стан феросплавної галузі в Україні. Незважаючи на те, що з 2014 року частина феросплавних заводів опинилася на тимчасово окупованих територіях України ті, що залишилися підконтрольні українській владі виробляли достатньо продукції для формування експортного вантажопотоку. Доля експорту в загальному обсязі виробництва феросплавів у 2018–2021 роках була в діапазоні 73–80%, а в 2022 році скоротилася до 65%. Повномасштабне вторгнення росії до України у лютому 2022 року та ракетні обстріли енергетичної інфраструктури призвели до скорочення виробництва феросплавів. А блокада портів призвела до скорочення експорту феросплавів та змінила його географію. До лютого 2022 року основними країнами експортерами українських феросплавів були Туреччина, Італія, Нідерланди та Китай, доля якого в останні роки стрімко зростала. В 2022 та 2023 роках основним експортером українських феросплавів була Польща доля якої зросла з 7% у довоєнні часи до більше ніж 50% в зазначених роках. Основними портами по перевалці феросплавів були Маріупольський морський торговельний порт та порт Чорноморськ. Інфраструктура автомобільного і залізничного транспорту України та країн, що межують з Україною по суші, не спроможні справитися з великими обсягами експортних вантажопотоків, які обслуговував до лютого 2022 року морський транспорт України. Відновлення до довоєнних часів та навіть збільшення вантажопотоку феросплавів з України та розрішення його географії можливе лише за умови повного відновлення роботи портів та морського транспорту загалом.

**Ключові слова:** вантажопотік феросплавів, морський транспорт блокада портів, географія експорту феросплавів.

**Постановка проблеми.** В основі зародження вантажопотоку на морських шляхах полягає міжнародний географічний розподіл праці, що призводить до певної спеціалізації окремих держав на виробництві певних видів продукції та необхідності в обміні нею. Значний вплив на розвиток світових вантажопотоків визначає також рівень транспортного освоєння морських шляхів певними державами. З зайвини виробництва феросплавів формується експортний вантажопотік з України. Повномасштабне військове вторгнення росії в Україну у лютому 2022 року і блокада мор-

ських портів, мали значний вплив на зміну обсягу експортного вантажопотоку феросплавів та географію його поглинання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженню галузі морського транспорту, який відіграє важливу роль у формуванні зовнішньоторговельних зав'язків присвячена велика кількість публікацій. В роботі [1] розглядаються динаміка експортних вантажопотоків з України та відзначається роль морського транспорту в забезпеченні експортних вантажопотоків з України. Організація роботи морського транспорту при обслугову-

ванні вже сформованих вантажопотоків та умови доставки вантажів досліджуються в роботах [2–5]. Аналізу обсягів експорту деяких окремих вантажів із портів України присвячені роботи [6, 7]. В роботах [8, 9] досліджуються умови та особливостей діяльності феросплавних підприємств, однак без урахування ролі транспорту в формуванні експортних вантажопотоків.

Таким чином, **метою статті** є аналіз умов зародження вантажопотоку феросплавів з України та роль морського транспорту в його освоєнні.

**Виклад основного матеріалу.** Світовий ринок феросплавів представлений наступними видами феросплавної продукції: крем'янисті (феросиліцій усіх марок, кристалічний кремній та ін.), марганцеві (феромарганець, силікомарганець, феросилікомарганець, металевий марганець), хромові (ферохром та ін.), нікелеві (феронікель). Основними споживачами феросплавів є металургійні, а також машинобудівні підприємства, світове споживання яких складає 90:10.

Загальні виробничі потужності у світі по виплавці усіх видів феросплавів складають близько 24 млн. т., при цьому на долю марганцевих сплавів доводиться 41% потужностей, крем'янистих – 25%, хромових – 20%, нікелевих – 14% (рис. 1).



Рис. 1. Виробництво феросплавів за видами, %

Основними виробниками високовуглецевого феромарганця у світі є Китай, Франція, Україна і Бразилія. Всього в цих країнах виплавляється 53% загальносвітового виробництва. Серед виробників феросилікомарганця необхідно відмітити Китай, Україну, ЮАР, Норвегію і Індію, доля яких складає 55% світового виробництва цього сплаву. Виробництво середньо- і низьковуглецевого феромарганця зосереджене в Японії, Китаї і Норвегії, доля яких, в загальносвітовому масштабі, складає 20,3%, 13%, 25,3% відповідно. Провідними світовими виробниками феронікелю є Японія, Колумбія, Нова Каледонія, на долю яких, припадає близько 60% загальносвітового виробництва, крім того, на частку України, Індонезії, Македонії та Республіки Корея, припадає близько 26–27% від загального обсягу світового виробництва феронікелю.

Найважливішим фактором для розміщення феросплавних виробництв є наявність місцевих джерел сировини, 85% якого знаходиться на території шести країн – України (22%), ПАР, Бразилії, Австралії, Індії та КНР, де і розташовані основні потужності з випуску феросплавів.

Згідно даних Обсерваторії економічної складності в 5 лідерів експортерів феросплавів у 2021 році вийшли такі країни, як Індонезія, Бразилія, ПАР, Казахстан та Індія, які реалізували продукції на суму більше ніж 13,5 млрд. дол. США. Доля країн основних експортерів феросплавів представлено на рис 2.

Згідно даних Обсерваторії економічної складності в 5 лідерів експортерів феросплавів у 2021 році вийшли такі країни, як Індонезія, Бразилія, ПАР, Казахстан та Індія, які реалізували продукції на суму більше ніж 13,5 млрд. дол. США. Доля країн основних експортерів феросплавів представлено на рис 2.

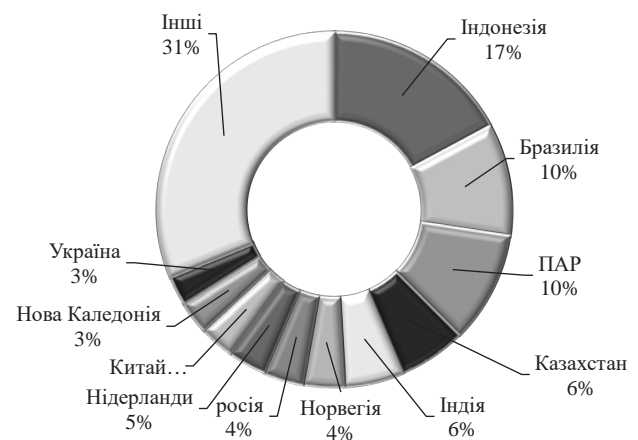


Рис. 2. Доля країн основних експортерів феросплавів у 2021 році, %

Найбільшим споживачем імпортних феросплавів у 2021 році був Китай із часткою 36,3%, далі Нідерланди – 7,4%, Японія та США по 5,6%, Німеччина та Південна Корея – 4,3% та 4,2% відповідно (рис. 3) [10].

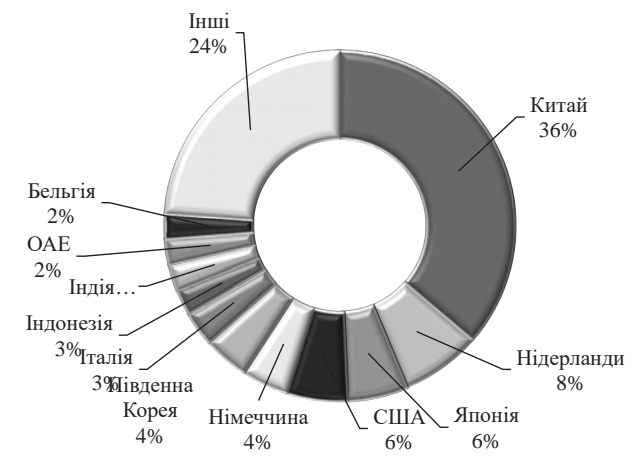


Рис. 3. Доля країн основних імпортерів феросплавів у 2021 році, %



За станом на кінець 1991 року українська феросплавна галузь налічувала більше десятка підприємств, що реально виробляли або потенційно здатних випускати феросплави. Найбільшими були Нікопольський завод феросплавів, Запорізький завод феросплавів і Стахановський завод феросплавів, а також Побужський феронікелевий комбінат, Хіміко-металургійна фабрика Маріупольського меткомбінату ім. Ілліча (її продукція – ферованадій, феромолибден і феровольфрам), Запорізький титано-магнієвий комбінат (що випускав, окрім іншого, феротитан), Константиновський і Краматорський металургійні заводи (марганцеві феросплави доменним способом) та ін. Окупація частин донецької та луганської областей росією у 2014 році та повномасштабне вторгнення 2022 року призвели до скорочення підприємств по виробництву феросплавів. Станом на 2023 рік феросплави виробляють Запорізький завод феросплавів, Нікопольський завод феросплавів, Краматорський феросплавний завод. Побужський феронікелевий комбінат зупинив свою роботу у листопаді 2022 року, так як виробництво феронікелю відбувається з нікелевої руди з Гватемали, а блокада морських портів унеможливорює безперерйну доставку імпоротної сировини. В таблиці 1 представлено обсяги виробництва феросплавів за видами у 2018–2022 роках [11].

Як видно з таблиці 1 обсяги виробництва феросплавів у 2022 році значно скоротилися у порівнянні із попередніми роками. В перш за все, це пов'язано із наслідками повномасштабної війни росії проти України. Блокада портів порушила логістичні ланцюги доставки сировини для виробництва феросплавів та доставки імпортерам української феросплавної продукції. Ракетні удари по об'єктах енергетичної інфраструктури восени 2022 року призвели до тимчасової призупинки роботи феросплавних підприємств. Незважаючи на те, що кабінет Міністрів України в січні 2023 року дозволив великим промисловим підприємствам імпортувати електроенергію та заборонив їх вимикати від електропостачання, заводи по виробництву феросплавів у 2023 році були завантажені лише на 20%.

Українська феросплавна галузь традиційно орієнтована на експорт, а основний експортний продукт упродовж тривалого часу – феросилікомарганець (за даними Державної служби статистики України, його частка становить 71,3% від загального обсягу експорту феросплавів за підсумками 2021 року), також Україна експортує феромарганець, феросиліцій та феронікель, а такі види як феромолибден, ферохром та ферованадій навпаки – імпортує. На рис. 4 представлена динаміка експорту та імпорту феросплавів в Україні.

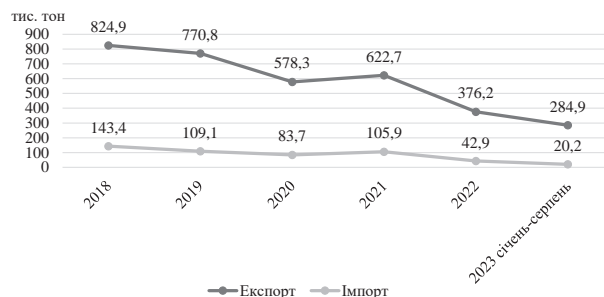


Рис. 4. Динаміка експорту та імпорту феросплавів в Україну в 2018–2023 роках, тис. тон

У 2022 році експорт феросплавів скоротився на 40% і ставив 376,2 тис. тон, а виробництво феросплавів у січні-серпні 2022 року скоротилося до 440,9 тис. тон.

Протягом 2018–2021 років доля експорту в загальному виробництві складала 73–81%, а в 2022 році скоротилася до 65% (рис. 5).

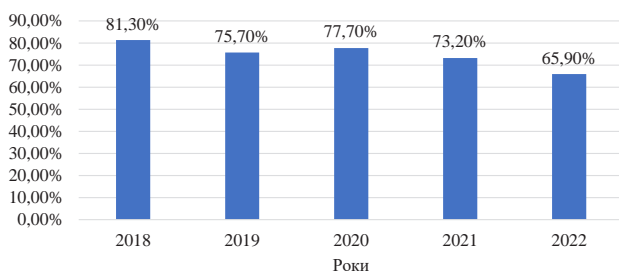


Рис. 5. Доля експорту в загальному виробництві феросплавів в Україні у 2018–2022 роках (данні за 2022 рік наводяться за січень-серпень)

Українські виробники базових феросплавів на зовнішніх ринках постійно стикаються з анти-

Таблиця 1

Обсяги виробництва основних видів феросплавів в Україні у 2018–2022 роках, тис. тон

Продукція	Роки				
	2018	2019	2020	2021	2022 (січень-серпень)
Феромарганець	79,4	151,1	123	100,6	20,7
Феросилікомарганець	859,6	804,7	559,9	662,7	356,5
Феросиліцій	75,4	62,6	60,8	87,6	63,7
Всього	1014,4	1018,4	743,7	850,9	440,9

## Країни імпортери українських феросплавів у 2018–2023 роках

Країни	2018	2019	2020	2021	2022	2023 (січень-серпень)
	Доля країн в загальному експорті феросплавів, %					
Туреччина	16,8	16,1	13,4	19,9	4,4	11,3
Італія	15,7	17,4	12,7	13,5	4,6	5,3
Нідерланди	13,7	9,6	21,6	10,6	13	6,7
Польща	7,4	5,1	7,3	9,7	55,2	57,4
Румунія	4,5	3,3	2,3	3	5	>1
Китай	>2	7,8	12,9	11,3	4,4	2,9

демпінговими заходами в протекціоністських цілях. Особливо це стосується феросилікомарганцю. Так, у червні 2016 року Євразійська економічна комісія (ЄЕК) ввела антидемпінгове мито у розмірі 26,35% терміном на 5 років для українського феросилікомарганцю при його ввезенні на митну територію країн ЄАЕС, що стало потужним ударом для українських виробників цього матеріалу, для яких російський ринок тривалий час був одним із основних ринків збуту. Американський ринок феросилікомарганцю ще з 1994 року закритий через антидемпінгове мито у розмірі 163%, а в грудні 2018 року Торгова палата США подовжила термін дії зазначеного мита ще на 5 років. Ринок Південної Кореї з 2017 року на наступні п'ять років закритий для українських виробників феросилікомарганцю через антидемпінгове мито до 19,06%. Як наслідок, феросилікомарганець з України на митну територію країн ЄАЕС, США та Південної Кореї впродовж 2020–2021 років не експортувався. Антидемпінгові мита стосовно українського феросилікомарганцю діють також у Мексиці (у розмірі 16,59%) і в Марокко (7,5%). Якщо розглядати географію експорту українських феросплавів, то основними ринками збуту українських феросплавів до 2022 року були ЄС, Туреччина та Китай (табл. 2) [12].

Як видно з табл. 2 блокування портів призвело до значного скорочення долі Туреччини, Італії, Нідерландів та Китаю, в які українські феросплави доставлялися морськими шляхами

та збільшення долі Польщі до майже 60% з якою Україна має спільний сухопутний кордон.

Морський транспорт відіграє важливу роль у експорті феросплавів, адже майже 90% експортного вантажопотоку доставляється морським транспортом. У номенклатурі статистики обсягу перевалки вантажів у портах України, феросплави входять у під позицію «Інші» в позиції «чорні метали». Протягом 2018–2021 років на перевальці феросплавів спеціалізувався Маріупольський морський торговельний порт із долею у 93%, а залишок у 7% оброблявся в порту Чорноморськ.

**Висновки.** Робота портів та морського транспорту відіграє важливу роль у забезпеченні експортних вантажопотоків і, зокрема, феросплавів. Попри всі складнощі з якими доводиться стикатися феросплавним підприємствам, до скорочення виробництва, перша за все, призводить саме блокада портів та неможливість доставляти країнам імпортерам феросплави морськими шляхами. Польща та інші країни, що межують по суші з Україною з лютого 2022 року стали «вікном» українського експорту та імпорту, але, вочевидь, що такі види транспорту, як автомобільний та залізничний не спроможні справитися із освоєнням вхідних та вихідних вантажопотоків. Таким чином, відновлення до довоєнних часів і в перспективі збільшення експортного вантажопотоку феросплавів, а також розширення географії експорту феросплавів можливе лише при умові відновлення роботи морського транспорту.

## Список літератури:

1. Осіпова Л. Динаміка експорту України в умовах повномасштабної війни: проблеми та можливі шляхи усунення в контексті євроінтеграції. Вісник Хмельницького національного університету. 2022. № 6, Том 2. С. 50-54.
2. Drozhzhyn O., Koskina Y. The model of container feeder line organization focused on the nature and parameters of external container flows. *Komunikácie*. 23(2). 2021. P. A94-A102.
3. Вільшанюк М.С., Судник Н.В. Обґрунтування умов ефективного транспортування пшениці з портів України. *Наукоємні технології*. № 1(57). 2023. С. 101-107.
4. Берневек Т.І., Павлова Н.Л., Тихоніна І.І. Перспективи розвитку транспортування зрідженого природного газу в порти України: технологічний аспект. *Вчені записки*, том 32(71) № 6. 2021. С. 191-196

5. Організація транспортного процесу та управління роботою флоту на ринку міжнародного судноплавства. Частина 3: монографія / [авт.кол.: Шibaєв О.Г., Дрожжин О.Л., Судник Н.В. та ін.]. – Одеса: КУПРІ-ЄНКО СВ, 2018. – 140 с.: іл. табл.
6. Коскіна Ю.О., Дрожжин О.Л. Аналіз обсягів та динаміки «морського» експорту зерна Україною. Транспортні системи і технології. (35). 2020. С. 205-215.
7. Шibaєв О.Г., Коскіна Ю.О., Кравченко О.А., Акімов К.С. Вантажопотоки вугілля в українських портах: ретроспективний огляд та сучасний стан Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Том 34 (73). № 5. 2023. С. 386-390. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/59>
8. Ляховська О.В. Особливості функціонування найбільших підприємств металургійної промисловості України під час війни. Економіка та суспільство. 47. 2023. doi: 10.32782/2524-0072/2023-47-86.
9. Коваленко О.В. Проблеми та перспективи розвитку феросплавного виробництва як важливої складової металургії України. Глобальні та національні проблеми економіки. Випуск 4. 2015. С. 424-426.
10. Обсерваторія економічної складності (ОЕС). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://oec.world/en/profile/hs92/ferroalloys>
11. GMK Center. Україна у 2021 році збільшила виробництво феросплавів на 15%. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://gmk.center/ua/news/ukraine-u-2021-rotsi-zbilshyla-vyrobnytstvo-ferosplaviv-na-15/>
12. Державна митна служба України. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://bi.customs.gov.ua/uk/trade/dimensions>
13. World Integrated Trade Solution. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/ALL/year/2020/tradeflow/Exports/partner/WLD/product/720260#>

**Borovyk S.S., Kravchenko O.A., Steba A.A. PROBLEMS AND PROSPECTS OF THE DEVELOPMENT OF THE EXPORT FREIGHT FLOW OF FERRO-ALLOYS FROM UKRAINE BY MARINE TRANSPORT**

*The article analyzes the main exporters and importers of ferroalloys in the world. The place of Ukraine in the structure of exporters of ferroalloys in the world is determined. Although Ukraine is not among the 5 leaders in the export of ferroalloys, it occupies a share of 3%, which is quite significant for our country. The current state of the ferroalloy industry in Ukraine is characterized. Despite the fact that since 2014, some of the ferroalloy plants have been located in the temporarily occupied territories of Ukraine, those that remained under the control of the Ukrainian authorities produced enough products to form an export cargo flow. The share of exports of ferroalloys in the total volume of production in 2018–2021 was in the range of 73–80%, and in 2022 it decreased to 65%. Russia's full-scale invasion of Ukraine in February 2022 and missile attacks on energy infrastructure led to a reduction in ferroalloy production. And the blockade of the port led to a reduction in the export of ferroalloys and changed its geography. Until February 2022, the main exporters of Ukrainian ferroalloys were Turkey, Italy, the Netherlands and China, whose share has been growing rapidly in recent years. In 2022 and 2023, the main exporter of Ukrainian ferroalloys was Poland, whose share increased from 7% in pre-war times to more than 50% in these years. The main ports for transshipment of ferroalloys were the Mariupol sea trade port and the port of Chornomorsk. The road and rail transport infrastructure of Ukraine and the countries bordering Ukraine on land are unable to cope with large volumes of export cargo flows, which were served by sea transport until February 2022. Restoring to pre-war times and even increasing the cargo flow of ferroalloys from Ukraine and resolving its geography is possible only if ports and maritime transport in general are fully restored.*

**Key words:** cargo flow of ferroalloys, maritime transport, blockade of ports, geography of ferroalloy exports.

**Грушевська Т.М.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Стрелко О.Г.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Бердніченко Ю.А.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Карпенко А.А.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Солтис І.В.**

Державний університет інфраструктури та технологій

## СВІТОВИЙ ДОСВІД ОРГАНІЗАЦІЇ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

*У даній статті проаналізовано світовий досвід організації пасажирських перевезень на залізничному транспорті. Визначено, яким чином впливають параметри транспортного процесу на вибір виду транспорту пасажирами. Запропоновано варіанти збільшення кількості перевезених пасажирів залізничним транспортом за рахунок покращення надання транспортних послуг, сервісу та розвитку додаткових послуг з іншими видами пасажирського транспорту. Досвід організації пасажирських перевезень у країнах Західної Європи відкриває можливість використовувати принципи модульної організації руху в технології приміських залізничних перевезень в Україні. Це також може стати раціональним способом для подальшого розвитку цієї галузі. Без належного фінансування неможливо досягти світових технологічних досягнень, які великою мірою покращили б технічний і фінансовий стан залізниць України. У більшості країн Західної Європи головною метою систем організації пасажирських перевезень є використання гнучких адаптивних технологій для задоволення потреб населення у перевезеннях за мінімальних витратах. Зусилля зарубіжних країн також спрямовані на поліпшення графіку руху поїздів, використання тактового графіка, покращення технічного обладнання приміських ділянок та визначення параметрів майбутнього рухомого складу. Зацікавлення пасажирів в користуванні послугами залізничного транспорту є важливим аспектом для підвищення конкурентоспроможності пасажирських перевезень. У цьому контексті досвід організації пасажирських перевезень зарубіжних країн може стати корисним джерелом навчання. Дослідження світового досвіду у сфері організації та технології пасажирських залізничних перевезень, особливо в умовах конкуренції на транспортному ринку, є ефективним засобом для удосконалення та оптимізації системи організації пасажирських перевезень та підвищення якості транспортного обслуговування.*

**Ключові слова:** пасажирські перевезення, світовий досвід, транспортний ринок, якість обслуговування пасажирів.

**Постановка проблеми.** Жорстка конкуренція між різними видами пасажирського транспорту існує як в зарубіжних країнах, так і в нашій країні. Характерною особливістю роботи пасажирського залізничного транспорту в сучасних умовах у всіх країнах світу є його активна участь у внутрішньоміських перевезеннях та перевезеннях у далекому сполученні. Тому в останні роки існуючі міські залізниці в багатьох великих містах світу інтенсивно розвиваються, модернізуються, забезпечуються новим комфортабельним рухомим скла-

дом. Розвиток швидкісного пасажирського руху є одним із найважливіших шляхів розвитку ринку залізничних пасажирських перевезень. Це зумовлено, по-перше, необхідністю виведення пасажирських залізничних сполучень на принципово новий якісний рівень, який забезпечує зростання мобільності населення, та, по-друге, необхідністю залучення додаткових пасажиропотоків, що забезпечує збільшення прибутків від здійснення перевезень. Сектор пасажирських перевезень у Європейському Союзі сьогодні є дуже орієнтованим на

клієнта. Транспортні оператори усвідомили, що наявність задоволеного клієнта означає, що пасажир повернеться, щоб знову скористатися послугою, і збільшить загальний дохід транспортного оператора. У сфері залізничних перевезень пасажирів за останнє десятиліття були спроби поставити пасажирів в центр уваги процесу залізничних перевезень, але в цілому ці зусилля були дуже повільними. Прискорена комерціалізація європейського ринку транспортних послуг останніми роками змушує залізничні компанії, які займаються пасажирськими перевезеннями, шукати нові способи підвищення привабливості послуг для потенційних користувачів та економічної ефективності експлуатаційної діяльності. Ці цілі досягаються збільшенням швидкості руху поїздів та пасажиромісткості рухомого складу, розширенням діапазону та покращенням якості обслуговування пасажирів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питаннями, що стосуються організації пасажирських перевезень займалися такі автори: Габа В.В., Грушевська Т.М., Стрелко О.Г., Гудкова В.П., Ейтутіс Г.Д., Козаченко Д.М., Мироненко В.К., Примаченко Г.О., Прохорченко А.В., Торопов Б.І., Яновський П.О. та інші [1–6]. Дослідження цих вчених присвячені питанням покращення надання транспортних послуг у пасажирських перевезеннях.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Незважаючи на те, що питаннями аналізу залізничних пасажирських перевезень присвячено безліч наукових публікацій, питання організації руху пасажирських перевезень у світі є відкритим та актуальним, особливо в нинішніх умовах. Удосконалення та покращення організації пасажирських перевезень, надання якісних транспортних послуг є цікавими питаннями сьогодення.

**Метою статті** є дослідження світового досвіду організації залізничних пасажирських перевезень в нинішніх умовах.

**Виклад основного матеріалу.** Головною метою систем організації пасажирських перевезень в більшості країн Західної Європи є прагнення до впровадження гнучких адаптивних технологій, спрямованих на задоволення потреб населення в перевезеннях при мінімізації витрат на організацію перевізного процесу. Їхні технології організації руху базуються на принципі адаптації до змін в попиті на перевезення і включають гнучкі заходи оперативного регулювання перевезень, зокрема регулювання складів пасажирських поїздів. У сфері організації перевезень у зарубіж-

них країнах приділяється увага вдосконаленню графіка руху поїздів, використанню тактового графіка руху, технічному оснащенню приміських ділянок та визначенню параметрів рухомого складу. Останнім часом інтегровані транспортні системи набувають все більшого поширення, а також використання нових технологічних та організаційних підходів до організації приміських перевезень. Системи організації приміських та регіональних пасажирських перевезень залізницями різних країн мають як спільні, так і відмінні риси порівняно з Україною. Загалом, якість транспортного обслуговування у системі залізничних пасажирських перевезень може бути оцінена за такими показниками, як: обсяг річних перевезень, оборот пасажирів, середня відстань подорожі, кількість поїздок на одну особу.

Завдання залучити пасажирів до послуг залізничного транспорту стає дедалі більш актуальним у контексті підвищення конкурентоспроможності пасажирських перевезень [2]. Тут, безумовно, стане у нагоді зарубіжний досвід організації пасажирських перевезень. Перевезення пасажирів у приміському та регіональному сполученні в окремих країнах за 2022 рік наведено у табл. 1.

Таблиця 1

**Перевезення пасажирів у приміському та регіональному сполученні в окремих країнах за 2022 рік**

Країна	Обсяги перевезень, млн. осіб	Пасажиро-обіг, млн. пас-км	Середня дальність поїздки, км	Кількість поїздок на 1 особу
Австрія	209	–	–	25
Бельгія	132	–	–	13
Великобританія	713	21585	30,3	12
Іспанія	557	11654	20,1	13
Італія	546	22402	41	11
Німеччина	1741	39265	22,6	21
Польща	228	14810	64,9	-
Угорщина	223	-	-	22
Франція	1246	23140	18,6	21
Чехія	139	5227	37,6	14
Швейцарія	362	5271	14,6	49
Швеція	91	1867	20,5	10

Пасажирські перевезення здійснюються різними видами транспорту. Цими видами транспорту можуть бути залізничний транспорт, маршрутні автобуси, маршрутні таксі у приміському сполученні та індивідуальні автомобілі. Значний вплив мають фактори, які приваблюють

пасажирів або відштовхують їх від того чи іншого виду перевезень: термін перебування пасажирів в дорозі; час відправлення та прибуття як на основні, так і на проміжні станції; зручність розкладу; рівень комфорту в поїздах; вартість проїзду; безпека руху; незалежність від кліматичних умов; початкові та кінцеві витрати часу, пов'язані з організацією поїздки [3]. У мегаполісах окремі лінії можуть бути виділені для приміських перевезень, щоб збільшити пасажиропотік.

*Німеччина.* У Німеччині, наприклад, для внутрішньоміських перевезень побудовані радіальні лінії, що з'єднують протилежні напрямки в Мюнхені, Гамбурзі та Штутгарті. Відмінною рисою німецьких залізниць є єдина система управління міським та залізничним рухом. За останні 30–35 років було побудовано мережу високошвидкісних залізниць загальною довжиною понад 1500 км. З них міські та приміські залізниці в густонаселених районах, таких як Гамбург, Рейн-Майн, Рейн-Рур, Штутгарт і Мюнхен, складають близько 75% від загальної довжини [7].

Головною особливістю нових електропоїздів є їхня модульна система, яка означає, що кількість вагонів можна гнучко змінювати, наприклад, комбінуючи причіпні вагони додатково до основних трьохвагонних груп, а також об'єднувати кілька поїздів.

У транспортному вузлі Бремен діє єдиний проїзний квиток на трамвай і по залізницях, що робить приміський залізничний транспорт більш привабливим. Також у Німеччині застосовують інтегральний тактовий графік руху поїздів [7]. Цей розклад, як і розклад руху автобусів, координує розклад руху всіх поїздів на всіх маршрутах на всіх залізничних вузлах. Велика увага приділяється усуненню безквиткового проїзду та різноманітним зручним для пасажирів системами продажу квитків [8].

*Італія.* Для забезпечення зростаючих обсягів перевезень на державних залізницях Італії (FS) здійснюється спорудження нових ліній, укладка третьої і четвертої головних колій для розділення далекого і приміського руху [9]. В Італії на залізницях спостерігається гострий дефіцит транспортних засобів, тому введений в експлуатацію новий тип електропоїзда (Pendolare) з підвищеним пусковим прискоренням, укороченим гальмівним шляхом, який має можливість змінювати склад [9].

*Швейцарія.* Швейцарія є провідним лідером в Європі у сфері пасажирських перевезень з використанням залізниць. У країні існує інтегрована система приміських і міських перевезень, яка

дозволяє зручно та ефективно переміщати пасажирів. Основні особливості системи включають:

- інтеграція руху. У Швейцарії розклади руху поїздів і міського транспорту погоджуються між собою, що дозволяє пасажирам зручно пересідати між різними видами транспорту;

- регіональні залізниці. У країні діє 57 регіональних залізниць, більшість з яких перебувають під управлінням держави, хоча вони можуть бути приватними;

- єдині смарт-карти. Введено єдині смарт-карти для зручної оплати проїзду, що спрощує користування різними видами транспорту;

- системи інформування пасажирів. Пасажири мають доступ до загальних систем інформування, які надають інформацію про розклади та стан руху транспорту;

- об'єднання систем продажу квитків. Системи продажу квитків різних видів транспорту об'єднані, що робить їх доступними та зручними для пасажирів;

- тактові інтервали. З грудня 2004 року введено розклад руху поїздів з тактовими інтервалами відправлення, що сприяє стабільному зростанню прибутку від пасажирських перевезень.

Ці заходи сприяють високій якості та ефективності пасажирських перевезень в Швейцарії, і ця країна є прикладом для інших націй у сфері розвитку транспортних систем [10].

Основні напрями діяльності компанії фокусуються на поліпшенні якості пасажирських перевезень і підвищенні конкурентоспроможності. Ось деякі з цих напрямів:

- розвиток швидкісного рухомого складу. Компанія вкладає зусилля у створення та модернізацію швидкісних поїздів та інших видів рухомого складу, які відповідають сучасним очікуванням пасажирів, забезпечують комфорт і швидкість подорожі;

- впровадження розкладу з тактовими інтервалами. Введення тактового розкладу руху поїздів сприяє оптимізації часу подорожі та зручності для пасажирів;

- фінансування залізниць. Компанія спільно з державою та її суб'єктами розробляє механізми фінансування, що дозволяють забезпечити стабільність та інвестиції в розвиток залізниць;

- використання технологій. Впровадження новітніх технологій сприяє підвищенню провізної спроможності залізниць, а також покращенню безпеки руху.

Ці напрями діяльності допомагають створити ефективну та конкурентоздатну систему пасажир-

ських перевезень на залізницях, задовольняючи потреби пасажирів і сприяючи розвитку транспортної галузі.

*Чехія.* Впровадження єдиного проїзного документа та гнучкої ціноутворення в міському транспорті Чехії є важливими кроками для покращення доступності та зручності для пасажирів. Ось деякі переваги цієї системи:

- зручність для пасажирів. Система дозволяє пасажирам легко переміщуватись між різними видами міського транспорту, зменшуючи адміністративні та фінансові бар'єри;

- економічна вигода. Гнучка ціноутворення, яке залежить від тривалості поїздки, означає, що пасажир платять лише за той час, який вони фактично витрачають в дорозі, що може зекономити кошти;

- підвищення привабливості залізничного транспорту. Пасажирі можуть використовувати залізничний транспорт для пересадок на інші види міського транспорту без додаткових витрат;

- самообслуговування. Наявність спеціальних терміналів для придбання квитків дозволяє пасажирам самостійно обслуговуватись, що робить процес покупки квитків швидким і зручним.

Ці інновації сприяють покращенню якості міських перевезень, зменшують навантаження на інфраструктуру та зроблюють систему більш доступною для населення [10].

*Польща.* На польських залізницях спостерігається різке зменшення пасажирських перевезень. Кількість пасажирів, які користуються залізничним транспортом для подорожей, майже вдвічі зменшилася порівняно з 1990 роками. Це зумовлено кількома чинниками, такими як збільшення кількості власників автомобілів, зростання тарифів на залізничний транспорт, закриття або скорочення кількості маршрутів та постійні зміни графіку руху поїздів.

У Катовіце впроваджено маятниковий рух для приміських поїздів. Залежно від обсягів пасажир-

ського потоку на залізницях Польщі введені в оборот поїзди з різною кількістю вагонів у їх складі поїзда [10]. Інтервал між поїздами складає 30–40 хв. Останнім часом широкого застосування набули рейкові автобуси. Вони обслуговують регіональні сполучення з відносно невеликими пасажиропотоками. Але вони також можуть використовуватись і на лініях з великими обсягами перевезень у зчепленні кількох одиниць під загальним керуванням. Доходи від приміських перевезень у Польщі покривають лише 10 % експлуатаційних витрат, решта субсидується з місцевих бюджетів.

На більшості залізниць світу спостерігається збільшення обсягів перевезень пасажирів, хоча частка пасажирського транспорту в освоєнні цих перевезень для різних країн неоднакова. Посилення конкурентної боротьби на ринку пасажирських перевезень надання транспортних послуг, вимагає від перевізників урахування в процесі якісних факторів послуги. Високий рівень якості транспортних послуг є запорукою, перш за все, безпеки перевезень, надійності, задоволеності попиту пасажирів.

**Висновки та пропозиції.** Досвід організації пасажирських перевезень у країнах Західної Європи відкриває перспективу використання принципів модульної організації руху в технології приміських перевезень на залізницях України, що також може бути одним з раціональних шляхів подальшого розвитку цієї галузі.

Таким чином, без достатнього фінансування не можливо досягти технологічних досягнень світового рівня, які могли б суттєво покращити технічний та фінансовий стан залізниць України. Аналіз міжнародного досвіду щодо організації та технології залізничних пасажирських перевезень у контексті конкуренції на транспортному ринку виявляється дієвим інструментом для вдосконалення та оптимізації системи пасажирських перевезень та підвищення якості транспортного обслуговування.

#### Список літератури:

1. Поздняков А.А., Мироненко В.К., Позднякова О.О., Гудков О.М. Дослідження факторів, що впливають на формування пасажиропотоків залізничних приміських перевезень у великих міських агломераціях. Збірник наукових праць ДЕУТ. Серія «Транспортні системи і технології», 2016. Вип. 29. С. 261–276. <https://tst.duit.in.ua/index.php/tst/issue/view/3/1>
2. Сич Є.М., Гудкова В.П. Пасажирський комплекс залізничного транспорту: розвиток і ефективність. К.: Аспект-Поліграф, 2014. 248 с.
3. Габа В.В., Грушевська Т.М. Дослідження ймовірності вибору пасажиром виду транспорту на конкурентному транспортному ринку. Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології». Вип. 33. Т. 2. ДУІТ.: 2019. С. 167–180. Режим доступу: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-33-2-16>.
4. Strelko O., Hrushevska T., Toropov B., Berdnychenko Y., Soloviova O. Study of the Formation of Passenger Flows in Transport Hubs. Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (eds) Integrated Computer Technologies in

Mechanical Engineering – 2022. ICTM 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, Cham. 2023. Vol. 657. P. 733–744. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-36201-9\\_60](https://doi.org/10.1007/978-3-031-36201-9_60)

5. Strelko O., Hrushevska T., Gaba V., Berdnychenko Y., Kyrychenko H. (). Improvement of the System of Arranging Commuter Passenger Transportation Based on the Kyiv Transport Hub. Arsenyeva, O., Romanova, T., Sukhonos, M., Tsegelnyk, Y. (eds) Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, Cham. 2023. Vol 536. P. 752–763. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7\\_67](https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_67)

6. Strelko O., Solovyova O., Berdnychenko Y., Kyrychenko H., Solovyova L. Study of the contemporary trends in the development of transport systems of the Ukrainian railways. Acta Scientiarum Polonorum Administratio Locorum. Vol. 202322(2). P. 263–279. <https://doi.org/10.31648/aspal.8444>

7. Punctlichkeit bei der Deutschen Bahn. Elek. Bahnen, 2012. 100. № 7. С. 282.

8. Мироненко В. К., Габа В. В., Мацюк В. І., Грушевська Т. М., Костюшко В. П. Техніко-технологічні заходи підвищення ефективності залізничних приміських перевезень. Збірник наукових праць ДЕТУТ. Серія «Транспортні системи і технології». 2014. Вип. 24. С. 222–231.

9. Geldauch im Personenverkehr der Eisenbahn / Breimeier Rudolf // Bundesbahn. 2017. 67, № 9. С. 885–886.

10. Нестеренко Г. І., Озерова О. О., Яновський П. О. Особливості організації сучасних приміських перевезень європейських країн. Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2012. № 4. С. 89–92.

### **Hrushevska T.M., Strelko O.H., Berdnychenko Yu.A., Karpenko A.A., Soltys I.V. WORLD EXPERIENCE IN ORGANIZING PASSENGER TRANSPORTATION IN RAILWAY TRANSPORT**

*This article analyzes the global experience of organizing passenger transportation in the railway sector. It identifies how transportation process parameters influence passengers' choice of transportation mode. The article proposes ways to increase the number of passengers transported by rail by improving the provision of transportation services, service quality, and the development of additional services in conjunction with other forms of passenger transportation. The experience of organizing passenger transportation in Western European countries opens up the possibility of utilizing modular traffic organization principles in suburban railway transportation technology in Ukraine, which could be a rational approach for further development in this field. Without adequate funding, it is impossible to achieve global technological advancements that would significantly improve the technical and financial state of Ukraine's railways. In most Western European countries, the primary goal of passenger transportation systems is to use flexible adaptive technologies to meet the population's transportation needs at minimal costs. Efforts in foreign countries also focus on improving train schedules, implementing interval schedules, enhancing technical equipment on suburban lines, and determining the parameters of future rolling stock. Attracting passengers to use railway transport services is a crucial aspect of increasing the competitiveness of passenger transportation. In this context, studying global experience in organizing and implementing passenger rail transportation, especially in competitive transport markets, is an effective way to enhance and optimize passenger transportation systems and improve the quality of transportation services.*

**Key words:** *passenger transportation, global experience, transportation market, passenger service quality.*



УДК 629.56.064

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/33>**Дакі О.А.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Войченко Т.О.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Штрибець В.В.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Маннапова О.В.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Рященко О.І.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

## АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗУ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПОШКОДЖЕНЬ ПІДШИПНИКІВ ВАЛОПРИВОДУ СУДНОВОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

*Метою роботи є дослідження підходів до ідентифікації пошкоджень підшипників валоприводу суднової енергетичної установки на основі вейвлет-аналізу та визначення найбільш ефективної вейвлет-утворюючої функції. Однією з причин значної кількості виникаючих аварій є відмова вузлів та агрегатів суднової енергетичної установки. Ресурс суднової енергетичної установки визначається, в тому числі, технічним станом підшипників колінчатих валів двигунів внутрішнього згорання, підшипників та шестірнів реверс-редукторних агрегатів та підшипників гребних валів. Тому контроль і оцінка технічного стану підшипників суднових валоприводів для працездатності суднової енергетичної установки має велике значення. Отже, необхідно налагодити систему технічного обслуговування і діагностики підшипників з використанням новітніх технологій, в тому числі у реальному часі, тобто в період експлуатації. До таких технологій виявлення зміни технічного стану машин, механізмів, обладнання та конструкцій відносять віброакустичні методи. Одним з перспективних підходів в рамках віброакустичних методів є використання математичного апарату вейвлет-аналізу. Поставлена мета в роботі досягається шляхом аналізу особливостей використання вейвлет-аналізу для ідентифікації пошкоджень підшипників суднового валоприводу. Для аналізу відгуку підшипника використовується безперервне вейвлет-перетворення. При цьому встановлені взаємозв'язки між чисельними характеристиками показниками Гельдера і дефектами підшипників, що полегшують практичне застосування вейвлет-аналізу. В роботі визначено, що для безперервного вейвлет-перетворення необхідно використовувати вейвлет-утворюючу функцію з великим числом нульових моментів – перетинань з віссю абсцис. Вейвлет-утворююча функція повинна бути добре локалізована в частотній і часовій області. Найважливішим результатом досліджень є визначення необхідності використання в якості вейвлет-утворюючої функції саме функції Морлета. Таким чином, в статті обґрунтована можливість ефективної ідентифікації пошкоджень підшипників валоприводу суднової енергетичної установки на основі вейвлет-аналізу.*

**Ключові слова:** ідентифікація, пошкодження, підшипник валоприводу, суднова енергетична установка, вейвлет-аналіз, вейвлет-утворююча функція.

**Постановка проблеми.** Аварії на водному транспорті в більшості випадків пов'язані з ризиком для здоров'я та життя екіпажу, небезпекою для навколишнього середовища, а також із серйозним економічним і моральним збитком. Однією з причин значної кількості виникаючих аварій є відмова вузлів та агрегатів судно-

вої енергетичної установки (СЕУ). Ресурс СЕУ визначається технічним станом основних деталей у складі «двигун внутрішнього згорання (ДВЗ) – валопровід (ВП) – гребний гвинт (ГГ)». Найбільш значним джерелом динамічних збуджень є судновий ДВЗ, оскільки в умовах реальної експлуатації саме він піддається широкому діапазону

змін швидкісного і навантажувального режимів. У зв'язку з цим виникають динамічні явища в системі «ДВЗ – ВП – ГГ», що негативно позначається на технічному стані всієї енергетичної установки. За статистичними даними вітчизняних суднових компаній, через відмови вузлів СЕУ не працює до 20% вантажних суден у навігації. Вкрай неприємною обставиною є неможливість прогнозувати поломки основних деталей, що вносить велику дезорганізацію у виробничий процес. Більшість непередбачених дефектів приходиться на ті деталі, механізми та обладнання, що недоступні для безпосереднього контролю. До таких деталей, наприклад, відносяться підшипники колінчатих валів (КВ) ДВЗ, підшипники та шестірні реверс-редукторних агрегатів та підшипники гребних валів (ГВ). Розбирання суднових ВП з метою контролю технічного стану окремих його вузлів, як правило, пов'язане з великими труднощами, виведенням з експлуатації і часто буває невиправданим. Крім цього, досвід експлуатації і ремонту машин, механізмів, різного обладнання свідчить, що розбирання приводить до прискорення зносу деталей, оскільки порушує приробіток сполучень. При належному технічному стані підшипники можуть безупинно експлуатуватися протягом багатьох років, але на практиці робочі умови рідко бувають ідеальними. Тому контроль і оцінка технічного стану підшипників суднових ВП для працездатності СЕУ має велике значення.

Отже, необхідно налагодити систему технічного обслуговування (ТО) і діагностики підшипників кочення (ПК) та ковзання на весь період експлуатації суден. Актуальність дослідження обумовлена ще і необхідністю розвитку технологій виявлення несправностей та ідентифікації пошкоджень підшипників у реальному часі, тобто в період експлуатації. Крім того, необхідно перейти від дорогих запланованих ТО на більш ефективні та менш дорогі альтернативні умови обслуговування суднових ВП за їх технічним станом під час експлуатації на основі сучасних методів та технологій. До таких технологій виявлення змін технічного стану машин, механізмів, обладнання та конструкцій варто віднести віброакустичні методи, в тому числі на основі вейвлет-аналізу. Вони дозволяють оцінювати технічний стан за параметрами динамічних (віброакустичних) процесів, що відбуваються у вузлах СЕУ при їх вібраційному огляді, коли виконують ТО або ремонт (поточний та капітальний), і в процесі експлуатації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз досліджень у галузі контролю технічного

стану механічних систем [1–4] дозволяє зробити висновок щодо доцільності та ефективності використання методів віброакустичної діагностики. Вібросигнал, який містить достатню інформацію про роботу агрегату та його елементів, може стати достовірним показником його стану. При цьому методи віброакустичної діагностики дозволяють не тільки виявити вже існуючу несправність, але й знайти дефект, який розвивається на дуже ранній стадії. Це надає можливість прогнозувати аварії та планувати терміни та об'єм ремонту обладнання [4]. Безпосередньо дослідження і розробки в області виміру динамічних характеристик з використанням вейвлет – аналізу представлені в роботах [5–15].

**Метою статті** є дослідження підходів до ідентифікації пошкоджень підшипників валоприводу суднової енергетичної установки на основі вейвлет-аналізу та визначення найбільш ефективної вейвлет-утворюючої функції.

**Виклад основного матеріалу.** Оцінка технічного стану та ідентифікації пошкоджень підшипників валової лінії СЕУ базується на методах системного аналізу і математичної обробки сигналу, що надходить з його елементів при експлуатації на різних режимах роботи. В якості базового математичного апарату для ідентифікації пошкоджень підшипників в подальшому розглядається теорія вейвлет-аналізу.

Безперервне вейвлет-перетворення, означає розкладання довільного вхідного сигналу на принципово новий базис у вигляді сукупності хвильових пакетів-вейвлетів, які характеризуються чотирма принципово важливими властивостями:

- мають вигляд коротких, локалізованих у часі (або в просторі) хвильових пакетів з нульовим значенням інтеграла;
- мають можливість зсувів за часом;
- здатні до масштабуванню (розтягання – стиску);
- мають обмежений (або локальний) частотний спектр.

Відмінною рисою аналізу у базисі вейвлетів є їх висока чутливість до короткочасних швидкозмінних флуктуацій сигналу, оскільки вікно вейвлету забезпечує адекватну оцінку таких флуктуацій за рахунок одночасного збільшення амплітуди вікна при зменшенні його ширини. Одна з головних ідей вейвлетів – це представлення сигналів на різних рівнях декомпозиції (розкладання). Декомпозиція полягає у поділі функцій наближення до сигналу до двох груп: апроксимуючої – грубої, з досить повільною часовою динамікою змін, і деталізуючої –

з локальною і швидкою динамікою змін на тлі плавної динаміки, з подальшим їх дробленням і деталізацією на інших рівнях декомпозиції сигналів (рис. 1). Це можливо як у часовій, так і у частотній областях представлення сигналів вейвлетами.

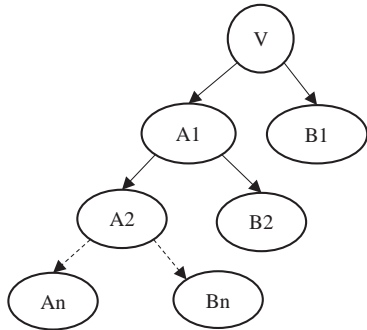


Рис. 1. Структура вейвлет-представлення сигналу

В основі безперервного вейвлет-перетворення лежить використання двох безперервних та інтегрованих по всій осі  $t$  функцій:

1) вейвлет-функція  $\psi(t)$  з нульовим значенням інтегралу, що визначає деталі сигналу та породжує деталізовані коефіцієнти:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0;$$

2) масштабуюча або скейлінг-функція  $\varphi(t)$  з одиничним значенням інтегралу, яка визначає грубе наближення (апроксимацію) сигналу та породжує коефіцієнти апроксимації:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t) dt = 1.$$

Безперервне вейвлет-перетворення одномірного сигналу – це його представлення у вигляді

узагальненого ряду або інтеграла Фур'є за системою базисних функцій. Результатом вейвлет-розкладення сигналу  $f(t)$  є двомірна функція, яка залежить від конкретних значень часу  $b$  та масштабу  $a$ , які несуть інформацію про частоту та час:

$$W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{a,b}(t) dt, \quad (1)$$

де  $\psi(t)$  – вейвлет-перетворююча функція;  
 $a$  – параметр масштабу, який відноситься опосередковано до частоти;

$b$  – параметр зсуву сигналу по осі часу;

$\sqrt{a}$  – нормуючий коефіцієнт;

$\psi_{a,b}(t)$  – коефіцієнт, що відповідає даному масштабу та зсуву материнського вейвлет за шкалою часу та амплітуди.

Для заданих значень параметрів  $a$  та  $b$  функція  $\psi_{a,b}(t)$  є вейвлетом, який породжується материнським вейвлетом  $\psi(t)$ . Як приклад наведемо вейвлет «мексиканський капелюх» у часовій та частотній областях (рис. 2).

Сконструємо базис  $\psi_{a,b}(t)$  за допомогою неперервних масштабних перетворень ( $a$ ) та переносів ( $b$ ) материнського вейвлету  $\psi(t)$  з довільними значеннями базисних параметрів  $a$  та  $b$ .

Тоді, за визначенням, зворотне безперервне вейвлет-перетворення сигналу  $f(t)$  представимо таким виразом:

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W_f(a, b) \psi_{a,b}(t) \frac{da \cdot db}{a^2}, \quad (2)$$

де  $C_\psi$  – нормуючий коефіцієнт.

Нормуючий коефіцієнт формально представимо у вигляді такого виразу:

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(\omega)|^2 |\omega|^{-1} d\omega < \infty, \quad (3)$$

де  $\Psi(\omega)$  – Фур'є – перетворення вейвлету  $\psi(t)$ .

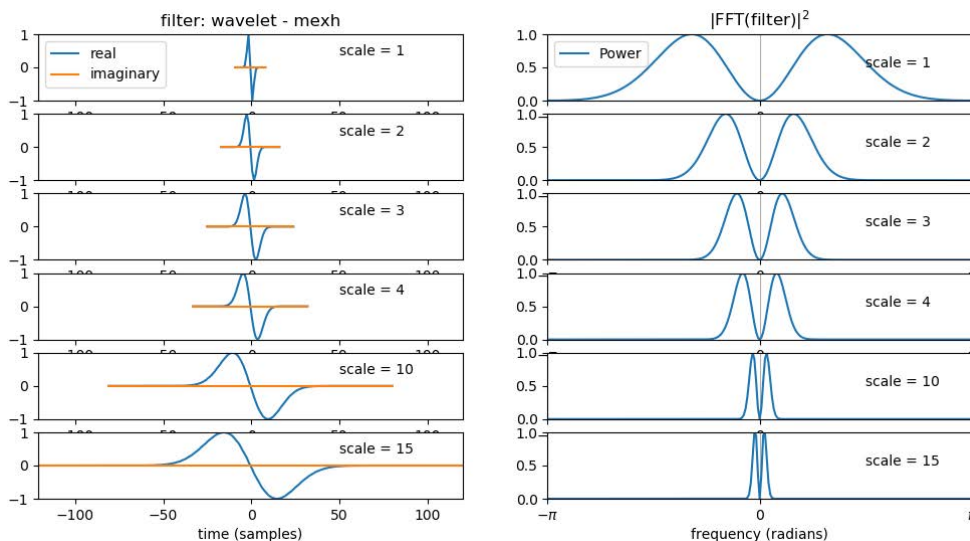


Рис. 2. Вейвлет «мексиканський капелюх» у часовій та частотній областях

З виразу (1) випливає, що вейвлет-спектр  $W_f(a, b)$  на відміну від Фур'є-спектра є функцією двох аргументів: перший аргумент  $a$  (часовий масштаб), аналогічний періоду осциляцій, тобто зворотній частоті, а другий  $b$  – аналогічний змішанню сигналу по осі часу.

Масштабно-часова локалізація обумовлена тим, що елементи базису вейвлет-перетворення добре локалізовані і володіють рухливим частотно-часовим вікном. За рахунок зміни масштабу (збільшення  $a$  приводить до звуження Фур'є-спектра функції  $\psi_{a,b}(t)$ ) вейвлети здатні виявляти розходження в характеристиках на різних шкалах (частотах), а за рахунок зрушення – проаналізувати властивості сигналу в різних точках на всьому інтервалі дослідження.

Тому при аналізі нестационарних сигналів за рахунок властивості локальності вейвлетов отримується істотна перевага перед перетворенням Фур'є, що дає тільки глобальні зведення про частоти (масштаби) аналізованого сигналу, оскільки використана при цьому система функцій (комплексна експонента або синуси і косинуси) визначена на нескінченному інтервалі. Відмінною рисою вейвлет-аналізу є його висока чутливість до короткочасних високочастотних флуктуацій сигналу, оскільки вейвлет-вікно забезпечує адекватну оцінку таких флуктуацій за рахунок одночасного збільшення амплітуди вікна при зменшенні його ширини. Розділяюча здатність аналізу у часовій області зростає зі збільшенням частоти.

Найбільш важливу інформацію про сигнал несе положення і значення локальних максимумів модуля вейвлет-перетворення. Точка з координатами  $(a_0, t_0)$  у площині  $(a, t)$  називається максимумом модуля вейвлет-перетворення, якщо виконується умова: якщо для всіх точок, які належать правому або лівому напівколу точки:  $t_0, |W_f(a, t)| \leq |W_f(a_0, t_0)|$ . З'єднані точки максимумів вейвлет-перетворень функції  $f(t)$  називаються лініями вейвлет-перетворення. В області обробки сигналів максимум модуля вейвлет-перетворення використовується для виявлення особливостей, для усунення шуму та реконструкції сигналів.

Формально локальна регулярність функції  $f(t)$  часто виміряється показником Гельдера, який характеризує гладкість функції відповідно до такого виразу:

$$|f(t) - f(t_0)| \leq A|t - t_0|^\alpha, \quad (4)$$

де константа  $A > 0, (t, t_0) \in [c, d], 0 \leq \alpha \leq 1$ .

За даними наведеного вище виразу, функція називається показником Гельдера  $\alpha$  на відрізку  $[c, d]$ . Чим більше значення  $\alpha$ , тим більш гладкою є функція  $f(t)$ :

- показник Гельдера  $\alpha = 1$  відповідає безперервно диференційованій функції в точці  $t_0$ ;
- показник Гельдера  $\alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ ) означає, що функція  $f(t)$  неперервна в точці  $t_0$ , однак похідна в даній точці розривається;
- показник Гельдера  $\alpha = 0$  вказує на розрив функції, но обмежена в околі  $t_0$ , отже функція має регулярність в даній точці.

Якщо показник Гельдера  $\alpha > 1$ , то необхідно з'ясувати порядок  $n$ , до якого функція  $f(t)$  неперервно диференційована в точці  $t_0$ . Якщо існує поліном  $p_n(t)$  ступеня  $n$ , що  $(n < \alpha \leq n + 1)$  такі, що має місце таке співвідношення:

$$|f(t) - p_n(t)| \leq |t - t_0|, \quad (5)$$

функція називається показником Гельдера  $\alpha$  в точці  $t_0$ .

При позитивному значенні показник Гельдера ( $\alpha > 0$ ) представляє собою інформацію про ступінь диференціювання функції. Отже, можна очікувати, що від'ємний показник Гельдера може виявити властивості функції  $f(t)$  на локалізованому інтервалі.

Для обчислення показника Гельдера візьмемо  $\log$  кожної частини рівняння та побудуємо графік вейвлет-коефіцієнтів відповідно до виразів:

$$\log |W_f(a, t)| = \log A + \alpha \log a, \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{\log |W_f(a, t)|}{\log a}. \quad (7)$$

Вираз (6) показує, що співвідношення між  $\log |W_f(a, t)|$  та масштабною змінною  $a$  визначається показником Гельдера. Нахил лінії, яка апроксимує логарифмічний графік є показником Гельдера  $\alpha$  в момент часу  $t$  для лінії максимуму вейвлет-перетворень. Для того, щоб обчислити показник Гельдера у всіх часових точках, необхідно повторити розрахунок відповідно виразу (7) для кожної точки.

Для обчислення показника Гельдера необхідно вибрати вейвлет-функції з достатньою кількістю  $k$  – нульових моментів. Вибір конкретної вейвлет-утворюючої функції цілком залежить від характеру поставленої задачі та від аналізованого сигналу. Це означає, що вейвлет-функція повинна задовольняти умові рівняння (7).

Різні типи вейвлетів за своїми основними властивостями відносяться до визначених сімейств (рис. 3):

1. Грубі вейвлети. До цього сімейства відносяться вейвлети Гауссова типу, Морлета, «мекси-

канський капелюх». Головні властивості – симетричність, функція  $\psi(t)$  явно виражена. На основі похідних Гаусса конструюються найбільш розповсюджені дійсні базиси. Це обумовлено тим, що функція Гаусса має найкращі показники локалізації як у часовій, так і в частотній областях. Основний недолік сімейства грубих вейвлетів – складність швидких алгоритмів обчислення вейвлет-коефіцієнтів.

2. Нескінченні регулярні вейвлети. До даного сімейства належать вейвлети Мейєра. Вейвлет функції симетричні і регулярні в нескінченності. Недоліки – функції  $\psi(t)$  та  $\phi(t)$  не визначені явно і не мають компактного носія, швидкі алгоритми обчислення вейвлет-коефіцієнтів неможливі.

3. Ортогональні вейвлети з компактним носієм. До цього сімейства відносяться вейвлети Хаара, Добеші, Симлета, Коифлетса і їх похідні.

4. Біортогональні парні вейвлети з компактним носієм. До них відносяться біортогональні вейвлети на основі  $\beta$ -сплайнів. Основні переваги – функції  $\psi(t)$  та  $\phi(t)$  мають компактний носій з числом нульових моментів для декомпозиції, а для реконструкції можуть бути регулярні. Основні труднощі – не мають властивість ортогональності.

5. Комплексні вейвлети. Це вейвлети на основі функцій Гаусса, Морлета, Шеннона, частотні р-сплайнові вейвлети. Вейвлети з даного сімейства є ортогональними і мають явно виражену функцію  $\psi(t)$ . Труднощі застосування – повільний алгоритм перетворень.

У даному дослідженні визначається така вейвлет-утворююча функція, що має не менш двох нульових моментів добре локалізовану як у частот-

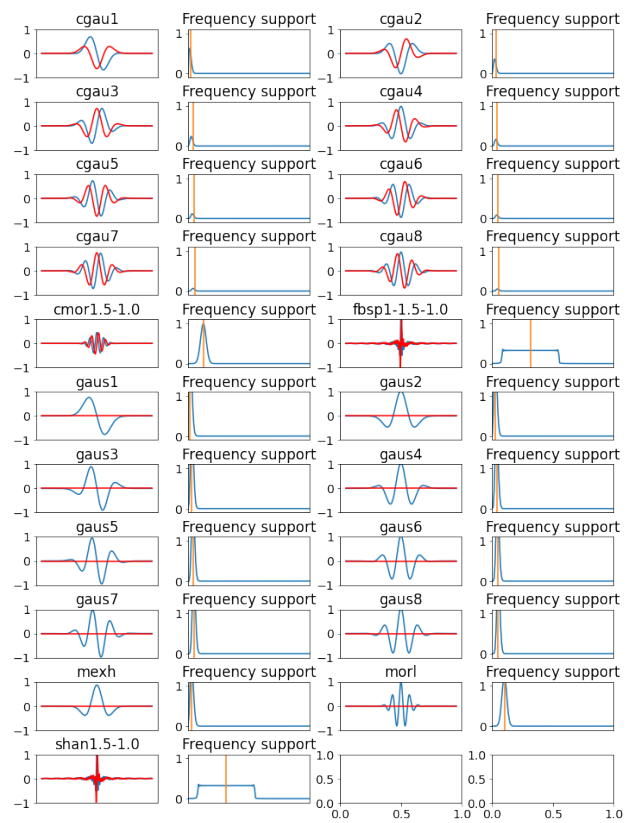


Рис. 3. Приклади різні типів вейвлетів

ній, так і у часовій областях. Симетричний вейвлет Морлета цілком відповідає даним умовам (рис. 4, 5). Функція Морлета має аналітичний вигляд:

$$F(x) = e^{x^2/2} \cdot \cos 5x, \quad (8)$$

в N точках регулярної сітки.

Лівий графік: функція материнського вейвлету у часовій області. Правий графік: амплітуда пере-

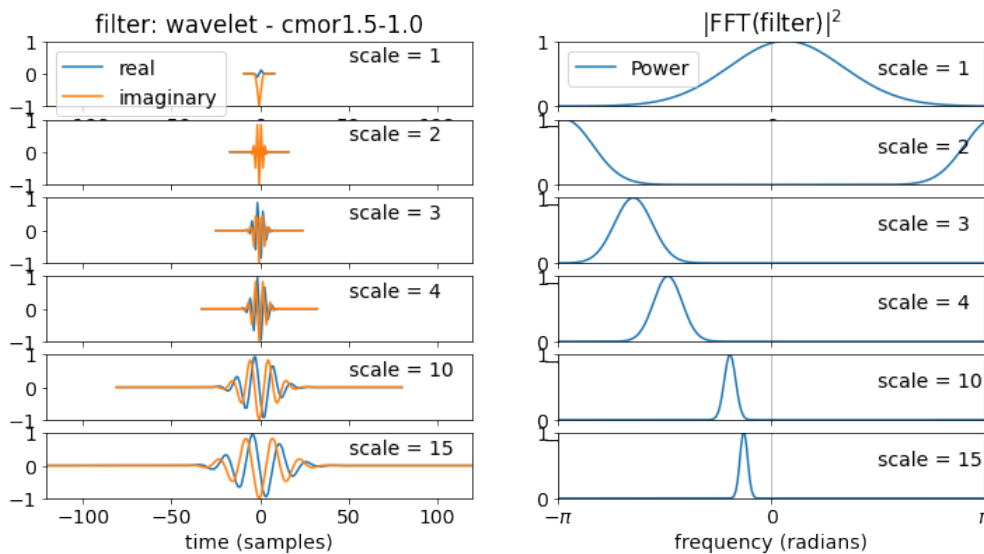


Рис. 4. Графік вейвлет-функції Морлета

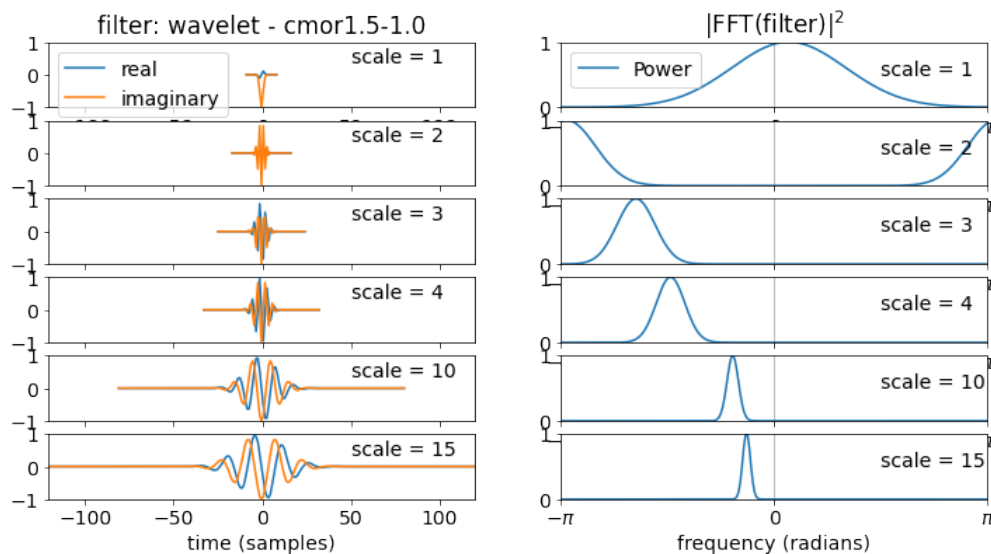


Рис. 5. Приклади різних реалізацій вейвлет-функції Морлета

творення Фур'є функції. На правому графіку (частота) жовта вертикальна лінія показує положення піку: це центральна частота вейвлета.

Таким чином, для дослідження сигналу вібрації підшипника суднового ВП найбільш ефективним варіантом є симетричний базис, що дає можливість досліджувати сигнали, які апроксимуються поліномами великих порядків.

**Висновки.** Отже, у статті розглянуто можливість ідентифікації пошкоджень підшипників суднового валоприводу на основі вейвлет-аналізу. Для аналізу відгуку підшипника використовується

безперервне вейвлет-перетворення. При цьому встановлені взаємозв'язки між чисельними характеристиками показниками Гельдера і дефектами підшипників кочення, що полегшують практичне застосування вейвлет-аналізу. Для безперервного вейвлет-перетворення необхідно використовувати вейвлет-утворюючу функцію з великою кількістю нульових моментів – перетинань з віссю абсцис. Вейвлет-утворююча функція повинна бути добре локалізована в частотній і часовій області. Тому як вейвлет-утворююча функція у даному дослідженні обрана функція Морлета.

#### Список літератури:

1. Shi D.F., Wang W. J., Unsworth P.J., Qu L. S. Purification and feature extraction of shaft orbits for diagnosing large rotating machinery. *Journal of Sound and Vibration*. 2005. P. 581–600.
2. Shabaueh N. H., Jean Zu W. Dynamic analysis of rotor-shaft systems with viscoelastically supported bearing. *Mech. and Mach. Theory*. 2000. Vol.35. № 9. P. 1313–1330.
3. Wang Quail, Xiaomin Deng. Damage detection with spatial wavelets. *International Journal of Solids and Structures*. 1999. Vol.36. no.23. P. 3443–3468.
4. Srinivasan M.G., Kot C.A. Effects of damage on the modal Parameters of a cylindrical shell. *10th International Modal Analysis Conference*. 1992. P. 529–535.
5. Yamnenko Y. S., Tielieha V. V., Niemchinova K. S. Використання вейвлет-перетворень Хаара та ОБ при аналізі сигналів. *Електроніка та Зв'язок*. 2017. No 22(4). P. 51–58.
6. Plicheva V.V., Guda A.N., Shevchuk P.S. Logical Approaches to Anomaly Detection in Industrial Dynamic Processes. *Intelligent Information Technologies For Industry (IITI'19) : Proceedings of the Fourth International Scientific Conference, Ostrava–Prague, Czech Republic, on December 2–7, 2019 / ed. by Kovalev S., Tarassov V., Snašel V., Sukhanov A. Springer International Publishing Ag. 2020. P. 352–361.*
7. Duris V., Chumarov S.G., Mikheev G.M., Mikheev K.G., Semenov V.I. The Orthogonal Wavelets in the Frequency Domain Used For the Images Filtering. *IEEE Access*. 2020. No 8. P. 211125–211134.
8. Nagovitsyn Y.A., Osipova A.A., Nagovitsyna E.Y. “Generative” Indices of Sunspot Solar Activity: 145-Year Composite Series. *Solar Physics* 296:2. 2021. No 32.
9. Kovalchuk I. V., Svechnikova O.S., Bulavin L.A. Multifractal Analysis of Cardiac Series and Predictors of Sudden Cardiac Death. *Ukrainian Journal of Physics*. 2021. No 66(10). P. 879–884.
10. Nam J., Kang J. Classification of Chaotic Squeak and Rattle Vibrations By Cnn Using Recurrence Pattern. *Sensors*. 2021. No 21(23). 8054.

11. Mandrikova V O., Rodomanskaya I A., Mandrikova B.S. Application of the New Wavelet-Decomposition Method For the Analysis of Geomagnetic Data and Cosmic Ray Variations. *Geomagn. Aeron.* 2021. No 61(4). P. 492–507.
12. Kurdyayeva Yu., Borchevskina O., Karpov I., Kshevetskii S. Thermospheric Disturbances Caused By the Propagation of Acoustic-Gravity Waves From the Lower Atmosphere During a Solar Eclipse. *Advances in Space Research.* 2021. No 68(3). P. 1390–1400.
13. Nagovitsyn Yu.A., Osipova A.A. Average Annual Total Sunspot Area in the Last 410 Yr: the Most Probable Values and Limits of Their Uncertainties. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* 2021. No 505(1). P. 1206–1212.
14. Kapwata T., Wright C.Y., du Preez D.J., Kunene Z., Mathee A., Ikeda T., Landman W., Maharaj R., Sweijd N., Minakawa N., Blesic S. Exploring Rural Hospital Admissions For Diarrhoeal Disease, Malaria, Pneumonia, and Asthma in Relation to Temperature, Rainfall and Air Pollution Using Wavelet Transform Analysis. *Science of The Total Environment.* 2021. No 791. 148307.
15. Kostianoy A.G., Lebedev S.A., Kostianaia E.A., Prokofiev Ya.A. Interannual Variability of Water Level in Two Largest Lakes of Europe. *Remote Sens.* 2022. No 14(3). 659.

**Daki O.A., Voichenko T.O., Shtrybets V.V., Mannapova O.V., Riashchenko O.I. ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF USING WAVELET ANALYSIS TO IDENTIFY DAMAGE TO SHAFT DRIVE BEARINGS OF A SHIP'S POWER PLANT**

*The aim of this paper is to study approaches to identifying damage to ship propulsion shaft drive bearings based on wavelet analysis and determine the most effective wavelet-forming function. One of the reasons for a significant number of accidents is the failure of components and assemblies of a ship's power plant. The service life of a ship's power plant is determined, among other things, by the technical condition of the bearings of crankshafts of internal combustion engines, bearings and gears of reverse gear units, and bearings of propeller shafts. Therefore, monitoring and assessing the technical condition of ship shaft drive bearings is of great importance for the efficiency of the ship's power plant. Consequently, it is necessary to establish a system of maintenance and diagnostics of bearings using the latest technologies, including in real time, i.e. during operation. Such technologies for detecting changes in the technical condition of machines, mechanisms, equipment and structures include vibroacoustic methods. One of the promising approaches within the framework of vibroacoustic methods is the use of the mathematical apparatus of wavelet analysis. The aim of this work is achieved by analysing the features of using wavelet analysis to identify damage to ship shaft drive bearings. A continuous wavelet transform is used to analyse the bearing response. The relationships between the numerical characteristics of the Hölder indices and bearing defects are established, which facilitate the practical application of wavelet analysis. The paper determines that for a continuous wavelet transform, it is necessary to use a wavelet-forming function with a large number of zero moments – intersections with the abscissa axis. The wavelet-forming function should be well localized in the frequency and time domain. The most important result of the research is to determine the necessity of using the Morlet function as a wavelet-forming function. Thus, the article substantiates the possibility of effective identification of damage to the bearings of the shaft drive of a ship's power plant based on wavelet analysis.*

**Key words:** identification, damage, shaft drive bearing, ship power plant, wavelet analysis, wavelet-forming function.

**Дакі О.А.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Войченко Т.О.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Штрибець В.В.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Рященко О.І.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

## МЕТОД КОНТРОЛЮ ДВОХВАЛЬНОГО ПРОПУЛЬСИВНОГО КОМПЛЕКСУ ШВИДКІСНИХ СУДЕН З ЧАСТКОВО ЗАНУРЕНИМИ ГВИНТАМИ

*Метою статті є розробка методу контролю двохвального пропульсивного комплексу для підвищення ефективності експлуатації швидкісних суден з частково зануреними гвинтами на різних режимах експлуатації на основі контролю параметрів. Поставлена мета досягається шляхом розробки структури методу та відповідних процедур контролю. Метод контролю пропульсивного комплексу забезпечує контроль стану його елементів в експлуатації, дослідження теплотехнічних параметрів пропульсивного комплексу з частково зануреними гвинтами та контроль його вібраційних параметрів. Проведений аналіз підходів щодо контролю стану елементів пропульсивного комплексу в експлуатації довів, що використання вібраційних методів дозволяє оперативніше оцінити технічний стан і знайти дефекти, тому їх використання виявляється найбільш ефективним. Таким чином, врахування несправностей пропульсивного комплексу швидкісних суден з частково зануреними гвинтами, їх характер свідчать про необхідність застосування вібраційних методів контролю для такого типу суден. В основу процедури дослідження теплотехнічних параметрів пропульсивного комплексу із частково зануреними гвинтами покладено вимоги, викладені в Правилах класифікації та побудови морських суден. В основу процедури контролю за вібраційними параметрами покладено вимоги керівних документів та стандартів. При цьому, вимір значень параметрів вібрації з метою оцінки технічного стану елементів ПК швидкісних суден із частково зануреними гвинтами можуть складати частину проїмо-здавальних випробувань при введенні судна в експлуатацію і повинні проводитися під час експлуатації. Найважливішим результатом досліджень є комплексна оцінка позитивних та негативних сторін різного виду контролю технічного стану пропульсивного комплексу із частково зануреними гвинтами, а саме візуального, параметричного, трибологічного, вібраційного, яка надає перевагу вібраційним методам перед іншими видами контролю. Таким чином, врахування несправностей пропульсивного комплексу із частково зануреними гвинтами, їх характер свідчать про необхідність застосування вібраційних методів контролю для високошвидкісних суден.*

**Ключові слова:** метод, швидкісне судно, пропульсивний комплекс, частково занурені гвинти, контроль, параметри.

**Постановка проблеми.** Сьогодні в усьому світі широкого розповсюдження отримали мали судна (катери), які відносяться до класу високошвидкісних і призначені, як правило, для виконання спеціальних завдань. Високошвидкісні судна (ВШС) відрізняються швидкістю понад 50 вузлів і водотоннажністю до 60 тон.

Двохвальний пропульсивний комплекс (ПК) таких суден складається з двох високооборотних

(ВОД) головних двигунів (ГД) сумарною потужністю до 3000 кВт, реверсів-редукторів, торсіонних валів і з приводів Арнесона з частково зануреними гвинтами (ЧЗГ) фіксованого кроку. Основними режимами руху такого типу суден є водотонажний та глісеруючий.

У процесі експлуатації цих швидкісних суден із ЧЗГ виникають відмови та несправності, аналіз яких показав, що вони пов'язані з конструк-



тивними особливостями ПК і помилковими діями екіпажів, що призводить до підвищених навантажень ГД, високим рівням вібрації тощо.

Виникаючі відмови призводять до зниження безпеки мореплавання, простою суден, а також до значних витрат судновласників на ремонт. Проективальники та експлуатанти повинні знати причини виникнення несправностей і забезпечити комплекс технічних та організаційно-методичних заходів для їх попередження або мінімізації. Тому завдання підвищення ефективності експлуатації ПК швидкісних суден ЧЗГ на різних режимах експлуатації на основі контролю параметрів є актуальним.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розробкою і впровадженням ефективних методів і засобів оцінки фактичного стану ЧЗГ, удосконаленням їх технічної експлуатації присвячена значна кількість досліджень.

У роботі [1] для чисельного моделювання гребних гвинтів серії Gawn використовують відкритий вихідний код OpenProp, оснований на теорії помірно навантажених підйомних ліній, та комерційний програмний пакет STAR-CCM+, оснований на теорії в'язкого потоку. Останній є більш трудомістким з точки зору часу, необхідного для підготовки моделювання, а також часу обчислень. Отримані чисельні результати порівнюються з регресійними поліномами на основі експериментальних даних. Перевірка результатів показала, що OpenProp може бути використаний як практичний та ефективний інструмент для попереднього проектування гребних гвинтів.

У роботі [2] дослідження спрямоване на вивчення впливу накипу на характеристики гребного гвинта за допомогою обчислювальної гідродинаміки (CFD). Результати представлені для гвинта, який був попередньо відсканований і оцифрований у 3D. Порівнюються результати, отримані за допомогою двох моделей турбулентності при чисельному моделюванні. Проводиться валідаційне дослідження для оцінки чисельної невизначеності. Модель переходу використовується в масштабі моделі для врахування частково ламінарного потоку. Потім гвинт масштабується і проводиться чисельне моделювання для оцінки впливу масштабу на продуктивність даного гвинта у відкритій воді.

У дослідженні [3] наведена повномасштабна модель судового руху на основі нестационарного усереднення Рейнольдса Нав'є-Стокса (URANS) для прогнозування впливу біообростання на ходові характеристики повномасштабного контейнеровоза KRISO. Модель функції

шорсткості була використана в рамках функції моделі CFD для представлення оболонки на поверхні корпусу, керма і гвинта. Побудовано імітаційну модель пропорційно-інтегрального регулятора для визначення точки самопереміщення. Моделювання проводилося з різними конфігураціями обростання корпусу та гвинта. Нарешті, досліджено вплив біологічного обростання на характеристики руху.

При проектуванні рушіїв гоночних суден використовуються різні методи розрахунку катерних ЧЗГ. У роботах [4–6] порівнюються гідродинамічні характеристики одного з ЧЗГ дослідженої серії при частковому і повному зануренні, описуються зовнішні характеристики ГД, аналізуються динамічні якості ПК для ЧЗГ, узагальнюється досвід застосування ЧЗГ на швидкісних судах, даються рекомендації з їх розрахунку.

**Мета статті** полягає у розробці методу контролю двохвального ПК для підвищення ефективності експлуатації швидкісних суден з ЧЗГ на різних режимах експлуатації на основі контролю параметрів.

**Виклад основного матеріалу.** Метод контролю ПК містить послідовне виконання трьох процедур (рис. 1):

- 1) процедуру контролю стану елементів ПК в експлуатації;
- 2) процедуру дослідження теплотехнічних параметрів ПК з частково зануреними гвинтами;
- 3) процедуру контролю вібраційних параметрів ПК з частково зануреними гвинтами.

На даний час існує декілька підходів щодо контролю стану елементів пропульсивного комплексу в експлуатації (рис. 2). З метою вибору найкращого для підходу розглянемо коротко їх зміст та недоліки.

На досліджуваних швидкісних судах візуальний контроль приводів Арнесона через особливості конструкції судна і ПК із ЧЗГ може здійснюватися тільки на стоянці. У таблиці 1 наведені робочі параметри системи гідравліки приводів Арнесона.

Недоліки візуального контролю загально відомі і майже не відрізняються для різного типу механізмів:

- не дає достатньої інформації про стан елементів приводу Арнесона у процесі експлуатації;
- необхідність у певних випадках проводити розбирання справних приводів із супутнім процесом ремонту з постановкою судна на кильблоки;
- збільшення матеріальних витрат судновласника.

Таблиця 2

Параметри на пульті оператора в ходовій рубці

№	Параметр	Позначення параметра	Одиниця виміру
1	Частота обертання колінчатого вала ГД	$n_{гд}$	хв. <sup>-1</sup>
2	Тиск мастила в ГД	$P_m$	бар
3	Температура мастила на виході з ГД	$t_m$	°С
4	Температура мастила в реверс-редукторі	$t_m$	°С
5	Температура охолоджувальної рідини на виході з ГД	$t_{ож}$	°С
6	Кути встановлення гребних валів приводів Арнесона	$\alpha$	град
7	Індикатори АПС		-

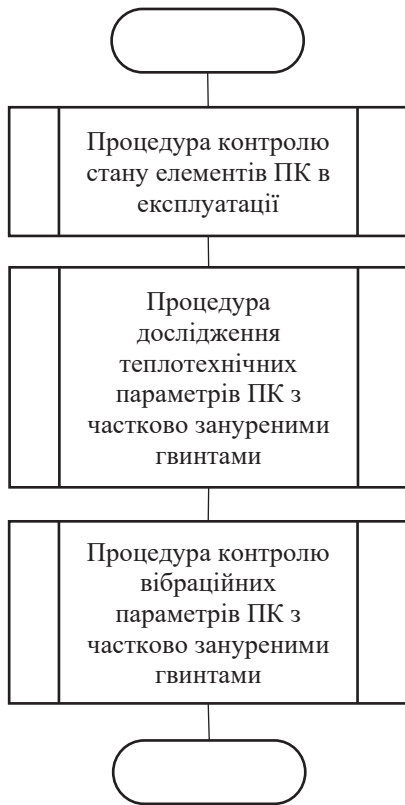


Рис. 1. Структура методу контролю ПК

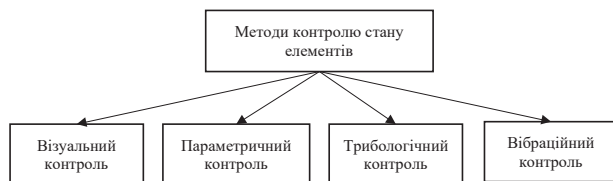


Рис. 2. Базові методи контролю стану елементів

При параметричному контролі під час роботи ПК із ЧЗГ необхідно періодично контролювати такі параметри, що виносяться на пульт оператора в ходовій рубці (табл. 2) і на пульт оператора в машинному відділенні.

Перелік контрольованих параметрів, виведених у ходову рубку, недостатній для об’єктивної оцінки стану ПК із ЧЗГ на різних експлуатаційних режимах. Оскільки перебування екіпажу в машинному відділенні під час руху судна не передбачається, то він не має постійної можливості контролювати параметри ГД. Оцінка технічного стану і пошук несправностей ПК із ЧЗГ виконується порівнянням поточних значень робочих параметрів в експлуатації з установленними нормами допустимих або базових (еталонних) значень, отриманими при ходових іспитах або першому виході (при повному завантаженні).

Недоліки параметричного контролю:  
 – кількість контрольованих параметрів у ходовій рубці є недостатньою;  
 – неможливість застосування для всіх вузлів і деталей комплексу;  
 – відсутність нормуючих показників технічного стану сучасних ПК із ЧЗГ.

Таблиця 1

Робочі параметри системи гідравліки приводів Арнесона

№ з/п	Найменування	Параметр	Значення параметра	
1	Робочий тиск у системі гідравліки рульового управління	$P_{раб.}$	8 бар	
2	Тиск настроювання протиударного клапана	Система гідравліки рульового управління	$P_{кл. РУ}$	10 бар
		Система гідравліки балансування	$P_{кл. ГБ}$	11 бар
3	Температура робочої рідини	$t_m$	не більше +70°С	
4	Робоча рідина	-	масло VG32	

При використанні методу трибологічного контролю перевірка рівня трансмісійного мастила та гідравлічного мастила здійснюється під час готування судна до виходу, кожних 30 хвилин на ходових режимах і після приходу в порт. Результати контролю записуються у вахтовий журнал, узагальнюються і щомісяця заносяться до формуляру. Витрата мастила визначалася об'ємами, що доливаються в мастильний бак. Середній об'єм мастила, що доливається, за час спостереження не перевищував 0,3 літри на місяць. При потраплянні забортної води в мастило через ущільнення хвостовика приводу виконувалася його заміна. Відповідно до контрольного переліку заходів технічної експлуатації, наведених у табл. 3, заміна мастила повинна проводитися після перших 200 годин, а далі через 500 годин роботи, або за результатами його аналізу але, не рідше 1 рази в рік.

Трибологічному контролю притаманні деякі недоліки:

- складність визначення місця дефекту;
- висока вартість існуючих засобів контролю;
- необхідність залучення висококваліфікованих фахівців;
- необхідність створення автоматизованих трибологічних комплексів на судні;
- складність у визначенні бракувальних параметрів мастил;
- недостатня кількість існуючих вітчизняних хімічних лабораторій;
- низька оперативність проведення контролю.

При вібраційному контролі оцінка технічного стану на основі контролю вібрації ПК із ЧЗГ проводиться службою сервісу тільки для ГД і реверса-редуктора. Для оцінки технічного стану приводів Арнесона, на досліджуваних судах вібраційний контроль дотепер не застосовувався. Методи і засоби вібраційного контролю не вимагають розбирання або доробки конструкції приводу Арнесона, що дуже важливо при їх експлуатації.

До переваг вібраційного контролю відносяться:

- мобільність вимірювальних приладів;
- оперативність одержання результатів вимірів;
- можливість визначення місця виникнення дефекту на етапі його виникнення;
- можливість спостереження за розвитком дефекту і недопущення досягнення ним критичних значень;
- можливість складання прогнозу щодо зміни технічного стану (ТС) об'єкта;
- можливість підбору при погіршенні технічного стану суднових технічних засобів таких режимів експлуатації, що дозволяють продовжити час експлуатації до чергового ремонту.

Використання вібраційних методів дозволяє оперативно оцінити ТС і знайти дефекти, тому їх використання є найбільш ефективним. Таким чином, врахування несправностей пропульсивного комплексу із ЧЗГ, їх характер свідчать про необхідність застосування вібраційних методів контролю для такого типу суден.

В основу процедури дослідження теплотехнічних параметрів ПК із ЧЗГ пропонується покласти вимоги, викладені у правилах класифікації та побудови суден [6]. Виміри значень теплотехнічних параметрів ПК із ЧЗГ проводяться з метою контролю та оцінки ТС під час експлуатації. В якості відповідних теплотехнічних параметрів ПК із ЧЗГ виступають:

- потужність ГД ( $N_{гд}$ );
- частота обертання ГД ( $n_{гд}$ );
- частота обертання гребного вала ( $n_{гв}$ );
- тиск наддуву ( $p_n$ );
- тиск мастила в системах ГД і реверса-редуктора ( $p_m$ );
- температура ВГ, перед та за ТК ( $t_{гг}$ );
- температура повітря на виході з ресивера ( $t_p$ );
- частота обертання ТК ( $n_{тк}$ );
- кут нахилу гребних валів приводу Арнесона ( $\alpha$ ).

Таблиця 3

**Технічне обслуговування і перевірки мастил для приводу Арнесона**

№ з/п	Найменування	Щоденно	Після перших 200 год. роботи	Через 500 год роботи, але не більш 12 мес.	Через 2000 годин роботи
Система змащення гребного валу					
1	Перевірка рівня мастила	X			
2	Перевірка якості мастила	X			
3	Заміна мастила		X	X	X
Система гідравліки					
4	Перевірка рівня мастила	X			
5	Перевірка якості мастила	X			
6	Заміна фільтра мастила			X	
7	Заміна мастила		X	X	X

Контроль теплотехнічного стану повинен виконуватися на вільній воді при хвилюванні моря не більш 1 бала і прямолінійному русі судна. Режим роботи ГД сталий. ГД та привід Арнесона повинні бути прогріті до робочої температури. Процедура контролю передбачає реєстрацію навантаження ГД, положення гребних валів у поперечній та у вертикальній площинах при зміні частоти обертання колінчатого вала ГД у діапазоні 600–2450 хв.<sup>-1</sup> через кожні 100 хв.<sup>-1</sup>.

В основу розробленої процедури контролю за вібраційними параметрами були покладені вимоги керівних документів та стандартів. Усі застосовувані засоби вимірів повинні пройти іспит або метрологічну атестацію відповідно до вимог [7, 8], та допущені до застосування і не повинні мати минулих термінів періодичної перевірки, проведеної відповідно до ДСТУ-Н РМГ 51:2006 [9].

Контроль вібраційного стану повинен здійснюватися на вільній воді при хвилюванні моря не більш 1 бала і прямолінійному русі судна. Режим роботи ГД має бути сталим. ГД та привід Арнесона повинні бути прогріті до робочої температури. Необхідно виконати не менш 3-х вимірів у кожній точці з перервою не менш 20 хв.

Проведення вібраційного контролю ґрунтується на аналізі конструктивних особливостей ПК із ЧЗГ. За результатами проведення вимірів складається протокол. Методика дозволяє:

– визначити необхідні вібраційні параметри і провести аналіз ТС його елементів;

– проводити докладний аналіз технічного стану його елементів у відповідних смугах на характерних частотах та у вузькосмугових спектрах;

– регламентувати терміни і порядок проведення вібраційних вимірів приводу Арнесона (не рідше одного разу за 200 годин роботи).

При цьому, виміри значень параметрів вібрації з метою оцінки технічного стану елементів ПК швидкісних суден із ЧЗГ можуть складати частину приймально-здавальних випробувань при введенні судна в експлуатацію і повинні проводитися під час експлуатації.

**Висновки.** Розроблений метод контролю двохвального ПК є основою підвищення ефективності експлуатації ПК швидкісних суден ЧЗГ на різних режимах експлуатації на основі контролю параметрів. Метод контролю ПК забезпечує контроль стану елементів ПК в експлуатації, дослідження теплотехнічних параметрів та контроль вібраційних параметрів ПК з ЧЗГ. Проведений аналіз підходів щодо контролю стану елементів ПК в експлуатації показав, що використання вібраційних методів дозволяє оперативно оцінити ТС і знайти дефекти, тому їх використання є найбільш ефективним. Таким чином, врахування несправностей ПК із ЧЗГ, їх характер свідчить про необхідність застосування вібраційних методів контролю для такого типу суден. В основу процедури дослідження теплотехнічних параметрів ПК із ЧЗГ покладено вимоги, викладені в правилах класифікації та побудови суден, в основу процедури контролю за вібраційними параметрами - вимоги керівних документів та стандартів [7–9].

#### Список літератури:

1. Vlašić Deni, Degiuli Nastia, Farkas Andrea, Martić Ivana. The preliminary design of a screw propeller by means of computational fluid dynamics. *Brodogradnja*. 2018. No 69. P. 129–147.
2. Grlj Carlo, Degiuli Nastia, Farkas Andrea, Martić Ivana. Numerical Study of Scale Effects on Open Water Propeller Performance. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. No 10(8). 17 p.
3. Song Soonseok, Demirel Yigit, Atlar Mehmet. Penalty of hull and propeller fouling on ship self-propulsion performance. *Applied Ocean Research*. 2020. No 94.
4. Taskar B., Yum K. K., Steen S., Pedersen E. The effect of waves on engine-propeller dynamics and propulsion performance of ships. *Ocean Engineering*. 2016. Vol. 122. P. 262–277.
5. Jian L., Xiwen L., Zuti Z., Xiaohui L., Yuquan Z. Numerical investigation into effects on momentum thrust by nozzle's geometric parameters in water jet propulsion system of autonomous underwater vehicles. *Ocean Engineering*. 2016. Vol. 123. P. 327–345.
6. Правила класифікації та побудови суден, 2020. URL: [http://91.203.91.178/books/Class2020\\_08.pdf](http://91.203.91.178/books/Class2020_08.pdf) (дата звернення: 29.04.2023).
7. Про метрологію та метрологічну діяльність : Закон України від 05.06.2014 р. № 1314-VII : станом на 1 січ. 2022 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1314-18#Text> (дата звернення: 18.04.2023).
8. ДСТУ ISO 10012:2005. Системи керування вимірюванням. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання. Чинний від 2007-01-01. Вид. офіц. Київ : ДЕРЖСПОЖИВСТАНДАРТ УКРАЇНИ, 2007. 23 с.
9. ДСТУ-Н РМГ 51:2006. Документи до методик повірки засобів вимірювання. Основні положення (РМГ 51-2002, IDT). [Чинний від 2007-07-01]. Вид. офіц. Київ, 2007. 11 с. (Метрологія).

---

**Daki O.A., Voichenko T.O., Shtrybets V.V., Riashchenko O.I. METHOD FOR CONTROLLING THE TWIN-SHAFT PROPULSION COMPLEX OF HIGH-SPEED VESSELS WITH PARTIALLY SUBMERGED PROPELLERS**

*The aim of the work is to develop a method for controlling a twin-shaft propulsion system to improve the efficiency of high-speed vessels with partially submerged propellers in different operating modes based on parameter control. This goal is achieved by developing the structure of the method and the corresponding control procedures. The method for controlling the propulsion system provides control of the state of its elements in operation, study of the thermal parameters of the propulsion system with partially submerged propellers, and control of its vibration parameters. The analysis of approaches to controlling the state of the propulsion system elements in operation has shown that the use of vibration methods allows for a quick assessment of the technical condition and detection of defects, so their use is most effective. Thus, considering the malfunctions of the propulsion complex of high-speed vessels with partially submerged propellers, their nature indicates the need to use vibration control methods for this type of vessel. The procedure for studying the thermal engineering parameters of the propulsion system with partially submerged propellers is based on the requirements set forth in the Rules for the Classification and Construction of Ships. The procedure for monitoring vibration parameters is based on the requirements of guidelines and standards. The most important result of the research is a comprehensive assessment of the positive and negative aspects of various types of control of the technical condition of the propulsion complex with partially submerged propellers, namely visual, parametric, tribological, and vibration, which gives preference to vibration methods over other types of control. Thus, taking into account the malfunctions of the propulsion complex with partially submerged propellers and their nature indicate the need to use vibration control methods for high-speed vessels.*

**Key words:** *method, high-speed vessel, propulsion complex, partially submerged propellers, control, parameters.*

**Доля К.В.**

Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»

**Доля О.Є.**

Харківський національний університет радіоелектроніки

## СИСТЕМНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ МАРШРУТІВ

*Планування перевезень та розвитку інфраструктури транспорту впливає на розвиток регіонів в економічному та соціальному напрямку. Проекти із закупівлі засобів транспорту є над актуальним питанням з часів початку індустріалізації та переходу суспільства до глобальних економік. В роботі вважається, що зміна в часі чистого прибутку, терміну періоду окупності, витрат та чистого дисконтованого прибутку є параметрами, що відображають доцільність впровадження таких проектів. Системність функціонування транспорту й залежність проектних параметрів від багатьох внутрішніх та зовнішніх факторів значно ускладняє дослідження. Метою дослідження є визначення можливості моделювання маршрутної мережі та розраховувати проектні параметри при врахуванні особливостей видів транспорту при їхньому одночасному функціонуванні. Для досягнення цілі було використано методи математичного та комп'ютерного моделювання, але не тільки. Наукова проблематика є у тому, що питання системного розгляду процесу функціонування перевезень не здійснювалась. В роботі розкривається гіпотеза можливості моделювання системи пасажирських маршрутів із урахуванням їхньої взаємопов'язаності та взаємного впливу. Основні економічні та технічні параметри функціонування різних маршрутів впливають один на одного та можливі до моделювання. Ціль та задачі дослідження полягають в створенні моделі маршрутної мережі при врахуванні різних типів транспорту, їхнього взаємного функціонування, моделюванні параметрів чистого прибутку, періоду окупності, витрат, дисконтованого чистого прибутку. В результаті роботи доведено можливість створення певного моделювання, проведення розрахунків проектних параметрів та визначення їх взаємовпливу.*

**Ключові слова:** транспорт, проект, ресурс, авіатransпорт, залізничний транспорт, авто-транспорт, транспортна мережа, маршрутна мережа, транспортна система, чистий прибуток, витрати, дисконтований прибуток, період окупності.

**Постановка проблеми.** Питання розвитку інфраструктури транспорту часто є питанням наукової думки сучасників. Транспортна інфраструктура забезпечує потреби суспільства та виробництва в переміщенні [1–5]. Вартість кінцевих послуг та навантаження на соціум є доволі цікавим питанням сучасності [6–8] і є важливим в соціальному, економічному та культурному розвитку населення [9–15].

**Аналіз останніх досліджень обсягів перевезень пасажирів.** Сучасні наукові дослідження завдань перевезень пасажирів значною мірою торкаються й автомобільного транспорту. У приведеному аналізі останніх наукових досліджень висвітлюється актуальність такого питання й його багатогранність. В роботі [1] розкривали питання якості обслуговування пасажирів до початку їздки. Авторами Запропоновано основу теорії еволюційних ігор для вирішення проблеми динамічної взаємодії пасажирів під час обслуговування. Розглядаються сценарії нескінченної та кінцевої

сукупності відповідно. Результати моделювання, проведеного авторами, вказують на те, що піші прогулянки є першим вибором для пасажирів за комфортної погоди, а таксі – першим вибором у несприятливу погоду.

Питаннями вивчення впливу привабливості автомобільного транспорту для пасажирів, із досягненням мети збільшення кількості пасажирів займалися й інші вчені. Так, в роботі [2] розглянуте питання розрахунку обсягів пасажирських перевезень із зазначенням першочерговості визначення таких параметрів для планування діяльності всього виробничого процесу таких перевезень. В роботі [3] викладено результати дослідження можливості залучення до роботи водіїв з питань їхніх власних характеристик характеру та поведінки. Встановлено, що водії мають певні психологічні профілі властивості яких впливають на стиль керування, що у свою чергу має задовольняти умовам визначеним при перевезенні пасажирів. Вивчення особливостей

поведінки водіїв міських водіїв у гірських містах за допомогою методу отримання GPS та порівняльного аналізу значення швидкості руху шести легкових автомобілів. Результати показують, що: звички різних водіїв у процесі водіння не однакові, експеримент із трьох моделей типу «Залишитися постійно», «Прискорення переваги», «Швидко та повільно»; завдяки своїм властивостям, в процесі водіння, діапазон швидкостей легкового автомобіля не великий. Авторами роботи [4] розглянуто вплив характеристик маршрутної мережі на привабливість виду транспорту. Запропоновано методу розрахунку маршрутної мережі далекого сполучення в умовах коливання пасажиропотоків. Робота охоплює такі питання, як якісне визначення маршрутної мережі далекого сполучення, задачі розрахунку маршрутної мережі пасажирських. Можна стверджувати, що зазвичай подібні задачі вирішується як статичні, тобто при розрахунку не враховуються коливання пасажиропотоку за певний проміжок часу. Це призводить або до збільшення пробігу вільних місць, або до їх дефіциту, оскільки пасажиропотік розподіляється нерівномірно по днях тижня. Якщо задачу розрахунку маршрутної мережі пасажирських поїздів сформулювати як динамічну, тобто змодельовати її з урахуванням коливань пасажиропотоку в часі та врахувати нерівномірність пасажиропотоку в прямому та зворотному напрямках, це призведе до підвищення ефективності використання рухомого складу.

Роботи [5–6] висвітлюють такі питання, як моделювання розподілу пасажирів опираючись на час очікування залізничних пасажирів на основі відстані руху поїзда. Час очікування пасажирів на вокзалі показує позитивну кореляцію між середнім часом очікування та відстанню руху поїзда. Результати, що відображають відмінність відстаней руху поїздів, можуть стати теоретичною основою для оптимізації параметрів прибуття пасажирів залізницею. Також, описано питання загальної структури для інтелектуальної залізничної пасажирської станції інтелектуальної залізничної пасажирської станції.

Авторами робіт [7, 8] описано методики розрахунку максимальної кількості пасажирів залізничної пасажирської станції. Визначено, що залізнична мережа незупинно збільшується, а тому буде побудовано багато нових залізничних пасажирських станцій й дуже необхідно вивчати теорії побудови залізничних пасажирських станцій, якими обумовлено, що максимальна кількість пасажирів є ключовим параметром для проек-

тування пропускної здатності залізничної пасажирської станції. У статті досліджуються існуючі методи розрахунку, які включають метод зібраних коефіцієнтів, метод графів і номерів поїздів одностороннього методу, імовірнісний метод, метод найгіршої ситуації та метод моделювання, крім того, дає запропоноване значення їхніх параметрів. Попереднє дослідження в основному зосереджувалося на аспекті управління залізничною або пасажирською організацією, які ігнорували їх взаємодію.

Дослідження питання моделі оцінки ризику безпеки для інформаційних технологій залізничної системи та її застосування в системі залізничних пасажирських квитків в роботі [9]. Авторами роботи [10] розроблено методологію вибору транспортного плану міжміських поїздів у мережі залізниць за допомогою методу аналітичного процесу ієрархії. В роботах [11, 12] було запропоновано підходи до розрахунку кількості пасажирів поліпшенням нейронної мережі та її застосуванням в прогнозуванні кількості пасажирів на залізниці під час весняного фестивалю.

В роботах авторів [13–14] розкрито метод коригування використання колій прибуття та відправлення на залізничних пасажирських станціях на основі часово-просторових ресурсів. Моделюється задача коригування схеми використання шляхів прибуття та відправлення на основі дискретизації часово-просторових ресурсів треків прибуття та відправлення з точки зору мікроскопічного опису. В роботах авторів [15–16] було розглянуто інші питання актуальні для пасажирських залізничних перевезень.

Подібні питання й підходи до їхнього вирішення вже було висвітлено в роботах сучасників [17–18]. Авторами роботи [19] запропоновано підхід до визначення пропускної здатності аеропорту та коливань пасажиропотоку за допомогою введеного ними індексу авіапасажирів.

Індекс авіапасажирів (API): Встановлення значення  $X_t$  як пасажиропотік аеропорту за одиницю періоду, API для цього періоду визначається як  $X_t^*$ :

$$X_t^* = \frac{X_t - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

де  $X_{\min}$  та  $X_{\max}$  – мінімальна та максимальна кількість авіапасажирів за одиницю часу відповідно, тоді як  $X_t^*$  коливається від 0 до 1.

Рівень індексу авіапасажирів (LAPI): Набір  $\{p_1, p_2, p_3 \dots p_t\}$  це набір послідовності API з кількох одиниць часу. Після кластеризації створений кластер  $\{N_t\}$  це сукупність об'єктів даних.

Коли період API становить 1 місяць, і місячний API аеропорту складає  $X_t^*$ , рівень індексу авіапасажирів (LAPI) виводиться як:

$$N_{x_t^*} = \left\{ \begin{array}{l} 1, p_t \in (0, i) \\ 2, p_t \in (i, j) \\ 3, p_t \in (j, k) \\ \dots \\ N, p_t \in (\theta, 1) \end{array} \right\} \quad (2)$$

де  $p_1, p_2, p_t \in$  одиницями часу, тоді як  $i, j, k, \theta \in$  граничними значеннями кластера.

Інформаційну ентропію можна використовувати для вимірювання ступеня невизначеності системи (або ступеня впорядкованості). Виводиться за такою формулою:

$$H(X) = -\sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (3)$$

де  $P(x_i)$  – ймовірність вибірки  $x_i$ , і  $n$  – кількість зразків.

Можна помітити, що чим менше ймовірність виникнення події, тим вищі значення інформаційної невизначеності та ентропії. Авторами запропоновано прийняти спільний розподіл ймовірностей випадкового вектору  $(X, Y)$  буде  $p_{ij}$ , потім двовимірна спільна ентропія вектора  $(X, Y)$  є:

$$H(X, Y) = -\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_{ij} \log p_{ij} \quad (4)$$

**Метою роботи** є визначення можливості системного розрахунку параметрів функціонування маршруту загалом користування

**Практична значущість.** Отримано модель, якою можна прогнозувати та здійснювати заходи планування розвитку проектів із закупівлі засобів транспорту. Отримано модель для визначення стану проекту та його параметрів від зовнішніх й внутрішніх факторів із урахуванням системності функціонування мереж маршрутів пасажирського

транспорту на одній території. Запропонований підхід можна застосовувати до різних регіонів за територіальним охопленням. В роботі отримано результати при спиранні на методи такі як: емпіричний при спостереженні за діючою системою, вивченні системи, вимірюванні її параметрів, комплексний при аналізі літератури, моделюванні мережі, верифікації при аналізі отриманих результатів, первинні методи при вивченні джерел та математичний при отриманні функції.

**Результат дослідження.** Побудовано комп'ютерну модель маршрутної мережі. Для моделювання використано маршрутну мережу України. Маршрутна мережа України складається з маршрутів автомобільного залізничного, авіаційного та водного транспорту. На рисунку 1 наведено вікно розробленої комп'ютерної моделі пасажирської транспортної системи України

Запропонована модель дозволяє використовувати й змінювати параметри витрат палива, вартість палива, місткість засобу транспорту.

Зазначена модель має можливість одночасного розподілу пасажирів між автомобільною, залізничною, авіаційною та водною мережами транспорту.

Місткість засобу транспорту – загальна пасажиромісткість, в транспорті міжміського сполучення загальна пасажиромісткість дорівнює кількості місць для сидіння (*од*).

Витрати палива вимірюються літрами на сто кілометрів (*л/100км*) та кіловатами на 100 км (*Квт/100км*) при використанні електричного двигуна.

Вартість засобів транспорту, ціни на паливо, вартість проїзду вимірюються умовними одиницями (*у.о.*), вартість проїзду під час моделювання вимірюється умовними одиницями за кілометр (*у.о.\*км.*).

В дослідженні прийнято, що в обласних центрах розміщуються вузли графової моделі. При-

Авто	ЖД	Авіа	Sea
40	45	10	5
Ціна одного літра палива	Ціна одного літра палива	Ціна одного літра палива	Ціна одного літра палива
60	3	3	3
Лінійні витрати палива	Лінійні витрати палива	Лінійні витрати палива	Лінійні витрати палива
30	100	100	100
Місткість, авто	Місткість, жд	Місткість, авіа	Місткість, sea
55	40	100	40

Рис. 1. Вікно розробленої комп'ютерної моделі пасажирської транспортної системи України



йнято, що Київ – вузол номер 1, Харків – 2, Дніпро – 3, Одеса – 4, Львів – 5, Запоріжжя – 6, Полтава – 7, Суми – 8, Чернігів – 9, Кропивницький – 10, Черкаси – 11, 12 – Вінниця, 13 – Тернопіль, 14 – Рівно, 15 – Житомир, 16 – Хмельницький, 17 – Луцьк, 18 – Івано-Франківськ, 19 – Чернівці, 20 – Миколаїв, 21 – Херсон, 22 – Ужгород, 23 – Донецьк, 24 – Луганськ, 25 – Симферопіль (Севастопіль для водного транспорту). Загально отримано 25 вузлів й дуги між певними вузлами.

В процесі моделювання було використано й такі відомості: кількість маршрутів певного виду транспорту (од.), швидкість руху (км./год.) транспортних засобів в певній мережі, ставка податку на додану вартість, ставка амортизаційних відрахувань, ставка на прибуток, відсоткові виплати по тілу кредита, величини дисконту, тривалість проекту (в кварталах), вартість транспортного засобу (у.о.), вартість проїзду (км.\*у.о.), середній коефіцієнт заповнення салону, коефіцієнт супротиву довжини їздки, відстань між вузлами (км.), вартість постійних (зарплата ті інш.) та змінних (шини та інш.) витрат змінюється при зміні вартості палива.

Отримано результати розрахунків. Отримано номер маршруту, квартал імовірного настання терміну окупності проекту із закупівлі засобів транспорту для цього маршруту, розмір фінансового ресурсу отриманого від функціонування даного маршруту (поквартально в у.о.).

Відповідні параметри розрахунків забезпечили можливість розрахунку варіантів настання періоду окупності проектів із закупівлі засобів транспорту на маршрут. На рисунку 13 наведено приклад розрахунків періоду окупності залізничного маршруту № 19. Відповідно до отриманих результатів залізничний маршрут окупиться в період з 21 по 31 квартал. Імовірність окупності проекту у 24 кварталі 0,2089. Імовірність окупності проекту найбільша у 24 кварталі, імовірність менше ніж 0,0001 відсотка не виводиться на монітор і не висвічується, вважається, що така ймовірність є над малою і не становить уваги. Імовірність виникає як наслідок властивостей пасажиропотоку, який є стохастичною величиною і може коливатись відповідно до нормального закону розподілу. Одночасно, підчищення значень потоку не є запорукою зменшення періоду окупності.

Вплив коливань потоку на період окупності проекту може мати й інші значення і приймати значніший діапазон окупності. Результати роботи мережі генеруються в окремий файл. Можна отримати узагальнені відомості про маршрут. Маршрут 5 прокладено між вузлами 2, 3, 21, 20 та 4 в одному

напрямку їздки та між вузлами 4, 20, 21, 3 та 2 в зворотному напрямку руху. На маршруті номер 5 обсяг перевезень між вузлом 2 та 3 складає 654 пасажирів за добу, а на маршруті 4 обсяг перевезень між вузлами 2 та 3 складає 8 пасажирів в добу. Це зумовлено функцією перерозподілу пасажирів між маршрутами, імовірно у даному випадку має значний вплив при перерозподілу значна різниця в інтервалі руху і тому  $f(I_i)$  – функція від інтервалу руху засобів транспорту на маршруті з залежності (1) здійснює такий вплив. Розрахунок висвітлює й значення про кількість пасажиромісць на маршруті –  $q$  (пас.), об'єм перевезень на маршруті за пік, у даному випадку генеруються значення за добу  $Q_{доб}$  (пас.), довжина маршруту  $L_m$  (км), швидкість сполучення на маршруті  $V_m$  км.год., проектна місткість засобу транспорту  $q$ , кількість розрахована засобів транспорту на маршруті  $A$ , інтервал руху в годинах та хвилинах, коефіцієнт заповнення салону статичний  $\gamma_c$  та динамічний  $\gamma_d$ .

Відстані між вузлами розраховуються для визначення багатьох параметрів, а саме: довжина маршруту, відстань їздки, змінні витрати період часу, інтервал руху, час їздки та інші параметри. Під час програмування було використано й інші параметри.

Здійснено моделювання мережі при наступних параметрах: частка автомобільних перевезень 39%; залізничних 51%; авіаційних 10%; вартість автомобільного палива  $C_A$  50 у.о.; витрати палива автомобільним транспортом  $Q_{НА}$  30 л/100 км; місткість автобусу  $q_A=55$  од.; ставка податку на додану вартість 0,01; ставка амортизаційних відрахувань 10; ставка податку на прибуток 10; величина ставки дисконту 10; річні відсоткові виплати по заповненому капіталу; тривалість проекту від 60 до 160 кварталів; частка пасажиропотоку в залізничній мережі 51%; вартість Кв.год.  $C_{ж}$  3 у.о.; витрати палива на пересування  $Q_{ЗТ}$  100 Кв., місткість вагону  $q_{зм}$  40 од., вартість авіаційного палива 3 у.о.; витрати палива в авіаційній мережі  $Q_{АВ}$ ; місткість літака  $q_{АВ}=55$  од.; вартість автобусу 10 000 000 у.о.; тариф в автомобільній мережі 1 у.о.; вартісті вагону 30 000 000 у.о.; тариф на проїзд 2 у.о.; вартість літака 1 000 000 000 у.о.; тариф на перельот 5 у.о.

Для встановлення зав'язків між параметрами мережі було проведено моделювання десять разів при зміні вартості засобів транспорту на 50 000 у.о. за результатами складено відповідні таблиці 1 та складають основу подальших досліджень.

Отримано результати моделювання параметрів функціонування автомобільної мережі. При моделюванні передбачено зміну вартості засобів

**Фінансовий потік витрат на заробітну платню персоналу  
обслуговування маршруту номер 10 автобусної маршрутної мережі**

№ кварталу	Розмір грошового потоку чистого прибутку, ЧП у.о.				
	1	2	–	59	60
28	2470446,29	2566745,09	–	7003893,53	7054767,08
27	2535674,71	2633441,14	–	7140027,83	7191707,97
26	2640040,17	2740154,83	–	7357842,72	7410813,4
25	2757451,32	2860207,72	–	7602884,46	7657307
24	2900953,83	3006939,04	–	7902379,93	7958576,97
23	3044456,34	3153670,36	–	8201875,39	8259846,93
22	3201004,54	3313740,89	–	8528597,72	8588505,07
21	3370701,76	3487256,3	–	8882762,59	8944768,35
20	3566645,73	3687609,02	–	9291705,48	9356134,2
19	3788715,57	3914675,42	–	9755174,08	9822348,84
18	4023848,34	4155098,68	–	10245905,54	10315987,86

транспорту на 50 000 умовних одиниць для кожного з розрахунків. Основними показниками роботи транспорту можна вважати чистий прибуток, чистий дисконтований прибуток, витрати на заробітну платню персоналу та період окупності.

В таблиці 1 зведено відомості розрахунків про моделювання періоду окупності маршрутів автомобільної мережі в межах пасажирської транспортної системи України.

Імовірність окупності на маршруті номер 44 розподілилась на 28 кварталів. Аналіз відповідних даних можна проаналізувати й побудувати функцію відгуку розподілу імовірності.

Оцінку фінансових потоків можна провести за дисконтованим фінансовим потоком. В моделюванні використано ставку дисконту у розмірі 10% та ставку виплат по запозиченому капіталу розміром 10%. Ставка податку на прибуток прийнято в моделюванні в розмірі 1% та амортизаційні відрахування – 10%. Тривалість модельованого проекту прийнято у розмірі 65 кварталів. Практика, демонструє, що тривалість проекту 65 кварта-

лів – понад 7 років є терміном експлуатації засобів транспорту в рамках їхньої технічної актуальності. В таблицю 4 зведено відомості розрахунку дисконтованого чистого прибутку маршруту 10 автомобільної маршрутної мережі України.

Імовірно настання окупності проекту із закупівлі засобів транспорту на маршрут номер 44 автомобільної маршрутної мережі в кварталі з 31-го по 59-й.

Зміну фінансових потоків чистого прибутку, дисконтованого чистого прибутку не відображають витратну частину проекту із закупівлі засобів транспорту. В таблицю 1 зведено данні розрахунку фінансового потоку передбаченого для заробітної платні персоналу для обслуговування маршруту номер 10 загального користування автомобільної маршрутної мережі.

Вартість засобів транспорту обумовлює їхню комфортність та привабливість, одночасно вартість засобів транспорту впливає на їхню технічну характеристику безпечності, швидкості, екологічності та інших параметрів.

#### Список літератури:

1. Aparicio A. Exploring Recent Long distance Passenger Travel Trends in Europe *Transportation Research Procedia*. 2016. № 14. С. 3199–3208.
2. Aparicio A. Exploring the Sustainability Challenges of Long distance Passenger Trends in Europe *Transportation Research Procedia*. 2016. № 13. С. 90–99.
3. Hasiak S., Rabaud M. Questioning the Relevance of Regional Bus and Train for Low Traffic Flow through a Sustainable Approach *Transportation Research Procedia*. 2016. Т. 14. С. 1287–1295.
4. Tuaycharoen N., Sakcharoen A., Cha – aim W. Bangkok Bus Route Planning API *Procedia Computer Science*. 2016. Т. 86. С. 441–444.
5. Fornalchuk Y. The model of corespondence of passenger transportation on the bus is off uzzy logic *ECONTECHMOD: an international quarterlyj our naloneconomics of technology and modelling processes*. 2015. № 4. С. 59–64.
6. Grosche T. Gravity models for air line passenger volume estimation *Journal of Air Transport Management*. 2007. № 13. С. 175–183.

7. Rwakarehe E. Development of a Freight Demand Model for the Province of Alberta Using Public Sources of Data *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2014. № 138. С. 695–705.
8. Park M., Hahn J. Regional Freight Demand Estimation Using Korean Commodity Flow Survey Data *Transportation Research Procedia*. 2015. Т. 11. С. 504–514.
9. Kabashkin I. Modelling of Regional Transit Multimodal Transport Accessibility with Petri Net Simulation *Procedia Computer Science*. 2015. Т. 77. С. 151–157.
10. Essadeq I., Dubail E., Jeanniere E. Modelling Passenger Congestion in Transit System – Benchmark and Three Case Studies *Transportation Research Procedia*. 2016. Т. 14. С. 1792–1801.
11. Brands T. et al. Modelling public transport route choice, with multiple access and egress modes *Transportation research procedia*. 2014. Т. 1. №. 1. С. 12–23.
12. Panasyuk M. V., Pudovik E. M., Sabirova M. E. Optimization of regional passenger bus traffic network *Procedia Economics and Finance*. 2013. Т. 5. С. 589–596.
13. Доля К. Моделювання пасажирських транспортних кореспонденцій між обласними центрами в Україні *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2017. Т. 1, N 2(33). С. 44–48. Режим доступу : DOI : 10.15587/2312 – 8372.2017.93458.
14. Доля К. Вплив особливостей малюнку транспортної мережі на довжину їздки між її вузлами на прикладі транспортної мережі України *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2017. Т. 5, N 2(37). С. 54–58. Режим доступу : DOI : 10.15587/2312–8372.2017.112078.
15. Dolia Kostiantyn Influence of features of the transport network pattern on the haul cycle length between its nodes *The international research and practical conference The development of technical sciences: problems and solutions*. BRNO, THE CZECH REPUBLIC, April 27 – 28, 2018. P. 121–124.
16. Zhu W. Generating route choice sets with operation information on metro networks *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. № 3. С. 243–252.
17. Moreno E. G., Romana M. G., Martínez Ó. A First Step to Diagnostic of Urban Transport Operations by Means of GPS Receiver *Procedia Computer Science*. 2016. Т. 83. С. 305–312.
18. Mao, L., Wu, X., Huang, Z., & Tatem, A. J. Modeling monthly flows of global air travel passengers: An open – access data resource *Journal of Transport Geography*, 48, 2015. С. 52–60.
19. A multimodal transport network model and efficient algorithms for buiding advanced traveler information systems *Transportation Research Procedia*. 2017. № 22. С. 134–143.

#### **Dolia K.V., Dolia O.Ye. SYSTEMATIC MODELING OF THE FUNCTIONALITY OF ROUTES**

*The economics of transportation and the development of transport infrastructure affect the development of regions in economic and social terms. Transportation procurement projects have been a topical issue since the beginning of industrialization and the transition of society to global economies. The paper assumes that changes over time in net profit, payback period, costs, and net discounted profit are parameters that reflect the feasibility of implementing such projects. The systemic nature of transport functioning and the dependence of project parameters on many internal and external factors greatly complicate the study. The aim of the study is to determine the possibility of modeling the route network and calculate the design parameters, taking into account the characteristics of transport modes in their simultaneous operation. Based on previous studies, it is believed that these selected parameters are relevant for solving technical, economic and social problems in regional transport management. The modeling provided an opportunity to establish payback models for projects, financial flows, and others. To achieve this goal, we used methods of mathematical and computer modeling, but not only. As a result of the work, the possibility of creating a certain modeling, calculating design parameters and determining their mutual influence has been proved. Investigating the possibilities of determining the direct or indirect effects of route functioning factors on its parameters is a promising area for further research. The interconnectedness of technical and economic parameters in the functioning of a transport route in the system is direct or immediate and requires study and modeling to make the right management decisions in obtaining social or socio-economic results.*

**Key words:** transport, project, resource, air transport, railway transport, motor vehicles, transport network, route network, transport system, net profit, costs, discounted profit, payback period.

**Кириллова В.Ю.**

Одеський національний морський університет

**Кириллова О.В.**

Одеський національний морський університет

## ОСНОВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ТРЕНДИ У СФЕРІ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ У ДІЯЛЬНОСТІ ТРАНСПОРТНО-ЕКСПЕДИТОРСЬКИХ КОМПАНІЙ

У статті досліджено питання щодо основних технологічних трендів у сфері транспортно-експедиторської діяльності, які використовуються провідними компаніями-лідерами транспортної галузі у частині інформаційного забезпечення систем доставки вантажів. Зазначено, що світова індустрія вантажних перевезень сьогодні в цілому перебуває в процесі поступового переходу від аналогового до цифрового управління. При цьому подальший розвиток транспортної галузі шляхом диджиталізації виявляється дієвим інструментом підвищення ефективності виробничої діяльності транспортних підприємств. Наведено, що «54% представників глобальних транспортних компаній очікують зростання доходів завдяки диджиталізації, 16% розраховують на збільшення прибутку, а 11% сподіваються на поліпшення задоволеності клієнтів». Проте поставлено акцент на те, що це взаємопов'язані речі. Задоволені клієнти – це джерело стабільної та ефективної роботи транспортно-експедиторської компанії (ТЕК). І навпаки, стабільна та ефективна робота ТЕК – це запорука задоволеності клієнтів та їх повторного звернення з новими запитами на обслуговування своїх вантажопотоків. Задоволеність клієнтів може бути забезпечено лише успіхом кожного співробітника ТЕК на своєму робочому місці. У досить просторій зоні обслуговування клієнтів на першій план для працівників ТЕК виходять раціональна організація, оптимальне планування та ефективність діяльності з надання відповідних транспортно-експедиторських послуг. Кожний з цих компонентів вже сьогодні має певну підтримку з боку новітніх технологій, використання яких спрощує роботу співробітників ТЕК, збільшуючи прибуток компанії та фактично забезпечуючи зростання задоволеності клієнтів. Розглянуто основні технології, які вже використовують у своїй діяльності провідні ТЕК світу. Виявлено, що існування технології Supply Chain Center (SCV) та її використання неможливо без прогресу у сфері розвитку та впровадження інших технологій інформаційного забезпечення транспортних процесів і систем, таких як хмарні системи (Cloud-based systems) та пристрої на базі Інтернету речей (IoT), що з'єднують усі сторони ланцюга постачання.

**Ключові слова:** транспортна галузь, транспортно-експедиторська компанія, транспортно-експедиторська діяльність, транспортна логістика, новітні технології, штучний інтелект, блокчейн, хмарні системи.

**Постановка проблеми.** Сьогодні сфера транспортної логістики розвивається швидкими темпами. Фахівці, чия діяльність пов'язана з питаннями організації та реалізації перевезень, управлінням об'єктами транспортної інфраструктури тощо, розуміють, що через кілька років галузь виглядатиме зовсім інакше, ніж сьогодні. Очевидно, що ланцюги постачань вже сьогодні стають «розумнішими» завдяки аналізу даних у режимі реального часу, і все більше компаній віддають перевагу стійкості як ключовому компоненту майбутнього транспортної галузі.

З початком епідемії коронавірусу весь світ транспортної логістики зіткнувся з безліччю

перешкод, включаючи брак працівників, перевантаженість портів, затримки завантаження розвантаження вантажів тощо. Саме поява цих проблем, а також інші виклики сучасного світу, зокрема перехід на транспорт з низьким рівнем викиду вуглецю, пришвидшили чергову технічну і технологічну революцію у транспортній галузі, зокрема у частині її новітніх інформаційних рішень. Стартапи почали прагнути знайти шляхи вирішення виникаючих транспортних проблем. І сьогодні новітні технології у сфері транспортних систем здебільшого пов'язані зі швидкістю, точністю, безпекою та екологічністю. Існуючі технологічні рішення вже змінили вигляд міжнародної торгівлі

та виробничої діяльності різних суб'єктів ринку транспортних послуг, зокрема транспортно-експедиторських компаній.

Аналіз останніх публікацій. В роботі [1] визначено низка проблем, що пов'язані з використанням блокчейн технологій; розглянуто теоретичні основи блокчейн технологій та блокчейн додатків; нові моделі блокчейн бізнесу; платформи розробки та безпеки блокчейн додатків; перспективи подальших досліджень блокчейн технологій; програмні засоби створення та підтримки блокчейн додатків; особливості, переваги та проблеми використання блокчейн технологій для створення розподілених, безпечних корпоративних додатків.

Не залишається без уваги сучасних авторів і питання диджиталізації в транспортній галузі. В роботі [2] розглянуто одна із головних тенденцій в морській галузі – цифровізація портової діяльності, оскільки саме порти будують інфраструктурний каркас системи міжнародних морських прямих і змішаних перевезень. Порти сьогодні є не просто техноприродними утвореннями і постачальниками традиційних послуг по обробці суден і перевалки вантажів [3; 4]. Порти – це складні багатофункціональні, диверсифіковані комплекси, на територіях яких функціонують суб'єкти господарювання всіх форм власності, які здійснюють діяльність, пов'язану з обслуговуванням суден, пасажирів, вантажів і підприємств, продукція і/або сировина яких транспортується по території та акваторії порту [5]. Від сталої, узгодженої та своєчасної роботи портів залежить ефективність всього транспортного процесу. Але для підтримки її сталої функціонування потрібен новий спосіб мислення та цифровізація, при одночасному забезпеченні захисту навколишнього середовища; безпеки судноплавства і кібербезпеки; ефективного і своєчасного виконання всіх технологічних процесів і операцій в портах. В роботі [2] розглянуто світові організації, які активно працюють над просуванням сучасних ініціатив у напрямку диджиталізації морської галузі, а саме: Міжнародна морська організація (International Maritime Organization, IMO), Асоціація цифрових контейнерних перевезень (The Digital Shipping Container Association, DCSA); Глобальний промисловий альянс (The Global Industry Alliance, GIA), Міжнародна рада PortCDM Council (IPCDMC). Диджиталізація морської галузі триває, а наведені в роботі [2] організації продовжують працювати над тим, щоб цифрова революція підтримувала стає функціонування глобальних ланцюгів поставок при одночасному забезпеченні

захисту навколишнього середовища, безпеки та кібербезпеки.

В роботі [6] досліджено передові роботизовані технології, які використовуються на морському транспорті у різних технологічних операціях, пов'язаних з перевезеннями вантажів на судах та вантажно/розвантажувальними роботами у портах. У статті розглянуто не тільки переваги застосування робототехніки у судноплавній галузі, а й негативні сторони, наприклад, вплив роботизації на можливість працевлаштування в галузі, що вже простежується у деяких частинах світу та різних сферах морегосподарського виробництва. Проте автори звертають увагу на те, що, хоча роботи і можуть виконувати різні функції та допомагати у виконанні багатьох важливих операцій, вони не здатні повністю замінити людину, а також ті знання, уміння, навички та, безумовно, досвід, які різні фахівці, зокрема моряки, «приносять» із собою у морську галузь. Розумний баланс між роботизацією та зусиллями персоналу є ключем до підвищення якості та безпеки праці у різних сферах морського виробництва на благо всієї галузі.

**Метою статті** є дослідження існуючих та перспективних технологічних трендів у сфері інформаційного забезпечення систем доставки вантажів у діяльності транспортно-експедиторських компаній.

**Виклад основного матеріалу.** Сьогодні світова індустрія вантажних перевезень в цілому перебуває в процесі поступового переходу від аналогового до цифрового управління. Подальший розвиток транспортної галузі шляхом диджиталізації виявляється дієвим інструментом підвищення ефективності виробничої діяльності транспортних підприємств.

Згідно з проведеними компанією «PwC» дослідженнями, «54% представників глобальних транспортних компаній очікують зростання доходів завдяки диджиталізації. Крім того, 16% розраховують на збільшення прибутку, а 11% сподіваються на поліпшення задоволеності клієнтів» [7]. Проте слід звернути увагу, що це взаємопов'язані речі. Задоволені клієнти – це джерело стабільної та ефективної роботи транспортно-експедиторської компанії (ТЕК). І навпаки, стабільна та ефективна робота ТЕК – це запорука задоволеності клієнтів та їх повторного звернення з новими запитами на обслуговування своїх вантажопотоків. Клієнтоорієнтовані ТЕК завжди зосереджують свою увагу на утриманні своїх клієнтів шляхом надання якісних і своєчасних послуг за адекватними та ретельно обґрунтованими цінами. Послідовне досягнення

результатів кожним робітником ТЕК та задоволеність клієнтів спонукає їх не тільки повертатися до компанії з повторними замовленнями, а й рекомендувати її послуги іншим. Таким чином очевидно, що задоволені клієнти ТЕК стають її умовними, але дієвими «промоутами», «сейлз-менеджерами» та «маркетологами». Таким чином, фінансовий успіх ТЕК – це результат її продуктивної діяльності на ринку і задоволення потреб її клієнтури, що, у свою чергу, є результатом успіху кожного співробітника ТЕК на своєму робочому місці. У зв'язку з цим у такій досить широкій зоні обслуговування клієнтів на перший план для співробітників ТЕК виходять раціональна організація, оптимальне планування та ефективність діяльності з надання відповідних транспортно-експедиторських послуг. Кожний з цих компонентів вже сьогодні має певну підтримку з боку новітніх технологій, спрощуючи роботу співробітників ТЕК, збільшуючи прибуток компанії та фактично забезпечуючи зростання задоволеності клієнтів.

Нинішня технічна «революція», що «струсила» галузь вантажних перевезень, фактично робить діяльність транспортно-експедиторських компаній більш керованою та підвищує прибутки невеликих гравців ринку, а не лише великих корпорацій. Це відбувається завдяки прозорості, яку забезпечують інноваційні технології у цій сфері транспортного бізнесу. Отже, сьогодні провідні транспортно-експедиторські компанії світу звертають увагу на наступні технологічні тренди:

1. Хмарні системи (Cloud-based systems). У багатьох галузях економіки та промисловості виходять на перший план і набувають широкого використання хмарні технології та відповідні програмні рішення. Транспортна галузь не є виключенням. Широке застосування хмарних систем сьогодні спостерігається у різних сферах транспортного бізнесу, зокрема у сфері транспортно-експедиторської діяльності, що відкриває нову еру для вантажовідправників і перевізників. Хмарні системи збирають поточну інформацію та оперативні дані в реальних масштабах часу від багатьох зацікавлених сторін у процесі організації та реалізації доставки вантажів. Це обумовлює скорочення трудозатрат та фінансових витрат всіх суб'єктів ринку транспортних послуг, задіяних до процесу транспортування, зокрема за рахунок скорочення витрат на ІТ-інфраструктуру, операції та апаратне забезпечення. Крім того, хмарне програмне забезпечення доступне звідки завгодно, доки доступне підключення до Інтернету, що робить його єдиним вибором у сучасному світі,

коли все більше людей працюють з дому або обирають цифровий спосіб життя. Наприклад:

– компанія «Amazon Web Services» (AWS) запустила нову програму «Supply Chain», яка дозволяє клієнтам транспортно-експедиторських компаній візуалізувати весь ланцюжок поставок, використовуючи дані в реальному часі і транслюючи всі технологічні процеси доставки безпосередньо з місця подій. Ця хмарна технологія дозволяє користувачам негайно виявляти всі ризики та проблеми, що виникають під час транспортування вантажів;

– хмарні системи, розроблені на основі «SaaS» (Software as a Service), продовжують активно охоплювати сферу вантажних перевезень, транспортної логістики і транспортно-експедиторської діяльності. Наприклад, система управління транспортом «SaaS Rate» – це хмарна система керування транспортними засобами, яка спрощує та прискорює підключення користувачів, покращує планування та моніторинг маршрутів, а також забезпечує швидке й автоматичне вирішення виникаючих проблем. Крім того, система «SaaS Rate» має технологію конвергенції даних із незліченних внутрішніх і зовнішніх джерел, що забезпечує більшу прозорість, видимість та наочність інформації, а також надає можливості оперативного пошуку кращих тарифів і маршрутів для експедиторів. В цілому хмарні системи, які створені на основі «SaaS», легко налаштовуються, легко оновлюються та повністю масштабуються, що забезпечує плавне зростання та розвиток бізнесу [8];

– логістична платформа «TOCAN TMS» (Transportation Management Systems) – одне з найкращих інтегрованих рішень для транспортної логістики в області управління ланцюгами поставок. Вона підходить для транспортно-експедиторських компаній, зокрема таких, що мають власний автопарк. «TOCAN TMS» – це також незамінне рішення для магістральних перевезень і для внутрішньоміської адресної доставки вантажів. Цей хмарний інформаційний сервіс дозволяє планувати маршрути, відстежувати рух транспортних засобів, фіксувати події на маршруті та передавати їх статуси, розподіляти заявки та вантажі за типами транспортних засобів та адресами з урахуванням понад 100 факторів. Менеджери та керівники операційних відділів транспортно-експедиторських компаній можуть відстежувати та контролювати всі процеси в режимі онлайн та оперативно приймати управлінські рішення [9]. Вантажовідправникам хмарні системи дають можливість бачити свій вантаж під час його тран-

спортування і до моменту його доставки до місця призначення. Перевізники можуть використовувати хмарні технології, щоб миттєво надавати ставки на вантажні перевезення, а також покращувати ефективність роботи своїх транспортних засобів. Комунікація з клієнтами та контрагентами також покращується завдяки використанню хмарних систем. Наприклад, на автомобільному транспорті завдяки здатності водіїв спілкуватися з вантажовідправниками під час здійснення перевезення за допомогою технології мобільних додатків.

2. Блокчейн (Blockchain). Технологія Blockchain – це система запису та передачі інформації, що дозволяє зберігати дані у вигляді ланцюжка блоків. Кожний блок містить інформацію про певну кількість транзакцій та хеш попереднього блоку. Таким чином, кожен блок забезпечує взаємозв'язок з попереднім блоком, що утворює ланцюжок. У кожному блоці поруч із хешем є мітка часу, тобто інформація про те, коли був створений цей блок. Як результат, хеш і мітка часу гарантують, що блоки тісно пов'язані між собою і в Blockchain неможливо втручатися непомітно. Кожен блок зберігає певний обсяг даних, наприклад, у формі певної кількості фінансових операцій. Коли один блок заповнений, створюється наступний. Відмінною рисою Blockchain є децентралізація. Це означає, що для належного функціонування системи не потрібна центральна база даних, один основний сервер, комп'ютер або будь-який інший елемент технічної інфраструктури. Збережені дані зберігаються лише в послідовних блоках. Це означає, що транзакції розподіляються на рівні однорангової мережі. Це дуже важливо, оскільки на практиці це означає, що операції не контролюються головним брокером. Це робить Blockchain відмінним інформаційним носієм, який надає спільний і повністю прозорий доступ до нередагованих даних всіх користувачів, що сприяє довірі, безпеці та розвитку. Таким чином, Blockchain забезпечує конфіденційність, але не анонімність інформації. Адреси є загальнодоступними (на зразок «номера рахунку в блокчейні»), проте особисті дані залишаються невідомими, а кожен користувач може переглянути достовірну історію всіх транзакцій [10]. Спочатку технологія Blockchain була розроблена для використання виключно у фінансовому секторі, але згодом її застосування стало потужною тенденцією, яку взяли на озброєння численні зацікавлені сторони в ланцюжку постачань. І сьогодні ця технологія перетворилася у вдосконалий меха-

нізм, який дозволяє організувати відкритий обмін інформацією у рамках бізнес-мережі. Наприклад, компанія «Mitsubishi Technologies» створила блокчейн-трекер (blockchain tracker) для забезпечення точної та своєчасної доставки ліків. Дані та розподілені реєстри захищені від несанкціонованого втручання саме завдяки використанню технології Blockchain. Таким чином, завдяки Blockchain вантажовідправники можуть легко відслідковувати свій вантаж, а перевізники – менше турбуватися про виникаючі проблеми, зокрема випадки вкрадення чи пошкодження вантажів. Перевізники можуть зосередити свою увагу на самому процесі перевезення та, наприклад, на питанні прискорення доставки вантажів.

3. Штучний інтелект (Artificial Intelligence). Завдяки впровадженню штучного інтелекту (ШІ) технології у сфері транспортної логістики різко просунулися вперед. Застосування ШІ при організації вантажних перевезень та управлінні об'єктами транспортної інфраструктури, зокрема автоматизація транспортних засобів, підйомно-транспортних машин і механізмів, перевантажувального обладнання, використання на складах роботів, що працюють на основі ШІ, знижує фінансові витрати на робочу силу. Так, компанія «Carrier Logistics Inc.» (CLI) нещодавно розробила нову логіку маршрутизації та інструмент для оптимізації планування, який використовує машинне навчання та штучний інтелект для оптимізації маршрутизації доставки вантажів і забезпечення повної оптимізації терміналу. Автопарки тепер матимуть можливість автоматично маршрутизувати та призначати відправлення для кожного клієнта, який зробив замовлення. ШІ (у формі машинного навчання) може розумно адаптуватися та «навчатися» на минулому досвіді та оптимізувати маршрут доставки вантажів у разі виявлення проблем. Це економить час і бюджет, що дозволяє вантажовідправникам швидше та дешевше розширювати свій бізнес. Розумна логіка маршрутизації та машинне навчання також значно сприяють ефективній експлуатації транспортних засобів при реалізації вантажних перевезень. Рішення ШІ дозволяють прогнозувати несприятливі затори і за потреби оптимізувати маршрути, приносячи користь як вантажовідправникам, так і перевізникам, забезпечуючи своєчасну доставку вантажів.

4. Інтернет речей (Internet of Things (IoT)). Технологія IoT дозволяє підключати різні пристрої до Інтернету та створювати потік інформації між ними, легко забезпечуючи контроль за доставкою вантажів в режимі реального часу. У транспортній сфері

технологія IoT найчастіше застосовується компаніями – автоперевізниками. Використовуючи постійний потік різних даних від транспортних засобів, що працюють на базі IoT, перевізники можуть точніше планувати свою роботу, наприклад, технічне обслуговування парку рухомого складу. Одною із переваг підприємств – перевізників, що використовують технологію IoT є те, що вони можуть в реальному масштабі часу отримувати одночасно дані про погоду та дорожній рух, і вже з урахуванням цих даних обґрунтовувати оптимальні маршрути доставки вантажів з метою зниження своїх витрат. У свою чергу, такі пристрої IoT, як «розумні» контейнери та «розумні» піддони, дозволяють логістичним відділам виробничих та/або торгових компаній миттєво розуміти, коли запаси тих чи інших товарів на складах потрібно поновлювати. А використання ШІ при цьому забезпечує можливість своєчасно поповнювати ці запаси навіть без втручання людини. Крім того, пристрої, що підключені до Інтернету речей (IoT), відкривають нову еру в сфері транспортної логістики. Цей етап характеризується не тільки можливістю управляти портовою та складською логістикою, а також відстежувати процеси руху транспортних засобів, а й можливістю доставляти окремі вантажі за допомогою дронів. Відомо, що компанії «Amazon», «UPS» і «Domino's» вже інвестують кошти у подібну дронуву технологію IoT, яка пришвидшить доставку певних вантажів та дозволить компаніям досягати значних успіхів у прагненні покращити рівень обслуговування та задоволеності клієнтів.

5. Цифрові близнюки (Digital Twins). Одним із останніх досягнень у сфері транспортних технологій є використання цифрового твінінгу (віртуального моделювання) фізичних активів транспортних компаній. Twinning використовує алгоритми машинного навчання на основі штучного інтелекту, щоб допомогти транспортним компаніям оцінити та передбачити, як ті чи інші транспортні засоби компанії, що використовуються у ланцюгу постачань, працюють за часом і коли потрібно почати і завершити їх технічне обслуговування. Цифровий твінінг використовується для:

- розуміння гнучкості та поведінки ланцюга поставок;
- виявлення та усунення вузьких місць транспортної логістики;
- тестування модифікацій конструкції ланцюга поставок;
- моніторингу ризиків у ланцюжку постачання та тестування непередбачених обставин;
- транспортного планування.

Відомо, що «Duality Robotics», «Lockheed Martin» і «uCrowds» наразі є одними з найбільших брендів, які використовують технологію цифрових близнюків для створення моделей, які імітують ланцюги поставок і виробничі процеси для прогнозування реальних результатів і вимірювання операційного ризику. «AWS SimSpace Weaver» – це одна з найновіших комп'ютерних служб, яка дозволяє клієнтам «створювати, працювати та запускати масштабні просторові симуляції». Віртуальний твінінг дозволяє вантажовідправникам тестувати та контролювати обладнання, що використовується на складах. Вантажовідправники також можуть візуалізувати свої маршрути та будь-які загрозові проблеми з доставкою вантажів у режимі реального часу та планувати, як вони можуть масштабувати свій бізнес і наскільки добре ланцюжок поставок витримає в умовах підвищеного стресу і наявних ризиків. Перевізникам цифровий твінінг дозволяє контролювати парки вантажних автомобілів і передбачати потребу в їхньому технічному обслуговуванні. Це прогнозне моделювання веде до зниження витрат завдяки меншому простому ланцюга постачання та вищій задоволеності клієнтів у цілому.

6. Видимість ланцюга поставок (Supply Chain Visibility (SCV)). На поточному етапі функціонування та розвитку транспортних систем вектор уваги професійного співтовариства направлений на покращення видимості ланцюга поставок – SCV. Дані в режимі реального часу, які використовуються для покращення SCV, включають моделі руху транспортних засобів, погодні умови та інформацію про інфраструктуру, обладнання та інвентар. Ці дані в режимі реального часу дозволяють вантажовідправникам і перевізникам обійти проблеми з транспортним забезпеченням будь-яких логістичних систем та/або уникнути дефіциту запасів на складах. Наприклад, компанія «Kraft-Heinz» і виробник вантажівок «Daimler» є одними з перших клієнтів «Microsoft», які запровадили «Центр ланцюга поставок» (Supply Chain Center), який має на меті допомогти покращити видимість ланцюга поставок, зокрема покращити загальну видимість всієї системи доставок та спростити систему управління ризиками, а також допомогти своїм логістичним відділам та/або транспортно-експедиторським компаніям дотримуватися вимог. Існування технології SCV та її використання неможливо без прогресу у сфері розвитку та впровадження інших розглянутих вище технологій інформаційного забезпечення транспортних процесів і систем, таких як хмарні



системи (Cloud-based systems) та пристрої на базі Інтернету речей (IoT), що з'єднують усі сторони ланцюга поставок. Для кращої видимості ланцюга постачання виробничі і торгові підприємства (вантажовідправники) можуть використовувати хмарну технологію відстеження з метою ефективного керування своїми запасами, а також задля покращення обслуговування клієнтів. Виробничі і торгові підприємства (вантажовідправники) також у режимі реального часу можуть вирішувати, чи купувати більше товарів у постачальників, чи відкласти цю покупку через проблеми в ланцюжку постачання, оскільки в наявності надмірні запаси. Перевізники можуть покладатися на хмарні системи «Cloud-based systems», «Software as a Service» (SaaS), «Transportation Management Systems» (TMS) та пристрої Internet of Things (IoT) для підтримки видимості ланцюга поставок. Це покращує комунікацію між вантажовідправниками та перевізниками, а також дає змогу приймати обґрунтовані бізнес-рішення.

Таким чином компанії, які працюють сьогодні у різних сферах транспортного бізнесу, можуть забезпечити собі стійке функціонування та конкурентні переваги на ринці транспортних послуг завдяки технологіям. Це відомий у сучасному світі тренд «Sustainability powered by tech», тобто «Стійкість завдяки технологіям». Очікується, що наступна хвиля інноваційних рішень буде зосереджена на технологіях нейтралізації вуглецю.

**Висновки.** Наведені вище факти, які отримані в результаті дослідження сучасних технологій у сфері транспортно-експедиторської діяльності, дають підстави зробити наступні висновки:

1. Однією з найбільш корисних переваг впровадження новітніх технологій у сфері інформаційного забезпечення систем доставки вантажів є доступ персоналу транспортно-експедиторських компаній, а також логістичних відділів виробничих

і торгових підприємств до розширеної аналітики з метою виявлення та усунення проблем, виникаючих у ланцюгах постачань. Ретельний аналіз даних про транспортні потоки, моделі технічного обслуговування парку рухомого складу тощо, використовують для прогнозування потенційних проблем на будь-якому етапі доставки вантажів. Якщо в процесі перевезення виникають поточні відхилення, діагностична аналітика допомагає точно визначити, що саме і на якому етапі пішло не так. Простіше кажучи, вдосконалена та розширена аналітика (Advanced analytics) від сучасних технологій інформаційного забезпечення систем доставки вантажів дозволяє вантажовідправникам та їх агентам - експедиторам адекватно у реальному масштабі часу оцінювати, наскільки добре вони можуть задовольнити попит своїх клієнтів.

2. Майбутнє транспортної логістики виглядає перспективним завдяки безперервному розвитку хмарних систем і логістичних платформ вантажних перевезень; «розумних контрактів», які відстежують рух вантажів; систем керування транспортуванням на основі штучного інтелекту тощо.

3. Використання транспортно-експедиторськими компаніями розглянутих в роботі цифрових інструментів сприятиме створенню їх конкурентних переваг на ринку транспортних послуг, збереженню існуючих і приверненню нових клієнтів. Проте, очевидно, що транспортно-експедиторським компаніям, особливо невеликим, складно вирішувати, які саме сучасні технології інформаційного забезпечення бізнес-процесів і систем доставки вантажів доцільно запроваджувати у виробничу діяльність своєї компанії. Це може бути складно через пов'язані з цим витрати і труднощі втілення. Таким чином, перш ніж вкладати час та гроші в реалізацію нового рішення, треба бути впевненим у позитивному впливі цієї інновації на свій бізнес.

#### Список літератури:

1. Спасітелєва С.О., Бурячок В.Л. Перспективи розвитку додатків блокчейн в Україні. Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка», 2018. 1(1), 35–48. URL: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2018.1.3548>.
2. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю. Діджиталізація як шлях до забезпечення екологічності, безпеки і сталого функціонування морської галузі // 2-а міжнародна науково-технічна конференція «Інтелектуальні транспортні технології», Харків, 27-9 квітня 2021 р.: Тези доповідей. – Харків: УкрДУЗТ, 2021. 173 с. С. 21–23. URL: <http://itt.kart.edu.ua/images/Tezu2021/TezuITT2021.pdf>.
3. Проблеми функціонування та розвитку портів. Том 7 : монографія / авт. кол.: О.В. Кириллова, В.М. Пітерська, О.Р. Магамадов, Д.М. Решетков, Т.Є. Корнієць, В.Ю. Кириллова та ін.; за ред. О.В. Кириллової, І.М. Іванової. Львів-Торунь: Liha-Pres, 2022. 438 с. (Серія «Транспортні системи і технології»). ISBN 978-966-397-289-3. ISSN 2663-9858. DOI: <https://doi.org/10.36059/978-966-397-289-3>.
4. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю. Класичні системи управління портами та їх концептуальні моделі // Нуківі вісті Далівського університету, № 24, 2023 р. DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2023-24>.

5. Закон України «Про морські порти України». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4709-17#Text>.
6. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю. Інноваційні робототехнічні технології для морської індустрії // Міжнародній конференції «Інтелектуальні транспортні системи: екологія, безпека, якість, комфорт», 29-30 листопада 2022 р. Київ, Національний транспортний університет. – Київ: НТУ, 2022. С. 72–76. URL: <https://drive.google.com/file/d/1n5wjnM0O7g8Cvk-CQwvqmjvHVDFs6Gtk/view>.
7. Мироненко О. Інноваційні технології у транспортній логістиці: перспективи та виклики. – URL: <https://cargofy.ua/uk/blog/innovaciini-tehnologiji-u-transportnii-logistici-perspektivi-ta-vikliki>.
8. SaaS (Software as a service). – URL: <https://it-integrator.ua/saas-software-service>.
9. Автоматизація транспортної логістики: планування та моніторинг усіх видів транспорту та перевезень. URL: <https://tocan.com.ua/ru/sistema-upravleniya-transportom-tocan-logist-tms/>
10. Лапко О.О., Солосіч О.С. Технологія блокчейн: поняття, сфери застосування та вплив на підприємницький сектор // БІ. 2019. № 6 (497). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-blokcheyn-ponyattya-sferi-zastosuvannya-ta-vpliv-na-pidpriemnitskiy-sektor>.

**Kyryllova V.Yu., Kyryllova O.V. MAIN TECHNOLOGICAL TRENDS IN THE SPHERE OF INFORMATION SECURE DELIVERY SYSTEMS IN THE ACTIVITY OF TRANSPORT AND FORWARDING COMPANIES**

*The article examines the main technological trends in the field of transport and forwarding activities, which are used by leading companies in the transport industry in terms of information support for cargo delivery systems. It is noted that the global freight transportation industry today as a whole is in the process of gradual transition from analog to digital management. At the same time, the further development of the transport industry through digitalization turns out to be an effective tool for increasing the efficiency of production activities of transport enterprises. It is stated that "54% of representatives of global transportation companies expect an increase in revenues due to digitalization, 16% expect an increase in profits, and 11% hope for an improvement in customer satisfaction". However, the emphasis is on the fact that these are interconnected things. Satisfied customers are the source of stable and efficient work of a freight forwarding company (FFC). Conversely, the stable and efficient operation of FFC is a guarantee of customer satisfaction and their repeated requests for service of their cargo flows. Customer satisfaction can only be ensured by the success of each FFC employee at his workplace. In the rather spacious customer service area, rational organization, optimal planning and efficiency of activities in the provision of relevant transport and forwarding services come to the fore for FFC employees. Each of these components already today has some support from the latest technologies, the use of which simplifies the work of FFC employees, increasing the company's profits and actually ensuring the growth of customer satisfaction. The main technologies that are already used in the activities of the world's leading fuel and energy companies are considered. It was found that the existence of Supply Chain Center (SCC) technology and its use is impossible without progress in the development and implementation of other technologies for information support of transport processes and systems, such as cloud-based systems and devices based on the Internet of Things (IoT), connecting all sides of the supply chain.*

**Key words:** transport industry, freight forwarding company, freight forwarding activity, transport logistics, latest technologies, artificial intelligence, blockchain, cloud systems.

**Мельник О.М.**

Одеський національний морський університет

## ОСНОВНІ КОНЦЕПЦІЇ БЕЗПЕЧНОЇ ОБРОБКИ ТА ТРАНСПОРТУВАННЯ ПАЛУБНИХ ВАНТАЖІВ

*Стаття розглядає актуальні питання, пов'язані з безпекою та ефективністю морського перевезення генеральних вантажів. Запропоновано інтегрований підхід до планування та організації вантажних операцій на відкритих палубах суден, звертаючи увагу на техніко-технологічні та масо-геометричні характеристики вантажів. У статті подано покроковий алгоритм, який охоплює вибір, класифікацію, розміщення та кріплення вантажів, а також розглядаються технічні аспекти кріплення вантажів та забезпечення їх безпеки протягом переходу. Зокрема, наголошується на необхідності індивідуального підходу до штучних вантажів різних типів та врахування обмежень конкретного судна при розробці вантажного плану. Досліджуються аспекти міцності судових конструкцій та надається опис процесів щодо контролю поточного стану вантажу та усунення недоліків під час завантаження. На основі практичного досвіду запропонована концептуальна модель, спрямована на покращення процесів завантаження та забезпечення безпеки перевезення вантажів на палубі суден. Ця концептуальна модель визначає нові можливості для оптимізації та підвищення ефективності вантажних операцій, роблячи акцент на індивідуальних особливостях та обмеженнях конкретного судна, що дозволяє покращити якість планування вантажних операцій, зменшити ризики при неправильному розміщенні та кріпленні вантажів, а також підвищити загальну безпеку судноплавства. Застосування розробленого підходу може мати широкий практичний застосування забезпечуючи ефективність та безпеку вантажних операцій. Подальше дослідження може бути спрямоване на розширення моделі для врахування специфічних умов перевезень, впливу різних метеорологічних та гідрометеорологічних умов на процеси завантаження, а також розробку інноваційних технологій та методів для поступового покращення безпеки та ефективності морських перевезень.*

**Ключові слова:** морські перевезення, генеральні вантажі, безпека та ефективність, класифікація вантажів, технічні вимоги, кріплення вантажів, вантажопідйомність, контроль стану вантажів, систематичний моніторинг, концептуальна модель, вантажний план, техніко-експлуатаційні характеристики.

**Постановка проблеми.** Актуальність цієї роботи необхідно розглядати у контексті постійного зростання обсягів морських перевезень генеральних вантажів. З урахуванням динамічного розвитку торгівлі та глобалізації економіки, безпека та ефективність перевезення різноманітних вантажів на відкритій палубі суден стають критичними завданнями. Запропонований інтегрований підхід до планування, класифікації та безпеки може виявитися вельми корисним у практиці морського транспортування, сприяючи оптимізації процесів та запобігаючи можливим ризикам та непередбаченим ситуаціям під час перевезення вантажів на відкритих палубах.

**Матеріал і результати досліджень.** Сучасна морська галузь фокусується на досягненні основної мети – задоволенні першочергової потреби у швидкій, надійній та якісній доставці вантажів. Швидкість, надійність та якість обслуговування є ключовими чинниками, поруч із забезпеченням

безпеки вантажу, оптимізації маршрутів та використання новітніх технологій. У міру зростання обсягів перевезень і розширення логістичної галузі пропорційно зростають ризики, пов'язані з транспортними процесами, і потенційні загрози безпеці вантажу. Слід зазначити, що багато з цих ризиків залежать від таких факторів, як обраний спосіб транспортування, географічна протяжність транспортних маршрутів і унікальні характеристики вантажу, що транспортується. Використання передових розробок та інновацій для забезпечення безпеки суден та їх вантажів під час морських перевезень, враховуючи застосування сучасних технологій для підвищення стійкості, надійності та ефективності перевезень, формує концепцію технологічної безпеки роботи судна в системі морських перевезень.

Технологічна безпека судна насамперед означає забезпечення безпеки процесу перевезення вантажів та впровадження при цьому ефектив-

них технологій та використання автоматизованих систем управління вантажними операціями і контроль стану вантажу в рейсі, що надають операторам суден додаткові засоби контролю як за станом судна так і за умовами навколишнього середовища, зокрема погодними умовами та станом вантажу.

Перевезення вантажів на відкритих палубах морських суден обґрунтовується необхідністю максимізації вантажопідйомності та оптимізації робочого простору судна для різноманітних вантажів. Це сприяє підвищенню загальної ефективності перевезень та розширенню можливостей суден у забезпеченні конкурентоспроможності на ринку та викликає додатковий інтерес від потенційних клієнтів і створює основи до збільшення прибутку судноплавної компанії.

Транспортування різноманітних вантажів на верхніх відкритих палубах морських суден вносить унікальні виклики, особливо в умовах несприятливої погоди. Це пов'язано з різноманітністю вантажів, включаючи важкі та габаритні обладнання, машини, модулі, судна та вироби з металу. Важливі аспекти, які потрібно враховувати, включають безпеку вантажу, остійність судна та його адаптацію до погодних умов.

Неналежне розміщення та кріплення палубних вантажів є основними причинами значної кількості нещасних випадків на морі, що призводить не лише до фінансових втрат, але, що найважливіше, до трагічної загибелі людей як у морі, протягом рейсу, так і під час вантажних операцій в порту. Це підкреслює нагальну потребу у вдосконаленні методів і практик, пов'язаних із розміщенням і кріпленням вантажу, що залишається одним із найбільш ризикованих аспектів морських перевезень. Тому дане дослідження має за мету представити комплексну дослідницьку ініціативу, яка стосується комплексних аспектів планування, розміщення та морського транспортування палубних вантажів. Запропоновано розгляд ключових детермінант та факторів, що впливають на безпеку транспортного процесу, і надається ретельний аналіз проблем, з якими стикаються всі залучені партії під час даних вантажних операцій. Незважаючи на те, що перевезення вантажу на палубі здійснюється на ризик вантажовідправника або фрахтувальника, виключаючи відповідальність судовласника, угода про таке перевезення допускається лише в тому випадку, якщо це обумовлено договором.

Слід зазначити що популярність такого виду перевезень залишається дуже актуальною. Це

пов'язано з високим рівнем складності та унікальності вантажних одиниць, які не можуть бути безпечно розміщені у вантажних приміщеннях під палубою.

Термін «палубний вантаж» відноситься до того типу об'єкта або товару, який прийнято для перевезення на відкритій палубі та/або люках судна і який піддається впливу зовнішнього середовища. Палубний вантаж може протягом тривалого часу піддаватися впливу атмосферних опадів або тиску вітру та хвиль у бурхливому морі. Отже, належне розміщення та кріплення палубного вантажу [1, 2] має вирішальне значення для безпеки людського життя в морі, судна та навколишнього середовища. Комбінація сил, створена прискореннями в штормову погоду, діє на судно та вантаж під час транспортування в морі, що в бурхливому морі створює більшість проблем, пов'язаних із системами кріплення та, як наслідок, з цілісністю конструкції судна. Тому небезпеки, що виникають внаслідок цих явищ, слід враховувати шляхом розробки та прийняття заходів, які на початковому етапі можуть забезпечити належне розміщення та кріплення вантажу на судні, а також сприятимуть заходам щодо зменшення амплітуди та частоти крену судна [3, 4].

Перевезення палубних вантажів на суднах пов'язане з широким спектром небезпек, які вимагають відповідних заходів для забезпечення безпеки судна та екіпажу, а також збереження вантажу під час навантаження, укладання та кріплення. Крім того, серед важливих аспектів є не тільки сам процес морських перевезень, а й комплекс підготовчих заходів у порту під час вантажних операцій.

Значну увагу було приділено комплексному висвітленню аспектів процесу палубних перевезень вантажів, в якому розглядалися конкретні питання їх безпеки з боку нормативних документів, інструкцій і вказівок, а також запропонованих тлумачень і поправок [5–7].

Під час транспортування палубного вантажу слід звертати увагу на місцеві, національні або міжнародні закони та правила, а також будь-які зміни в законах, правилах, адміністративних вимогах, впровадження яких може вплинути на транспортний процес. Питання підвищення безпеки судноплавства на основі розвитку технології кріплення тарованих лісових вантажів та актуальні питання забезпечення безпеки морських перевезень вантажів розглянуті в [8, 11, 12]. Відповідальність перевізника за перевезення палубного вантажу має значення, труднощі виникають

при спробі визначити відповідальність перевізника у разі втрати або пошкодження вантажу під час морського перевезення, розглянутого в [9].

Враховуючи те, що велика кількість контейнерів становить палубний вантаж, ряд наукових робіт присвячено розробці правил розміщення контейнерів на палубі, чисельному моделюванню динаміки контейнерних штабелів при типовому збудженні руху [10].

Підсумовуючи, проведений огляд літератури показує існування критичної прогалини в існуючих дослідженнях щодо аспектів безпеки палубних вантажних перевезень. Аналіз свідчить про важливість розробки та впровадження комплексної концептуальної основи з урахуванням необхідності застосування комплексного підходу. Такий підхід має включати глибоке розуміння загальних факторів, що сприяють втраті, пошкодженню та псуванню палубного вантажу. Він також повинен відповідати встановленим правилам, кодексам і найкращим практикам, що регулюють розміщення та кріплення палубного вантажу на суднах. Крім того, існує нагальна потреба у вдосконаленні методів планування та обробки вантажів і ретельної оцінки їх впливу на остійність судна та комплексних досліджень у цій галузі, що підкреслює важливість подальших досліджень і розробок.

За даними Всесвітньої ради судноплавства (WSC), у середньому 1382 контейнери втрачаються в морі щороку, і ці цифри не включають генеральні вантажі, які перевозяться морем на палубі неконтейнерних суден, вартість яких може перевищувати сотні тисяч доларів.

Звіти страхового співтовариства про основні види претензій щодо пошкодження або втрати вантажу ґрунтуються на тому, що причиною інциденту стали суворі погодні умови.

Типи претензій, де важка погода є основним фактором спричинили:

- Фізичні пошкодження: зміщення вантажу, псування, руйнування, падіння;
- Підмокання вантажу або пошкодження внаслідок потрапляння води у вантажні приміщення;
- Втрачений за борт вантаж (палубний вантаж);
- Забруднення внаслідок фізичного пошкодження суміжного вантажу.

Всі палубні вантажі можна розділити на такі групи:

- небезпечні, до яких належать: вибухові, стиснуті та зріджені гази, легкозаймисті тверді та рідкі речовини, окисні, отруйні, радіоактивні та

їдкі речовини. Такі вантажі, якщо вони не перевозяться на спеціалізованих суднах, можуть бути завантажені на палубу і знаходитись у вільному доступі;

- виділяють різкі запахи;
- водонепроникні (залізо, труби);
- великогабаритні: плавзасоби, локомотиви, вагони, деталі машин, котли, автомобілі, літаки, танки тощо;
- лісоматеріали;
- вантажі худоби та птиці, що перевозяться в стійлах, вольєрах, клітках.

Аналіз наукових праць та статистичних даних вказує на те, що проблема зсуву палубних вантажів часто виникає внаслідок порушень технології перевезення вантажів морем. Особливо це стає актуальним під час руху судна в умовах несприятливої погоди, коли на нього діють динамічні навантаження.

Механічна модель зміщення визначає класифікацію всіх видів вантажів що схильні до зміщення на основі їхньої фізичної структури. Таким чином, види вантажів поділяються на:

1. Абсолютно тверді об'єкти, до яких відносяться контейнери, рол-трейлери, великогабаритні та інші вантажні місця.
2. Тверде зв'язне сипуче середовище, що охоплює насипні вантажі та зерно.
3. Дискретна сутність, яка представлена мішками, пакетами, металопрокатом, металобрухтом тощо.

Ця класифікація дозволяє систематизувати різні типи вантажів відповідно до їхньої механічної природи зсуву.

МЕХАНІЧНА ПРИРОДА ЗМІЩЕННЯ ВАНТАЖІВ		
Абсолютно тверді об'єкти контейнери, рол-трейлери, інші штучні місця	Тверде зв'язне сипуче середовище зерно та насипні вантажі	Дискретна структура мішки, тюки, пакети, тощо

Рис. 1. Природа зсуву вантажів за механічною моделлю

Вантажі, а саме рухомий транспорт, залізничні вагони, контейнери, платформи, близькі до стану абсолютно твердого тіла, залишаються на борту під дією сил, які не залежать від властивостей самого вантажу.

При перевезенні збірних вантажів стійкість штабеля забезпечується насамперед надійним кріпленням його поверхні. Закріплення поверхні штабеля може здійснюватися блочно: шляхом щільного укладання вантажу.

Незважаючи на те, що перевізник не несе відповідальності за втрату або пошкодження вантажу, що перевозиться на палубі, капітан судна повинен докласти максимум зусиль для забезпечення безпеки перевезення палубного вантажу, оскільки це безпосередньо пов'язано з безпекою вантажу та судна.

У разі завантаження палубного вантажу, відомості про який відсутні в судовому посібнику з кріплення вантажу або в нормативних документах щодо правил і умов перевезення палубного вантажу, капітан повинен ознайомитися з інформацією про вантаж, наданою з боку вантажовідправника, транспортною декларацією. За відсутності такої інформації або за відсутністю письмових інструкцій капітан має право відмовити у прийнятті вантажу до перевезення або звернутися за допомогою до експертів незалежної сертифікованої сюрвейерської компанії. Якщо на судні немає умов для розміщення та кріплення вантажу, які забезпечують його безпечне транспортування і, насамперед, забезпечення його нерухомого стану під час рейсу, капітан має право відмовити у перевезенні вантажу.

Що стосується змісту інформації про вантаж, який планується до морського перевезення, то вона, як правило, повинна складатися з наступних частин:

1. Відомості про учасників морського перевезення вантажу: вантажовідправника, вантажоодержувача та перевізника із зазначенням їх точних найменувань та реквізитів; назви портів відправлення та призначення.

2. Опис вантажу із зазначенням: повного найменування з обов'язковим зазначенням кількості нормативних документів на продукцію, компанію-виробника; форма, розміри та маса вантажних місць; види та опис упаковки, включаючи наявність та міцність пристроїв, що використовуються для перевантаження та кріплення вантажу; транспортні характеристики вантажів (питомий вантажний об'єм, допустима висота штабелювання, кут статичної стійкості, парні коефіцієнти тертя; хімічні властивості та інші потенційні небезпеки).

3. Вимоги та заходи щодо забезпечення безпеки перевезень, у тому числі вимоги до розміщення та кріплення вантажу, інструкції щодо супроводжувальних вантажних декларацій, сертифікатів та інших документів. Вимоги до розміщення та кріплення – цей розділ повинен містити перелік заходів кріплення вантажу або посилання на документ, що містить такі вимоги, наприклад, інструкції щодо кріплення вантажу.

4. Додаткові документи – цей розділ заповнюється, якщо вантаж перевозиться у вигляді укрупнених упаковок, сформованих із застосуванням вантажопакувальних пристроїв (документ про міцність вантажопакувальних пристроїв), або в транспортні засоби укрупнення під пломбами відправника.

Аналіз нормативних аспектів, що регулюють палубне перевезення генеральних вантажів, є важливим етапом у забезпеченні безпеки та ефективності морських перевезень. Нормативні документи визначають стандарти та правила, які судна повинні виконувати під час палубного перевезення різноманітних генеральних вантажів. Це охоплює такі аспекти, як:

1. Транспортна декларація вантажів, офіційний документ, що містить інформацію про вантаж, його характеристики та кількість, і встановлює умови та деталі його транспортування, контактну інформацію відправника та одержувача а також інші необхідні дані. Використовується для забезпечення правильного та безпечного транспортування вантажу та вирішення можливих конфліктів під час перевезення.

2. Стандарти кріплення та вимоги до безпеки кріплення вантажів на відкритих палубах суден, зокрема вживання відповідних фіксаційних засобів та кріпильних систем. Сертифікати на кріпильні матеріали надаються після здійснення відповідної експертизи та перевірки відповідності всіх визначених критеріїв, що гарантує належний рівень безпеки та якості морських перевезень палубних вантажів.

3. Маркування та ідентифікація. Нормативи визначають вимоги до маркування та ідентифікації генеральних вантажів для забезпечення їхньої належної обробки протягом вантажних операцій.

4. Обмеження та лімітації судна враховують конструктивні особливості судна, структуру вантажу та судового обладнання. Критерії обмеження включають місцеву міцність палуби судна, максимальну вантажопідйомність підйомного обладнання, габаритні розміри палуб та приміщень судна, його остійність та інші технічні параметри. Ці обмеження слід ретельно враховувати при плануванні та виконанні навантаження для забезпечення безпечності та оптимальності процесу перевезення, включаючи врахування погодних умов.

5. Сертифікація є важливими етапами для суден, які виконують палубне перевезення генеральних вантажів та передбачають відповідність судна встановленим нормам та стандартам без-

пеки. Ці вимоги включають технічні характеристики судна, наявність необхідного обладнання та систем безпеки, кваліфікацію екіпажу та відповідність міжнародним та національним морським стандартам.

Аналіз цих аспектів допомагає забезпечити дотримання правил та стандартів для ефективного та безпечного палубного перевезення різноманітних генеральних вантажів.

Узагальнюючи практичний досвід, стає можливим розроблення концептуальної моделі, що передбачає поетапне планування та організацію вантажних операцій з палубними вантажами, враховуючи масо-геометричні параметри вантажів та техніко-технологічні аспекти процесу завантаження судна (рис. 2).

Враховуючи попередній процес вивчення транспортних та масогабаритних характеристик вантажів призначених для перевезення на відкритій палубі (Крок 2), виникає необхідність розподілу та класифікації цих вантажів на групи (Крок 3). Припускаючи, що вантажі можуть бути негабаритними та мати різну вагу, їх поділяють на

тарно-тучні вантажні одиниці, комбіновані перевезення, а також групу, що включає негабаритні та великовагові вантажі, групу партій уніфікованих розмірів і ваги (Крок 3А, 3Б).

Цей підхід дозволяє враховувати обмеження вантажопідйомності суден, зокрема, максимальні вантажопідйомності кранів (за наявності вантажних засобів на судні або залученням берегових). Така класифікація дозволяє визначити вантажопідйомність для кожної групи вантажів.

Після цього проводиться порівняльний аналіз техніко-експлуатаційних характеристик судна та розрахунок попереднього вантажного плану (Крок 5). Якщо результати розрахунків відповідають критеріям безпеки та остійності (Крок 6), переходять до формування варіантів виконавчого плану завантаження та створення етапів послідовності завантаження та баластування судна (Крок 8).

Вантажний план для великогабаритних і великовагових вантажів розробляється з урахуванням індивідуального підходу до їх розміщення, місцевої та поздовжньої міцності, вимог до навантаження та кріплення (Крок 9, 10). При прийнятті

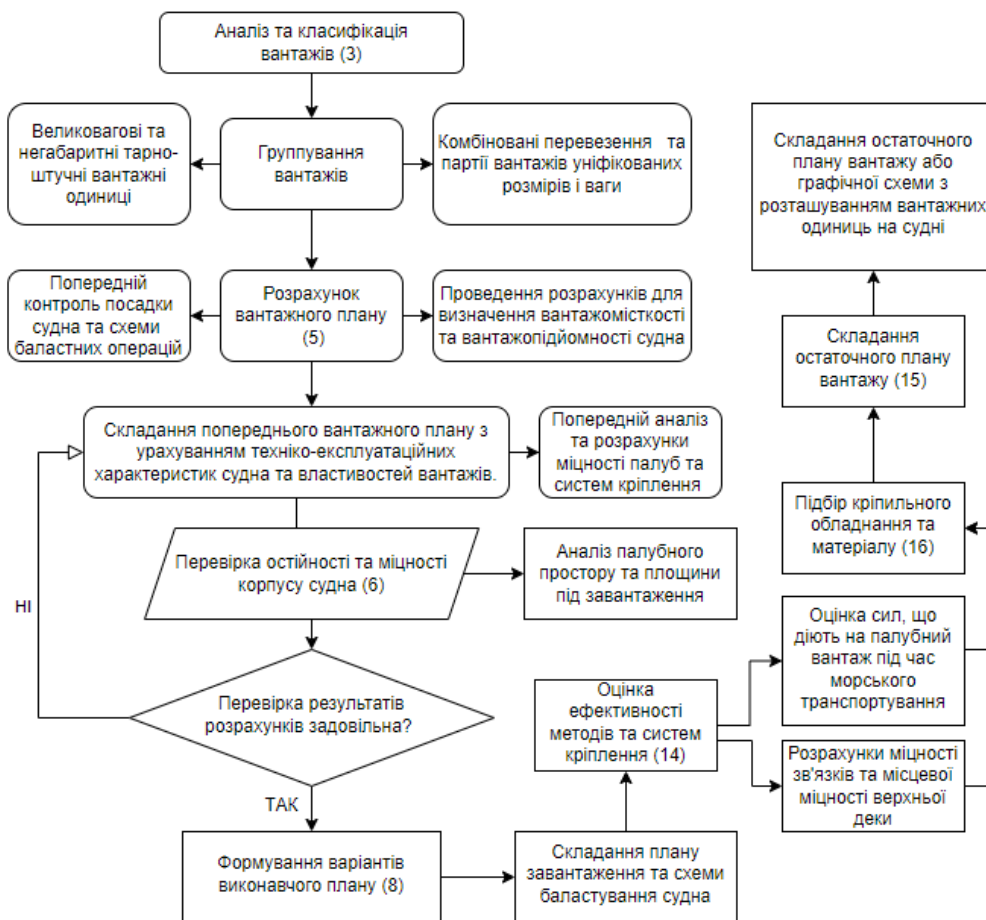


Рис. 2. Концептуальна модель процесу завантаження палубного вантажу

вантажу для перевезення на відкритій палубі проводяться локальні розрахунки на міцність конструкції палуби та люкових кришок (Крок 11), а в разі перевантаження вантажі розподіляються шляхом спорудження платформ, підсилюючих надбудов або інших варіантів з розподілу зосередженої маси вантажу (Крок 12).

Далі, на основі розрахунків сил, що діють на палубний вантаж під час морського транспортування (Крок 13), та оцінки ефективності запропонованих способів кріплення, аналізу схеми кріплення, вибору матеріалу та розрахунків міцності зв'язків та місцевої міцності верхньої деки (Крок 14), обирають кріпильне обладнання та матеріали (Крок 16). Після завершення цього процесу формується остаточний план вантажу або графічна схема з детальним розташуванням вантажних одиниць на судні (Крок 15).

При перевірці стану завантажених палубних вантажів слід звертати увагу на ознаки їх зміщення:

- ослаблення або поломка систем кріплення; пошкодження або деформація структур упаковки;
- наявність динамічних контактів вантажних одиниць між собою та з конструкціями судна;
- перерозподіл навантажень внаслідок поломки елементів кріплення, стан кріпильних матеріалів, що впливає на міцність суднових конструкцій, вантажу та його кріплення;

- міцність вантажних і суднових конструкцій;
- інші умови та обставини, які можуть негативно вплинути на стан і якість вантажу.

У разі виявлення недоліків необхідно вжити заходів щодо їх усунення, а при необхідності провести додаткове кріплення вантажу. Результати перевірки стану вантажу заносяться до судового журналу.

**Висновки.** В статті зазначається про важливість впровадження комплексного підходу до перевезень генеральних вантажів з урахуванням різних технічних, технологічних і масо-геометричних параметрів. Розроблений алгоритм, починаючи з класифікації вантажів, до закріплення і забезпечення їх збереження, служить практичним інструментом для планування і виконання вантажних операцій на судні. Підкреслюється важливість індивідуального підходу до кожного виду вантажу з урахуванням обмежень судна, а також характеристик суднових конструкцій за місцевою міцністю. Запропонована концептуальна модель дозволяє оптимізувати процес завантаження і гарантує безпеку перевезення генеральних вантажів на відкритій палубі. Підкреслюється необхідність систематичного контролю за станом вантажів та вжиття ефективних заходів щодо усунення недоліків протягом рейсу. Підкреслюється важливість дотримання норм безпеки і стандартів морських перевезень для забезпечення успішних і надійних перевезень генеральних вантажів.

#### Список літератури:

1. Stowage of breakbulk (general cargo) – 2006: UK P&I Club. URL://eclass.unipi.gr/modules/document/file.php/NAS-SHM116/UNIFI%20CARGO%20CLAIMS%20Bad%20Stowage%202019.pdf (date of access: 06.11.2023).
2. Shigunov, V., Moctar, O., Rathje, H. Operational Guidance for Prevention of Cargo Loss and Damage on Container Ships. *Ship Technology Research*. 2010. Vol. 57. No. 6. DOI:10.1179/str.2010.57.1.002.
3. Ghamari, I. Greco, M., Faltinsen, O., Lugni, C. Numerical and experimental study on the parametric roll resonance for a fishing vessel with and without forward speed. *Applied Ocean Research*. 2020. Vol. 101. 102272. DOI:10.1016/j.apor.2020.102272.
4. Peşman, E., Taylan, M. Influence of varying restoring moment curve on parametric roll motion of ships in regular longitudinal waves. *Journal of Marine Science and Technology*. 2012. Vol. 17. DOI:10.1007/s00773-012-0179-9.
5. IMO Resolution A.715(17) – Code of Safe Practice for Ships Carrying Timber Deck Cargoes, 1991 (Adopted on 6 November 1991). URL://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.715(17).pdf (date of access: 06.11.2023).
6. RESOLUTION A.714(17) adopted on 6 November 1991. CODE OF SAFE PRACTICE FOR CARGO STOWAGE AND SECURING. URL://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.714(17).pdf (date of access: 06.11.2023).
7. IMO Resolution A.749(18) – Code on Intact Stability for all Types of Ships Covered by IMO Instruments (Adopted on 4 November 1993). URL://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.749(18).pdf (date of access: 06.11.2023).
8. Karpovich, O. Actual issues of ensuring the safety of maritime transportation of goods. Collection of scientific papers CNIIMF. *Problems of marine fleet development*. 2004. С. 142–147.
9. Clark L. Carrying Deck Cargo – at whose risk? UKP&I. URL://www.ukpandi.com/news-and-resources/briefings/2019/carrying-deck-cargo-at-whose-risk/ (date of access: 06.11.2023).



10. Wolf, V., Darie, I., Rathje, H. Rule development for container stowage on deck. 2011. DOI:10.1201/b10771-87.

11. Onyshchenko S., Melnyk O. Probabilistic Assessment Method of Hydrometeorological Conditions and their Impact on the Efficiency of Ship Operation. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2021. Vol. 14 (6), P. 132–136. DOI: 10.25103/jestr.146.15

12. Onyshchenko, S., Melnyk, O. Efficiency of Ship Operation in Transportation of Oversized and Heavy Cargo by Optimizing the Speed Mode Considering the Impact of Weather Conditions. *Transport and Telecommunication Journal*. 2022. vol.23, no.1, pp. 73–80. DOI:10.2478/ttj-2022-0007.

### **Melnyk O.M. CORE CONCEPTS OF SAFE HANDLING AND TRANSPORTATION OF ON-DECK CARGO**

*The article deals with topical issues related to the safety and efficiency of maritime transportation of general cargo. An integrated approach to the planning and organization of cargo operations on open decks of ships is proposed, paying attention to the technical, technological and mass-geometric characteristics of cargo. The article presents a step-by-step algorithm that covers the selection, classification, placement and securing of cargoes, and also considers the technical aspects of cargo securing and ensuring their safety during the transition. In particular, the author emphasizes the need for an individual approach to piece cargo of various types and the need to take into account the limitations of a particular vessel when developing a cargo plan. The aspects of ship structure strength are investigated and the processes for monitoring the current state of cargo and eliminating deficiencies during loading are described. Based on practical experience, a conceptual model aimed at improving the loading processes and ensuring the safety of cargo transportation on the deck of ships is proposed. This conceptual model identifies new opportunities for optimizing and increasing the efficiency of cargo operations, focusing on the individual characteristics and limitations of a particular vessel, which allows to improve the quality of planning cargo operations, reduce the risks of improper placement and securing of cargo, and increase the overall safety of navigation. The application of the developed approach can be widely used in practice to ensure the efficiency and safety of cargo operations. Further research can be aimed at extending the model to take into account specific transportation conditions, the impact of various meteorological and hydrometeorological conditions on loading processes, as well as the development of innovative technologies and methods to gradually improve the safety and efficiency of maritime transportation.*

**Key words:** maritime transportation, general cargo, safety and efficiency, cargo classification, technical requirements, cargo securing, cargo capacity, cargo condition control, systematic monitoring, conceptual model, cargo plan, technical and operational characteristics.

**Mukovska D.**

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

## RESULTS OF SIMULATION STUDIES OF THE TRANSPORT AND PRODUCTION SYSTEM OF WASTE RECYCLING IN THE CONDITIONS OF A METALLURGICAL ENTERPRISE

*The article conducts simulation studies of the transport and production system of waste recycling at a metallurgical enterprise. To date, the method of simulation modelling is one of the most powerful and effective methods for studying processes and production systems. The object of research is the processes of managing freight transport on technological routes for the transport of metallurgical waste. In this study, the transport and production system of waste recycling of a metallurgical enterprise is considered as a complex system that includes a certain number of subsystems, namely: "Raw material supply", "Raw material processing", "Raw material sales", the elements of which are technologically interconnected.*

*The subsystem "Raw material processing" was selected for simulation studies. The aim of the study is to develop software that will simulate the situation on the technological routes of transport and production systems, taking into account the specified criteria, and obtain a set of values of the number of rational type trucks, taking into account their carrying capacity and time factors, a set of values of the total queue time, and the time spent in the queue of trucks. The random nature of the time for unloading trucks associated with the operation of crushing and screening equipment was revealed. At the same time, neither the intensity of raw material supply to the receiving devices of the DSC nor the variability of the time parameters of transport service cycles are taken into account. The software makes it possible to model any situation on the technological routes of the structural units of a coal enterprise and obtain a variety of values for the total queuing time, vehicle queuing time, downtime and repair rates for a group of vehicles with a given carrying capacity. This enables the operation department to correctly select and deploy rolling stock on routes to ensure the highest system performance.*

**Key words:** dump truck, recycling, technological route, crushing and screening complex, transport costs.

**Formulation of the problem.** The current methodology for calculating the required amount of RS on the technological routes of domestic metallurgical enterprises is related to the volume of continuous production, the value of which is planned for a long-term period. In other words, there is a planned amount of raw materials to be transported over a certain period of time (shift, month, year). At the same time, neither the intensity of raw material supply to the receiving devices of crushing and screening equipment nor the variability of the time parameters of transport service cycles are taken into account.

**Analysis of recent research and publications.** The efficient functioning of transport and production systems of mining and quarrying enterprises largely depends on the effective organization of the transportation process, which involves the timely delivery of goods in accordance with the technology and production needs at minimal cost. The transport and production systems for the transportation of metallurgical slag are no exception, where the organization of freight transport is associated with

extremely difficult operating conditions for trucks and with ensuring continuous technological processes for recycling waste from the main production process. The use of dump trucks is driven by the advantages of this transport: the relatively low cost of this transport compared to other vehicles, manoeuvrability, use of diesel fuel (independence from the power grid), mobility, which makes it possible to use them at any horizons in the quarry, a greater slope overcome by dump trucks when lifting, simplification of the process of creating quarry roads, small work sites, etc. [1].

A number of works have been devoted to the study of transport and production systems [2–5]. In today's environment, enterprises are faced with the task of increasing profits and improving the efficiency of managing production processes, including transportation. For the sustainable development of transport and production systems, a new approach to research is needed that will allow to promptly take into account environmental changes, adequately respond to the changing behaviour of transport consumers, and effectively influence supply and demand [6, 7].

Transportation of goods in transport and production systems Slag transportation is carried out in changing environmental conditions and is associated with random processes that occur during the transportation of goods, as a result, abnormal time occurs during cargo operations, which leads to a decrease in the efficiency of the system as a whole. Therefore, it is extremely important to take into account the stochastic nature of rolling stock downtime when selecting rolling stock.

The types of vehicles and the need for them are determined on the basis of a study of intraplant cargo flows, i.e. the amount of cargo moved in a certain period of time in a certain direction between loading and unloading points [8]. The rational allocation of different types of rolling stock for different tasks is referred to as a distribution problem. If the demand for transportation is deterministic, and the effect of using rolling stock is proportional to its number, then such distribution is carried out using linear programming methods [9]. The authors of [10] propose to take into account the following factors when selecting rolling stock: transport, road, natural and climatic, structural, operational qualities, and economic criteria. Paper [11] provides an analysis of methods for assessing and selecting a rational type of rolling stock, including the following: depending on the nature of transportation and type of cargo, technical, operational and consumer properties. The authors [12] suggest choosing rolling stock based on performance, namely, using various indicators – weight and volume of cargo, specific fuel consumption, transportation distance. Higher load capacity and utilization ratio (lower unladen weight) as well as lower fuel consumption (low rolling and air resistance) can maximize efficiency at a given speed and distance. The work [13] considers the algorithm for choosing the most rational mode of transport according to the conditions of specific transportation. In order to substantiate the economic feasibility of using one or another type of transport, it is necessary to take into account the geography of production and consumption of goods, the volume of cargo flows, the presence and condition of rolling stock, the seasonality and rhythm of work on transport and at manufacturers of goods, the system of organizing the transportation process.

The authors of [12] propose to select rolling stock by performance, namely, using various indicators – weight and volume of cargo, specific

fuel consumption, and transportation distance. Higher carrying capacity and utilisation rate (lower unladen weight), as well as lower fuel consumption (low rolling and air resistance) can maximise efficiency at a given speed and distance. Paper [13] discusses an algorithm for selecting the most rational mode of transport for a particular transportation. To substantiate the economic feasibility of using a particular mode of transport, it is necessary to take into account the geography of production and consumption of goods, the volume of cargo flows, the availability and condition of rolling stock, the seasonality and rhythm of work in transport and at manufacturers of goods, and the system of organising the transportation process. The authors of [14] present the results of solving the problem of choosing the number and type of vehicles, which was achieved by determining the specialisation and selection of the carrying capacity of rolling stock, which would lead to a reduction in the cost of transportation. According to the authors in their study [4], the task of choosing a rational rolling stock is to allocate available resources to fulfil known orders. If we are talking about a long planning period (season, year, several years), then another task arises – the formation of a rational fleet structure.

Existing studies, when choosing a rational truck fleet, do not take into account the specifics of truck operation and the stochastic nature of rolling stock downtime when transporting metallurgical slag.

Task statement. Conduct simulation studies to develop software that will simulate the situation on the technological routes of transport and production systems, taking into account the specified criteria, and obtain a set of values for the number of rational trucks, taking into account their carrying capacity and time factors, a set of values for the total queue time, and the time spent in the queue by the trucks.

Outline of the main material of the study. In this study, the transport and production system of waste recycling of a metallurgical enterprise is considered as a complex system that includes a certain number of subsystems, namely: "Receipt of raw materials", "Processing of raw materials", "Sales of raw materials" [15].

For simulation studies, the subsystem "Raw material processing" was selected, with technological routes Б, В.

The study of routes В, С will significantly complicate further research, so for further analysis, the share of each route in the total number of trips within the subsystem was considered (Table 1) [16].

Table 1

**Share of routes in the total number of trips**

Route	Share of routes in the total number of trips, %.
Subsystem "Processing of raw materials"	
Route Б	3
Route B	97

Given the insignificant share in the total number of trips, it is advisable to exclude route Б from the study.

The selected route has a length of 1.05 km, the productivity of the crushing and screening equipment is 300 t/h, the duration of the crushing and screening equipment per 1 shift is 10.5 hours, the average vehicle travel time is 7.99 minutes, the average time of unloading and loading operations is 6.29 minutes, the average waiting time in the queue is 5.97 minutes, the average number of riders per shift is 30 ~ 31. The productivity of the crushing and screening complex on this route is 300 t/h, the shift time of which is 12 hours, the useful time is 10.5 hours (excluding the time for the operator's lunch of 0.5 hours, 0.5 hours for cleaning the equipment – 0.5 hours, 1 hour – time for acceptance/delivery of the shift).

According to the costing of trucks and the specifics of transportation, four types of dump trucks are most appropriate for servicing technological routes (Table 2).

To service the technological route B, BelAZ dump trucks with a capacity of 33 tonnes and 42 tonnes are used, some of which are periodically idle for certain technological reasons. As can be seen from Table 2, the highest tariff is for a BelAZ-7523 dump truck, and the lowest tariff is for a BelAZ-7522 dump truck. However, BelAZ-75404 and BelAZ-7540B dump trucks are also used on technological routes. In this regard, in order to reduce transport costs, the task of selecting a rational dump truck fleet is being addressed. Using the developed methods and models, it is possible

to quickly determine the rational type of rolling stock on technological routes at the lowest cost.

Under such conditions, the route, taking into account the bulk cargo weight, should be serviced by 4 BelAZ-7522 (BelAZ-7523) vehicles with a carrying capacity of 30 tonnes or 3 BelAZ-75404 (7540B) vehicles with a carrying capacity of 40 tonnes, with the number of vehicles varying depending on the technical condition of the rolling stock, the operational situation of production processes, and the physical condition of the drivers.

Under these conditions, the transport costs per shift for the first variant using four units of BelAZ-7522 dump truck will amount to ~ UAH 34362, and for the second variant using four units of BelAZ-7523 dump truck ~ UAH 36776. For the second variant, when using three units of BelAZ-75404 or BelAZ-7540B dump trucks, the cost will be ~ UAH 27166.

Accordingly, the transport costs for one month for the first variant when using four units of BelAZ-7522 dump truck will be ~ 1065222 UAH, when using four units of BelAZ-7523 dump truck ~ 1140056 UAH. For the second variant, when using three units of BelAZ-75404 or BelAZ-7540V dump trucks, the cost will be ~ UAH 842146.

Based on the timekeeping of transport service cycles for technological route B, the random nature of the time for unloading vehicles associated with the operation of crushing and screening equipment was revealed. At the same time, neither the intensity of raw material supply to the receiving devices of the DSC nor the variability of the time parameters of transport service cycles are taken into account.

In particular, the load intensity of the crushing and screening complex is a random variable  $I_{CSC}$ , which is determined by the time of unloading vehicles, the carrying capacity of the vehicle, and the time of movement on the routes. On the routes, during any

Table 2

**Estimates for transport services by car brand, UAH**

Calculation item	BelAZ 7522	БелАЗ 7523	БелАЗ 75404	БелАЗ 7540B
Fuel	308,90	367,74	349,31	349,31
Salary	177,85	177,85	177,85	177,85
Social security contributions	38,82	38,82	38,82	38,82
Replaceable equipment	0	0	0	0
Current repairs	7,02	7,02	7,02	7,02
Maintenance	45,98	45,98	45,98	45,98
Transport costs	0	0	0	0
Depreciation of property, plant and equipment	52,02	52,02	52,02	52,02
Other workshop expenses	1,12	1,12	1,12	1,12
General production costs	108,94	108,94	108,94	108,94
Labour protection	6,34	6,34	6,34	6,34
Total costs for 1 hour.	746,99	799,49	787,40	787,40

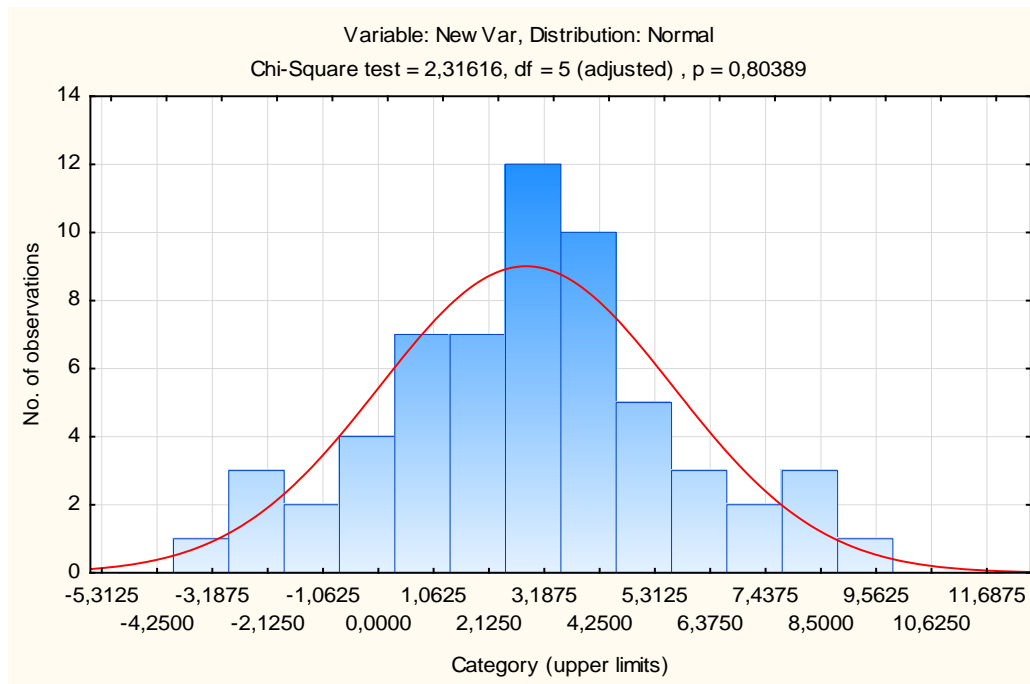


Fig. 1. Histogram of the distribution of values  $\Delta t_{CSC}$

shift, a situation may arise of uneven arrival of vehicles for unloading, uneven unloading, uneven departure from the unloading fronts. In this case, there are two possible situations for the time of departure from unloading in front of a moving vehicle  $t_{dis}$  and the time of arrival for unloading of the vehicle following it  $t_{arriv}$ . The first case involved a delay in unloading a vehicle  $t_{dis} > t_{arriv}$ , and, as a result, the formation of a queue. The second case involved the detention of a car following in the queue  $t_{dis} < t_{arriv}$ , which leads to a gradual reduction in the residual amount of raw materials in the crushing and screening complex.

Fig. 1 shows the results of processing the values  $\Delta t_{CSC}$  for 312 vehicle trips on the routes Б, В. with parameters for the route Б –  $\bar{x} = 5,515$ ;  $\sigma = 0,107$ , for the route В –  $\bar{x} = 3,199$ ;  $\sigma = 0,091$ . The resulting sample at the 0.95 significance level follows a normal distribution law with parameters  $\bar{x} = 2,842$ ;  $\sigma = 0,364$ , it has ranges of negative values  $\Delta t_{CSC}$  for transport service cycles. This proves that there is a possibility of trucks being late for loading. The data obtained and

the ranges of negative values make it clear that the amount of raw materials in the crushing and screening complex is decreasing, which ultimately leads to a shutdown of the crushing and screening complex. The solution in this case is to involve backup vehicles, the number of which will depend on the time of delay of the vehicles for unloading.

However, an increase in the number of vehicles on the route can lead to a queue in front of the crushing and screening complex, so it is advisable to develop special software that would take into account these simulation studies.

**Conclusions.** The software makes it possible to model any situation on the technological routes of the structural units of a coal enterprise and obtain a variety of values for the total queue time, vehicle queue time, downtime and repair rates for a group of vehicles with a given carrying capacity. This enables the operation department to correctly select and deploy rolling stock on routes to ensure maximum productivity.

#### Bibliography:

1. Анісімов, О.О., Довгальок, І.А. Дослідження показників роботи кар'єрних самоскидів та підвищення їх продуктивності в умовах Стрижавського родовища мігматитів. *Розробка родовищ корисних копалин*, 2015.
2. Шарай С.М., Стефанович О.М., Рой М.П. Методика вибору послідовності виконання замовлень на міжміські вантажні автомобільні перевезення. *World Science*, 9 (70), с. 1-7, 2021.
- 3 Чупрін Є.С., Кондратенко Є.В., Гелеверя Є.М. Аналіз та перспективи розвитку транспортної галузі України з позиції автотранспортних підприємств. *Науковий вісник Ужгородського національного університету*, вип. 24, с. 125-130, 2019.

4. Літвінова Я.В., Барановський О.Д. Пошук та обґрунтування шляхів підвищення ефективності перевезень тарно-штучних вантажів. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*, № 5 (89), с. 22-31, 2020.
5. Калініченко О.П., Павленко О.В., Нефьодов В.М. Оптимізація рішення задач оперативного планування вантажних перевезень на автомобільному транспорті. *Комунальне господарство міст*, вип. 142, с. 108-113, 2018.
6. Ziebuhr M., Kopfer H. (2016). Solving an integrated operational transportation planning problem with forwarding limitations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 87. p. 149–166, 2016 DOI: <http://doi.org/10.1016/j.tre.2016.01.006>
7. Нестеренко Г.І., Музикін М.І., Сакаль О.М., Жабокрик Б.В., Цьомка Р.О. Дослідження економічної доцільності автомобільних перевезень. *Логістичне управління та безпека руху на транспорті*, зб. наук. пр. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти та молодих вчених, м. Рубіжне (Луганська обл.), 1–2 груд. 2020 р. Северодонецьк, с. 126–129.
8. Аулін В.В., Голуб Д.В., Біліченко В.В., Замуренко А.С. Формування показників оцінки ефективності транспортного процесу перевезень. *Вісник машинобудування та транспорту*, № 1(11), с. 4-10, 2020.
9. Кусяк М.М.; Мельник В.М. Критерії вибору парку транспортних засобів для забезпечення ефективної системи вантажних перевезень. *Збірник тез доповідей VIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів Актуальні задачі сучасних технологій* “, 1: 194-195, 2019.
10. Галкін А.С. Щодо оцінки ефективності перевезень вантажів однопотипними транспортними засобами. *Technology audit and production reserves*, № 6/3 (14), с. 11-14, 2013.
11. Поляков А.В., Галушак О.О., Галушак Д.О., Грабенко М.Д. Методика вибору рухомого складу, маршруту і графіка перевезення вантажів. *Наукові праці ВНТУ*, № 3, с. 1-10, 2011.
12. Khavruk, V.O., Parkhomenko, O.O. Критерії оцінки й вибору рухомого складу АТП. *Science and Transport Progress*, вип. 2 (92), с. 17-28, 2021.
13. Glaeser, K. P., Ritzinger, M. A. Comparison of the Performance of Heavy Vehicles Results of the OECD Study: «Moving Freight with Better Trucks». *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 48, с. 106-120, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.992>
14. Савченко, Л. В. Задача вибору виду транспорту для вантажоперевезення. *Вісник Національного транспортного університету*, вип. 26 (2), с. 267-272, 2012
15. Sereda V.P., Mukovska D.Y. Mathematical modeling of the efficiency indicator of the functioning of the transport and production system in the conditions of the quarry. *Transport technologies*. 2023. Vol. 4. № 1. С. 48-61.
16. Sereda V.P., Mukovska D.Y., Sereda D.B. Investigation of the functioning of the transport and production system of a metallurgical enterprise quarry. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2023. № 1 (20). С. 34-43.

## **Муковська Д.Я. РЕЗУЛЬТАТИ ІМІТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТРАНСПОРТНО-ВИРОБНИЧОЇ СИСТЕМИ РЕЦИКЛІНГУ ВІДХОДІВ В УМОВАХ МЕТАЛУРГІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА**

У статті проведено імітаційні дослідження транспортно-виробничої системи рециклінгу відходів металургійного підприємства. На сьогоднішній день саме метод імітаційного моделювання є одним із найпотужніших та найефективніших методів дослідження процесів та виробничих систем. Об'єктом дослідження є процеси управління вантажним автотранспортом на технологічних маршрутах перевезення відходів металургійного виробництва. У даному дослідженні транспортно-виробнича система рециклінгу відходів металургійного підприємства розглядається як складна система, що містить у своєму складі певну кількість підсистем, а саме: «Надходження сировини», «Переробка сировини», «Збут сировини», елементи яких технологічно пов'язані між собою.

Для проведення імітаційних досліджень була обрана підсистема «Переробка сировини». Метою дослідження є розробка програмного забезпечення, що дозволить імітувати ситуацію на технологічних маршрутах транспортно-виробничих систем з урахуванням заданих критеріїв і отримувати безліч значень кількості вантажних автомобілів раціонального типу з урахуванням їхньої вантажопідйомності та часових факторів, множини значень сумарного часу перебування в черзі, часу перебування в черзі автомобілів. Було виявлено випадковий характер часу розвантаження автомобілів, пов'язаний з роботою дробильно-сортувального устаткування. При цьому ні яким чином не враховуються ні інтенсивність подачі сировини до приймальних пристроїв ДСК, ні мінливість часових параметрів циклів транспортного обслуговування. Використання програмного забезпечення дає можливість моделювати будь-яку ситуацію на технологічних маршрутах структурних підрозділів вугільного підприємства й отримувати безліч значень сумарного часу перебування в черзі, часу перебування в черзі автомобілів, коефіцієнтів простою та коефіцієнтів ремонту для групи автомобілів із заданою вантажопідйомністю. Це робить можливим співробітникам відділу експлуатації правильно здійснювати підбір і розстановку рухомого складу за маршрутами для забезпечення найбільшої продуктивності функціонування системи.

**Ключові слова:** самоскид, рециклінг, технологічний маршрут, дробильно-сортувальний комплекс, транспортні витрати.

**Петренко О.І.**

Державний університет інфраструктури та технологій

## КОНТРЕЙЛЕРНІ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВАНТАЖІВ ЯК НАПРЯМ РОЗВИТКУ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ З УРАХУВАННЯМ СУЧАСНИХ РЕАЛІЙ

У статті досліджується потенціал контрейлерних перевезень як напрямку розвитку транспортної системи України в сучасних реаліях. Відзначено, що через вплив глобалізаційних та геополітичних факторів, повномасштабну військову агресію проти України змінюється географія транспортно-економічних зв'язків, що знаходить прояв у зменшенні обсягів перевезень у східному напрямку та коригуванні маршрутів. Акцентовано увагу на тому, що сьогодні, враховуючи європейський вектор розвитку країни, одним з пріоритетних напрямів розвитку національної економіки виступає зростання рівня транзитних перевезень. Зосереджено увагу на ефективності контрейлерних перевезень та їх значному потенціалі для використання в Україні, в першу чергу, у міжнародному сполученні. Підкреслено інноваційний характер даної технології, досліджено її основні переваги та недоліки. На основі аналізу закордонного досвіду її використання відзначено розмаїття існуючих контрейлерних систем, які відрізняються технологічними та організаційно-економічними характеристиками. Охарактеризовано основні аспекти запровадження даної технології в Україні. Визначено основні вимоги, які доцільно враховувати при виборі контрейлерної системи. Встановлено фактори, які перешкоджають повноцінному застосуванню контрейлерних технологій у вітчизняних умовах. Сформовано основні стратегічні напрями розвитку контрейлерних перевезень в Україні, які базуються на комплексному підході до вирішення означених питань і подолання існуючих перешкод у сучасних реаліях, включаючи технологічні, економічні, правові аспекти, та спираються на передовий досвід. Серед них: формування нормативно-правової бази в сфері організації контрейлерних перевезень; забезпечення технологічної модернізації транспортного комплексу; підтримка проєктів, спрямованих на використання сучасних інформаційних технологій; формування програм у сфері технологічних новацій; використання адаптивної тарифної політики та запровадження гнучких форм ціноутворення тощо. Це сприятиме забезпеченню повноцінної експлуатації технологічних можливостей та використанню транзитного потенціалу держави, посиленню її конкурентних позицій на міжнародному ринку логістичних послуг.

**Ключові слова:** контрейлерна технологія, контрейлерні системи, транспортна система, технологічні процеси, перевезення, транспорт.

**Постановка проблеми.** Україна має розгалужену транспортну систему, а особливості її географічного розташування на перетині транспортних потоків між Європою та Азією, проходження через територію держави міжнародних транспортних коридорів дозволяють реалізувати транзитний потенціал та виступати транспортним хабом між цими регіонами світу. Так, за результатами досліджень англійського інституту «Рендел», за коефіцієнтом транзитності Україна посіла перше місце в Європі (за даними 2021 року він дорівнює 3,75) [1, с. 13], але разом з тим, на сучасному етапі цей потенціал використовується не в повному обсязі.

Слід констатувати, що через вплив глобалізаційних та геополітичних факторів, повномасштабну військову агресію проти України змінюється географія транспортно-економічних зв'язків, що

знаходить прояв у зменшенні обсягів перевезень у східному напрямку та коригуванні маршрутів.

Сьогодні, враховуючи європейський вектор розвитку країни, одним з пріоритетних напрямів розвитку національної економіки виступає зростання рівня транзитних перевезень. Такі тенденції, з врахуванням загроз та викликів, знайшли відображення і у Національній транспортній стратегії України на період до 2030 р., в якій акцентовано увагу на створенні ефективної конкурентоспроможної мультимодальної національної транспортної системи, яка є експлуатаційно сумісною з мультимодальною світовою транспортною системою [2], що потребує удосконалення взаємодії різних видів транспорту і розвитку комбінованих систем міжнародних перевезень.

Зазначимо, що одним із ефективних інструментів розв'язання таких проблем виступають

контрейлерні перевезення (як різновид комбінованих), ефективність яких доведена поширеними світовими практиками, які набули популярності в країнах Європейського Союзу (ЄС), США, Канаді за рахунок поєднання переваг автомобільного та залізничного транспорту, що дозволило покращити транспортне обслуговування, забезпечити збереження вантажу протягом всього маршруту, підвищити швидкість проходження митних кордонів у різних країнах тощо.

Зазначимо, що на ефективності даного виду комбінованих перевезень та значному потенціалі для його використання в Україні, в першу чергу, в міжнародному сполученні, неодноразово наголошувалось у наукових дискурсах [3, с. 21; 4].

Однак, як свідчать результати досліджень, останнім часом у країні здійснюється лише незначна кількість транспортувань з використанням контрейлерної технології.

Тому, питання розвитку контрейлерних перевезень та забезпечення регулярного міжнародного сполучення з застосуванням такої технології, потребує невідкладної уваги, що сприятиме розвитку транспортної системи України та підвищенню ефективності використання її транзитного потенціалу в сучасних реаліях, стимулюючи зростання конкурентоспроможності держави на світовому ринку транспортних послуг та інтеграції її транспортної інфраструктури до світової транспортної системи. Це обумовлює значущість тематики даного дослідження.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання, які пов'язані з розвитком технології контрейлерних перевезень в Україні знаходиться в полі зору ряду вітчизняних дослідників, які звертають увагу на окремі економіко-технологічні аспекти її запровадження, проблеми організації контрейлерного обслуговування (розробку спеціального рухомого складу та термінальних технологій, проходження митних кордонів) [1; 3–6], відзначаючи як переваги так і труднощі реалізації цих процесів; аналізують закордонний досвід використання різних моделей контрейлерних перевезень [7; 8]; розглядають напрями та пропонують шляхи поширення даної технології у вітчизняній практиці [9; 10], спираючись на техніко-економічне обґрунтування авторських поглядів і пропозицій з врахуванням існуючих тарифів та конкурентної ситуації на ринку логістичних послуг [11; 12].

Відзначимо, що на питання впровадження сучасних ефективних та екологічних технологій доставки вантажів, якими саме є контрейлерні

моделі, звертається увага в транспортній складовій Угоди про асоціацію з ЄС, яка передбачає поступову інтеграцію транспортної системи України до європейської мережі.

Окремі аспекти функціонування мультимодальних транспортних систем, в тому числі з застосуванням контрейлерних перевезень, визначаються в офіційних документах (міжнародних конвенціях, їх окремих розділах та угодах) Європейської економічної комісії ООН (UNECE), Європейської конференції міністрів транспорту (ECMT), Конференції ООН із торгівлі і розвитку (UNCTAD) [13; 14], Міжнародного союзу комбінованих автомобільних та залізничних перевезень (UIRR) [15].

На доцільність розвитку контрейлерного обслуговування звертається увага у Національній транспортній стратегії України на період до 2030 р. [2].

Але, зважаючи на динамічність розвитку світового ринку логістичних послуг, окремі питання дослідження контрейлерних перевезень, як інструменту розвитку інтегрованих транспортних систем, потребують подальшого опрацювання (з врахуванням сучасних викликів та загроз).

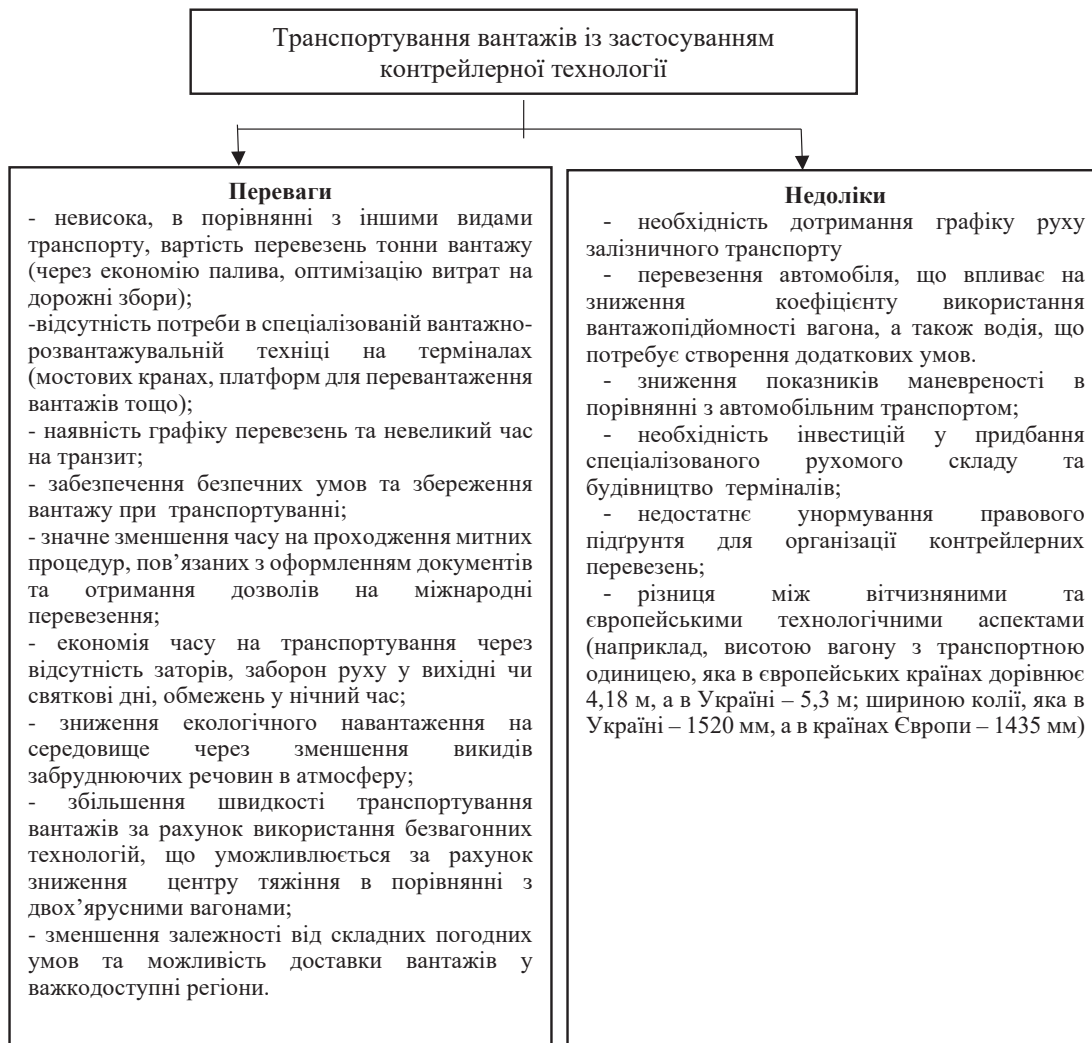
**Метою** даної статті є дослідження потенціалу контрейлерних перевезень як напряму розвитку транспортної системи України з врахуванням сучасних реалій, що дозволить визначити існуючі проблеми та шляхи їх подолання, забезпечуючи повноцінну експлуатацію технологічних можливостей та сприятиме використанню транзитного потенціалу держави, посиленню її конкурентних позицій на міжнародному ринку логістичних послуг.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Загальновідомо, що контрейлерні перевезення вантажів передбачають застосування змішаної технології, яка включає доставку автотягачами (на початковому та кінцевому етапах) та використання на значній частині маршруту спеціальних залізничних платформ для транспортування автотягачів, автомобільних причепів та напівпричепів, які до моменту початку самостійного руху по автодорогам, являють собою пасивний транспортний засіб.

Відзначаючи інноваційний характер даної технології, на що неодноразово зверталась увага у наукових дискурсах [3, с. 21; 5, с. 50], вважаємо доцільним визначити її основні переваги та недоліки (рис. 1).

Аналіз світових практик використання даної технології дозволив відзначити значний рівень розвитку даної технології як в країнах ЄС





**Рис. 1. Переваги та недоліки контрейлерної технології**

*Джерело: побудовано автором на основі [3, с. 22; 5, с. 51; 9, с. 55; 16, с. 72] та доповнено*

(Франції, Швейцарії, Австрії, Італії та Німеччині), США Китаї та інших, а також констатувати розмаїття існуючих контрейлерних систем, які відрізняються технологічними, організаційно-економічними характеристиками (табл. 1).

Узагальнюючи наведені характеристики варто відзначити певні переваги шведської системи Flexiwaggon, яка не потребує використання спеціалізованих контрейлерних терміналів протягом всього маршруту, що значно знижує інфраструктурні витрати та уможлиблює паралельну організацію вантажно-розвантажувальних робіт без додаткового залучення (окрім водія) персоналу та обладнання.

Але відзначимо, що у наукових дискурсах немає однозначної думки щодо оптимальної технології при організації такого виду перевезень в Україні. Так, існують міркування щодо ефективності французької технології Modalohr через

«уможливлення перевезень як окремих напівпричепів, так і автопоїздів та розгалужену мережу діючих маршрутів» [9, с. 75]; ряд науковців наголошує на неможливості використання на вітчизняних залізницях основних світових технологій через «конструкційні особливості, які не відповідають специфіці експлуатації парку рухомого складу, особливостям кліматичних умов або цінним характеристикам» [11, с. 440; 17, с. 6751].

Тому, вважаємо доцільним вказати, що при виборі контрейлерної технології, перевізникам слід враховувати ряд базисних вимог. Серед них: можливість швидкого переходу поїздом стиків при різній ширині колії; скорочення часу для вантажно-розвантажувальних робіт; відносно низькі витрати для побудови платформи та будівництва терміналів [11, с. 442].

Звертаючи увагу на вже існуючий досвід запровадження даної технології на вітчизняних тере-

## Особливості деяких контрейлерних систем

Назва	Технологічні	Організаційні	Економічні
Modalohr (Франція)	Максимальна швидкість рухомого складу – 120 км/год; транспортування автопотягу (окремо), напівпричепів, контейнерів; максимальна вага навантаження 38 т; використовується об'єднана залізнична платформа; обов'язкова наявність спеціалізованого контрейлерного терміналу	Перевезення може здійснюватися як супроводом, так і без нього; тип перевантаження на терміналі – горизонтальний; обов'язкова необхідність точного позиціонування вагонів по фронту при вантажно-розвантажувальних роботах; максимальне число напівпричепів – 40 од.; можливість паралельної організації вантажно-розвантажувального процесу (без необхідності участі персоналу)	Сумарні витрати на один потяг 19,90 євро/км; експлуатаційні витрати на платформу – 0,498 євро/км; максимальна рентабельність (при 100% завантаженні потяга) – 40%
Cargo Beamer (Німеччина)	Максимальна швидкість рухомого складу – 120 км/год; транспортування автопотягу (окремо), напівпричепів, контейнерів; максимальна вага навантаження 44 т; використовується спеціальна поворотна залізнична платформа; обов'язковість контрейлерного терміналу	Перевезення може здійснюватися без супроводу; тип перевантаження на терміналі – горизонтальний; обов'язкова необхідність точного позиціонування вагонів по фронту при вантажно-розвантажувальних роботах; максимальне число напівпричепів – 32 од.; можливість паралельної організації вантажно-розвантажувального процесу (без необхідності участі персоналу)	Сумарні витрати на один потяг 19,42 євро/км; експлуатаційні витрати на платформу – 0,607 євро/км; максимальна рентабельність (при 100% завантаженні потяга) – 28%
Mega Swing (Швеція)	Максимальна швидкість 120 км/год; транспортування автопотягу, напівпричепів, контейнерів; максимальна вага навантаження 38,5 т; використовується спеціальна поворотна залізнична платформа; контрейлерний термінал необов'язковий	Перевезення може здійснюватися без супроводу; тип перевантаження на терміналі – горизонтальний; необов'язковість точного позиціонування вагонів по фронту при вантажно-розвантажувальних роботах; максимальне число напівпричепів – 42 од.; можливість паралельної організації вантажно-розвантажувального процесу (участь персоналу обов'язкова)	Сумарні витрати на один потяг 20,02 євро/км; експлуатаційні витрати на платформу – 0,477 євро/км; максимальна рентабельність (при 100% завантаженні потяга) – 43%
Flexiwaggon (Швеція)	Максимальна швидкість 120 км/год; транспортування автопотягів; причепів, максимальна вага навантаження 44 т; використовується спеціалізована залізнична платформа; спеціалізований контрейлерний термінал необов'язковий	Перевезення здійснюється з супроводом; тип перевантаження на терміналі – горизонтальний; немає необхідності точного позиціонування вагонів по фронту при вантажно-розвантажувальних роботах; максимальне число напівпричепів – 35 од.; можливість паралельної організації вантажно-розвантажувального процесу (участь персоналу обов'язкова)	Сумарні витрати на один потяг 21 євро/км; експлуатаційні витрати на платформу – 0,6 євро/км; максимальна рентабельність (при 100% завантаженні потяга) – 31%

Джерело: сформовано автором на основі [7, с. 58] та доповнено

нах зазначимо, що перші кроки в напрямі формування контрейлерних потягів було зроблено ще у 1990-х роках, а у 1996 році було вперше організовано рух комбінованого поїзду за маршрутом Дніпропетровськ – Захонь (Угорщина). У 1998 році запущено контрейлерний поїзд за маршрутом Луганськ – Київ – Катовіце (Польща) [6].

Після тривалої перерви, питання відновлення таких практик було розглянуто на державному рівні і на сучасному етапі планується запуск контрейлерного потяга з України до Австрії й Італії транзитом через територію Угорщини, що зменшить навантаження на українські автошляхи та сприятиме збільшенню транзитних перевезень

через територію країни. При цьому відправлення таких поїздів планується з наступних станцій: Вадул – Сірет, Чоп – Захонь та Мостиська.

Але зазначимо, що виступаючи однією з інноваційних технологій та вектором розвитку світової транспортної системи і вітчизняної, як її складової, повноцінне використання контрейлерних перевезень у сучасних реаліях гальмується низкою факторів. Серед основних з них слід відзначити такі: нестача спеціалізованої логістичної інфраструктури, в тому числі для виконання вантажних операцій; брак залізничного рухомого складу для таких перевезень і, насамперед, контрейлерних платформ; нестабільність тарифної

політики щодо транспортування контрейлерів; відмінності вітчизняних та європейських технічних вимог стосовно такого виду перевезень; недосконалість законодавства у сфері мультимодальних перевезень та відсутність нормативно-правового базису, спрямованого на врегулювання відносин між учасниками процесу; незакінчені процедури отримання дозволів на перевезення вантажів від ряду країн.

Дослідження світових практик організації транспортування вантажів із застосуванням контрейлерної технології та основних проблем, які гальмують її використання в Україні, дозволили сформулювати основні стратегічні напрями розвитку вітчизняних контрейлерних перевезень (як вектору реалізації транзитного потенціалу транспортної системи України), які базуються на комплексному підході до вирішення означених питань і подолання існуючих перешкод у сучасних реаліях, включаючи технологічні, економічні, правові аспекти та спираються на передовий досвід. Серед основних з них необхідно відзначити наступні:

- формування нормативно-правової бази в сфері організації контрейлерних перевезень, яка спрямована на врегулювання відносин між учасниками цього процесу, її гармонізація з міжнародними стандартами та нормами, що сприятиме посиленню співробітництва та активізації процесу інтеграції вітчизняної транспортної системи до загальноєвропейської та світової транспортних мереж;

- активізація співробітництва з країнами ЄС у транспортній сфері, участь у профільних проєктах, присвячених технологічній модернізації транспортного комплексу; залучення вітчизняних компаній до участі в таких програмах;

- стимулювання інноваційної активності в транспортному секторі, підтримка проєктів, спрямованих на використання сучасних інформаційних технологій (відповідного програмного забезпечення, систем супутникового зв'язку та ін.), що дозволить створити ефективну систему комунікацій між учасниками логістичного процесу в режимі реального часу, підвищити рівень автоматизації технологічних процесів та оптимізувати операції. А саме: використання Інтернету речей на основі відповідного програмного забезпечення для оптимізації маршрутів та раціоналізації управління рухом транспорту; розвиток технології блокчейн, що дозволить відстежувати пересування вантажів і забезпечити інформування учасників процесу із застосуванням контр-

ейлерної технології впродовж всього ланцюжка поставок, оптимізувати час та витрати на оформлення та доставку вантажів;

- використання програмного підходу, який передбачає формування програм у сфері технологічних новацій, оновлення парку транспортних засобів (насамперед, контрейлерних платформ), інфраструктурного розвитку (розбудова та модернізація транзитних терміналів, інформаційно-комунікаційної інфраструктури) в галузі контрейлерних перевезень;

- формування адаптивної тарифної політики та запровадження гнучких форм ціноутворення, які передбачають використання спеціальних тарифів на перевезення вантажів з використанням контрейлерної технології та застосування системи знижок.

**Висновки.** В сучасних реаліях через вплив глобалізаційних та геополітичних факторів, повномасштабну військову агресію проти України з боку росії змінюється географія транспортно-економічних зв'язків та коригуванні маршрутів. Європейський вектор розвитку країни акцентував увагу на підвищення ефективності використання її транзитного потенціалу шляхом розвитку контрейлерних перевезень, які здійснюються на міжнародних напрямках. Безумовно, маючи інноваційний характер, ця технологія має як переваги, так і недоліки. Аналіз закордонного досвіду її використання дозволяє відзначити розмаїття існуючих контрейлерних систем, які відрізняються технологічними, організаційно-економічними характеристиками та застосовуються в різних країнах, демонструючи підвищення ефективності транспортування вантажів. Проте, повноцінне запровадження контрейлерної технології у вітчизняних умовах гальмується через низку факторів впливу. Зазначимо, що з метою вирішення означених питань та подолання існуючих перешкод у сучасних реаліях, сформовано стратегічні напрями розвитку контрейлерних перевезень в Україні, які базуються на комплексному підході, включаючи технологічні, економічні, правові аспекти та спираються на передовий досвід. Це сприятиме забезпеченню повноцінної експлуатації технологічних можливостей та використанню транзитного потенціалу держави, посиленню її конкурентних позицій на міжнародному ринку логістичних послуг.

Але практична реалізація таких напрямів та заходів в їх рамках потребує більш докладного опрацювання за кожним (з визначенням основних механізмів та інструментів), що складає перспективи подальших досліджень.

Список літератури:

1. Березовий М. І., Малашкін В. В., Лаушник С. В. Сучасний стан та перспективи розвитку комбінованих перевезень в Україні. *Транспортні системи і технології перевезень*. 2018. Вип. 15. С. 12-18.
2. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року: Розпорядження КМУ від 30.05.2018 № 430-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-p#Text> (дата звернення 01.10.2023).
3. Вернигора Р. В., Огороков А. М., Цупров П. С., Павленко О. І. Мультиmodalні перевезення як базовий сегмент транзитного потенціалу України. *Транспортні системи та технології перевезень: Зб. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. тр-ту*. 2017. Вип. 14. С. 20-29.
4. Купалова Г. І., Хрутьба Ю. С. *Еколого-економічні аспекти оптимізації логістичних товаротранспортних потоків підприємств*: монографія. К.: Компринт, 2019. 143 с.
5. Курган М. Б. Досвід експлуатації контрейлерних поїздів у внутрішньому та міжнародному сполученні. *Українська залізниця*. 2016. №12 (42). С. 49-54.
6. Щодо шляхів розвитку мультиmodalних (комбінованих) перевезень в Україні». Аналітична записка. URL: <http://www.niss.gov.ua/articles/599/> (дата звернення 01.10.2023).
7. Вернигора Р. В., Журавель І. Л., Єльнікова Л. О. Дослідження ефективності застосування контрейлерної технології перевезення вантажів в Україні. *Збірник наукових праць ДНУЗТ*. 2021. Вип. 22. С. 56-66.
8. Литвин О. В. Порівняльна характеристика існуючих систем організації контрейлерних перевезень у світі. *Вісник Нац. трансп. ун-ту*. 2015. №1 (31). С. 324-332.
9. Рикованова І. С. Контрейлерні перевезення: європейський досвід та проблеми і перспективи розвитку в Україні. *Науковий вісник Ужгородського національного університету*. 2020. № 32. С. 74-80.
10. Андрушків Б., Кирич Н., Погайдак О., Стойко І., Шерстюк Р. Контрейлерні перевезення - перспективи розв'язання проблеми в Україні (Шляхи удосконалення транспортного обслуговування в умовах гібридної війни). *Вісник економічної науки України*. 2015. №1. С.23-26.
11. Nitsenko V., Kotenko S., Hanzhurenko I., Mardani A., Stashkevych I., Karakai M. Mathematical Modeling of Multimodal Transportation Risks. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 978. P. 439-447. doi.org/10.1007/978-3-030-36056-6\_4.
12. Rakhmangulov A., Śladkowski A., Osintsev N., Kopylova O. Sustainable development of transport systems for cargo flows on the East-West direction, Transport systems and delivery of cargo on East-West routes: Studies in Systems Decision and Control. 2018. Vol. 156. P. 3-69.
13. Terminology on combined transport / Prepared by the UNECE, the European Conference of Ministers of Transport (ECMT) and the European Commission (EC). New York and Geneva: United Nations. 2001. 71 p. URL: <https://www.unece.org/index.php>.
14. Implementation of multimodal transport rules (UNCTAD/SDTE/TLB/2). URL: <http://unctad.org/en/Pages/DTL/TTL/Legal/LegalDocuments.aspx> (дата звернення: 25.10.2023).
15. Report on Combined Transport in Europe 2020. URL: <http://www.uirr.com/en/media-centre/press-releasesand-position-papers/2020/mediacentre/1675-2020-report-on-combined-transport-in-europe.html> (дата звернення: 25.10.2023).
16. Петренко О. І., Горбенко О. І. Контрейлерні перевезення як інструмент розвитку інтегрованих транспортних систем. *Економіка та держава*. 2017. № 5. С. 70-74.
17. Galkin A., Popova Y., Chuprina E., Shapovalenko D. Interaction of logistics 4.0 and consumer oriented marketing using ICT. Proceedings of the 33rd International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2019: Education Excellence and Innovation Management through Vision 2020. Granada, 2019. P. 6751-6760.

**Petrenko O.I. CONTRAILER CARGO TRANSPORTATION AS A DIRECTION FOR THE DEVELOPMENT OF THE TRANSPORT SYSTEM OF UKRAINE TAKEN INTO CONSIDERATION OF MODERN REALITIES**

*The article examines the potential of counter-trailer transportation as a direction of development of the transport system of Ukraine, taking into consideration modern realities. It was noted that due to the influence of globalization and geopolitical factors, full-scale military aggression against Ukraine, the geography of transport and economic relations is changing, which is manifested in the reduction of the volume of transportation in the eastern direction and the adjustment of routes. Attention is focused on the fact that today, taking into account the European vector of the country's development, one of the priority directions of the development of the national economy is the growth of the level of transit transportation. Attention is focused on the efficiency of cross-trailer transportation and their significant potential for use in Ukraine, primarily in international traffic. The innovative nature of this technology is emphasized and its main advantages and disadvantages are investigated. On the*

*basis of the analysis of foreign experience of its use, the variety of existing of contrailer systems, which differ in technological, organizational and economic characteristics, was noted. The main aspects of the introduction of this technology in Ukraine are characterized. The main requirements that should be taken into account when choosing a counter-trailer system have been defined. The factors that prevent the full application of contrailer technologies in domestic conditions have been established. The main strategic directions for the development of cross-trailer transportation in Ukraine have been formed, which are based on a comprehensive approach to solving the identified problems and overcoming existing obstacles in modern realities, including technological, economic, legal and other aspects and are based on best experience. Among them: the formation of a normative and legal framework in the field of the organization of of contrailer transportation; ensuring technological modernization of the transport complex; support of projects aimed at the use of modern information technologies; formation of a number of programs in the field of technological innovations; forming an adaptive tariff policy and introducing flexible forms of pricing, etc. This will contribute to ensuring the full exploitation of technological capabilities and the use of the transit potential of the state, strengthening its competitive position on the international market of logistics services.*

**Key words:** *contrailer technology, contrailer systems, transport system, technological processes, transportation, transport.*

**Petrov L.M.**

Odesa Military Academy

**Kishianus I.V.**

Odesa Military Academy

**Verpivskiy S.M.**

Odesa Military Academy

**Malinovskyi O.A.**

Odesa Military Academy

**Nikishyn V.A.**

Odesa Military Academy

**Sheluhin S.V.**

Odesa Military Academy

## CONSTRUCTION POSSIBILITIES WITH VARIABLE UNDERCARRIAGE GEOMETRY

*The article deals with the research of elements of the theory of a car with a variable chassis geometry. The study of a car with a variable chassis geometry was connected with the application of the Lagrange equation. As a generalized coordinate, the angular displacement of the moving wheel from its position with the contact in the support surface was accepted –  $\varphi$ .*

*The purpose of the study is to create a technological diagram of a mobile wheel drive when transferring the energy of the wheel drive's oscillating motion due to the "transition" of kinetic energy into potential energy and vice versa due to elastic elements made according to a special geometry with the creation of a transfer force that acts on the frame of a car with a variable chassis geometry and is an auxiliary factor to the innovative technology of its movement.*

*The scientific and practical direction of the work consists in the fact that for the first time a technology for a car with a variable chassis geometry is proposed, in which its movement along the road is applied by the "transition" of potential energy into kinetic energy by the oscillating movement of the wheel, connected to the frame of a car with a variable chassis geometry parts with elastic elements made according to a special geometry.*

*The result of the research is the development of elements of the theory of a car with a variable chassis geometry with a movable wheel, which allows to create a design of a promising car with a variable chassis geometry with an oscillating wheel, and thereby offer increased mobility for the car.*

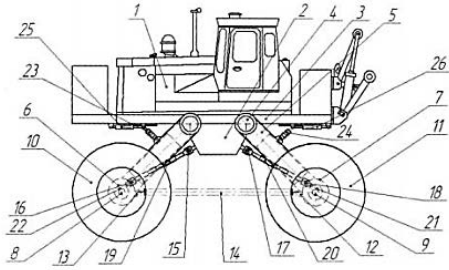
*The proposed car model with oscillating wheel movement is suitable for use in difficult conditions.*

**Key words:** *physical-mathematical model, force, oscillatory motion, potential energy, kinetic energy.*

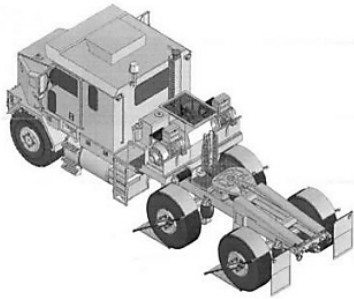
**Formulation of the problem.** The energy of forward movement of a car with a variable chassis geometry can be an indicator of its energy level. When used in difficult conditions, more advanced technologies are used to use its energy to support gradual movement. To maintain the established movement of a vehicle with a variable chassis geometry, its speed must be supported by the "transition" of kinetic energy into potential energy and vice versa [1, 2, pp. 1–3].

Highlighting previously unresolved parts of the overall problem.

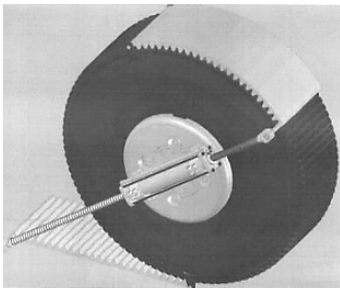
Modern cars with variable chassis geometry use a higher level of tangential traction force to perform the process of gradual movement, which occurs when the wheel driver contacts the supporting surface and acts directly on the wheel driver. In the absence of reaction of the support surface, there is no tangential traction force. For its restoration, more detailed structural improvements of the wheel drive are needed in order to forcibly create the reaction of the support surface, and thereby the tangential traction force.



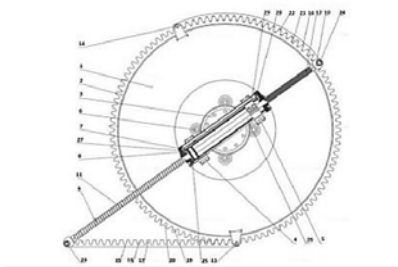
**Fig. 1.** The mobile device is made according to the declarative patent "Frog" method of moving a mobile energy device designed by L.M. Petrova": 1 – wheeled motor; 2 – toothed protector; 3 – hub; 4,5 – clamps; 6 – control cylinder; 7 – body; 8 – piston; 9, 10 – rods; 11, 12 – springs; 13,14 – tread joints; 15, 16, 19, 21 – teeth; 17, 18, 20, 22 – depressions; 23, 24 – hinges; 25, 26 – cavities; 27, 28 – holes; 29 – wire



**Fig. 2.** General appearance of a car with advanced wheel drives

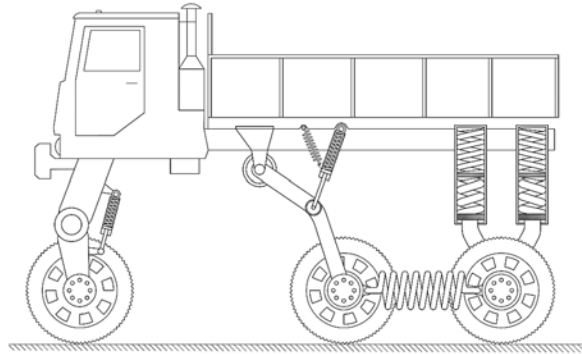


**Fig. 3.** The general appearance of the wheel drive according to the declarative patent “Petrov-Borysenko method of increasing the patency of the traction and transport system”



**Fig. 4.** Drawing according to the Petrov-Borysenko method, regarding the improvement of the traversability of the traction and transport system

We have proposed constructive improvements of a car with a variable chassis geometry, where a moving wheel is proposed in the chassis, the purpose of which is to convert potential energy into kinetic energy and vice versa, and thus the wheels of a car with a variable chassis geometry roll over the support surface (Fig. 5) [3, pp. 125–136], [4, pp. 85–94].

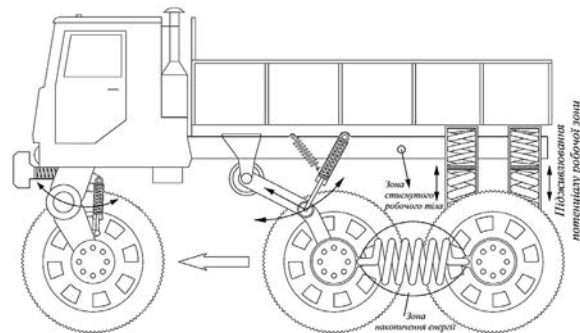


**Fig. 5.** Model model of a car with variable chassis geometry

Setting objectives

The task of creating the proposed car with a variable chassis geometry is the selection and justification of the deflection angles of the movable wheel of the chassis, the deflection angle of which affects the realization of the energy indicators of the technical capabilities of the car with a variable chassis geometry.

**Presentation of the main research material.** We conducted theoretical studies of the oscillating motion of the free wheel of the chassis of a car with variable geometry of the chassis (Fig. 6) in order to identify the motion parameters of the proposed structure in any operating conditions.



**Fig. 6.** Physical model of a car with variable chassis geometry

In order to simplify the theoretical studies of the oscillatory motion of the free wheel of the chassis, we present a simplified physical model of a car with a variable geometry of the chassis (Fig. 7).

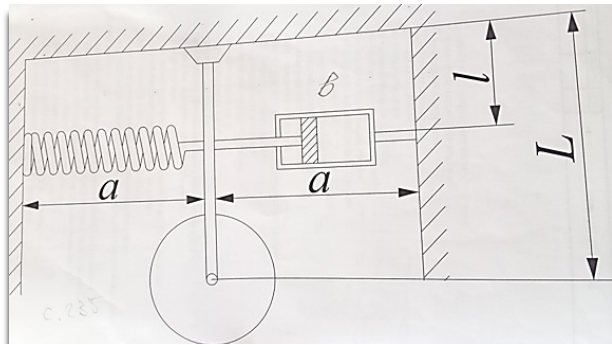


Fig. 7. A simplified physical model of a car with a variable chassis geometry

As a generalized coordinate, we take the angular deviation of the moving wheel (Fig. 8) from its position with contact in the support surface –  $\varphi$ . As an excess coordinate, we use the amount of lifting the wheel up to the frame by the amount –  $y$ .

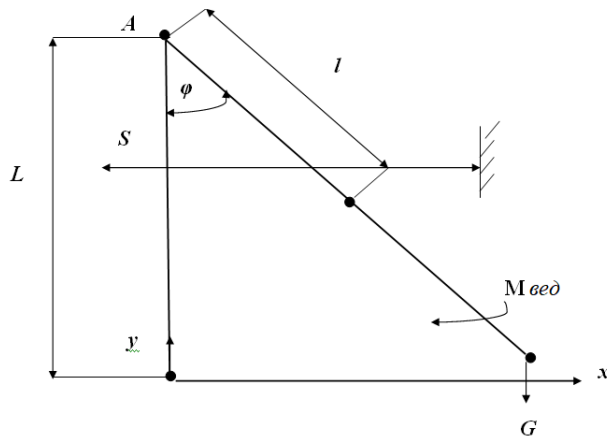


Fig. 8. Drawing for calculating the generalized coordinate of the angular deviation of the moving wheel

Let's write the equation of moments relative to hinge A, which is a fixed point of the system – the point of suspension to the frame of the moving wheel:

$$M_{вездн} + M_{кол} + M_{инер} = 0$$

$$M_{вездн} = -mg \cdot l \cdot \sin \varphi$$

We will take into account that the angle is small, then

$$M_{вездн} = -mg \cdot l \cdot \varphi$$

Moment of the wheel –  $M_{кол}$  we will neglect

$$M_{кол} = 0$$

The moment of inertia of the moving wheel together with the suspension:

$$M_{инер} = -I \cdot \varphi'' = -m l^2 \cdot \varphi''$$

The equation of motion of the wheel together with the suspension will look like this

$$mgl \cdot \varphi - m l^2 \cdot \varphi'' = 0$$

To check the created mathematical model, we use the Lagrange equation, the components of the energy of the suspension wheel will have the form:

– kinetic energy

$$T = y \cdot \frac{(\varphi'')^2}{2} = m l^2 \cdot \frac{(\varphi')^2}{2}$$

– potential energy

$$\Pi = mg \cdot h = mg \cdot y,$$

where  $y$  – is the lifting height of the wheel (excessive coordinate)

$$y = l - l \cdot \sin(\varphi) = 2l \cdot \sin^2\left(\frac{y}{2}\right)$$

At small angles

$$y = l \cdot \frac{\varphi^2}{2}$$

Then the expression for the potential energy will have the form

$$\Pi = mg \cdot l \cdot \frac{\varphi^2}{2}$$

The general Lagrange equation has the form

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} + \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi} + \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi} = Q_{зовн} \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} = m l^2 \cdot \varphi';$$

$$\frac{\partial L}{\partial t} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) = m l^2 \cdot \varphi''$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\varphi}} = 0$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \varphi} = m \cdot g \cdot l \cdot \varphi$$

Then the equation of motion will have the form:

$$m \cdot g \cdot l \cdot \varphi - m \cdot l^2 \cdot \varphi'' = 0$$

Changing the position of the wheel relative to the support surface:

$$y = L(1 - \cos \varphi)$$

at small deviation angles

$$y = L \cdot \frac{\varphi^2}{2}$$

The amount of displacement of the point of attachment of the elastic element and the damper  $l_g = l \cdot \sin \varphi$  at small angles  $\varphi$ :  $l_g \cong l \cdot \varphi$

Within the limits of small deviations, the deformation of the elastic element will be considered to be close to the amount of displacement,  $l_g$

As a basis for calculations, we will use the Lagrange equation (1) Kinetic energy of the proposed system:

and potential energy of the system



$$T = \frac{Y_{\text{кол}} \cdot (\varphi')^2}{2} = \frac{m l^2 \cdot (\varphi')^2}{2} \quad (2)$$

$$\Pi = m \cdot g \cdot y + \frac{c l_z}{2} = \frac{m \cdot g \cdot L \cdot \varphi^2}{2} + \frac{c \cdot l^2 \cdot \varphi^2}{2} = (m \cdot g \cdot L + c \cdot l^2) \cdot \frac{\varphi^2}{2} \quad (3)$$

Energy of the generalized deflection angle of the moving wheel:

$$\Phi = \frac{\sigma \cdot l^2 (\varphi')^2}{2} \quad (4)$$

The derivatives of (2, 3, 4) would have the form

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \varphi'} &= m L^2 \varphi' \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \varphi'} \right) &= m L^2 \cdot \varphi'' \\ \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi} &= 0, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \varphi} = (m \cdot g \cdot L + c \cdot l^2) \cdot \varphi$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \varphi'} = \sigma \cdot l^2 \cdot \varphi'$$

The equation of motion of the car will look like this:

$$m \cdot L^2 \cdot \varphi'' + \sigma \cdot l^2 \cdot \varphi' + (m \cdot g \cdot L + c \cdot l^2) \varphi = 0$$

The canonical form of this equation has the form

$$\varphi'' + 2n \cdot \varphi' + p^2 \cdot \varphi = 0;$$

where  $2n = \frac{\sigma \cdot l^2}{m \cdot L}$  – relative damping coefficient;

$p^2 = \frac{(m \cdot g \cdot L + c \cdot l^2)}{m \cdot L^2}$  – natural frequency of the system.

If the coefficients  $n$  i  $p$  are permanent, and  $n > p$  then

$$\varphi(x) = c_1 e^{-(n+i\sqrt{n^2-p^2})x} + c_2 e^{-(n-i\sqrt{n^2-p^2})x}$$

If  $n < p$ , then  $i = \sqrt{-1}$

$$\varphi(x) = c_1 e^{-(n+i\sqrt{p^2-n^2})x} + c_2 e^{-(n-i\sqrt{p^2-n^2})x}$$

or

$$\varphi(x) = c_1 e^{-nx} (\cos \beta x - \sin \beta x) + c_2 e^{-nx} (\cos \beta x + \sin \beta x),$$

where  $\beta = \sqrt{p^2 - n^2}$  – generalized damping coefficient, natural frequency of the system.

$$\varphi(x) = e^{-nx} (c_3 \cos \beta x + c_4 \sin \beta x),$$

де  $\beta = \sqrt{p^2 - n^2}$ , де  $c^1, c^2, c^3, c^4$  – невідомі коефіцієнти, що визначаються початковими умовами.

If  $\varphi(x)=0$ , then

$$\varphi(x) = c_1 \left( e^{-(n+\sqrt{n^2-p^2})x} - e^{-(n-\sqrt{n^2-p^2})x} \right)$$

$$\varphi(x) = c_2 e^{-nx} \sin \beta x, \text{ where } \beta = \sqrt{p^2 - n^2}$$

### Conclusions

1. The design of an improved car with variable undercarriage geometry is proposed, with the undercarriage of an additional movable wheel, the purpose of which is to convert potential energy into kinetic energy and vice versa, and thus the wheels of a car with a changed undercarriage geometry roll over a support surface.

2. The substantiation of the angles of deviation of the movable wheel of the chassis, the angle of deviation of which affects the implementation of the energy indicators of the technical capabilities of the car with a changed geometry of the chassis, has been substantiated.

3. The deviation angle  $\varphi$  of the movable wheel is more influenced by the natural frequency of oscillation of the movable wheel than the relative damping coefficient.

### Bibliography:

- Петров Л.М. «Спосіб удосконалення обертального руху колісного приводу автомобіля. Київ: Патент № 42929, Бюл. № 7, 2009, 1–3 с.
- Петров Л. М. «Спосіб переміщення мобільного енергетичного засобу» Київ: Патент № 96475, Бюл. № 1, 2014, 1–3 с.
- Колпахчян П.Г., Заріфян А.А. «Дослідження режимів роботи асинхронного тягового приводу методом комп'ютерного моделювання» Постановка задачі та комп'ютерна модель. «Транспортні проблеми». Міжнародно-технічна конференція, Харків:10, 2015, с. 125–136.
- Молодан А.О. «Метод визначення додаткових витрат енергії викликаних нерівномірністю крутного моменту руху при відключенні циліндрів». Вісник машинобудування та транспорту: Харків: № 2, 2018, с. 85–94.

### Петров Л.М., Кішянус І.В., Верпівський С.М., Малиновський О.А., Нікішин В.А., Шелухін С.В. КОНСТРУКТИВНІ МОЖЛИВОСТІ З ПЕРЕМІННОЮ ГЕОМЕТРІЄЮ ХОДОВОЇ ЧАСТИНИ

У статті розглянуті питання дослідження елементів теорії військового автомобіля для автомобіля з перемінною геометрією ходової частини зі змінням колісної формули ходової частини. Дослідження автомобіля з перемінною геометрією ходової частини було пов'язано з застосуванням рівняння Лагранжа В якості узагальненої координати було прийнято кутівий зсув рухливого колеса від його положення з контактом у опорній поверхні –  $\varphi$ . В якості надлишкової координати було використано величину підйому колеса вгору до рами на величину –  $y$ . Також, було складено рівняння моментів відносно шарніра, який є нерухомою точкою системи – точкою підвісу до рами рухливого колеса. Для

рішення рівняння Лагранжа було використано теореми про зміну кінетичної та потенційної енергії такого рухливого колісного рушія.

Метою дослідження є створення технологічної схеми рухливого колісного рушія при передачі енергії коливального руху колісного рушія за рахунок «переходу» кінетичної в потенційну енергію та навпаки за рахунок пружних елементів виконаних по спеціальній геометрії зі створенням переносної сили, яка діє на раму автомобіля з перемінною геометрією ходової частини і є допоміжним фактором до інноваційної технології його переміщення.

Науковий та практичний напрям роботи полягає в тому, що вперше запропоновано технологія для автомобіля з перемінною геометрією ходової частини, в якій його переміщення по дорозі застосований «перехід» потенційної енергії в кінетичну шляхом коливального руху колеса, зв'язаний з рамою автомобіля з перемінною геометрією ходової частини пружними елементами виконаних по спеціальній геометрії.

Результатом дослідження є розробка елементів теорії автомобіля з перемінною геометрією ходової частини з рухливим колесом що дозволяє створити конструкцію перспективного автомобіля з перемінною геометрією ходової частини з коливальним колесом, а тим самим запропонувати підвищену рухливість для автомобіля з перемінною геометрією ходової частини.

Дослідження дозволять зробити внесок в галузь автомобільного виробництва.

Запропонована модель автомобіля з перемінною геометрією ходової частини з коливальним рухом колеса придатним для використання в складних умовах.

**Ключові слова:** фізико-математична модель, сила, коливальний рух, потенційна енергія, кінетична енергія.

УДК 627.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/41>**Пліта Л.Л.**Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій**Іваненко В.М.**Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій**Федунов В.М.**Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій**Трофименко І.В.**Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИЗНАЧЕННЯ ЦІЛІСНОСТІ СУЧАСНИХ ІНТЕГРОВАНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Метою статті є дослідження особливостей визначення цілісності сучасних інтегрованих навігаційних систем для підвищення безпеки забезпечення споживача інформацією про місцезнаходження судна та відображення її на електронних картах. Поставлена мета досягається шляхом аналізу джерел інформації щодо питань цілісності сучасних інтегрованих навігаційних систем в морській сфері, зокрема кібербезпеки морських систем. Встановлено, що сучасні судові мостики і морські операції вже зазнали революції завдяки комп'ютеризованим системам. Ключовими компонентами є інтегровані навігаційні системи та системи відображення електронних карт та інформації, які забезпечують споживача інформацією про місцезнаходження судна та відображення її на електронних картах. Хоча цілісність цих систем має вирішальне значення для безпеки морських операцій, вона залишається недостатньо вивченою. Цілісність передбачає здатність системи швидко і точно попереджати користувачів про неможливість виконання вимог точності. Однак у новій літературі з морської кібербезпеки мало обговорюється це питання. Більшість загальних публікацій, які застосовують загальні принципи кібербезпеки до морських систем. Посилання на морські інциденти, атаки й уразливості не містять достатньої інформації і часто повторюються в різних джерелах. У даній статті розглянуто цілісність навігаційних систем, проаналізовано можливості інтегрованих навігаційних систем, а також випадки кібератак на навігаційні системи. Найбільш суттєвим результатом є запропонований загальний прототип інтегрованих навігаційних систем та визначені вимоги до можливих криптографічних контрзаходів щодо захисту цілісності навігаційних даних в інтегрованих навігаційних системах. При цьому визначено також два можливих варіанти втілення криптографічних контрзаходів: простіше рішення з відкритим ключем та рішення на основі ідентифікації, яке використовує апаратні модулі безпеки. Хоча повна безпека недосяжна, застосування криптографічних контрзаходів може потенційно поліпшити цілісність інтегрованих навігаційних систем.

**Ключові слова:** інтегрована навігаційна система, цілісність, електронна карта, судно, прототип, кібербезпека, криптографічні контрзаходи.

**Постановка проблеми.** Сучасні судна оснащені інтегрованими мостиковими системами (IBS) (рис. 1). IBS являє собою комбінацію систем, які взаємопов'язані для забезпечення централізованого доступу до сенсорної або командно-керуючої інформації з робочих станцій з метою підвищення безпеки та ефективності управління суднами відповідним кваліфікованим персоналом [1].

Іншими словами, IBS – це інтеграція систем, яка дозволяє контролювати і контролювати судно і його роботу з мостика.

До інтегрованих систем зазвичай входять навігаційні системи, системи зв'язку та системи управління двигуном, але й іноді також системи спостереження тощо. Ці комп'ютеризовані судові мостики являють собою технологічну



Рис. 1. Приклад інтегрованої мостикової системи судна

революцію для морського судноплавства. Історично склалося так, що основним завданням для штурмана було знайти і зафіксувати положення судна, в той час як сучасний штурман стежить за положенням, застосовуючи дані, отримані навігаційними датчиками судна, та представлене навігаційне програмне забезпечення [2].

У даній статті розглядаються саме навігаційні системи. Морські навігаційні системи, пов'язані через бортові мережі, називаються інтегрованими навігаційними системами (INS) [3]. В INS датчики, що використовуються в навігації, такі як GPS, гіроскоп, датчики глибини і т. д., підключаються до робочих станцій, оснащених програмним забезпеченням для відображення електронних карт, відомим як Electronic Chart Display and Information Systems (ECDIS) [4]. Програмне забезпечення ECDIS показує положення судна на карті за допомогою даних навігаційних датчиків, а також положення суден, що знаходяться поруч, на основі даних, отриманих через систему автоматичної ідентифікації (AIS) [5]. Крім того, програмне забезпечення ECDIS має функціонал для планування маршрутів і моніторингу маршрутів.

Очевидно, що забезпечення цілісності INS відіграє важливу роль у забезпеченні безпечних і надійних морських операцій. Цілісність тут означає здатність системи швидко і точно попереджати користувачів про неможливість виконання вимог точності. Однак у новій літературі з морської кібербезпеки мало обговорюється це питання. Більшість загальних публікацій, які застосовують загальні принципи кібербезпеки до морських систем. Посилання на морські інциденти, атаки й уразливості не містять достатньої інформації і часто повторюються в різних джерелах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Загальні питання цілісності INS в морській сфері розглядаються, наприклад, в роботах [2], [6], [7]. Так, у статті [2] визначено, що інформаційно-комунікаційні технології, а також операційні тех-

нології на борту суден все частіше об'єднуються в мережі і все більше підключаються до мережі Інтернет. Впровадження кіберсистем змінює робоче середовище для зниження навантаження на навігатор, але в той же час створює додаткові складності і вразливості, які, в свою чергу, можуть змінити компетенції, необхідні для безпечного й ефективного плавання. Сучасними прикладами цього є кібератаки, які можуть спотворити ситуаційну обізнаність і перешкодити визначеним морським операціям. У даній статті демонструються деякі з можливих векторів атаки, які кібератака може представляти для судна, а також обговорюється ймовірність і наслідки таких атак.

Питання кібербезпеки морських систем розглядаються, наприклад, в роботах [8–11]. Так, у роботі [11] визначено, що кібератаки швидко зростали протягом багатьох років, що призвело до великих фінансових втрат для бізнесу через відновлення, санкції з боку регуляторів та супутні збитки, такі як репутація та довіра. У зв'язку з цим морський сектор, який досі вважався безпечним через відсутність підключення до Інтернету та ізольований характер суден у морі, спостерігає 900-відсоткове збільшення порушень кібербезпеки в операційних технологіях, коли він вступає в цифрову епоху. Безпосередньо у даній статті проведено детальне дослідження кібербезпеки в морській галузі з метою виявлення проблем та викликів безпеці. По-перше, автор досліджує системи на суднах, які можуть стати мішенню зловмисників, їх можливі вразливості, якими може скористатися зловмисник, наслідки в разі доступу до системи і реальні інциденти. Потім автор описує та аналізує можливі дії щодо пом'якшення наслідків, які можуть бути заздалегідь використані для запобігання таким атакам. Нарешті, обговорюється кілька проблем і відкритих питань для майбутніх досліджень.

**Метою статті** є дослідження особливостей визначення цілісності сучасних інтегрованих навігаційних систем для підвищення безпеки забезпечення споживача інформацією про місцезнаходження судна та відображення її на електронних картах.

**Викладення основного матеріалу.** Дослідження особливостей визначення цілісності сучасної INS в даній статті здійснюється відповідно до таких етапів:

1) вивчення можливостей сучасних INS в рамках таких рішень:

– робочі станції (включаючи операційні системи);

- інтеграція датчиків;
  - мережі передачі даних (включаючи протоколи зв'язку);
  - радар;
  - автопілот;
  - підключення до мережі Інтернет;
- 2) дослідження кібербезпеки в рамках використання INS (включаючи атаки та інциденти);
- 3) визначення криптографічної цілісності та контрзаходів в INS.

INS – це інтеграція навігаційних датчиків з робочими станціями, оснащеними ECDIS. У теперішній час існує широкий спектр пропонувананих рішень в цій області. Усі розробники проводять чітке розмежування між INS і IBS – можливо, тому, що навігація є невід'ємною частиною повсякденної роботи на містку. Для того щоб мати критерій включення або виключення системи будь-якого розробника, визначимо мінімальну вимогу, яка полягає в тому, що відповідний виріб повинен містити принаймні навігаційне обладнання (наприклад, робочі станції та датчики) та навігаційне програмне забезпечення (наприклад, ECDIS). Це можна розглядати як робоче визначення INS для даного дослідження, хоча воно відрізняється від визначень, даних Міжнародною морською організацією (ІМО) [3].

Традиційно станції INS надають робочі місця для екіпажу на мостіку. Це, в першу чергу, автономні комп'ютери, на яких працює локальне програмне забезпечення, тобто те, що називається «товстими клієнтами». У деяких рішеннях ці робочі станції є консолями ECDIS, призначеними тільки для відображення карт. У той час інші рішення пропонують багатофункціональні робочі станції (MFW), які часто називають багатофункціональними дисплеями (MFD). Вони фактично є робочими станціями, які дозволяють оператору перемикатися між дисплеєм ECDIS і радарним дисплеєм. Деякі з рішень – це інфрачервоні системи на основі мостів, які інтегрують інші системи на додаток до навігаційних систем, але в більшості випадків MFW все ще є навігаційними робочими станціями, що забезпечують ECDIS, радар та дисплеї, тоді як інші функції, такі як управління двигуном, мають окремі робочі станції/консолі. Більшість рішень використовують операційну систему Microsoft Windows, а деякі рішення – операційну систему Linux.

Основною особливістю INS є інтеграція, інтерпретація та представлення сенсорного введення в навігаційне програмне забезпечення, таке як ECDIS. Під інтеграцією датчиків маються на увазі

засоби, за допомогою яких дані з датчиків, таких як GPS, гіроскоп, ехолот або приймач AIS, передаються на робочі станції. Ці датчики мають послідовний вихід, який зазвичай відповідає стандарту IEC 61162-1/NMEA 0183 для морських навігаційних пристроїв. Переважна більшість існуючих рішень передбачає наявність своєрідного блоку інтеграції датчиків, які часто називаються по-різному: блок розподілу даних, блок збору даних, блок концентрації датчиків і т. д. Спільним для цих пристроїв є те, що вони отримують дані від навігаційних датчиків через послідовні інтерфейси і забезпечують єдине джерело даних датчиків для робочих станцій. Деякі рішення не мають блоків інтеграторів датчиків, і при цьому датчики мають прямі послідовні з'єднання з робочими станціями.

Одним з рішень є автономна робоча станція ECDIS з датчиками, підключеними до послідовних портів. Однак будь-яке рішення, більш складне, ніж це, вимагає різних компонентів, що взаємодіють певним чином. Тобто, інші рішення так чи інакше об'єднані в мережу. Їх мережі з'єднують блоки інтеграції датчиків з робочими станціями. Вони підключають робочі станції для обміну даними (наприклад, дані датчиків, маршрути та оновлення карт), і далі – підключають INS до інших бортових систем, наприклад, до системи зв'язку судна. Точна конфігурація варіюється, але в більшості рішень мережа є різновидом IP Ethernet LAN мережі. Крім того, в автономному рішенні робоча станція оснащена портами Ethernet, які забезпечують роботу в IP-мережі. Тобто Ethernet на базі IP є домінуючою мережевою технологією в навігаційних мережах. Іншими рішеннями є мережа CAN-шини, багатопрофільна система послідовної шини, яка була спочатку розроблена автомобільною промисловістю для використання в автомобілях. У багатьох рішеннях мережі, що з'єднують блоки інтеграції датчиків з робочими станціями, описуються як подвійні або резервні.

За протоколи зв'язку в навігаційних мережах використовуються протоколи TCP і UDP, які дотримуються стандарту IEC 61162-450 “Lightweight Ethernet (LWE)” для судових мереж. LWE заснований на одній комутованій багатоадресній передачі Ethernet і UDP.

Багато рішень реалізують радіолокаційну інтеграцію. Радар відрізняється від інших типів датчиків в INS тим, що його дані представляються у вигляді зображень, в той час як інші датчики передають числові та текстові дані. За цієї

причини дані від радарів обробляються інакше, ніж від інших датчиків. Тому радар дуже рідко підключається до блоку інтеграції датчиків. Деякі рішення мають радари, підключені до робочих станцій через окрему мережу або через мережу, що і блоки інтеграції датчиків, або радар підключається безпосередньо до робочих станцій якимось іншим способом.

Особливістю, описаною в декількох рішеннях, є інтеграція автопілоту з функціональністю планування маршруту програмного забезпечення ECDIS, тобто можливість автопілоту керувати судном за маршрутом, визначеним в ECDIS. Це, очевидно, означає, що блок автопілоту повинен отримувати команди від робочої станції, і надається опис, як команди передаються по мережі.

Навігаційні карти оновлюються регулярно. Тому навігаційні системи повинні отримувати регулярні оновлення карт. Крім того, стороннє програмне забезпечення, таке як операційна система Windows, також потребує регулярних оновлень і виправлень. Зазвичай оновлення інсталиються за допомогою фізичних носіїв. Однак зараз судна все частіше оснащуються супутниковим підключенням до Інтернету та / або ширококутовим доступом 4G (для використання під час плавання поблизу берега). У той же час деякі рішення пропонують можливість надання підключення INS до Інтернету для онлайн-оновлень карт, в більшості випадків шляхом надання шлюзу від мережі INS до системи зв'язку судна.

Таким чином, хоча існують відмінності в конкретних конфігураціях різних INS, можна виділити ряд типових особливостей. Приклад уза-

гальненого прототипу INS показаний на рис. 2. Типовою ситуацією є те, що один або кілька Ethernets використовуються для підключення різних компонентів INS: багатофункціональні робочі станції, блок інтеграції датчиків (іноді два для резервування), радар і автопілот тощо. Крім того, судно може мати шлюз для інших систем, які також можуть підключатися до інтернету.

Найбільшою проблемою щодо навігаційних систем досі була загроза підміни GPS, коли навігаційні системи обманюються шляхом передачі помилкових сигналів GPS. Хоча підміна GPS може становити загрозу цілісності положення GPS, розрахованого приймачем GPS судна, і, таким чином, загрозу цілісності положення, що відображається на електронних картах судна, вона не є загрозою цілісності самого INS.

Однак існують і приклади серйозних загроз цілісності навігаційних систем:

- при оновленні карт e-lectron за допомогою USB-накопичувачів консоль ECDIS на борту може бути заражена шкідливим програмним забезпеченням;

- INS все частіше підключаються до Інтернету для оновлення карт в Інтернеті, відомі реальні випадки атак на навігаційне програмне забезпечення.

У той же час, наприклад, в резервній програмі можна перехоплювати і маніпулювати GPS координатами, що передаються на робочу станцію з блоком інтеграції датчиків по мережі. Таким чином, шкідливе програмне забезпечення може змінити положення, яке з'явилося в програмному забезпеченні ECDIS. Відомі результати експери-

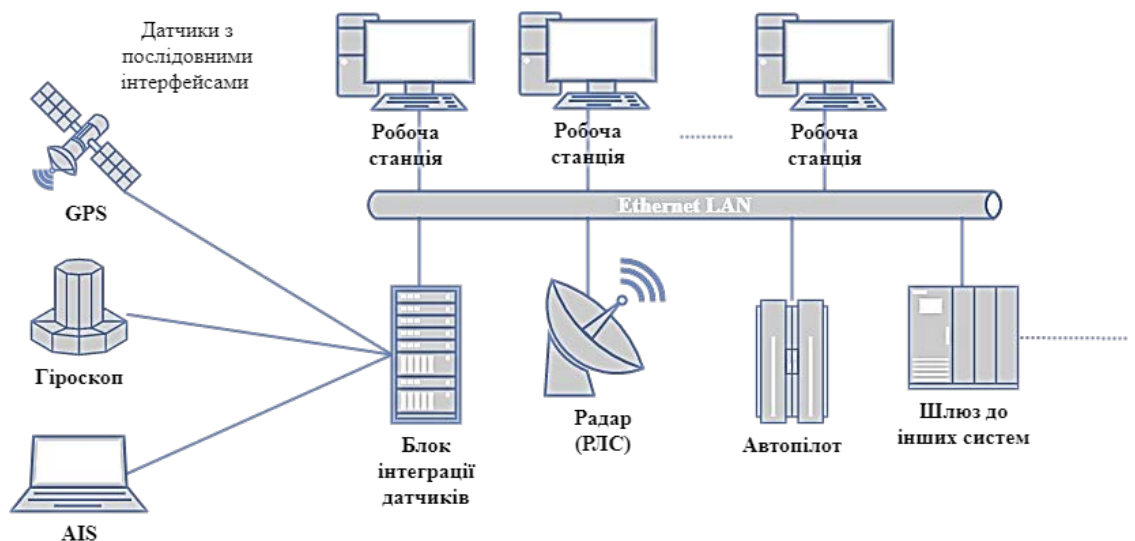


Рис. 2. Прототип інтегрованої навігаційної системи

ментів з підключенням комутатора до мережі INS. Моделювання з внесенням хибних GPS координат в мережі показує, що робочі станції не можуть відрізнити ці координати від GPS-координат, надісланих блоком інтеграції датчиків. Крім того, збільшивши частоту передачі, можна фактично перевизначити блок інтеграції датчиків.

Стандарти продуктивності INS ІМО вимагають, щоб системи контролювали цілісність у формі порівняння інформації між надлишковими джерелами навігаційних даних. Хоча цього може бути достатньо для захисту від несправних пристроїв, цього недостатньо для захисту від кібератак. Якщо INS скомпрометовано, не можна маніпулювати даними з кількох джерел.

Розглянемо потенційні засоби захисту цілісності даних в INS. Обмеженням є використання даних  $x$ , що передаються від блоку інтеграції датчиків до робочих станцій, хоча подібні проблеми можуть стосуватися даних, що надсилаються з радара на робочі станції, між робочими станціями або з робочих станцій на автопілот. На основі прототипу INS, показаного на рис. 2, і потенційних кіберзагроз можна вивести певні вимоги до криптографічних контрзаходів (set of cryptographic countermeasures), які формально представимо у вигляді такого кортежу

$$SCC = CC_i, i = \overline{1,5}, \quad (1)$$

де  $CC_1$  – вимога, яка обумовлена тим, що дані поширюються за допомогою мультиадресної передачі. Тому контрзаходи повинні бути придатними для мультиадресної передачі;

$CC_2$  – вимога, яка обумовлена тим, що контрзаходи повинні бути ефективними як для автономних, так і для підключених до Інтернету систем;

$CC_3$  – вимога, яка обумовлена тим, що контрзаходи повинні захищати від атак, пов'язаних з маніпулюванням або фабрикацією навігаційних даних;

$CC_4$  – вимога, яка обумовлена тим, що контрзаходи повинні захищати від повторних атак (навігаційні дані збираються і передаються пізніше);

$CC_5$  – вимога, яка обумовлена тим, що хоча блок інтеграції датчиків може вважатися апаратним пристроєм, робочі станції слід вважати звичайними комп'ютерами під управлінням (потенційно старих і невіправлених) операційних систем. Тому вкрай важливо, щоб контрзаходи забезпечували захист навіть у випадках, коли робочі станції скомпрометовані.

Вимоги  $CC_1$  і  $CC_3$  вказують на рішення, яке використовує криптографію з відкритим ключем. Відправник (тобто блок інтеграції датчиків) криптографічно підписує повідомлення закритим ключем,

тоді як кілька одержувачів (робочі станції) перевіряють підписи, використовуючи копію відповідного відкритого ключа. Вимогу  $CC_4$  можна отримати, включивши порядковий номер або мітку часу в підписані повідомлення. Вимога  $CC_2$  містить стандартне рішення інфраструктури відкритих ключів (PKI), засноване на онлайновому центрі сертифікації (CA). На основі інформації від бездротових сенсорних мереж (WSN) виділяють два основних варіанти:

– варіант 1 – спрощене рішення PKI з одним кореневим CA;

– варіант 2 – схема підпису на основі ідентифікації.

У варіанті 1 генерується ключ і встановлюється в блок інтеграції датчика – пара захищеного ключа (SK) і відкритого ключа (PK). PK підписується захищеним ключем SK автономного кореневого CA (наприклад, постачальника INS або судновласника) для отримання сертифіката С для блоку інтеграції датчиків. Сертифікат С встановлюється в блок інтеграції датчиків і розподіляється по мережі на робочі станції. Сертифікат ССА CA встановлюється на робочих станціях, які використовують ССА для перевірки С та перевірки повідомлень від блоку інтеграції датчиків.

Варіант 2 – це схема підпису на основі ідентичності. У цій схемі закритий ключ SK генерується автономним центром генератора ключів (знову ж таки, постачальником або судновласником INS), випадково відомим лише хабу, та ідентифікатором блоку інтеграції датчиків (наприклад, серійним номером або MAC-адресою). Як і у варіанті 1, PK встановлюється в блок інтеграції датчика, який використовує його для підписання повідомлень. На відміну від варіанту 1, другий тип ідентифікації сам по собі є відкритим ключем; сертифікат не потрібен, оскільки він може бути автентифікований шляхом перевірки. А ідентифікація блоку інтеграції датчиків встановлюється на робочі станції і використовується для перевірки повідомлень блоку інтеграції датчиків.

В обох випадках цілісність сканерів (ССА має місце у варіанті 1 та ідентифікація блоку інтеграції датчиків у варіанті 2) повинна бути забезпечена після установки на робочі станції, але вимога  $CC_5$  не дозволяє покладатися на їх операційну систему для цього. Можливим рішенням може бути зберігання цих значень у захищених від несанкціонованого доступу апаратних модулях безпеки (HSM), з яких програмне забезпечення ECDIS може витягти їх (або, можливо, перевірити в безпечному середовищі). Використання знімних HSM також

може полегшити розповсюдження та встановлення сертифікатів безпеки або посвідчень.

Очевидно, що жоден із запропонованих варіантів не може гарантувати 100% цілісність навігаційних даних. Оскільки робочі станції можуть бути скомпрометовані, не може бути абсолютної гарантії безпеки. Якщо зловмисник може маніпулювати операційною системою робочих станцій, то він також потенційно може маніпулювати навігаційним програмним забезпеченням. Однак використання запропонованих криптографічних контрзаходів надасть додатковий рівень безпеки, тому що маніпулювати власницьким додатком ECDIS буде складніше, ніж маніпулювати недостатньо безпечною установкою операційної системи бортового комп'ютера. Таким чином, дані контрзаходи сприяють підвищенню безпеки системи, хоча і не можуть забезпечити стовідсоткову гарантію цілісності навігаційних даних.

**Висновки.** Оскільки сучасні морські судна замінюють традиційні паперові карти інтегрованими навігаційними та електронними системами відображення карт та інформації, цілісність цих

систем стає ще більш важливою для забезпечення безпеки морських операцій. У даній статті було проведено дослідження цілісності наявних в даний час інтегрованих навігаційних систем. Це було засновано на аналізі можливостей, що надаються ринком, а також на аналізі можливих кіберінцидентів й атак, які могли вплинути на цілісність навігаційних систем. Ці дослідження показують, що в цілому цілісність інтегрованих навігаційних систем недостатньо захищена.

Після аналізу інтегрованих навігаційних систем був запропонований узагальнений їх прототип. Цей прототип складає основу для виявлення криптографічних заходів, здатних підвищити цілісність захисту навігаційних даних в INS. У результаті представлений набір вимог і два можливих варіанти їх реалізації: спрощене рішення з відкритим ключем і рішення на основі ідентифікації, об'єднане з використанням апаратних модулів безпеки. Хоча гарантована безпека є недосяжною, передбачається, що використання криптографічних контрзаходів потенційно може поліпшити цілісність INS.

#### Список літератури:

1. Resolution MSC.64(67): Adaption of new and amended performance standars, International Maritime Organization (IMO), 1996.
2. Hareide O. S., Jøsok Ø., Lund M. S., Helkala K., Ostnes R. Enhancing navigator competence by demonstrating maritime cyber security. *Journal of Navigation*. 2018. No 71(5). P. 1-15.
3. Resolution MSC.252(83): Adoption of the Revised Performance Standard for Integrated Navigation Systems (INS), International Maritime Organization (IMO), 2007.
4. Resolution MSC.232(82): Adoption of the Revised Performance Standards for Electronic Chart Display and Information Systems (ECDIS), International Maritime Organization (IMO), 2006.
5. Norris A. Integrated Bridge Systems Vol 1: Radar and AIS. The Nautical Institute, 2008.
6. Demchak C., Patton K., Tangredi S. J. Why are our ships crashing? Competence, overload, and cyber considerations. *Center for International Maritime Security*, URL: <https://cimsec.org/ships-crashing-competence-overload-cyber-considerations/> (дата звернення: 23.04.23).
7. Jones K. D., Tam K., Papadaki M. Threats and impacts in maritime cyber security. *Engineering & Technology Reference*. 2016. DOI: 10.1049/etr.2015.0123
8. *The Coast Guard Journal of Safety & Security at Sea* : Proceedings of the Marine Safety & Security Council, Special Issue on Cybersecurity. Vol. 71. No. 4. U. S. Coast Guard, Winter 2014–2015.
9. Issues in Maritime Cyber Security / ed. by J. III Drenzo, N. K. Drumiller, F. S. Roberts. Westphalia Press, 2017. 602 p.
10. Lund M. S., Hareide O. S., Jøsok Ø. An attack on an Integrated Navigation System. *Necesse*. 2018. P. 149-163.
11. Frank Akpan, Gueltoum Bendiab, Stavros Shiaeles, Stavros Karamperidis, Michalis Michaloliakos. Cybersecurity Challenges in the Maritime Sector. *Network*. 2022. No 2(1). P. 123-138.

#### **Plita L.L., Ivanenko V.M., Fedunov V.M., Trofymenko I.V. STUDYING THE PECULIARITIES OF DETERMINING THE INTEGRITY OF MODERN INTEGRATED NAVIGATION SYSTEMS**

*The purpose of the article is to study the peculiarities of determining the integrity of modern integrated navigation systems to improve the security of providing consumers with information about the location of a vessel and displaying it on electronic charts. This aim is achieved by analyzing the sources of information on the integrity of modern integrated navigation systems in the maritime sphere, particularly the cybersecurity of maritime systems. It has been established that modern ship bridges and maritime operations have already*



---

*undergone a revolution due to computerized systems. The key components are integrated navigation systems and electronic chart and information display systems that provide the consumer with information about the vessel's location and display it on electronic charts. Although the integrity of these systems is critical to the safety of maritime operations, it remains poorly understood. The integrity of the transmission of the building of the system is fast and exactly ahead of the users about the impossibility of implementation could not be accurate. However, in the new literature on maritime cyber security, there is little discussion of food. More global publications, like stating global principles of cyber security to maritime systems. Forced on maritime incidents, attacks and frivolity do not retaliate for sufficient information and are often repeated in different seas.*

*This article discusses the integrity of navigation systems, analyses the capabilities of integrated navigation systems, and examines cases of cyber-attacks on navigation systems. The most significant result is the proposed general prototype of integrated navigation systems and the requirements for possible cryptographic countermeasures to protect the integrity of navigation data in integrated navigation systems. Two possible cryptographic countermeasures are identified: a simple public key solution and an identity-based solution using hardware security modules. Although complete security is not achievable, the use of cryptographic countermeasures can potentially improve the integrity of integrated navigation systems.*

**Key words:** *integrated navigation system, integrity, electronic chart, ship, prototype, cybersecurity, cryptographic countermeasures.*

**Пліта Л.Л.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Трофименко І.В.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Шевченко А.П.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Іваненко В.М.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОЕФІЦІЄНТА ПРОНИКНОСТІ РЕФРИЖЕРАТОРНОГО ВАНТАЖУ В РАЗІ ЗАТОПЛЕННЯ ВІДСІКУ СУДНА

Метою статті є дослідження впливу коефіцієнта проникності рефрижераторного вантажу в разі затоплення відсіку судна та аналіз затоплення аварійного відсіку та його впливу на стійкість і посадку рефрижераторних і риболовецьких суден. Поставлена мета досягається шляхом визначення основних показників та залежностей для визначення коефіцієнта проникності рефрижераторного вантажу в разі затоплення відсіку судна, аналізу організаційно-технічних заходів та безпосередньо процесу за незатоплюваність рефрижераторних і риболовецьких суден. Під час роботи було встановлено два основні факти про перевезення деяких вантажів у твердому замороженому стані. По-перше, зміна температури та оточуючого середовища може призвести до того, що такі вантажі перетворюються на «пульпу» (в даному випадку, суміші рідини і елементів вантажу) і змінюють свій фізичний стан. Ці вантажі належать до категорії двофазних. По-друге, відсіки з цими вантажами менш небезпечні та відносяться до першої категорії, тоді як відсіки з іншими категоріями є більш небезпечними. Аналіз затоплення аварійного відсіку та його впливу на стійкість і посадку судна виявив такі факти. Відсік другої категорії може бути значною загрозою, оскільки рефрижераторний вантаж у стані «пульпи» має коефіцієнт об'ємної ваги, що значно перевищує об'ємну масу морської води. Зміна стану вантажу з твердого на «пульпу» неминуче призводить до зміни коефіцієнта проникності приміщення, що необхідно враховувати при розрахунках стійкості та аварійної посадки судна. Час, необхідний для герметизації отвору в приміщенні з двофазним вантажем, має велике значення в боротьбі за непотоплюваність судна. Навіть незначні впливи навколишнього середовища, такі як вітер, можуть істотно вплинути на аварійну посадку та стійкість судна, оскільки перехід вантажу з твердого стану в стан «пульпи» є дуже чутливим до зовнішніх впливів. Найбільш суттєвим результатом є визначені основні математичні залежності, які забезпечують врахування зміни коефіцієнта проникності вантажу в разі затоплення відсіку рефрижераторних і риболовецьких суден та результати аналізу затоплення аварійного відсіку та його впливу на стійкість і посадку суден.

**Ключові слова:** судно, коефіцієнт проникності, стійкість, посадка, трюм, категорія, вантаж, незатоплюваність.

**Постановка проблеми.** Непотоплюваність судна, як показник його аварійного стану, не є самостійною характеристикою, а складається з таких елементів, як плавучість та стійкість. Для розрахунків аварійної посадки та стійкості судна використовується коефіцієнт проникності приміщення, який

відображає співвідношення обсягу приміщення, який може заповнитись водою при його повному затопленні, до його повного теоретичного обсягу. При цьому враховується осадка поділу на відсіки, що відповідає вантажній ватерлінії, що розділяє судно на відсіки. При цьому безпека судна в пошко-

дженому стані у значній мірі залежить від міцності і цілісності його водонепроникних перегородок. Існує множина факторів, що визначають розташування водонепроникних перегородок на судні й їх конструкцію. Водонепроникні перегородки – це вертикально спроектовані водонепроникні поділи / стінки в конструкції судна для запобігання потраплянню води в відсік, якщо сусідній відсік затоплений через пошкодження корпусу судна. Залежно від типу та розмірів судна визначаються різноманітні документи щодо аварійної посадки та стійкості судна, наслідків затоплення відсіків, схеми живучості тощо. Ці документи дозволяють враховувати вимоги, пов'язані з поділом на відсіки, оцінювати стан судна в разі затоплення відсіків, містити інформацію про результати розрахунку з урахуванням коефіцієнтів проникності приміщень, а також про заходи щодо збереження пошкодженого судна тощо.

Сьогодні залишається важливим питання врахування зміни коефіцієнта проникності рефрижераторного вантажу в разі затоплення вантажного відсіку, що може призвести до зміни аварійної стійкості та посадки в цілому саме рефрижераторних і риболовецьких суден. При цьому особливо важливими є ситуації, що відрізняються від типових випадків, описаних в нормативних документах про аварійну стійкість рефрижераторних і риболовецьких суден.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням дослідження стійкості до пошкоджень суден присвячено багато робіт, як нормативних документів, наприклад, [1–4], так і наукових досліджень, наприклад [5–7].

Так, у роботі [5] визначено, що імовірнісні розрахунки стійкості до пошкоджень вимагають багато часу і проводяться на пізній стадії процесу проектування. Для того, щоб розрахувати, чи відповідає судно вимогам, необхідна детальна схема. Щоб звести до мінімуму кількість ітерацій у процесі проектування, морські архітектори повинні знати, як водонепроникність впливає на досягнутий показник. Поздовжня перегородка крила танка в середній частині судна – це перегородка, яка застосовується на всіх морських суднах. Розміщення цієї перегородки, з точки зору максимізації досягнутого показника, було предметом обговорення в Wärtsilä Ship Design. Метою цієї дисертації було проаналізувати, як поперечне розташування перегородки поздовжнього крила танка впливає на досягнутий індекс. Ця інформація може бути використана для максимізації досягнутого індексу для морських суден. Щоб з'ясувати, чи пропорційно змінюється досягнутий

індекс для різних розмірів суден, у дослідженні визначено, чи існує кореляція між розташуванням перегородки і досягнутим індексом для чотирьох різних розмірів суден.

У статті [6] розглядається процедура проектування і нещодавні роботи, опубліковані на тему стійкості до пошкоджень і критеріїв оцінки безпеки, що встановлюються відповідно до неї. Наявні сценарії пошкоджень повинні бути розроблені до оцінки безпеки пошкодженого судна. Іншим аспектом дискусій є думка про деякі проблемні аспекти правил щодо остійності до пошкоджень, оскільки практичні аспекти, представлені в літературі, дуже рідкісні, а також той факт, що різні комп'ютерні програми можуть давати різні результати. Наведено невеликий огляд вимог до стабільності пошкоджень за новими правилами. Оцінка остійності виконується на обраному контейнеровозі за допомогою програмного забезпечення Maxsurf як для неушкодженого, так і для пошкодженого стану судна, в той час як параметри, пов'язані з остійністю, визначаються і класифікуються при розробці детермінованих і імовірнісних сценаріїв пошкоджень.

У роботі [7] надається повний опис і пояснення імовірнісного методу оцінки стійкості суден до пошкоджень від його концепції до сьогоденного дня з акцентом на ймовірність виживання (s-фактор), пояснюються відповідні припущення і обмеження, а також описується його еволюція для конкретного застосування до пасажирських суден з використанням сучасних чисельних і експериментальних інструментів і даних. У ньому також представлено порівняння результатів між статистичним і прямим підходами і надано рекомендації щодо того, як їх можна узгодити з кращим розумінням неявних припущень у підході для використання при проектуванні та експлуатації суден. Еволюція останніх років, спрямована на підтримку відповідних нормативних змін, пов'язаних з оцінкою ризику затоплення (рівня безпеки), а також дослідження в цьому напрямку з акцентом на пасажирські судна, створили новий фокус, який об'єднує всі небезпеки затоплення (зіткнення, посадка на дно і на борт) для оцінки потенційних людських жертв як засіб спрямування подальших досліджень і розробок щодо стійкості до пошкоджень для цього типу суден. На завершення документу надаються рекомендації щодо подальших кроків у сфері оцінки стійкості суден до пошкоджень і ризиків затоплення.

**Метою статті** є дослідження впливу коефіцієнта проникності рефрижераторного вантажу в разі зато-

плення відсіку судна та аналіз затоплення аварійного відсіку та його впливу на стійкість і посадку рефрижераторних і риболовецьких суден.

**Викладення основного матеріалу.** При розрахунках аварійної стійкості пошкодженого судна вплив вільної поверхні наливного вантажу, суднових запасів і баласту коригується так само, як і при розрахунках неушкодженого судна. Крім того, коефіцієнт проникності враховується при визначенні обсягу води, що потрапляє у вантажне приміщення  $M_v$ , згідно з виразом

$$M_v = V \delta_i \mu_j, \quad (1)$$

де  $V$  – геометричний об'єм води у вантажному просторі;

$\delta_i$  – питома вага морської води, що надходить в аварійний відсік;

$\mu_j$  – коефіцієнт проникності трюму з конкретним видом вантажу або без нього.

Зазвичай, для визначення зміни метацентричної висоти під впливом вільної поверхні використовується такий вираз:

$$H_m = \frac{x_j \delta_i}{\varepsilon}, \quad (2)$$

де  $x_j$  – момент інерції аварійного щодо осі абсциса;

$\varepsilon$  – водотоннажність судни.

При розрахунку амплітуди качки, крім інших параметрів, також враховується коефіцієнт проникності у вигляді виправленої метацентричної висоти для впливу вільної поверхні рідинного навантаження:

$$\tau_r = K Y_1 Y_2 \sqrt{r S}, \quad (3)$$

де  $K$  – коефіцієнт, що враховує вплив вилічного і стрижневого кіля, при відсутності кілів  $K = 1$ ;

$Y_1$  – безрозмірний показник, що визначається в залежності від співвідношення ширини до осадку;

$Y_2$  – безрозмірний показник, що визначається в залежності від коефіцієнта комплектності судна;

$r$  – параметр, що визначається за додатковим виразом в залежності від поділу на відсіки, при цьому значення не повинно бути більше 1;

$S$  – безрозмірний показник, що визначається в залежності від району плавання судна і періоду качки.

Щоб визначити рівень непотоплюваності судна, необхідно враховувати допустимий імовірнісний показник поділу на відсіки  $A$ , який враховує можливість виникнення бічного отвору внаслідок зіткнення або іншої причини. Для забезпечення необхідного ступеня поділу на відсіки  $R$ , яка гарантує непотоплюваність судна, має бути виконана така умова:

$$A \geq R. \quad (4)$$

Даний вираз визначає допустимий імовірнісний показник  $R_1$ :

$$R = \sum W_p, \quad (5)$$

де  $W_p$  – ймовірність затоплення відсіку або прилеглих відсіків при отриманні бортового навігаційного отвору;

$p$  – ймовірність збереження судна в разі затоплення відсіку або прилеглої приміщення.

Імовірність  $W_s$  затоплення відсіку, обмеженого поперечними перегородками, дорівнює

$$W_p = \alpha_p \rho_p, \quad (6)$$

де  $\alpha_p$  – величина, що визначає вплив на задану ймовірність положення відсіку по довжині судна;  $\rho_p$  – величина, що визначає ефект довжини відсіку з урахуванням закону розподілу довжини отвору.

Оцінка результатів затоплення відсіків та груп суміжних відсіків, що виконується шляхом розрахунків аварійної посадки і стійкості, проводиться шляхом підсумовування номерів цих відсіків. Для визначення необхідного показника поділу на відсіки використовується вираз

$$R = 1 - \frac{250}{L_s + (N_1 + N_2) / 4 + 375}, \quad (7)$$

де  $N_1$  – кількість осіб, забезпечених місцями в рятувальних шлюпках із загальної кількості осіб, що знаходяться на борту судна під час плавання;

$N_2$  – кількість людей (включаючи екіпаж), яких дозволено перевозити на борту понад  $N_1$ ;

$L_p$  – довжина поділу судна на відсіки; для вантажного судна найбільша теоретична довжина проєкції судна на палубу або нижче неї, що обмежує максимальну вертикальну довжину потопяючого судна,  $H_{max}$ .

У розрахунках, що виконуються для визначення ймовірностей  $p_i$ , в яких при осадці  $d_i$  визначаються коефіцієнт проникності вантажного простору  $\mu_i$ , які не повинні перевищувати 0,95 і не менше 0,60, і розраховуються за виразом:

$$\mu_i = 1 - 1.2(d_i - d_0) / d_p - 0.05(d_p - d_i) / (d_p - d_0), \quad (8)$$

де  $d_0$  – найнижча осадка, що відповідає мінімально можливому навантаженню судна, з урахуванням наливних вантажів, включаючи баласт;

$d_p$  – осадка за відсіками відповідно вантажної ватерлінії.

Якщо аварійна посадка відповідала вимогам до посадкових елементів і стійкості пошкодженого судна, а також додатковим вимогам до посадки і стійкості судна, то ймовірність для цього відсіку приймається за  $p_i = 1$ .

Проте, для будь-якого затоплення, яке відбувається під час проміжної стадії затоплення або

при випрямленні кута крену більше  $20^\circ$ , або кута, під яким отвори надходять у воду і поширюється вода, або коли завершальний етап затоплення містить палубу перегорожок, включаючи район затоплення відсіку або відсіків, або на завершальній стадії затоплення кут крену більше  $12^\circ$  і т. д., імовірність приймається за  $p_i = 0$ .

Таким чином, можна зробити висновок, що коефіцієнт проникності аварійного вантажного відсіку відіграє важливу роль як у розрахунку аварійної стійкості, так і у визначенні рівня непотоплюваності судна. Зокрема, коефіцієнт проникності для вантажних приміщень, включаючи рефрижераторні, має значення  $\mu = 0,6$ .

Слід зауважити, що досвід аналізу аварійних ситуацій, що стосуються рефрижераторних і риболовецьких суден, показує, що коефіцієнт проникності заморожених вантажів рефрижераторних приміщень не завжди відповідає величині відповідно до нормативних документів. Проблема полягає в тому, що отвір у судні при аварії не може бути негайно ліквідований, тому морська вода швидко потрапляє на борт. Для аналізу ситуації та мобілізації екіпажу судна потрібно багато часу. Відновлення судна потребує розвідки аварійного відділення, визначення розмірів пошкоджень, прийняття рішення про герметизацію отвору, підготовки необхідного обладнання та підручних засобів, а також безпечного зупинення судна та визначення місця дрейфування. Усі ці кроки забирають значний час, а також вимагають великої психологічної напруги від екіпажу судна, який потрапив у надзвичайну ситуацію.

При аналізі процесу забезпечення життєдіяльності на судні, зокрема у процесі виникнення отвору в трюмі, можна передбачити, що зміна осадки судна в напрямку збільшення може бути припинена, якщо продуктивність дренажної системи зможе впоратися з кількістю води, що надходить. Проте, якщо вимірювання показують продовження надходження води при осушенні аварійного трюму і збільшення осадки судна, це свідчить про значний розмір отвору або низьку продуктивність дренажної системи з яких-небудь причин. Наприклад, у повністю завантаженому холодильному приміщенні неможливо визначити розмір пошкоджень та їх розташування внутрішньо. У даному випадку можна лише здогадуватися про місце отвору, якщо вантаж упакований і є можливість використовувати простір між палубою та вантажем на висоті балки для доступу до передбачуваного місця пошкодження борту. Проте, цей підхід є надзвичайно небезпечним. Крім того, під-

дони заморожених продуктів мають позитивну плавучість і під час потоплення можуть плавати і впиралися в верхню частину палуби та виступаючі балки під палубою, стрингери тощо. При цьому, якщо в аварійному трюмі відсутній палетний вантаж, останній заповнить всі доступні під палубні простори.

Припускається, що в разі подальшого надходження води до пошкодженого приміщення, воно стане практично повністю затопленим, і туди уже не можна потрапити. Ймовірно, що дренажні насоси незабаром почнуть працювати, що призведе до підняття рівня води в трюмі через фізичну зміну стану вантажу. Це станеться, коли почнеться розморожування замороженого вантажу, що може призвести до пошкодження упаковки в трюмі та засмічення решіток колодязів та клапанів всмоктувальних трубопроводів. Однак, наявність насоса на борту може забезпечити часткове вирішення проблеми. Але стан боротьби за непотоплюваність стабілізується лише після того, як екіпаж зможе нанести латку на отвір. Розташування отвору нижче ватерлінії у вантажному районі з рефрижераторним вантажем неможливо визначити інструментальними способами через перераховані вище причини, але місцезнаходження пошкодження можна встановити на інтуїтивному рівні, ретельно проаналізувавши інформацію, отриману від безпосередніх свідків. Незважаючи на ситуацію, наявність працюючого насоса при непрацюючій стаціонарній судовій дренажній системі може дозволити заявити, що латка на отвір розміщена успішно та правильно, коли рівень води в трюмі починає знижуватися за вимірами забірних колодязів.

У разі, якщо можливо оглянути аварійний трюм зсередини, то можна, як правило, побачити вже не первинний вантаж, а тверду масу розмороженого вантажу, який раніше був заморожений. Цей розморожений вантаж частково зберіг свою первісну форму і розмір, і його можна побачити на поверхні води фактично у вигляді «пульпи» (суміші, в даному випадку, рідини і елементів вантажу).

Загальну вагу «пульпи» (тобто вагу вантажу, води та контейнерів)  $G^p$  після затоплення відсіку можна визначити шляхом обчислення кількості морської води, яка надходить в пошкоджений трюм з коефіцієнтом проникності  $\mu = 0,6$  відповідно до об'ємної маси для морської води в районі плавання за допомогою виразу (1). Для цього потрібно знати вагу вантажу брутто  $G$  (включаючи картонну упаковку), яка зазначена в товаросупровідних документах

$$G^p = G + M_v. \quad (9)$$

Тоді об'ємну вагу «пульпи»  $\delta_p$  можна визначити за виразом

$$\delta_p = G^p / V. \quad (10)$$

Таким чином, об'ємна вага «пульпи»  $\delta_p$  є більш об'єктивним показником для розрахунків аварійної посадки та стійкості судна, якщо використовувати її у виразах (2) і (3).

З урахуванням виразів (1) – (10) розглянемо організацію та проведення заходів щодо боротьби за живучість аварійного судна. Такі заходи базуються на трьох основних принципах: конструктивні, організаційно-технічні та боротьба за непотоплюваність у разі аварії. Конструктивні заходи містять достатню кількість водонепроникних перегородок та певну висоту вільного борту для забезпечення необхідного запасу плавучості. Основний конструктивний принцип – принцип «слабкої ланки» – полягає у тому, що плавучість судна втрачається раніше, ніж стійкість, тому поділ на відсіки здійснюється таким чином, щоб судно не перекидалося коли тоне.

Раціональне проектування суднових систем та пристроїв, які забезпечують непотоплюваність судна, є важливим компонентом конструктивних рішень. Проте, стаціонарні системи перекачування та зливу аварійного відсіку з двофазним вантажем, що складається, наприклад, із заморожених рибних продуктів, стають неефективними у подальшій стадії боротьби за непотоплюваність судна, через те, що зміна структури та упаковки вантажу може призвести до забивання решіток колодязів та всмоктувальних труб. Це показує, що при проектуванні стаціонарних систем осушення не було враховано можливість зміни фізичного стану вантажу та його вплив на продуктивність сушильних агентів. Тому розробка та вдосконалення пристроїв фільтрації та водозбору з підтопленого приміщення потребує більш глибокого дослідження та практичного застосування.

Аналіз аварій та загибелі рефрижераторних транспортних та риболовецьких суден свідчить про те, що, незважаючи на правильне розуміння екіпажем будови судна, нерозуміння прихованого фактору зміни стану вантажу (з твердого стану в «пульпу») призводить до неправильного прогнозування поведінки судна в аварійних ситуаціях та прийняття неправильних рішень, що може призвести до загибелі судна та екіпажу.

Важливо знати, на який стандарт відсіку має бути розраховане судно. Судно вважається таким, що має однокамерний стандарт (рис. 1), якщо воно

призначене для морехідності (триматися на плаву і не топити основну лінію) навіть після того, як будь-який з його водонепроникних відсіків буде повністю пошкоджений. Аналогічно, судно з двокамерним стандартом може залишатися на плаву навіть після повного пошкодження будь-якого з двох сусідніх водонепроникних відсіків (рис. 2).

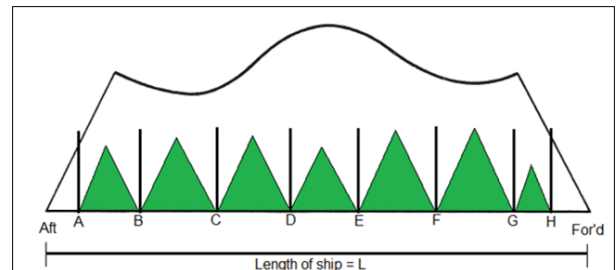


Рис. 1. Однокамерний стандарт

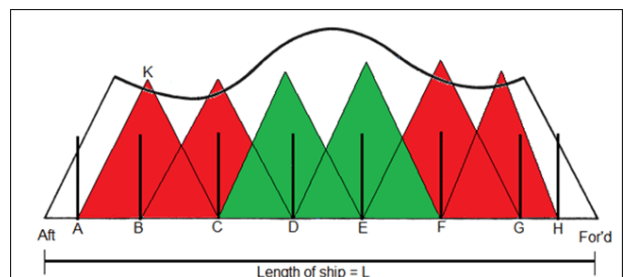


Рис. 2. Двокамерний стандарт

Незатоплюваність рефрижераторних транспортних та риболовецьких суден має бути забезпечена у випадку затоплення будь-яких двох сусідніх відсіків. Це досягається шляхом забезпечення того, щоб при затопленні сусідніх відсіків судно не занурювалось глибше за максимальну водолазну лінію.

Одним з основних заходів для забезпечення непотоплюваності судна є боротьба з потоком води, яка надходить в аварійний відсік. При затопленні рефрижераторного трюму стійкість судна залежить від схеми посадки вантажу та коефіцієнта проникності відсіку. У початковому етапі затоплення, коли вантаж зберігає твердий стан і вода надходить повільно, вода відкачується стаціонарними засобами, і затоплення відсіку можна віднести до четвертої категорії (рис. 3, де WL – це ватерлінія неаварійного судна, W1L1 – ватерлінія відсіку четвертої категорії, W2L2 – ватерлінія відсіку третьої категорії, W3L3 – ватерлінія відсіку першої категорії). У таких випадках потрібно враховувати рівень води у відсіку:

– залишається незмінною, коли продуктивність насосного засобу дорівнює кількості води, що надходить;

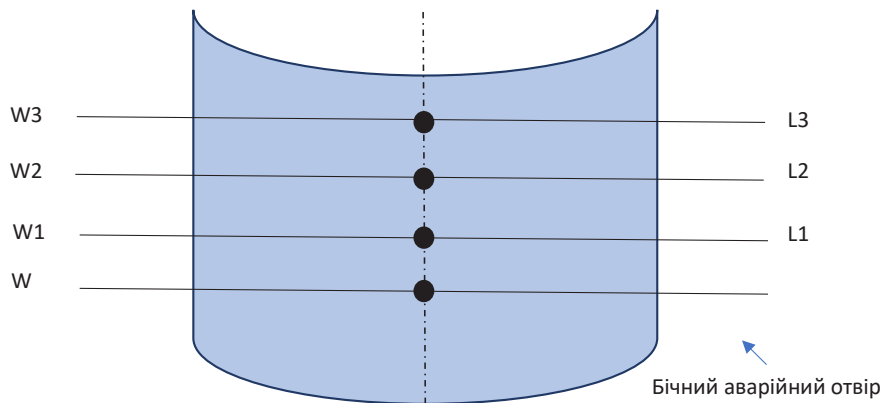


Рис. 3. Затоплення відсіків різних категорій

– зменшується, якщо продуктивність насосів вища, ніж кількість води, що надходить;

– збільшується, коли припливні засоби не в змозі справитись з кількістю води, що надходить в відсік. У даному випадку, відсік заповнений частково, рівень води в ньому не співпадає з рівнем морської води.

Під час подальшого надходження та підвищення рівня води у відсіку, як правило, припливні засоби не можуть впоратися з цим завданням через початок процесу переходу вантажу та упаковки зі стану твердого в стан «пульпи». Це спричинює забруднення решіток колодязів та всмоктувальних труб розмороженою рибкою та картонними ємностями, що призводить до того, що відсік заповнюється неповністю, і морська вода сполучається. Рівень води у відсіку збігається з рівнем морської води, і кількість припливної води змінюється залежно від зміни осадки, крену та обшивки аварійного судна (див. рис. 3). У такій ситуації затоплення відсіку відноситься до третьої категорії і виключається з запасу плавучості. Зміна початкової стійкості визначається геометрією та координатами центру ваги втраченої ватерлінії.

Одним з важливих елементів конструкції рефрижераторних транспортних та деяких рибальських суден є наявність у трюмах водонепроникної палуби, яка зазвичай розташовується на першому рівні від головної палуби. Під час аналізу процесу затоплення трюму можна припустити, що морська вода повністю затопить пошкоджений відсік до рівня водонепроникної палуби (див. рис. 3). У такому випадку затоплення можна розглядати як затоплення відсіку першої категорії, тобто як надходження ваги води, яка стікає в перший відсік з координатами, відповідними координатам центру ваги обсягу відсіку.

При затопленні відсіку другої категорії зміна плавучості розглядається як затоплення відсіку першої категорії, з урахуванням впливу вільної

поверхні «пульпи» в трюмах. Цей ефект відзначається значною мірою через різницю у питомій вазі «пульпи» та морської води. З використанням виразу (2) може бути виконана корекція метацентричної висоти відсіку другої категорії під час навантаження в стані «пульпа».

При аналізі виразу (2) можна зробити висновок, що поправки на метацентричну висоту, які враховують вплив вільної поверхні, завжди є негативними і залежать від моменту інерції вільної поверхні морської води і «пульпи». Оскільки об'ємна вага морської води значно менша, ніж об'ємна вага «пульпи», затоплення вантажу у відсіку в стані «пульпи» призводить до значної негативної зміни метацентричної висоти судна.

При цьому для забезпечення безпечного плавання необхідно вжити заходів щодо відновлення стійкості та випрямлення судна. Випрямлення судна повинно передувати відновленню стійкості. Це особливо важливо, наприклад, у разі затоплення частини приміщення під час гасіння пожежі. Якщо аварійна ситуація дозволяє проводити відновлення стійкості та випрямлення судна одночасно з роботами із зупинки потоку та відкачуванням води при мінімальному споживанні запасу плавучості, можна припустити, що судно не потоне при отриманні отвору та симетричному затопленні відсіку. Стійкість оцінюється після затоплення відсіків, і якщо є сумніви, то приймаються заходи для її відновлення.

**Висновки.** У роботі досліджено вплив коефіцієнта проникності рефрижераторного вантажу в разі затоплення відсіку судна. Визначено основні математичні залежності, які забезпечують врахування зміни коефіцієнта проникності вантажу. При цьому у роботі визначено, по-перше, що деякі вантажі, що перевозяться в твердому замороженому стані, можуть перетворюватися на «пульпу» під впливом зміни температури і навколишнього середовища, що призводить до фізичної зміни їх стану. Такі вантажі можна віднести до категорії

двофазних. По-друге, відсіки з такими вантажами є менш небезпечними і відносяться до першої категорії, тоді як відсіки з іншими категоріями становлять більшу небезпеку. Проведений аналіз затоплення аварійного відсіку та його впливу на стійкість і посадку судна показав, що:

1) відсік другої категорії може бути значною загрозою, оскільки рефрижераторний вантаж у стані «пульпи» має коефіцієнт об'ємної ваги, що значно перевищує об'ємну масу морської води;

2) зміна стану вантажу з твердого на «пульпу» неминуче призводить до зміни коефіцієнта проникності приміщення, що потрібно враховувати при розрахунках стійкості та аварійної посадки судна;

3) час, необхідний для герметизації отвору в приміщенні з двофазним вантажем, має велике

значення в боротьбі за непотоплюваність судна. Навіть незначні впливи навколишнього середовища, такі як вітер, можуть істотно вплинути на аварійну посадку та стійкість судна, оскільки перехід вантажу з твердого стану в стан «пульпи» є дуже чутливим до зовнішніх впливів;

4) при повному осушенні відсіку виникає стан рідкої фази «пульпи», який є більш в'язким і здатним стискатися при відкачуванні води з аварійного відсіку. У результаті при усадці виникає вільна поверхня зневодненої «пульпи», яка впливає на стійкість та посадку судна аналогічно до впливу сипучих вантажів з їх невідомим кутом природного ухилу. При цьому на сьогоднішній день не існує методів, які дозволяють запобігти усадці «пульпи» та виключити вплив вільної поверхні на стабільність.

#### Список літератури:

1. IMO. (2006). SOLAS Chapter II-1 Construction - structure, Subdivision and Stability, Machinery and Electrical Installations, Part B-1 Stability.: International Maritime Organization.
2. IMO. (2008a). International Code on Intact Stability (2008 IS Code): International Maritime Organization.
3. IMO. (2008b). Resolution MSC.266(84) – Code of safety for special purpose ships, 2008: International Maritime Organization.
4. IMO. (2008c). Resolution MSC.281(85), Explanatory notes to the SOLAS Chapter II-1, Subdivision and damage stability regulations, Part B.: International Maritime Organization.
5. Probabilistic Damage Stability Evaluating the Attained Subdivision Index by Analysing the Effect of Changes in the Arrangement and Intact Stability for an Offshore Vessel. URL: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2350929> (дата звернення: 12.10.23).
6. Recent Advances in Damage Stability Assessment with Application on a Container Vessel. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Recent-Advances-in-Damage-Stability-Assessment-with-Tomic-Turk/e7a3a3950354d8938b3cb2abbb8d170ed2e07901> (дата звернення: 12.10.23).
7. Conception and Evolution of the Probabilistic Methods for Ship Damage Stability and Flooding Risk Assessment. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Conception-and-Evolution-of-the-Probabilistic-for-Vassalos-Mujeeb-Ahmed/48d8e08bd037e98b0c1b2ced1feffa1db09fc091> (дата звернення: 12.10.23).

#### Plita L.L., Trofymenko I.V., Shevchenko A.P., Ivanenko V.M. STUDY OF THE INFLUENCE OF THE PERMEABILITY COEFFICIENT OF REFRIGERATED CARGO IN CASE OF FLOODING OF THE SHIP'S COMPARTMENT

*The purpose of the article is to study the impact of the permeability coefficient of refrigerated cargo in the event of a ship's compartment flooding and to analyse the flooding of the emergency compartment and its impact on the stability and landing of refrigerated and fishing vessels. This goal is achieved by identifying the main indicators and dependencies for determining the permeability coefficient of refrigerated cargo in the event of a ship's compartment flooding, analysing organizational and technical measures and the process of ensuring the unsinkability of refrigerated and fishing vessels. During the work, two main facts were established about the transportation of certain cargoes in a solid frozen state. Firstly, changes in temperature and environment can cause such cargoes to turn into a «pulp» (in this case, a mixture of liquid and cargo elements) and change their physical state. These cargoes are classified as two-phase. Second, compartments with these cargoes are less dangerous and belong to the first category, while compartments with other categories are more dangerous. The analysis of the emergency compartment flooding and its impact on the stability and landing of the vessel revealed the following facts. A compartment of the second category can be a significant threat, since refrigerated cargo in the «pulp» state has a volume weight coefficient that significantly exceeds the volume weight of seawater. Changing the state of the cargo from solid to pulp inevitably leads to a change in the permeability coefficient of the room, which must be taken into account when calculating the stability and emergency landing of the vessel. The time required to seal an opening in a room with a two-phase cargo is of great importance in the fight for the ship's unsinkability. Even minor environmental influences, such as wind, can have a significant impact on emergency landing and vessel stability, as the transition of cargo from a solid to a «pulp» state is very sensitive to external influences. The most significant result is the determination of the main mathematical dependencies that ensure that the change in the permeability coefficient of cargo in the event of flooding of the refrigerated and fishing vessels' compartment and the results of the analysis of the emergency compartment flooding and its impact on the stability and landing of ships.*

**Key words:** ship, permeability coefficient, stability, landing, hold, category, cargo, unsinkability.



УДК 656.021

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/43>**Стрелко О.Г.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Грушевська Т.М.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Бердниченко Ю.А.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Римша О.Ю.**

Державний університет інфраструктури та технологій

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ ПАСАЖИРОПОТОКІВ У ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНОМУ ВУЗЛІ

У даній статті досліджено закономірності формування пасажиропотоків у транспортно-пересадочному вузлі. Описано основні напрямки розвитку пасажирських транспортних процесів у транспортних вузлах, а саме розвиток різних видів транспортних систем, інтеграція рішень у сфері інформаційних технологій та формування скоординованих розкладів руху взаємодіючих видів пасажирського транспорту. Перехід на скоординований розклад забезпечить збалансоване використання місць у всіх транспортних засобах, що беруть участь у мультимодальних перевезеннях, раціональне використання потужностей залізниці та автомобільного транспорту, а також скорочення часу очікування пасажирів у пунктах пересадок. Основними задачами транспортно-пересадочних вузлів є забезпечення зручної пересадки, збільшення ефективності транспортної системи, розвиток мультимодального транспорту, розвиток логістики, економічний розвиток, підтримка інтеграції транспортних систем, зменшення транспортних заторів, розвиток пасажирського і вантажного транспорту, забезпечення доступності та рівномірного розподілу транспортних послуг, забезпечення безпеки та комфорту. Транспортно-пересадочні комплекси мають важливе значення для розвитку транспортної системи країни. Вони виконують різноманітні функції, які сприяють покращенню продуктивності, доступності та безпеки транспортування. Ці комплекси сприяють зменшенню транспортних заторів, розвитку мультимодального транспорту, логістики та економічного зростання. Вони також сприяють інтеграції різних транспортних систем і забезпечують зручну пересадку пасажирів і вантажів між різними видами транспорту. Завдяки транспортно-пересадочним комплексам досягається оптимальне використання різних видів транспорту, збільшується рухливість населення і сприяє розвитку туризму та торгівлі. Отже, ці комплекси грають важливу роль у покращенні транспортної системи країни і сприяють рівномірному розвитку транспортної інфраструктури.

**Ключові слова:** пасажиропотік, транспортно-пересадочний вузол, пасажирські перевезення, інтегрований розклад руху, мультимодальні пасажирські перевезення.

**Постановка проблеми.** Сучасний стан пасажирських перевезень в Україні, на жаль, бажає бути набагато кращим, особливо в умовах війни та нестабільної економічної ситуації в країні. Ці проблеми є глобальними, та в основному стосуються практично всіх видів транспорту у всіх регіонах країни. Рівень обслуговування пасажирів в Україні є набагато нижчим відносно інших країн Європи, що свідчить про необхідність переймати європейський досвід та програми розвитку пасажирських перевезень задля ефективнішого та прогресивнішого надання транспортних послуг для українців [1]. Для підвищення конкурентоспроможності

пасажирських залізничних перевезень були проаналізовані чинники, які мають прямий вплив на розвиток ринку транспортних послуг. Виокремлено, що значний вплив на збільшення обсягів перевезень пасажирів залізничним транспортом в умовах конкуренції з автомобільним транспортом має оптимізація організації пасажирських перевезень. Основні аспекти цієї оптимізації включають скорочення часу очікування поїздки, збільшення швидкості руху по маршруту та покращення комфорту пасажирських перевезень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У розвиток досліджень організації пасажирських

перевезень, формування закономірностей пасажиропотоків у транспортно-пересадочних вузлах внесли великий вклад такі вчені: Аксьонов І.М., Бутко Т.В., Габа В.В., Грушевська Т.М., Гудков О.М., Мацюк В.І., Мироненко В.К., Торопов Б.І., Христофор О.В., Яновський П.О., Стрелко О.Г. та ін. [8–10]. Але, не зважаючи на велику кількість публікацій науковців та фахівців, що присвятили свої роботи проблемам підвищенню ефективності організації пасажирських залізничних перевезень, питання дослідження формування закономірностей формування пасажиропотоків залишається актуальним і на сьогоднішній день.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Питаннями організації пасажирських перевезень займалися багато науковців як в Україні, так і у світі. Незважаючи на те, що питаннями аналізу залізничних пасажирських перевезень присвячено безліч наукових публікацій, питання організації руху пасажирських перевезень у світі є відкритим та актуальним, особливо в нинішніх умовах. Удосконалення та покращення організації пасажирських перевезень, надання якісних транспортних послуг є цікавими питаннями сьогодення.

**Метою статті** є дослідження закономірностей формування пасажиропотоків у транспортно-пересадочному вузлі.

**Виклад основного матеріалу.** Транспортно-пересадочні комплекси відіграють важливу роль у розвитку транспортної системи країни. Вони є вузловими пунктами, де здійснюється взаємодія між різними видами транспорту (автомобільний, залізничний, міський і т.д.) і забезпечують пересадку пасажирів з одного виду транспорту на інший. У сучасних умовах переважна більшість пасажирських перевезень здійснюється з участю двох і більше видів транспорту. Процеси взаємодії, зазвичай, відбуваються у транспортних вузлах [5].

Основними задачами транспортно-пересадочних вузлів є [6]:

*Забезпечення зручної пересадки.* Транспортно-пересадочні комплекси створюють зручні умови для пасажирів і вантажів, які змушені змінювати транспортний засіб під час подорожі. Вони забезпечують належну інфраструктуру, таку як платформи, термінали, мости, зони очікування, де пасажирів можуть зручно пересісти з одного транспорту на інший.

*Збільшення ефективності транспортної системи.* Транспортно-пересадочні комплекси допомагають збільшити ефективність транспортної системи, зменшуючи час та затрати, пов'язані

з пересадками. Завдяки цим комплексам пасажирів можуть швидко та зручно пересісти з одного виду транспорту на інший, що сприяє підвищенню загальної продуктивності системи.

*Розвиток мультимодального транспорту.* Транспортно-пересадочні комплекси сприяють розвитку мультимодального транспорту, де різні види транспорту працюють разом у координації. Це сприяє збільшенню ефективності та вибору для пасажирів, оскільки вони можуть скористатися комбінацією транспортних засобів для досягнення своєї кінцевої точки.

*Розвиток логістики.* Транспортно-пересадочні комплекси виконують важливу функцію у розвитку логістики. Вони дозволяють зв'язувати різні логістичні маршрути та мережі, що сприяє оптимізації перевезень вантажів. Транспортні комплекси забезпечують зручні пункти пересування товарів з одного виду транспорту на інший, дозволяючи ефективно використовувати різні транспортні засоби залежно від потреб.

*Економічний розвиток.* Транспортно-пересадочні комплекси мають великий вплив на економічний розвиток країни. Вони створюють робочі місця, сприяють розвитку туризму, залученню інвестицій та торгівлі. Забезпечуючи швидкий та зручний перехід від одного виду транспорту до іншого, вони сприяють підвищенню мобільності населення та розвитку бізнесу.

*Підтримка інтеграції транспортних систем.* Транспортно-пересадочні комплекси відіграють важливу роль у підтримці інтеграції різних видів транспорту. Вони створюють умови для зручного та ефективного зв'язку між транспортними системами, що допомагає покращити координацію та співпрацю між ними.

*Зменшення транспортних заторів.* Транспортно-пересадочні комплекси відіграють важливу роль у зменшенні транспортних заторів і заторів на дорогах. Шляхи, які забезпечують пересадку пасажирів та вантажів з одного виду транспорту на інший, допомагають розподілити транспортний потік та зменшити навантаження на дороги.

*Розвиток пасажирського і вантажного транспорту.* Транспортно-пересадочні комплекси стимулюють розвиток пасажирського та вантажного транспорту. Вони створюють передумови для підвищення обсягів перевезень, покращення якості послуг та розширення мережі транспортних зв'язків. Це сприяє зростанню транспортного сектора країни та залученню інвестицій у розширення транспортної інфраструктури.

*Забезпечення доступності та рівномірного розподілу транспортних послуг.* Транспортно-пересадочні комплекси допомагають забезпечити доступність транспортних послуг для різних регіонів та населення. Вони розташовані в стратегічних місцях, що дозволяє забезпечити рівномірний розподіл транспортних зв'язків і забезпечити доступ до різних місць країни.

*Забезпечення безпеки та комфорту.* Транспортно-пересадочні комплекси відіграють важливу роль у забезпеченні безпеки та комфорту пасажирів. Вони мають необхідну інфраструктуру та послуги для забезпечення безпеки, включаючи контроль за перевезенням вантажів та пасажирів, системи безпеки та інформаційні сервіси.



**Рис. 1. Основні задачі транспортно-пересадочних вузлів**

Організація пасажирських перевезень повинна забезпечувати зручний час поїздки пасажирів до місця призначення, регулярність руху, раціональне використання рухомого складу, повну безпеку й культуру обслуговування пасажирів з виправданими витратами [7].

Ефективна організація пасажирських перевезень, високоякісне обслуговування пасажирів у сучасних умовах неможливі без дослідження закономірностей формування пасажиропотоків, аналізу організаційних і технологічних факторів формування попиту на залізничні пасажирські перевезення.

У формуванні закономірностей пасажиропотоку та попиту в приміських залізничних перевезеннях визначено два типи факторів: позитивні, що сприяють зростанню, та негативні, що зменшують попит на ці послуги. Серед позитивних факторів зростання важливу роль відіграють наступні аспекти: постійне зростання цін на паливо, розвиток приміської житлової забудови, проблеми, пов'язані зі станом автомобільних

доріг і їх перевантаженість, а також питання безпеки пасажирських перевезень. Серед негативних факторів зменшення, які впливають на пасажирські залізничні перевезення, можна відзначити обмеженість доставки пасажирів до приміських залізничних станцій з необхідністю пересідання на інші види транспорту та великі інтервали між рухом електропоїздів [8].

Україна має активний ринок транспортних послуг, зокрема в сфері пасажирських перевезень. Залізничний транспорт відзначається великою потужністю, особливо в години пік, коли автомобільні дороги в місті Київ та його околицях переповнені і «пробки» стають звичайною ситуацією. Залізничний транспорт проявляє більшу надійність у виконанні графіка руху, не залежить від погодних умов, у порівнянні з автомобільним транспортом, і має більш доступні ціни на проїзд. Крім того, в порівнянні з автотранспортом, залізничний транспорт вважається безпечнішим.

Якщо аналізувати пасажирські перевезення в приміських напрямках, то бачимо, що понад 86% пасажирів користуються залізничним транспортом для приміських подорожей, що складає більше третини загального пасажиропотоку в цьому напрямку.

Автомобільний транспорт вважається найбільш мобільним і доступним видом транспорту, але варто відзначити, що вартість проїзду на автомобільному транспорті зазвичай в два або навіть три рази більше, ніж на інших видах транспорту. Основною сферою застосування автомобільного транспорту є надання послуг з перевезення пасажирів між їхніми місцями проживання в передмістях та зупинними пунктами приміських електропоїздів. Крім цього, він здійснює обслуговування приміського пасажирського транспорту поза годинами пік [8].

Власний (приватний) автомобільний транспорт вважається найзручнішим (для тих, хто може собі його дозволити мати). Однак в часи пік автомобільні дороги перевантажені, що є причиною численних заторів та автомобільних пробок.

На більшості залізниць світу спостерігається збільшення обсягів перевезень пасажирів, хоча частка пасажирського транспорту в освоєнні цих перевезень для різних країн неоднакова. Посилення конкурентної боротьби на ринку пасажирських перевезень надання транспортних послуг, вимагає від перевізників урахування в процесі якісних факторів послуги.

Поведінка пасажирів дуже впливає на експлуатаційні компоненти, такі як пасажиропотоки на

залізничних станціях, час обміну пасажиром і, отже, на пунктуальність поїздів. Для дослідження формування закономірностей пасажиропотоків у транспортно-пересадочних вузлах можна розглянути як впливає поведінка та потреби пасажирів на інфраструктурні об'єкти транспортних станцій. Якщо проаналізувати пасажиропотоки далекого сполучення, то можна відмітити факт, що пасажир далекого сполучення прибувають на вокзал раніше відправлення та хотіли б скористатися інфраструктурою вокзалів, наприклад магазинами. Зокрема, їм у цьому зазвичай заважає провезення багажу, через що виникає потреба у короткочасному зберіганні багажу. Що стосується поведінки під час використання сходів, ескалаторів та ліфтів, помітні різні впливи, особливо з погляду продуктивності. У випадку ескалаторів при параметрах з розрахунку їх розмірів, в ідеальному випадку можна досягти швидкості потоку. Однак на вокзалах з великою кількістю пасажирів та багажу пропускна спроможність може становити менше половини. Розподіл пасажирів по платформі істотно впливає на час обміну пасажиром і, отже, на час очікування та якість роботи. Це показує, що більшість пасажирів орієнтуються на ситуацію висадки, що частково призводить до дуже вираженого нерівномірного розподілу по платформі. Це, у свою чергу, призводить до переважання окремих дверей та значного збільшення часу обміну пасажиром [9].

Якість надання транспортних послуг має фундаментальний вплив на послуги пасажирського транспорту. Одним із найкорисніших методів оцінки якості обслуговування є опитування. Опитування можуть проводитися з погляду пасажирів, і навіть з погляду транспортного оператора. Протягом останнього десятиліття рівень обслуговування на регіональних залізничних лініях Хорватії є відносно стабільним із тенденцією до зниження рівня обслуговування. Один із спостережень – відсутність регулярної оцінки послуг та взаємодії з пасажиром. Результати опитувальної оцінки якості послуг пасажирського транспорту на регіональній лінії у північно-західній частині Хорватії, де комплексне дослідження визначило, як зберегти існуючий рівень обслуговування,

а також деякі пропозиції щодо підвищення рівня обслуговування послуги також представлені у роботі [10].

У сучасних умовах особливого значення набуває вдосконалення технологічної взаємодії різних видів пасажирського транспорту в транспортних вузлах, яке можливе на основі: більш повного використання досягнень розвитку інформаційної техніки та єдиної системи управління всіма видами транспорту; єдиних термінів обстеження пасажиропотоків на взаємодіючих видах транспорту; узгоджених розкладів руху; використання ефекту великих систем (розширення можливостей маневрування рухомим складом, ремонтною базою, робочою силою тощо); оптимального поєднання (за кількістю і часткою транспортної роботи) взаємодіючих видів транспорту, оптимальних структур та чисельності парків окремих видів транспорту, єдиного тарифу, що забезпечує право пересадки в межах міста на будь-який вид транспорту [8].

Головне завдання пасажирських перевезень в Україні – своєчасне, якісне та повне задоволення потреб населення в перевезеннях. Пасажирський транспорт повинен бути доступним, зручним у користуванні, забезпечувати комфортну швидкість пересування до місця призначення, безпека перевезень і, головне, економічність.

**Висновки та пропозиції.** Загалом транспортно-пересадочні комплекси є ключовим елементом розвитку транспортної системи країни, виконуючи різноманітні функції, що сприяють покращенню ефективності, доступності та безпеки перевезень. Вони сприяють зменшенню затворів, розвитку мультимодального транспорту, логістики та економічному зростанню. Крім того, вони сприяють інтеграції транспортних систем та забезпечують зручну пересадку пасажирів та вантажів з одного виду транспорту на інший. Завдяки транспортно-пересадочним комплексам забезпечується оптимальне використання різних видів транспорту, підвищується мобільність населення та стимулюється розвиток туризму та торгівлі. Таким чином, ці комплекси відіграють важливу роль у покращенні транспортної системи країни та сприяють забезпеченню рівномірного розвитку транспортної інфраструктури.

#### Список літератури:

1. Головатчик Н.А., Каширець Н.М. Оцінка якості транспортних послуг. Студентський вісник національного університету водного господарства та природокористування. Вип. 1 (7), 2017. С. 33–36.
2. Strelko O., Hrushevska T., Toropov B., Berdnychenko Y., Soloviova O. Study of the Formation of Passenger Flows in Transport Hubs. Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering–2022. ICTM2022. Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, Cham. 2023. Vol 657. P. 733–744. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-36201-9\\_60](https://doi.org/10.1007/978-3-031-36201-9_60)

3. Strelko O., Hrushevska T., Gaba V., Berdnychenko Y., Kyrychenko H. (). Improvement of the System of Arranging Commuter Passenger Transportation Based on the Kyiv Transport Hub. *Smart Technologies in Urban Engineering*. STUE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, Cham. 2023. Vol 536. P. 752–763. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7\\_67](https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_67)
4. Strelko O., Solovyova O., Berdnychenko Y., Kyrychenko H., Solovyova L. Study of the contemporary trends in the development of transport systems of the Ukrainian railways. *Acta Scientiarum Polonorum Administratio Locorum*. Vol. 202322(2). P. 263–279. <https://doi.org/10.31648/aspal.8444>
5. Стрелко О.Г., Торопов Б.І., Грушевська Т.М., Войцехович В.С., Поповичук Т.О. Дослідження впливу пасажиропотоків на пропускну спроможність транспортних пересадочних вузлів. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. Вип. 33 (72). № 4. 2022. С. 271–277. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/41>.
6. Мельник Т., Христофор О., Красноштан О. (2021). Роль транспортно-пересадочних комплексів у розвитку транспортної системи країни: соціальний і сервісний аспекти. *Review of transport economics and management*, 5 (21), 59–69. DOI: <https://doi.org/10.15802/rtem2021/224970>
7. Габа В.В., Грушевська Т.М., Поворознік О.О., Костюшко В.П. Формалізація впливу факторів зовнішнього середовища на систему організації залізничних перевезень. *Збірник наукових праць ДЕТУТ*. Серія «Транспортні системи і технології». К.: ДЕТУТ, 2016. Вип. 29. С. 277–285. <http://tst.duit.edu.ua/index.php/tst/article/view/90/83>.
8. Поздняков А.А., Мироненко В.К., Позднякова О.О., Гудков О.М. Дослідження факторів, що впливають на формування пасажиропотоків залізничних приміських перевезень у великих міських агломераціях. *Збірник наукових праць ДЕТУТ*. Серія «Транспортні системи і технології», 2016. Вип. 29. С. 261–276. <https://tst.duit.in.ua/index.php/tst/issue/view/3/1>
9. Bernhard R. Influence of Passenger Behaviour on Railway-Station Infrastructure. *Rail NewCastle*. 2017. P. 127–160. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-78544-8\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-78544-8_8)
10. Abramović B., Šipuš D. Quality Assessment of Regional Railway Passenger Transport. 2020. P. 83–96. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-19519-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-19519-9_2).

### **Strelko O.H., Hrushevska T.M., Berdnychenko Yu.A., Rymsha O.Yu. RESEARCH ON THE PATTERNS OF PASSENGER FLOW FORMATION IN A TRANSPORT INTERCHANGE HUB**

*In this article, the study investigates the patterns of passenger flow formation in a transport interchange hub. It describes the main directions for the development of passenger transportation processes in transport hubs, including the development of various modes of transportation systems, the integration of decisions in the field of information technology, and the creation of coordinated schedules for interacting modes of passenger transportation. Transitioning to a coordinated schedule ensures balanced utilization of capacities in all modes of transport participating in multimodal transportation, rational use of railway and road transport capacities, and reduces passenger waiting times at transfer points. The main tasks of transport interchange hubs include ensuring convenient transfers, increasing the efficiency of the transportation system, developing multimodal transportation, advancing logistics, economic development, supporting the integration of transportation systems, reducing traffic congestion, promoting the development of both passenger and freight transport, ensuring accessibility and equitable distribution of transportation services, and providing safety and comfort. Transport interchange complexes play a crucial role in improving the country's transportation system. They perform various functions that enhance transportation productivity, accessibility, and safety. These complexes contribute to reducing traffic congestion, fostering the development of multimodal transportation, logistics, and economic growth. They also facilitate the integration of various transportation systems and enable convenient transfers for passengers and cargo between different modes of transportation. Thanks to transport interchange complexes, optimal utilization of different modes of transportation is achieved, enhancing the mobility of the population and stimulating tourism and trade. Thus, these complexes play a vital role in improving the country's transportation system and promoting the even development of transportation infrastructure.*

**Key words:** passenger flow, transport interchange hub, passenger transportation, integrated scheduling, multimodal passenger transportation.

**Фоменко Г.Р.**

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

## ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ РОЗВИТКУ СУСПІЛЬНОГО ПРОСТОРУ У МІСТАХ

*У статті розглянуті питання просторового розвитку міст, що визначає необхідність майбутнього їх покращення. Важливою складовою є розвиток громадського простору на міських вулицях і спрямованого на підвищення якості життя населення, а також досягнення рівня комфортності міського середовища. Розглянуті особливості формування громадського простору на міських вулицях, а також принципи стійкості вулиці.*

*Процес формування громадських просторів на вулицях міста широко розповсюджений у практиці по всьому світу. Вулиці це одне з найбільш важливих публічних місць у просторі. Вони є джерелом життєвої сили міст і основою економічного розвитку населеного пункту. Також вони утворюють більшу частину громадських просторів міста і мають потенціал розвитку ділової активності.*

*Важливу увагу необхідно звернути на принципи, що вулиці є одночасно громадським простором, а також і транспортними артеріями. З врахуванням цього, вуличному простору надається роль катализатора перетворення міського середовища, в умовах якого дизайн вулиці повинен враховувати пішоходів, водіїв, велосипедистів, так само, як і користувачів громадського транспорту.*

*Вулиця повинна бути комфортною. Комфортні вулиці повинні бути не тільки для переміщення, але і сприйматися, як невід'ємна частина самого міста. Основна задача комфортних вулиць полягає у забезпеченні балансу інтересів усіх учасників руху, а також зручного переміщення усіх користувачів вуличного простору, незалежно від їх віку і вибраного виду переміщення. Комфортні вулиці важливі для підвищення безпеки, а також вони створюють громадські місця, які наповнені їх життям і енергією міста. Завдяки особливостям комфортної вулиці можливо розглянути перехід до нових принципів при плануванні, згідно з якими спочатку буде відводиться необхідна територія в межах червоних ліній з двох боків вулиці, виходячи із просторових потреб землекористування прилеглих будівель для пішоходів, велосипедистів, а також озеленення та організації місць відпочинку.*

*Вулиці, які безпечні та комфортні для усіх користувачів, створюють умови збалансованого розвитку, як з питань економіки, так і екології у районах міста та забезпечують стійку взаємодію між об'єктами тяжіння і населення. Комфортні вулиці врівноважують пропускну здатність вуличного простору і рівень міської мобільності з існуючими містобудівними умовами землекористування і характером прилягаючої забудови. Сучасні питання по проектуванню міських вулиць спрямовані на покращення якості життя населення.*

**Ключові слова:** міські вулиці, громадський простір, комфортні території, пішоходи, громадське життя.

**Постановка проблеми.** Однією із важливіших складових міст є вулиці. В сучасному сприйманні, вулиця це не тільки транспортно-комунікаційна частина, яка призначена для забезпечення переміщення транспортних засобів і пішоходів. Міська вулиця, це ще і територія для життя людей, простору, який часто стає центром громадського життя. Такий підхід обумовлений сучасними тенденціями у розвитку міст, а саме інтенсифікацією соціального життя, зростання щільності забудови і цінності міської землі в умовах її дефіциту, формуванні вимог до сталого розвитку кожної із територій. Саме цьому у світовій літературі з'являються такі терміни, як *sustainable streets*, *living streets*, спрямовані на встановлення нових

стандартів використання благоустрою, безпеки і екологічного стану міських вулиць і доріг, що знайшло відображення у нормативній документації. Загалом міська вулиця виконує дві основні функції. Перша – це забезпечення транспортного функціоналу міста, а друга – формує суспільні простори, тобто зовнішній облік. До них належить парки, сквери, бульвари, площі, які є невід'ємною частиною життя населення. Основною метою просторового розвитку міст є забезпечення в них сталого розвитку, яке включає розробку нових підходів, що сприяють підвищенню якості міського середовища, формуванню комфортного і безпечного міського простору при плануванні нових та реконструкції існуючих територій.

Суттєве значення має також функціональна класифікація міських вулиць, яка одночасно пов'язана із створенням суспільних просторів, а також бути сприятливою при формуванні стійкої міської мобільності і підвищенню якості міського середовища.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питання пов'язані із містобудівництвом розглядаються і досліджуються у багатьох країнах світу. Значна увага приділяється дослідженням питань ефективного перетворення міських просторів. Л. Лофланд, К. Лінч, Дж. Гейл і А. Лефевр розглядають суспільні простори, як невід'ємну частину міського життя, де відбувається взаємозв'язок людей [1–4]. В Україні вчені також займаються питаннями організації і зв'язку суспільного простору, функціональних зон міста та вуличної мережі, що відображають у роботах Русанова І. В., Філіпова Т. О., Осиченко Г. О., Соснова Н. С., Крижановська Н. Я. та інші [2, 3, 5–7].

**Метою статті** є розгляд питань присвячених ефективному перетворенню міських просторів, створенню комфортних вулиць, які покращають та наповнюють життям і енергією населення міст.

#### Виклад основного матеріалу дослідження.

Сучасний підхід до транспортного планування міських вулиць полягає в розвитку функцій для задоволення потреб в переміщенні всіх користувачів, а також у розвитку просторової структури території вулиць для організації громадського життя населення. До основних принципів розвитку громадського розвитку на міських вулицях можна віднести, відповідно із загальними принципами стійкого розвитку міських територій, яке повинно забезпечувати:

– економічний підхід – раціональне використання територій, які не виконують функції забезпечення руху на користь усіх груп користувачів;

– соціальний підхід – наявність необхідних об'єктів соціального обслуговування, як для забезпечення повсякденних цілей, так і для організації соціальної взаємодії;

– екологічний підхід – підвищення екологічної безпеки міської території за рахунок зниження дії всіх можливих негативних впливів [5, 6].

Процес формування громадських просторів на вулицях міста широко розповсюджений у практиці по всьому світу; спільними для створення таких проєктів є принципи планування, які були сформульовані в ході роботи Конгресу для Нового урбанізму «The Congress for New Urbanism» – міжнародної некомерційної організації, яка працює над створенням проєктів вулиць для життя. Головна ідея цих проєктів полягає в тому, що міські вулиці створюють умови для соціальної взаємодії та стають центрами громадського життя, а іноді на шкоду організації руху транспорту. За результатами роботи були сформульовані 7 основних принципів стійкого розвитку вулиць – «sustainable street Network Principles» для використання у транспортному плануванні міських вулиць, що наведені у таблиці 1 [3, 4].

Безумовно, вулиці це одне з найбільш важливих публічних місць у просторі. Вони є джерелом життєвої сили міст і основою економічного розвитку населеного пункту. Також вони утворюють більшу частину громадських просторів міста і мають потенціал розвитку ділової активності. Сучасний ритм міського життя диктує нові вимоги до планування міських вулиць в процесі якого необхідно враховувати безліч функцій, які виконують вулиці.

Важливу увагу необхідно звернути на принципи, що вулиці є одночасно громадським простором, а також і транспортними артеріями. З врахуванням цього, вуличному простору надається роль

Таблиця 1

#### Принципи для формування стійкої вулиці

Принципи		Опис принципів
I	Формування на вулицях громадських просторів	Простір вулиці може використовуватись не тільки для переміщення людей, але і для їх соціальної взаємодії
II	Створення просторів, які підтримують економічну активність	Простір вулиці може бути інвестиційним проєктом
III	Різноманітність умов руху	Формування шляхів руху для усіх видів моторизованого і не моторизованого транспорту для усіх користувачів
IV	Інтеграція простору в природну систему	Збільшення кількості природних елементів при благоустрої
V	Враховування унікальних особливостей території	Створення та зберігання індивідуальних особливостей території
VI	Формування вуличної мережі, яка буде привабливою для пішоходів	Формування комфортного, безпечного, естетично привабливого середовища
VII	Створення гармонії з іншими елементами транспортної інфраструктури	Забезпечення взаємозв'язків усіх елементів вулиці між собою

каталізатора перетворення міського середовища, в умовах якого дизайн вулиці повинен враховувати пішоходів, водіїв, велосипедистів, так само, як і користувачів громадського транспорту, але все це перебуває у рамках обмеженого простору. Тому при проектуванні на рівні із транспортними артеріями, необхідно передбачати громадські простори із врахуванням різноманітності функцій, які належать вулицям в міському середовищі [6, 8, 9].

Необхідно звернути увагу на те, що багато міських вулиць формувались у різні часи, тому вони повинні змінюватися із врахуванням сучасних вимог. Простір вулиць може бути використаний для різних цілей, в тому числі і для використання технічних прийомів заспокоєння руху з елементами дизайну архітектурного середовища. Як свідчить закордонний досвід, вулиці можуть бути не тільки функціональним елементом транспортної системи, але і фінансовим активом. За умов сучасного підходу, вулиці можливо розглядати, як цілі екосистеми, в яких створені людиною елементи взаємодіють із природними. Екологічні рішення можуть стати основою для довгострокової роботи над створенням природно-орієнтованого міського простору [10].

Безумовно, вулиця повинна бути комфортною. Комфортні вулиці повинні бути не тільки для переміщення, але і сприйматися, як невід'ємна частина самого міста. Основна задача комфортних вулиць полягає у забезпеченні балансу інтересів усіх учасників руху, а також зручного переміщення усіх користувачів вуличного простору, незалежно від їх віку і вибраного виду переміщення, тобто: ходьба, їзда на велосипеді, використання громадського транспорту або прогулянка по бульвару.

Комфортні вулиці важливі для підвищення безпеки, а також вони створюють громадські місця, які наповнені їх життям і енергією міста. Завдяки таким елементам дизайну комфортної вулиці, як пішохідний тротуар, розвинута мережа велосипедних доріжок, жителі вулиці можуть використовувати її також не побоюючись зустрічного руху транспорту, а батьки мають змогу навчати своїх дітей безпечній їзді на велосипедах. Комфортна вулиця надає своїм користувачам конкурентні умови переміщення для забезпечення міської мобільності. Завдяки особливостям комфортної вулиці можливо розглянути перехід до нових принципів при плануванні, згідно з якими спочатку буде відводиться необхідна територія в межах червоних ліній з двох боків вулиці, виходячи із просторових потреб землекористування прилеглих будівель для пішоходів, велосипедистів, а також озеленення та

організації місць відпочинку. На наступному етапі визначаються межі проїзної частини та траєкторія руху автомобілів, що потім дозволять збалансувати оптимальний розподіл простору вулиці між її користувачами з врахуванням попиту різних місць тяжіння [4, 6, 7].

Разом із комфортними вулицями перетворюється не тільки спосіб життя людини, а також виявляється позитивний ефект на економічний стан населеного пункту. Місцеві органи влади і приватні підприємства можуть отримати вигоду від інвестицій у реконструкції і перетворенні вулиць в невід'ємну частину привабливого міського середовища. Дослідженнями проведеними у США встановлений стійкий зв'язок в бажанні людей жити і працювати у міських районах, де переважає озеленення і культурний природний ландшафт. У багатьох закордонних містах, концепція комфортної вулиці реалізується на основі державного приватного партнерства до якого включені адміністрація міста, науково-дослідницькі інститути, міський департамент транспорту, а також громадські і некомерційні організації та ініціативні групи. Таке партнерство може гарантувати, що у кожного із спільнот є власний гнучкий напрямок, але усіх об'єднує єдина мета, завдяки якій усі жителі мають доступ до заходів по організації безпечного і комфортного руху по вулиці міста.

Вулиці, які безпечні та комфортні для усіх користувачів, створюють умови збалансованого розвитку, як з питань економіки, так і екології у районах міста та забезпечують стійку взаємодію між об'єктами тяжіння і населення. Комфортні вулиці врівноважують пропускну здатність вуличного простору і рівень міської мобільності з існуючими містобудівними умовами землекористування і характером прилягаючої забудови. Сучасні питання по проектуванню міських вулиць спрямовані на покращення якості життя населення, а також створення вулиць, які одночасно забезпечують комфортні умови для проживання і утворюють збалансовану транспорту мережу міста. Також необхідно звернути увагу на відповідність наступним принципам:

– мультимодальність вулиці, що передбачає безпечні і зручні переміщення пішоходів, велосипедистів, користувачів громадського транспорту, водіїв транспортних засобів;

– екологічність вулиці, яка здійснюється за допомогою використання альтернатив індивідуальному транспорту. Збільшення насадження рослин спрямоване на покращення стану навколишнього середовища;



– інтелектуальність вулиці, яка забезпечує її оснащеність інформаційною інфраструктурою, що необхідна для підвищення ефективності роботи транспортної мережі [6, 7, 9].

Безумовно, неможливо одразу гарантувати досягнення комфортності і безпеки вулиць, але використання тих чи інших напрямків при проектуванні вуличного простору з використанням елементів дизайну і ландшафтними особливостями дозволить досягти поставленої мети. Цьому можуть сприяти:

– заходи заспокоєння руху для зниження швидкості автомобілів, використання різних матеріалів покриття, влаштування островців безпеки та ін.;

– інфраструктура для пішохів спрямована на забезпечення комфортних умов для людей різного віку, а також маломобільних груп населення, влаштування переходів та островців для перетину вулиці із зниженим бордюром камінням, використання матеріалів, що перешкоджають ковзанню по поверхні в зоні тротуару і пішохідних переходів та інше;

– заохочення велосипедистів – влаштування велосмуг та велодоріжок, облаштування велопарковок поряд із багатофункціональними об'єктами тяжіння населення [2, 3, 8, 9].

Використання комплексних заходів по створенню комфортних вулиць у містах в процесі їх планування або реконструкції дозволить створити покращені зони суспільного простору і взаємовідносин населення та якості життя.

**Висновки.** Таким чином в сучасний, безпечний і комфортний вуличний простір сприяє:

– підвищенню безпеки руху і зниження кількості травмованих і загиблих пішоходів;

– зниженню поїздки на індивідуальному транспорті, що покращує пропускну здатність вулиць, а також екологічний стан внаслідок зниження шкідливих викидів;

– збільшенню поїздки велосипедистів;

– збільшенню пішохідних прогулянок і зон спілкування населення;

– розвитку просторової структури території вулиць для організації громадського життя людей.

#### Список літератури:

1. Lofland L., Lyn H. The public realm: exploring the city's quintessential social territory: Hawthorne, N.Y., Aldine de Gruyter. 1998. 305 p.
2. Lefebure H. Writings on Cities. The Right to the City. Oxford: Blackwell Publishers. 2000. PP. 147-160.
3. Wesley E., Marshall, Piatkowski D., and Garrick N. Community Design, Street Networks and Public Health Journal of Transportation & Health. 2015. Vol. 1. Issue 4. 326-340 p.
4. Harvey D. Rebel Cities. From Right of the City to the Urban Revolution. London & New York: Verso, 2012. 187 p.
5. Соснова Н.С. Трансформація міського середовища як відображення економічних і суспільних процесів у найбільших містах України. Досвід та перспективи розвитку міст України. Проблеми розвитку найкрупніших міст України, Київ, ДІПРОМІСТО, 2011. Вип. 20. С. 98-106.
6. Карповець М. Місто як світ людського буття: монографія. Острог: Вид-во НаУОА. 2014. 258 с.
7. Сидоренко І.Г. Місто як соціокультурний простір: якісні ознаки. Науковий вісник НУБІП України. 2017. № 274. С. 92-102.
8. Соснова Н., Бардин Ю. Громадські простори у містобудівному розвитку та плануванні. Містобудування та територіальне планування. Київ, 2018. Вип. 67. С. 439-450.
9. Heal, Zachary. Seeking common ground: three perspectives on public space in. Proceedings of the institution of Civil Engineers. Urban Design and Planning. Issue DPOOO, 2018. PP. 1-8.
10. Філіппова Т.О. Функціонування міста: ландшафтний контекст. Вісник ХНТУ ім. Г.С. Сковороди, 2019. Т. 2, № 52. С. 71-82.

#### **Fomenko H.R. FEATURES OF FORMING THE DEVELOPMENT OF PUBLIC SPACE IN CITIES**

*The article examines the issues of spatial development of cities, which determine the need for their future improvement. An important component is the development of public space on city streets aimed at improving the quality of life of the population, as well as achieving a level of comfort in the urban environment. The features of the formation of public space on city streets, as well as the principles of street sustainability are considered. Attention is drawn to the rational use of space both for the movement of transport and for the expansion of users, namely pedestrians, cyclists, and vacationers.*

*Important attention must be paid to the principles that streets are both public space and also transport arteries. With this in mind, street space is given the role of a catalyst for the transformation of the urban environment, in which the street design must take into account pedestrians, drivers, cyclists, as well as public transport users, but all within a limited space. Therefore, when designing at the level with transport arteries,*

*it is necessary to provide for public spaces, taking into account the variety of functions belonging to streets in the urban environment.*

*Thanks to the features of a comfortable street, it is possible to consider a transition to new principles in planning, according to which the necessary territory will first be allocated within the red lines on both sides of the street, based on the spatial needs of land use of nearby buildings for pedestrians, cyclists, as well as landscaping and the organization of recreation areas. At the next stage, the boundaries of the roadway and the trajectory of cars are determined, which then makes it possible to balance the optimal distribution of street space between its users, taking into account the demand of different places of gravity.*

*Streets that are safe and comfortable for all users create conditions for balanced development, both economically and environmentally, in city districts and ensure sustainable interaction between objects of gravity and the population.*

*Modern issues in the design of city streets are aimed at improving the quality of life of the population, as well as creating streets that simultaneously provide comfortable living conditions and form a balanced transport network of the city.*

**Key words:** *city streets, public space, comfortable areas, pedestrians, public life.*

УДК 629.067

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/45>**Чимшир В.І.**

Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»

**Тірон-Воробйова Н.Б.**

Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»

**Шик Е.**

Стамбульський технічний університет

**Малий В.С.**

Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»

## КОНЦЕПТУАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО ЗНЕЗАРАЖЕННЯ БАЛАСТУ ТА ЙОГО ЗАЛИШКІВ ІЗ ШЛАМОВИХ ЦИСТЕРН МОРСЬКИХ СУДЕН

Транскордонне вторгнення немісцевих (інвазивних) мікроорганізмів і органічних, і неорганічних забруднень через довготривале зберігання-переміщення/скидання баластної води великотоннажними океанськими суднами вважають широко ймовірним. Введення забруднюючих речовин і немісцевих мікроорганізмів може спричинити зміни в місцевих мікроорганізмах, морських видах і біоті, що може створити проблеми для екології, економіки, навколишнього середовища та здоров'я широких верств населення. У цій статті зібрано та представлено концептуальні підходи до очищення/знезараження баласту та його залишків зі створенням систем очищення баластних вод, використовуваних принципів та механізмів інактивації, а також переваги та проблеми (недоліки) технологій очищення. Крім того, стаття має на меті привернути увагу до взаємозв'язку між різними організмами та окремим механізмом, який необхідно інактивувати, включаючи вплив зовнішніх факторів (наприклад, рН, солоності, каламутності) на ефективність інактивації. У статті чітко виділена мета та завдання, де окреслюються проблеми знезараження баластної води та її осадів зі суттєвим впливом на навколишнє середовище; методи, сучасні технології, висновки та рекомендації щодо покращення процесів очищення/знезараження.

Цей огляд може допомогти у виборі відповідних систем очищення/знезараження баластних вод (існуючих і у майбутньому допрацьованих згідно законодавства відповідних країн перебування суден і, зокрема, міжнародних стандартів), принцип дії яких засновано на запронованих методах і методологіях, враховуючи умови морської води (наприклад, рН, температуру, солоність) і місцеві види морських районів, де судна мають намір працювати при автономному плаванні. Цей огляд також містить інформацію, що описує реакцію різних організмів на різні методи лікування.

**Ключові слова:** концептуальні підходи, баластні води, шламові цистерни, Міжнародна Морська Організація (ММО), знезараження.

**Постановка проблеми.** Баластна вода – це вода, яка використовується на морських судах для забезпечення стабільності та безпечності під час руху судна, а також для контролю навантаження. Баластна вода може набиратися або випускатися зі спеціальних цистерн або баків на судні.

У осадах баластних танків містяться організми, які становлять ризик вторгнення, навіть якщо на судах встановлено системи обробки баласту. Донні відкладення (осади) також сприяють корозії та спричиняють кумулятивні втрати дедвейту протягом багатьох років.

Так, зокрема, баластна вода може містити нафту та нафтопродукти, якщо судно користу-

валося нафтопродуктами або іншими нафтовмісними матеріалами під час набору баласту. Нафтовмісна баластна вода може стати джерелом забруднення для морського середовища, оскільки нафта та нафтопродукти можуть бути шкідливими для морських організмів та екосистем.

Контроль та управління нафтовмісною баластною водою є важливим аспектом управління залишками баласту на морських судах з метою збереження морського середовища [1, с. 2627; 2] та мінімізації екологічного впливу. Міжнародні та національні нормативи та стандарти регулюють цю сферу та встановлюють вимоги щодо обробки

та знезараження баластної води, щоб запобігти забрудненню морських вод та екосистем.

*Основні функції баластної води на судні включають:*

*Забезпечення стабільності:* Баластна вода використовується для зміни ваги та центра ваги судна, щоб забезпечити його стабільність під час руху та при доковому обслуговуванні.

*Контроль навантаження:* Баластна вода може використовуватися для контролю глибини занурення судна та забезпечення оптимальної водотоннажності для безпеки та ефективності перевезень.

*Запобігання качці:* В морському судні баластна вода може використовуватися для зменшення качки та підвищення комфорту для екіпажу та пасажирів.

Проте однією з ключових проблем, пов'язаних з баластною водою, є те, що під час набирання баласту у водоймі судно може випускати воду, яка містить живі організми, включаючи інвазивні види. Це може створити серйозні проблеми для біорізноманітності та морських екосистем, що вимагає регулювання та керування залишками баласту, а також очищення цієї води для зменшення її негативного впливу.

Вплив незнезараженої баластної води на екосистеми може бути катастрофічним. Надмірне введення шкідливих іноземних видів та патогенних мікроорганізмів може спричинити зруйнуванню місцевих біотопів та загрожувати морському біорізноманіттю. З цієї причини міжнародні організації вводять обов'язкові правові норми, вимоги щодо знезараження баластної води та стандарти якості води для суден.

Міжнародна конвенція Міжнародної морської організації (ММО) [3, с. 27727–27738] про контроль та управління баластною водою та осадами суден встановлює стандарти та вимоги, яких повинні дотримуватися морські судна. Ця конвенція стала важливим кроком у запобіганні розповсюдженню екологічних проблем через баластну воду.

Проблематика залишків баласту у шламових цистернах морських суден становить серйозний екологічний та біологічний ризик. Основні аспекти цієї проблеми включають:

– Перенесення інвазивних видів: Залишки баласту містять живі організми, включаючи рослини, тварини та мікроорганізми. Під час процесу баластування вони можуть потрапити в нові морські середовища та стати інвазивними видами. Це може призвести до змін в біорізноманітності та знищення місцевих видів.

– Розповсюдження хвороб: Залишки баласту можуть містити патогенні мікроорганізми, які можуть стати джерелом інфекцій для морських організмів та людей, які користуються морськими ресурсами.

– Забруднення водних середовищ: Баластна вода може містити забруднювачі, такі як нафта, солі, важкі метали та інші хімічні речовини. Їх вилиття у місцеві води може призвести до забруднення та зруйнування морських середовищ.

– Шкода для комерційних видів: Вилиття залишків баласту може спричинити шкоду комерційно важливим видам риб та іншим морським ресурсам, що може вплинути на риболовну індустрію та економіку регіону.

– Законодавство і регулювання: Міжнародна Морська Організація (ММО) прийняла ряд конвенцій та стандартів, спрямованих на регулювання управління залишками баласту, але дотримання їх вимог не завжди ефективне та контрольоване [4; 5, с. 110–111].

– Для вирішення цієї проблеми важливо розробляти та впроваджувати ефективні технології [6, с. 90–93; 7, с. 27755–27760; 8] та стратегії знезараження баластної води та обробки осадів, а також зміцнювати законодавчу базу та здійснювати контроль за її виконанням, з метою зменшення негативного впливу залишків баласту на морське середовище.

Дослідницька робота у цьому напрямку є надзвичайно важливою, і вона вже призвела до розробки нових методів та систем для контролю та знезараження баластної води [9; 10, с. 5139–5146; 11; 12, с. 617]. Такі інновації можуть вдосконалити якість баластного обслуговування та сприяти збереженню морського середовища.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Міжнародна Морська Організація (ММО) встановила ряд міжнародних нормативів та стандартів, спрямованих на контроль та управління баластною водою та осадами суден з метою зменшення негативного впливу баластної води на морське середовище та біорізноманітність. Однією з основних конвенцій, що стосуються цього питання, є Міжнародний кодекс про керування залишками баласту та водами баласту (International Ballast Water Management Code), який був прийнятий ММО та набув чинності 8 вересня 2017 року.

Основні положення Міжнародного Кодексу про керування залишками баласту та водами баласту включають:

Вимоги до очищення та знезараження баластної води: Кодекс встановлює стандарти та про-

цедури для очищення та знезараження баластної води з метою зниження ризику перенесення інвазивних видів та патогенних мікроорганізмів.

Вимоги до управління баластом: Кодекс містить вимоги щодо управління залишками баласту, включаючи їх контроль та обробку.

Перевірки та інспекції: ММО вимагає від держав-членів проводити інспекції та перевірки суден щодо дотримання вимог Кодексу.

Заповнення та подання звітів: Власники суден зобов'язані вести облік та подавати звіти щодо управління баластом та баластною водою.

Ці заходи призначені для захисту морських екосистем від введення інвазивних видів та зменшення ризику поширення патогенних мікроорганізмів через баластну воду. Держави-члени ММО зобов'язані впроваджувати та виконувати вимоги цього кодексу, а також сприяти розробці та впровадженню технологій для очищення та знезараження баластної води.

На сьогодні є декілька ключових тем і публікацій у сфері знезараження залишків баласту із шламових цистерн:

*Ефективність методів знезараження баластної води:* Дослідження спрямовані на оцінку та порівняння різних методів знезараження баластної води, таких як хлорування, озонування, ультрафільтрація та інші технології, щоб з'ясувати їхню ефективність у знищенні шкідливих мікроорганізмів та інших забруднювачів.

*Вплив знезараження баластної води на морське середовище:* Дослідження оцінюють екологічні наслідки використання різних методів знезараження баласту на морські організми та екосистеми.

*Розробка нових технологій:* Деякі дослідження фокусуються на розробці нових інноваційних технологій для знезараження баласту та очищення баластної води, що можуть бути більш ефективними та екологічно безпечними. Системи очищення баластних вод мають максимальну ефективність очищення та інактивації, коли гарантуються оптимальні зовнішні умови (наприклад, рН, температура, каламутність, солоність, наявність осаду).

*Регулювання та впровадження стандартів:* Велика частина досліджень стосується розвитку міжнародних та національних нормативів та стандартів, а також оцінки їхнього впровадження та дотримання на судах.

Зокрема, авторами О. В. Шестопалов та ін. (2015, НТУ «Харківський політехнічний інститут») у навчальному посібнику «Екологія та охо-

рона навколишнього середовища» розглядаються сучасні проблеми забруднення навколишнього середовища нафтопродуктами. Проаналізовано існуючі методи попередження забруднення навколишнього середовища нафтопродуктами, а також шляхи його відновлення після забруднення. Наведено рекомендації щодо вибору та розрахунку устаткування для очищення викидів та утилізації відходів, які містять нафтопродукти [13].

У магістерській роботі Морашової Валентини «Дослідження технології очищення води р. Десна з використанням коагулянтів сульфату та оксихлориду алюмінію» (2022) наведено, що винахідниками Новоженюк М. С. та Затолокін М. Є. запропоновано спосіб очищення води баластною коагуляцією. Процес полягає в тому, що в оброблювану воду при перемішуванні додають коагулянт та інертний гранульований матеріал, проводять первинну коагуляцію колоїдів. Здійснюють проміжне часткове видалення гранульованого інертного матеріалу. Після чого в оброблювану воду додають флокулянт, а також другу порцію коагулянта в кількості 10–70% його загальної використаної маси, та проводять повторну (вторинну) коагуляцію та видалення гранульованого інертного матеріалу [14].

У статті Reduction of ballast tank sediment: Evaluating the effect of minor structural changes and developing a pneumatic cleaning system (Зменшення осаду в баластних танках: оцінка впливу незначних структурних змін і розробка пневматичної системи очищення) турецької професорки Ceren Bilgin Güney (2020) наведено, що регулярна експлуатація пневматичної системи очищення перед операціями дебаласту зменшила загальне відкладення осаду в баластній цистерні до 45%, який необхідно контролювати. Це призвело до зменшення ризику вторгнення, корозії резервуарів і кумулятивних втрат дедвейту. Це дослідження представляє результати проекту «Концептуальна конструкція баластної цистерни для зменшення накопичення осадів» (TUBITAK, Грант №: 115Y740) [15–16].

У тезах доповідей Reducing the Risks of Crude Oil Tanks Operation by Means of Automating Bottom Water Drainage and Bottom Sediment Removal Processes (Teregulov M. та ін.) наведено метод застосовування додаткових функцій автоматизованих систем управління (АСУ) технологічними процесами (ТП) для зниження ризиків експлуатації небезпечних виробничих об'єктів (резервуари для збереження сирової нафти та нафтопродуктів). Автоматизація процесу дренажу досягається

установкою на сифонний кран кульового крана з моторним приводом і покажчика концентрації масла у воді. Новизна запропонованого рішення полягає в алгоритмі ітераційного процесу дренування. Коли досягається задана концентрація, сигналізація сповіщає та й надсилає сигнал про закриття кульового крана [17, с. 196–197].

**Метою статті** є розгляд та аналіз концептуальних підходів до знезараження баласту та його залишків з шламових цистерн морських суден. Специфічні завдання статті включають вивчення проблем, пов'язаних із знезараженням баластної води при прийманні баласту на судно та перевірку показників якості води у процесі утворення залишку баласту та його тривалому зберіганні на судні.

#### **Завдання:**

1. Розглянути основні проблеми знезараження баластної води та їх вплив на навколишнє середовище.

2. Вивчити методи та технології, які використовуються для знезараження баласту та забезпечення якості води під час його перевезення.

3. Представити висновки та рекомендації щодо покращення процесу знезараження баласту та контролю за якістю води в шламових цистернах морських суден.

**Виклад основного матеріалу.** Біорізноманіття у водних організмах, яке є властивим певній зоні, може змінюватися та трансформуватися з часом через транспортування водяного баласту великотоннажними морськими суднами. Шкідливі види, перенесені в баластні води, можуть становити небезпеку для біокультури регіону.

Лабораторні випробування або моделювання випробувань баластної води завжди сприяють подальшим інноваційним розробкам методів обробки баластної води та її осадів (шламу). Однак більш реальним є тематичні моніторингові дослідження, які продемонструють діючі висновки про біорізноманіття баластних вод і реальну ефективність методів очищення. З огляду на це, ідентифікація організмів у баластній воді є вирішальним кроком у процесі очищення. Мета-штрихкодування (метабаркодинг) ДНК і РНК і нові розроблені методи сприяють ідентифікації біорізноманіття. На додаток до добре відомих шкідливих мікроорганізмів, бактерії, стійкі до антибіотиків, і гени стійкості до антибіотиків, присутні в баластній воді, є іншими темами досліджень, які нещодавно проводяться (Lv та ін.) [18].

Основні дослідження привертають увагу до осаду (залишку, шламу) в резервуарах баластної води, оскільки осад є багатим джерелом, що

складається з великої різноманітності та високої концентрації різноманітних біологічних видів (Хуе та ін.) [19]. Дослідники, компанії та власники суден повинні приділяти більше уваги обробці осадів так само, як і обробці баластних вод.

#### **1. Проблеми знезараження баластної води**

Перша проблема, яку необхідно розглянути, – це *знезараження баластної води* при прийманні її на судно.

Знезараження баластної води є важливою задачею для запобігання поширенню інвазивних видів та мікроорганізмів, а також забрудненню морського середовища. Основні проблеми знезараження баластної води та їх вплив на навколишнє середовище включають:

Розповсюдження інвазивних видів: Баластна вода може містити живі організми, які не є місцевими для конкретного регіону. Це може призвести до перенесення інвазивних видів, які конкурують з місцевими видами, завдаючи їм шкоди та змінюючи екосистему.

Розповсюдження патогенних мікроорганізмів: Баластна вода може містити патогенні бактерії та віруси, які можуть стати джерелом хвороб для морських організмів та навіть людей, які користуються морем.

Забруднення морського середовища: Баластна вода може містити забруднювачі, такі як нафта, солі, важкі метали та інші хімічні речовини. Їх вилив в море може призвести до забруднення та зруйнування морських середовищ.

Різноманітність методів знезараження: Різні судна та порти можуть використовувати різні методи знезараження баластної води, і їх ефективність може варіюватися. Це ускладнює встановлення єдиної стратегії знезараження.

Відсутність міжнародних стандартів: Національні та міжнародні стандарти та нормативи знезараження баластної води не завжди є єдиною та детально регульованою системою, що ускладнює контроль і впровадження стандартів.

Для розв'язання цих проблем важливо розвивати та впроваджувати ефективні технології знезараження баластної води, зміцнювати законодавчу базу та регулювання, а також вдосконалювати моніторинг та контроль за дотриманням вимог. Такі заходи спрямовані на зменшення негативного впливу баластної води на навколишнє середовище та біорізноманітність.

#### **2. Контроль якості води при залишку баласту на судні**

Друга проблема, яка потребує уваги, – це контроль за якістю води в шламових цистернах

морських суден та під час тривалого зберігання баласту. Це важливо для запобігання викидам забруднюючих речовин та забезпечення дотримання екологічних стандартів. Розділ включає:

- **Технічні аспекти контролю:** Розгляд технологічних систем і сенсорів для моніторингу якості води у шламових цистернах. У січні 2019 року ММО опублікувала список затверджених систем управління баластними водами з назвами виробників (ІМО, 2019а).

- **Вимоги та стандарти якості води:** Огляд міжнародних та національних стандартів для баластної води, які повинні дотримуватися судновласниками.

- **Інновації у контролі за якістю:** Представлення новітніх розробок та технологій, які дозволяють покращити контроль за якістю води.

1. Суть концептуальних підходів до знезараження баласту.

2. Технології та інновації в знезараженні баласту

Знезараження баластної води – це важлива складова процесу, який пов'язаний з обробкою і управлінням баластними водами на морських судах. Суть концептуальних підходів полягає в ефективному видаленні та знищенні потенційно шкідливих мікроорганізмів, бактерій, вірусів та інших забруднень, які можуть бути присутніми у баластній воді перед її скиданням у море.

Це необхідно для запобігання введенню шкідливих інвазивних видів у нові морські екосистеми та забезпечення дотримання стандартів якості води.

Основні етапи концептуальних підходів до знезараження баласту включають:

- а. Забір баластної води

Перший крок – це забір баластної води у шламові цистерни судна під час приймання баласту. Це відбувається для забезпечення стабільності судна та збереження безпеки під час плавання. Однак важливо зрозуміти, що ця вода може бути зараженою і містити патогени та інші забруднюючі речовини. Організми транспортуються водняним баластом від порту завантаження до порту розвантаження і можуть стати інвазивними водними видами, які порушують морське середовище.

Щоб зменшити ймовірність такого шкідливого впливу на навколишнє середовище, у Міжнародній конвенції про управління баластними водами (ІМО, 2004) визначено стандарти для скидання баластних вод.

Наявність багатьох організмів у баластній воді суворо регулюється, особливо мікро-

організмів, зокрема (джерело-оригінал: Recent progress and challenges facing ballast water treatment – A review: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132776>) – список бактерій, фітопланктону та зоопланктону, зареєстрованих на основі проб баластної води з наведеними методами культивування та кількісного визначення (види-відбір проб/культивування-моніторинг і кількісна оцінка-автори(довідка)), наприклад, для **Bacteria (бактерій):** *Bacillus globigii spores* – Cultured – Dilution plate counting (Holm et al. (2008)); *Bacillus subtilis spores* (ATCC 6633) – Cultured – Microscopic state of the spore analysis by Transmission Electron Microscope (TEM) (Jung et al. (2013)). Зокрема, для **Phytoplankton (фітопланктону):** *Algal cell* – Natural phytoplankton composition collected from DHI Ballast Water Centre from Denmark and Singapore – Enumerated by fluorescein diacetate staining (FDA) method within a Sedgewick Rafter Counting Chamber using an inverted microscope. Quantified by Most Probable Number (MPN) calculation (Lundgreen et al. (2018)). Для **Zooplankton (зоопланктону):** *Artemia franciscana* (Brine shrimp) – Cultured – Monitored and quantified by using Bogorov-Rass counting chamber and stereomicroscope (Park et al. (2017)).

- б. Обробка та знезараження

Після збору баластної води необхідно провести обробку та знезараження, щоб забезпечити її безпечність для навколишнього середовища.

Процеси відбору проб, моніторингу, аналізу та очищення інвазивних організмів є дуже складними через їх різні властивості, розміри та структуру. Наприклад, в організмах розміром понад 50 мкм переважає зоопланктон, тоді як діапазон розмірів фітопланктону коливається від 10 мкм до 50 мкм. Бактерії зустрічаються в групі організмів розміром менше 10 мкм (ІМО, 2004). Отже, ці процеси потребують ретельного дослідження.

На основі останніх досліджень й публікацій, про які йдеться в літературних оглядах, методи обробки баластних вод згруповані у **фізичні, механічні та хімічні**.

*Методи фізичної та механічної обробки* вважаються основними, оскільки під час обробки не додаються хімічні речовини. Часто використовуваними методами фізичної та механічної обробки є фільтрація, циклонна сепарація, нагрівання, ультразвукова обробка та УФ-обробка.

Фільтрація видалає відкладення (завислі частинки), мікроорганізми з баластної води за допомогою принципів просіювання за розміром частинок і відцентрових сил. З метою відділення осаду та

організмів від баластної води застосовуються такі методи фільтрації, як повільна та швидка піщана фільтрація, ситова фільтрація, тканинні сітки/фільтри, фільтрація попереднього покриття, дискова фільтрація, гумова фільтрація, мембранна фільтрація, колодязна фільтрація та циклонна розділення – інтегровано в системи очищення (Gregg та ін.; Kumar та ін.) [20, с. 5116–5120; 21, с. 521–530]. Вибір відповідного методу фільтрації вимагає аналізу складових води та якості з точки зору органічних і неорганічних речовин, організмів, а також фізичних і хімічних параметрів (наприклад, рН, температура, каламутність). Крім того, швидкість фільтрації відіграє вирішальну роль у виборі методу фільтрації. Визначення швидкості фільтрації повинно супроводжуватися врахуванням забезпечення високої ефективності видалення, часу роботи, вартості енергії, потреби в просторі на судні, а також забруднення та зворотного промивання фільтрів. Оскільки зважені тверді речовини та мікроорганізми мають широкий діапазон розмірів, методи фільтрації можуть демонструвати різні результати ефективності видалення залежно від фізичних властивостей фільтра.

Мікроорганізми дуже чутливі до значного підвищення або зниження температури навколишнього середовища. *Технологія термічної обробки* використовує нездатність мікроорганізмів протистояти високим температурам. Вищі температури в діапазоні 40–55 °С демонструють хорошу здатність до інактивації мікроорганізмів, таких як бактерії, фітопланктон і зоопланктон (Quilez-Badia та ін.). Термічна обробка є дуже зручною технікою для обробки баластних вод, оскільки вона має високу ефективність знищення (Wang та ін.) і не призводить до утворення шкідливих побічних продуктів. Крім того, відпрацьоване тепло, що виробляється судновим двигуном, можна рекуперувати та направляти через систему очищення баластних вод (Acomi та ін.; Acomi та Ghita; Li та Lu) [22, с. 408–410]. Рігбі та ін. (1999) розробили метод нагріву, який використовує відпрацьоване тепло судових двигунів. Підхід знищив багато зоопланктону та фітопланктону при температурі близько 38 °С. Необхідність тривалого часу роботи, підвищена потреба в енергії та можливість корозії на поверхні баластної цистерни, однак, можна розглядати як недоліки підходів до термічної обробки.

*Мікрохвильовий нагрів* дозволяє досягти високих температур за короткий час. Мікрохвильова термообробка не потребує складних компонентів і демонструє ефективність навіть для непрозорої води.

Однак у справжніх очисних установках для баластних вод потрібно безперервно очищати тонни води з високою швидкістю потоку (1000 м<sup>3</sup>/год). З огляду на ці умови, досягнення високої температури та ефективності обробки потребує більш тривалого часу обробки (години або дні, залежно від застосованої потужності) і тягне за собою більші споживання енергії. Тим не менш, мікрохвильова обробка може бути прийнятним варіантом, якщо витрати часу та енергії можуть бути зменшені до тих, які використовуються в пілотних системах обробки.

*Ультразвукова дезінфекція* заснована на генерації високочастотної вібрації, яка призводить до утворення кавітаційних бульбашок у рідині, а імпульсія кавітаційних бульбашок призводить до розриву клітинної мембрани та знищення мікроорганізмів (Viitasalo та ін.) [23, с. 35–45]. Параметри, що впливають на ефективність ультразвукової дезінфекції, включають застосовувану частоту, щільність потужності, час впливу, матеріал резервуара, положення джерела ультразвуку та розмір організмів. Однак, *поєднання ультразвукової обробки* з такими системами обробки, як УФ (Viitasalo та ін.), *перекис водню* (Ванг та ін.), *озон та передові хімічні окислювачі* (Gavand та ін.) має високу ефективність інактивації. Ультразвукові дослідження зараз розробляють та оптимізують обладнання для дезінфекції баластної води за допомогою ультразвукового резонатора (Osman та ін.) і застосування засобів для запобігання нальоту для систем очищення баластної води (Estévez-Calvar та ін.) [24, с. 115–120].

Критичною проблемою, з якою стикається *УФ-обробка*, яка може знизити ефективність інактивації, є здатність морських організмів до самовідновлення та відродження. Незважаючи на порушення клітинного циклу або пошкодження ДНК після ультрафіолетового опромінення, морські організми здатні відновлювати пошкодження за допомогою механізмів відновлення ДНК, таких як фотореактивація та темне відновлення (Chen та ін. [25, с. 1445–1447]; Romero-Martínez та ін.; Сазерленд та ін.). Крім того, може відбутися повторна колонізація умовно-патогенними бактеріями, які споживають субстрати, що з'являються після вивільнення клітинної речовини з мертвих клітин (Hess-Erga та ін.). Застосування відповідної дози УФ може бути ключовим аспектом для запобігання самовідновленню та відростанню організмів. Дозу ультрафіолетового опромінення слід визначати, враховуючи тип організмів, які підлягають лікуванню, та їхню чутливість до ультрафіолетового опромінення (Sanz та ін.).



*Дезоксигенація* – це процес, який відноситься як до фізичної, так і до хіміко-біологічної обробки. Фундаментальний принцип деоксигенації заснований на видаленні кисню з баластної водяної цистерни для створення середовища гіпоксії, тобто концентрація кисню нижче 1 ppm. У якості фізичної обробки кисень можна видалити або зменшити шляхом вакуумування або видалення його з баластної води безперервним потоком інертного газу, такого як азот (N<sub>2</sub>). У разі хімічної та біологічної обробки рівень кисню можна зменшити шляхом подачі газу з додатковим ефектом, такого як CO<sub>2</sub> або діоксид сірки (SO<sub>2</sub>), у баластний бак, використанням біоагентів на основі дріжджів або додаванням поживних речовин, глюкози, або відновник, такий як сульфід (McCollin та ін.).

#### в. Моніторинг якості води

Після проходження обробки та знезараження, важливо провести моніторинг кількісного та якісного складу води, щоб переконатися, що всі параметри відповідають вимогам міжнародних та національних стандартів, зокрема ключовому стандарту D-2. Це включає в себе аналіз хімічного, біологічного, мікробного складу «нативної» та знезараженої води, вимірювання концентрації та визначення рівнів забруднюючих речовин.

Так, *Проведення тривалого моніторингу та забезпечення автоматизації* процесу знезараження баластних вод дозволяють реагувати на зміни якості води в реальному часі та забезпечувати стабільність процесу знезараження. Такі ключові процеси мають декілька важливих переваг для керування залишками баласту та охорони морського середовища:

- Покращення якості знезараження;
- Зменшення ризику негативного впливу;
- Відповідність нормативам і стандартам;
- Ефективність роботи судна;
- Зменшення ризику викидів.

Загалом, тривалий моніторинг та автоматизація грають важливу роль в забезпеченні ефективного

та безпечного знезараження баластної води, зменшенні негативного впливу на морське середовище та дотриманні вимог стандартів та регулювань.

**Висновки.** Концептуальні підходи до знезараження баласту є ключовими ланками для збереження морського біорізноманіття та попередження забруднення водних ресурсів. Застосування високоефективних, енергозберігаючих технологій та інновацій в цій області може допомогти досягти стандартів якості води та зберегти екологічну цілісність морських екосистем.

У статті розглянуто проблеми знезараження баласту та його осадів, та контролю за якістю води на морських суднах; дезінфекції мікроорганізмів із широкого точки зору. Подано обговорення щодо відбору проб, моніторингу, кількісного визначення та основних методів обробки баластних вод. Також у цій роботі розглядаються їх значення, переваги, проблеми та вплив на навколишнє середовище. Важливість розв'язання цих проблем полягає в збереженні морського середовища та попередженні поширенню шкідливих організмів. Сучасні технології та міжнародні стандарти можуть сприяти покращенню процесу знезараження баласту та контролю за якістю води. Поєднання дослідницького й практичного досвіду висококваліфікованих спеціалістів національного/міжнародного рівнів морської галузі сприяє покращенню усвідомленості перед глобальними проблемами знищення осередків флори і фауни світу серед широких верств населення.

Майбутні дослідження (прикладного, практичного характеру) мають найбільш влучно ідентифікувати та охарактеризувати чужорідні організми. Майбутня розробка систем очищення/управління баластних вод та їх осадів повинна бути зосереджена на більш високому ступені ефективності очищення, покращенні економічної складової та екологічно чистих аспектах («зелених»/відновлюваних) сьогодення.

#### Список літератури:

1. Smith, J. K., & Johnson, A. B. Ballast Water Management: Challenges and Solutions. *Environmental Science & Technology*. 2020. 54(5). Pp. 2625-2636.
2. International Maritime Organization (IMO). International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments. 2021. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/BallastWaterManagement/Pages/Default.aspx>
3. Wang, L., & Chen, Z. Advances in Ballast Water Treatment Technologies. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. 26(27). Pp. 27727-27738.
4. United States Environmental Protection Agency (EPA). Ballast Water Management Program. 2021. <https://www.epa.gov/vessels-marinas-and-ports/ballast-water-management-program>
5. Anderson, M. A., & Smith, C. D. Monitoring and Control of Ballast Water Treatment Systems: Current Trends and Future Perspectives. *Environmental Technology & Innovation*. 2018. 9. Pp. 100-112.

6. Gollasch, S., & David, M. Ballast Water Management and Maritime Transport of Harmful Aquatic Organisms and Pathogens (HAOP): Review and Analysis of Management and Policy Options. *Environmental Management*. 2017. 60(1). Pp. 85-102.
7. Mardones, J. I., & Tiselius, P. Review of Monitoring Technologies for Ballast Water Compliance Testing. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019. 26(27). Pp. 27755-27765.
8. US Coast Guard. Ballast Water Discharge Standards. 2021. <https://www.dco.uscg.mil/Our-Organization/Assistant-Commandant-for-Prevention-Policy-CG-5P/National-Ballast-Water-Management-Program/Discharge-Standards/>
9. Green Marine. Ballast Water Management. 2021. <https://green-marine.org/environmental-program/water/>
10. Zhang, H., & Miao, Y. Development and Application of Ballast Water Management Systems: A Review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. 25(6). Pp. 5139-5149.
11. European Maritime Safety Agency (EMSA). Ballast Water Management. 2021. <https://www.emsa.europa.eu/environment/environmental-topics/ballast-water-management.html>
12. Guo, F., & Wang, D. A Review of Ballast Water Management Regulations and Technologies: A Chinese Perspective. *Frontiers in Marine Science*. 2020. 7. P. 617.
13. Шестопапов О. В. Охорона навколишнього середовища від забруднення нафтопродуктами: навч. посіб. / Шестопапов О. В., Бахарєва Г. Ю., Мамедова О. О. та ін. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – 116 с.
14. Морашова, В. С. Дослідження технології очищення води р. Десна з використанням коагулянтів сульфату та оксихлориду алюмінію: дипломна робота ... магістра: 181 Харчові технології / Валентина Святославівна Морашова; наук. керівник Гусятинська Наталія Альфредівна. – Київ, 2022. – 132 с.
15. Ceren Bilgin Güney, Devrim Bülent Danişman, Şafak Nur Ertürk Bozkurtoğlu. Reduction of ballast tank sediment: Evaluating the effect of minor structural changes and developing a pneumatic cleaning system. *Ocean Engineering*. 2020. 203. Article 107204. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107204>
16. Ceren Bilgin Güney. Optimization of operational parameters of pneumatic system for ballast tank sediment reduction with experimental and ANN applications. *Ocean Engineering*. 259. 2022. Article 111927. <https://www.sciencedirect.com/journal/ocean-engineering/vol/259/suppl/C>
17. Teregulov M., Zemlerub L., Mashkova A., Kharasov E. Reducing the Risks of Crude Oil Tanks Operation by Means of Automating Bottom Water Drainage and Bottom Sediment Removal Processes. Abstracts of The Second Eurasian RISK-2020 Conference and Symposium. 2020. Pp. 196-197. <https://doi.org/10.21467/abstracts.93.104>
18. Lv et al. Transfer of antibiotic-resistant bacteria via ballast water with a special focus on multiple antibiotic-resistant bacteria: a survey from an inland port in the Yangtze River. *Mar. Pollut. Bull.* 2021. 166. Article 112166. 10.1016/j.marpolbul.2021.112166
19. Xue et al. Bacterial diversity in ballast water and sediments revealed by 2b-RAD sequencing. *Mar. Pollut. Bull.* 2021. 169 Article 112523. 10.1016/j.marpolbul.2021.112523
20. Kumar et al. Green method of stemming the tide of invasive marine and freshwater organisms by natural filtration of shipping ballast water. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2021. 28. Pp. 5116-5125, 10.1007/s11356-020-10839-4
21. Gregg et al. Review of two decades of progress in the development of management options for reducing or eradicating phytoplankton, zooplankton and bacteria in ship's ballast water. 2009. *Aquat. Invasions*. 2009. 4. Pp. 521-565. 10.3391/ai.2009.4.3.14
22. Li and Lu. The feasibility study of marine diesel engine exhaust gas for ballast water treatment. *Adv. Eng. Res.* 2018. 153. Pp. 408-411. 10.2991/aetr-17.2018.78
23. Viitasalo et al. Ozone, ultraviolet light, ultrasound and hydrogen peroxide as ballast water treatments—experiments with mesozooplankton in low-saline brackish water. *J. Mar. Environ. Eng.* 2005. 8. Pp. 35-55. <https://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-23944514607&partnerID=10&rel=R3.0.0>
24. Estévez-Calvar et al. Potential use of an ultrasound antifouling technology as a ballast water treatment system. *J. Sea Res.* 2018. 133. Pp. 115-123. 10.1016/j.seares.2017.04.007
25. Chen et al. A review on organism regrowth in UV-based ballast water treatment systems for the approval of new G8 guidelines. *Adv. Eng. Res.* 2018. 170. Pp. 1445-1448. 10.2991/iceep-18.2018.257

### **Chymshyr V.I., Tiron-Vorobiova N.B., Şık E., Malyy V.S. CONCEPTUAL APPROACHES TO DECONTAMINATION OF BALLAST AND ITS RESIDUES FROM SLUDGE TANKS OF SEA VESSELS**

*Transboundary invasion of non-native (invasive) microorganisms and organic and inorganic pollutants due to long-term storage-movement/discharge of ballast water by large-tonnage ocean-going ships is widely considered probable. The introduction of pollutants and non-native microorganisms can cause changes in native microorganisms, marine species, and biota, which can create ecological, economic, environmental, and public health problems. This article collects and presents conceptual approaches to cleaning/decontamination*

---

*of ballast and its residues with the creation of ballast water treatment systems, using principles and mechanisms of inactivation, as well as advantages and problems (disadvantages) of cleaning technologies. In addition, the paper aims to draw attention to the relationship between the various organisms and the particular mechanism to be inactivated, including the influence of external factors (e.g. pH, salinity, turbidity) on inactivation efficiency. The article clearly highlights the goal and task, which outlines the problems of decontamination of ballast water and its sediments with a significant impact on the environment; methods, current technologies, conclusions, and recommendations for improving cleaning/decontamination processes.*

*This review can help in the selection of appropriate ballast water cleaning/disinfection systems (existing and in the future refined according to the legislation of the respective countries where the ships are staying and, in particular, international standards), the principle of operation of which is based on the proposed methods and methodologies, taking into account the conditions of seawater (for example, pH, temperature, salinity) and local species of sea areas where the vessels intend to operate under autonomous navigation. This review also includes information describing the response of different organisms to different treatments.*

**Key words:** *conceptual approaches, ballast water, sludge tanks, International Maritime Organization (IMO), decontamination.*

## БУДІВНИЦТВО

УДК 624.042.05

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/46>

**Чичуліна К.В.**

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

**Щур-Дунець О.І.<sup>1</sup>**

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

**Щур-Дунець О.І.<sup>2</sup>**

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАДІЙНОСТІ ЖОРСТКИХ ВУЗЛІВ РАМНИХ КАРКАСІВ

*Розглянуто розрахунок надійності жорсткого вузла сталевого рамного каркасу будівлі. Проводиться врахування деяких параметрів дійсної роботи фланцевого з'єднання ригеля з колоною. Аналізується жорстке з'єднання ригеля з колоною для рамно-в'язевих каркасів одноповерхових та багатопверхових будівель з з'єднання за допомогою фланця на болтах підвищеної міцності класу 6,6–10,9. У такому вузлі болти працюють на розтяг, фланець працює на згин, а поперечну силу від балки приймає на себе столик, приварений до колони, чи болти самого фланцю, які частіше по розрахунках працюють в запас на зрізання. Болти проектується на максимальне зусилля розтягу і приймаються (частіше) одного типорозміру, тому в з'єднанні існує деякий резерв несучої здатності, котрий необхідно враховувати при розгляді реальної роботи вузла. Пропонується використання умовно-жорстких рамних вузлів. Надійність вузла визначається з умов взаємопов'язаної роботи окремих елементів. Пропонуються розрахункові коефіцієнти для проектування даного типу вузлів. В ході розрахунку були порівняні невеликі коефіцієнти кореляції  $r_{ij} < 0,5$ , тобто відмови елементів можна вважати незалежними. При незалежності випадкових характеристик для елементів вузла ймовірність відмови вузла в цілому буде наближено розраховуватись як сума всіх ймовірностей відмови елементів, запроєктованих згідно з нормами, вона буде дещо вища, ніж ймовірність відмови одного елемента. Для врахування цього фактору випадковості відмови пропонується використовувати коефіцієнт зниження розрахункового опору  $\gamma_z$ , який залежить від кількості незалежних елементів вузла  $n$ , представлений графіком. Для інженерної практики в статті пропонується використання коефіцієнта  $\gamma_z = 0,9$ . В європейських нормах проектування представлено розрахунок подібного вузла, близький до розгляду роботи елементів вузла у вигляді логічного з'єднання елементів. Загалом в статті проаналізовані міжнародні норми та стандарти.*

**Ключові слова:** відмова, надійність, жорсткі вузли, рамні каркаси.

**Постановка проблеми.** Сучасне будівництво потребує виключення із практики проектування вузлів на монтажному зварюванні у зв'язку із значною їх трудомісткістю. Тому до використання як вітчизняними, так і європейськими нормами останній час рекомендуються до застосування фланцеві вузли на болтах підвищеної міцності. Такі з'єднання надають можливість скоротити час монтажу конструкцій. Впровадження нових з'єднань вимагає більш повного з'ясування їх дійсної роботи. Необхідність зменшення ваги

конструкцій потребує більш повного визначення взаємозв'язків між несучою здатністю елементів вузла. Для визначення міри статистичної залежності між цими величинами можна використовувати коефіцієнт кореляції.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В європейських нормах проектування [1] представлено розрахунок подібного вузла, близький до розгляду роботи елементів вузла у вигляді логічного з'єднання елементів. Загалом в статті проаналізовані міжнародні норми та стандарти [1–6]. Дана стаття опирається на українські норми вказані в [7–8]. У [9–10] представлені основні

<sup>1</sup> Щур-Дунець Олександра Ігорівна

<sup>2</sup> Щур-Дунець Омелян Ігорівна

поняття теорії надійності, компоненти та показники надійності, найбільш поширені методи оцінювання показників надійності будівельних конструкцій, імовірнісні моделі навантажень, методи їх статистичного дослідження та встановлення розрахункових значень. Базуючись на викладках [10], розраховано кореляційний момент даного вузла.

**Метою статті** є пошук розрахункового алгоритму надійності жорсткого вузла сталевих рамного каркасу будівлі з урахуванням деяких параметрів дійсної роботи фланцевого з'єднання ригеля з колоною на основі міжнародних норм та стандартів.

**Виклад основного матеріалу.** Основним жорстким з'єднанням ригеля з колоною для рамно-в'язевих каркасів одноповерхових та багатопверхових будівель є з'єднання за допомогою фланця на болтах підвищеної міцності класу 6,6–10,9 (рис. 1).

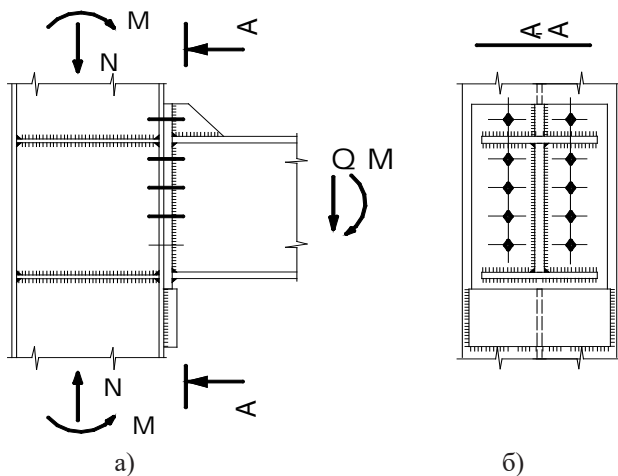


Рис. 1. Типовий вузол жорсткого спряження балки з колоною

У такому вузлі болти працюють на розтяг, фланець працює на згин, а поперечну силу від балки приймає на себе столик, приварений до колони, чи болти самого фланцю, які частіше по розрахунках працюють в запас на зрізання. Болти проєктуються на максимальне зусилля розтягу і приймаються (частіше) одного типорозміру, тому в з'єднанні існує деякий резерв несучої здатності, котрий необхідно враховувати при розгляді реальної роботи вузла.

При розрахунках вузла розглядаються різні стани відмови, у яких може знаходитись з'єднання. Представлений у європейських нормах проєктування [1] розрахунок подібного вузла близький до розгляду роботи елементів вузла у вигляді логічного з'єднання елементів.

При розгляді роботи елементів вузла можна відмітити, що Пластичні деформації вузла перед-

бачають деформації болтів і деформації від згину фланця в площині дії болтів. Поряд з основними зусиллями в стінці балки  $F_w$ , від дії моменту в балці і зусилля розтягу у болті  $F_a$ , необхідно враховувати дію моменту у консольній частині фланцю  $M_k$ . Реакція цього моменту додає зусилля, що розтягує, у болті за рахунок плеча «а» (рис. 2, б). Різниця зусилля розтягу у болті:

$$\Delta F_a = R_y W_k (a + b) / ab, \quad (1)$$

де  $R_y$  – розрахунковий опір сталі фланця;  $W_k$  – момент опору консолі на ділянці роботи болта.

На відміну від сталевих, в залізобетонних конструкціях жорсткість ригеля і колони регулюється арматурою. До визначеного розрахунком моменту  $M_{cp}$  вузол працює як звичайне жорстке з'єднання, при зростанні навантаження і досягнувши граничного моменту далі вузол працює як умовно шарнірний. Пропонується використання для сталевих рам умовно жорстких податливих вузлів, які забезпечують перерозподіл зусиль (момент згину) між навантаженими ригелями та колонами. Якщо обмежити значення моменту, котрий передається на колону від балки за рахунок регулювання жорсткості вузла, можливо отримувати значну економію сталі при проєктуванні колон одноповерхових та багатопверхових будівель. Податливість вузла можливо забезпечити за рахунок пружно пластичної роботи болтів у фланцевому з'єднанні, або використанням розрахованих пружин, що не стиснуті, на болтах фланцевого з'єднання чи встановленням пружних прокладок в замкненому сталевому корпусі. Усі ці демпферні пристрої повинні попередньо розраховуватись на стиск враховуючи границю жорсткості вузла Демпферні пристрої мають виконувати роль вирівнювача зусиль в рядах болтів у фланцевому з'єднанні.

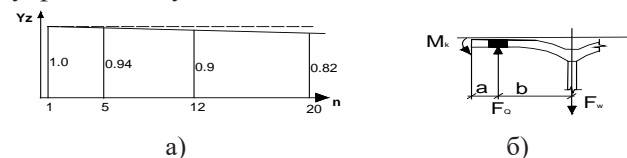


Рис. 2. До оцінювання надійності вузлів: а) графік залежності коефіцієнта зниження розрахункового опору  $\gamma_z$  від кількості статично незалежних елементів  $n$  вузла; б) схема роботи фланця балки

При розрахунках на надійність умову безвідмовної роботи рамного вузла можна представити як:

$$\tilde{x}_i = \tilde{\sigma}_{mi} - \tilde{\sigma}_{qi} \geq 0, \quad (2)$$

де  $\tilde{\sigma}_{mi}$  – випадковий параметр міцності  $i$ -го елемента вузла;

$\tilde{\sigma}_{q_i}$  – випадковий параметр навантаження і-го елемента вузла.

Для вузлів, структурні схеми яких можна представити у вигляді послідовного з'єднання незалежних елементів, умови безвідмовної роботи мають вигляд:

$$Y(x_1, x_2 \dots x_n) = \prod_{i=1}^n X_i \quad (3)$$

Запишемо вираз для резерву несучої здатності двох елементів одного і того ж вузла:

$$\tilde{Y}_1 = \tilde{X} - a_1 \tilde{q}, \quad (4)$$

$$\tilde{Y}_2 = \tilde{Z} - a_2 \tilde{q}, \quad (5)$$

де  $\tilde{X}, \tilde{Z}$  – випадкова характеристика міцності елемента (межа плинності сталі для основних деталей, межа плинності металу зварних швів і болтів), для загальності вважаємо їх різними для різних деталей;

$\tilde{q}$  – навантаження на конструкцію в цілому, наприклад, снігове навантаження на покриття, яка створює в елементах вузлів напруження  $a_1 \tilde{q}, a_2 \tilde{q}$  (робота конструкції вважається лінійною).

Розпишемо кореляційний момент для функцій (4) і (5), базуючись на викладах [10]:

$$\begin{aligned} K_{Y_1 Y_2} &= M[(Y_1 - \bar{Y}_1)(Y_2 - \bar{Y}_2)] = M[(X - a_1 q - \bar{X} + a_1 \bar{q})(Z - a_2 q - \bar{Z} + a_2 \bar{q})] = \\ &= M\{[(X - \bar{X}) - a_1(q - \bar{q})][(Z - \bar{Z}) - a_2(q - \bar{q})]\} = \\ &= M\{(X - \bar{X})(Z - \bar{Z}) - a_1(q - \bar{q})(Z - \bar{Z}) - a_2(q - \bar{q})(X - \bar{X}) + a_1 a_2 (q - \bar{q})^2\} = \\ &= M\{(X - \bar{X})(Z - \bar{Z})\} - M[a_1(q - \bar{q})(Z - \bar{Z})] - M[a_2(q - \bar{q})(X - \bar{X})] + M[a_1 a_2 (q - \bar{q})^2] = \\ &= K_{XZ} - a_1 K_{qZ} - a_2 K_{qX} + a_1 a_2 \tilde{q}^2. \end{aligned} \quad (6)$$

Стандарти лінійних функцій (4) і (5) записуються у вигляді:

$$\tilde{Y}_1 = \sqrt{\tilde{X}^2 + a_1^2 \tilde{q}^2}; \quad \tilde{Y}_2 = \sqrt{\tilde{Z}^2 + a_2^2 \tilde{q}^2}, \quad (7)$$

З урахуванням отриманих виразів запишемо формулу коефіцієнта кореляції для даного випадку у загальному вигляді

$$r_{Y_1 Y_2} = \frac{K_{Y_1 Y_2}}{\tilde{Y}_1 \tilde{Y}_2} = \frac{K_{XZ} - a_1 K_{qZ} - a_2 K_{qX} + a_1 a_2 \tilde{q}^2}{\sqrt{\tilde{X}^2 + a_1^2 \tilde{q}^2} \sqrt{\tilde{Z}^2 + a_2^2 \tilde{q}^2}}. \quad (8)$$

Проведемо узагальнення формули коефіцієнта кореляції.

Для всіх можливих випадків, в зв'язку із незалежністю і міцністю елементів вузлів, відповідні кореляційні моменти (другий і третій члени чисельника формули (8)) перетворюються у нуль. Далі розглянемо усі можливі випадки.

Випадок 1. Обидві деталі виготовляються із одного матеріалу, у зв'язку з чим  $X=Z$  і кореляційний момент  $K_{XZ}$ , що залишився у чисельнику, перетворюється на дисперсію, а формула (8) приймає наступний вигляд :

$$r_{Y_1 Y_2} = \frac{K_{Y_1 Y_2}}{\tilde{Y}_1 \tilde{Y}_2} = \frac{\tilde{X}^2 + a_1 a_2 \tilde{q}^2}{\sqrt{\tilde{X}^2 + a_1^2 \tilde{q}^2} \sqrt{\tilde{Z}^2 + a_2^2 \tilde{q}^2}}. \quad (9)$$

Випадок 2. Деталі виготовляються із різних матеріалів, внаслідок чого випадкові величини  $X$  і  $Z$  стають незалежними, кореляційний момент  $K_{XZ}$  перетворюється на нуль, а формула (8) записується як:

$$r_{Y_1 Y_2} = \frac{K_{Y_1 Y_2}}{\tilde{Y}_1 \tilde{Y}_2} = \frac{a_1 a_2 \tilde{q}^2}{\sqrt{\tilde{X}^2 + a_1^2 \tilde{q}^2} \sqrt{\tilde{Z}^2 + a_2^2 \tilde{q}^2}}. \quad (10)$$

Зв'яжемо стандарти міцності і напруження від загального навантаження співвідношеннями:

$$a_1 \tilde{q} = p_1 \tilde{X}, a_2 \tilde{q} = p_2 \tilde{Z}. \quad (11),$$

При цьому в практичних розрахунках стандарт міцності значно перевищує стандарт напруження від зовнішнього навантаження, тому звичайно  $p_1 < 1, p_2 < 1$ .

З урахуванням співвідношень, що були введені, перетворимо формулу (9)

$$\begin{aligned} r_{Y_1 Y_2} &= \frac{K_{Y_1 Y_2}}{\tilde{Y}_1 \tilde{Y}_2} = \frac{\tilde{X}^2 + a_1 a_2 \tilde{q}^2}{\sqrt{\tilde{X}^2 + a_1^2 \tilde{q}^2} \sqrt{\tilde{Z}^2 + a_2^2 \tilde{q}^2}} = \frac{\tilde{X}^2 + p_1 p_2 \tilde{q}^2}{\sqrt{\tilde{X}^2 + p_1^2 \tilde{q}^2} \sqrt{\tilde{Z}^2 + p_2^2 \tilde{q}^2}} = \\ &= \frac{\tilde{X}^2 (1 + p_1 p_2)}{\tilde{X} \sqrt{1 + p_1^2} \tilde{X} \sqrt{1 + p_2^2}} = \frac{1 + p_1 p_2}{\sqrt{1 + p_1^2} \sqrt{1 + p_2^2}} = \frac{1 + p_1 p_2}{\sqrt{1 + p_1^2 + p_2^2 + p_1^2 p_2^2}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Аналогічним чином перетворимо формулу (9)

$$\begin{aligned} r_{Y_1 Y_2} &= \frac{K_{Y_1 Y_2}}{\tilde{Y}_1 \tilde{Y}_2} = \frac{a_1 a_2 \tilde{q}^2}{\sqrt{\tilde{X}^2 + a_1^2 \tilde{q}^2} \sqrt{\tilde{Z}^2 + a_2^2 \tilde{q}^2}} = \frac{p_1 p_2 \tilde{X} \tilde{Z}}{\sqrt{\tilde{X}^2 + p_1^2 \tilde{q}^2} \sqrt{\tilde{Z}^2 + p_2^2 \tilde{q}^2}} = \\ &= \frac{p_1 p_2 \tilde{X} \tilde{Z}}{\tilde{X} \sqrt{1 + p_1^2} \tilde{Z} \sqrt{1 + p_2^2}} = \frac{p_1 p_2}{\sqrt{1 + p_1^2} \sqrt{1 + p_2^2}} = \frac{p_1 p_2}{\sqrt{1 + p_1^2 + p_2^2 + p_1^2 p_2^2}}. \end{aligned} \quad (13)$$

Отримані формули мають однаковий знаменник і відрізняються на одиницю у чисельнику.

Чисельні значення коефіцієнту кореляції для різних значень  $p_1$  та  $p_2$  надані у графіках на рис. 3.

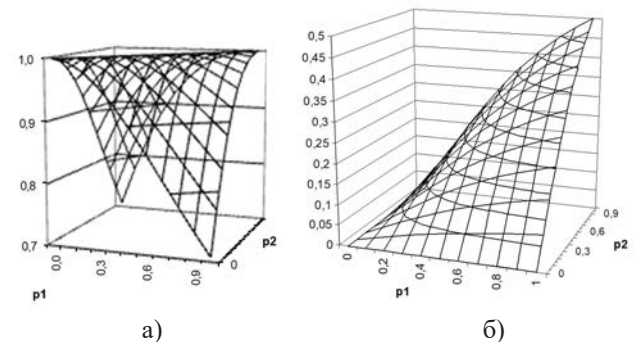


Рис. 3. Чисельні значення коефіцієнту кореляції для різних значень  $p_1$  та  $p_2$ :  
а) коефіцієнт кореляції 1-ий варіант;  
б) коефіцієнт кореляції 2-ий варіант

**Висновки.** Якщо отримано порівняно невеликі коефіцієнти кореляції  $r_{ij} < 0,5$ , відмови елементів можна вважати незалежними. При незалежності випадкових характеристик для елементів вузла ймовірність відмови вузла в цілому буде наближено розраховуватись як сума всіх імовірностей відмови елементів, запроєктованих згідно з нормами, вона буде дещо вища, ніж імовірність відмови одного елемента. Для враху-

вання цього фактору випадковості відмови пропонується використовувати коефіцієнт зниження розрахункового опору  $\gamma_z$ , який залежить від кількості незалежних елементів вузла  $n$ , представлений графіком рис. 1, а. Для інженерної практики пропонується використання коефіцієнта  $\gamma_z = 0,9$ .

#### Список літератури:

1. EN 1993-1-1. Eurocode 3: Design of steel structures. Part-1. General Rules and Rules for Buildings. Volume 1. Brussels, 2005. 288 p.
2. ISO 2394:2015. General principles on reliability of structures. International Organization for Standardization. ISO. Geneva, 2015. 73 p.
3. EN 1990. Basis of Structural Design. Eurocode European Committee for Standardization. Brussels, 2005. 89 p.
4. ISO 2394: 2015. General principles on reliability of structures. ISO. Geneva, 2015. 111 p.
6. ISO 13822:2010. Bases for design of structures – Assessment of existing structures. ISO. Geneva, 2010. 50 p.
7. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи. К.: Міністерство розвитку громад та територій України, 2018. 67 с.
8. ДБН В.1.2-6:2022. Основні вимоги до будівель і споруд. Механічний опір та стійкість. К.: Міністерство розвитку громад та територій України, 2022. 56 с.
9. Пічугін С., Перельмутер А. Деякі особливості розрахунку надійності пошкоджених сталевих конструкцій. *Наука та будівництво*. 2023. Т. 35. № 1. С. 15-26. URL: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-1-2023-3> (дата звернення: 12.11.2023)
10. Pichugin S. Scientific School «Reliability of Building structures»: new results and perspectives. 36. наук. Праць (галуз. машинобудування, будівництво). 2019. Вип. 2 (53). С. 5–12. URL: <https://doi.org/10.26906/znr.2019.53.1880> (дата звернення: 13.11.2023).

#### Chichulina K.V., Shchur-Dunets O.I., Shchur-Dunets O.I. STUDY OF RELIABILITY PARAMETERS OF RIGID NODES OF FRAME FRAMES

*The calculation of the reliability of the rigid unit of the steel frame of the building is considered. Some parameters of the actual operation of the flange connection of the bolt with the column are taken into account. The analyzed rigid connection of the crossbar with the column for ramen-elm frameworks of one-story and multi-story buildings is the connection using a flange on bolts of increased strength class 6.6–10.9. In such a node, the bolts work in tension, the flange works in bending, and the transverse force from the beam is taken over by the table welded to the column, or the bolts of the flange itself, which are more often calculated to work in reserve for cutting. Bolts are designed for maximum tensile strength and are (more often) of one standard size, so there is some reserve of load-bearing capacity in the connection, which must be taken into account when considering the real operation of the unit. It is suggested to use conditionally rigid frame nodes. The reliability of the node is determined from the conditions of interconnected operation of individual elements. Estimated coefficients for the design of this type of nodes are offered. In the course of the calculation, small correlation coefficients  $r_{ij} < 0.5$  were compared, that is, element failures can be considered independent. With the independence of random characteristics for the elements of the node, the probability of failure of the node as a whole will be approximately calculated as the sum of all the failure probabilities of the elements designed according to the standards, it will be slightly higher than the probability of failure of one element. To take into account this factor of randomness of failure, it is proposed to use the coefficient of reduction of the calculated resistance  $\gamma_z$ , which depends on the number of independent elements of the node  $n$ , represented by the graph. For engineering practice, the article suggests using the coefficient  $\gamma_z = 0.9$ . In the European design standards, the calculation of such a node is presented, which is close to considering the operation of the elements of the node in the form of a logical connection of elements. In general, international norms and standards are analyzed in the article.*

**Key words:** failure, reliability, rigid assemblies, frames.

## ГЕОДЕЗІЯ

УДК 528.8

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/47>

*Гулько І.С.*

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

### ДОСВІД ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ GOOGLE EARTH ДЛЯ ПОБУДОВИ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ СИТУАЦІЇ

*У сучасній епосі цифрових технологій, геодезія, знаходить широке застосування в різних галузях людської діяльності. Основою для аналізу геопросторових даних є геоінформаційні системи, які дозволяють збирати, зберігати, обробляти та візуалізувати різноманітну інформацію про географічні об'єкти. У статті висвітлено важливість геоінформаційних систем та їхню роль у підвищенні ефективності та точності геопросторового аналізу.*

*Однією з найпоширеніших та доступних геоінформаційних систем є Google Earth. У статті розглядаються можливості геоінформаційної системи Google Earth для візуалізації та аналізу географічних даних. До переваг програми відносяться доступність, зручний інтерфейс, широкий функціонал та актуальність інформації. Проте, важливо враховувати обмежену точність вимірювань, особливо висотних відміток, які можуть варіюватися залежно від регіону. Недоліком є також обов'язкове підключення до Інтернету, що може ускладнити роботу при нестійкому з'єднанні чи в областях без доступу до мережі.*

*Цифрова модель ситуації представляє собою геопросторову модель, яка відображає фізичні об'єкти та їх атрибути в певному регіоні. Детально розглядається сутність та структура цифрової моделі ситуації, яка включає метричну, атрибутивну, семантичну та синтаксичну інформацію. Потрібно також враховувати важливість точності та організації даних для успішного створення цифрової моделі ситуації.*

*У статті досліджено процес створення цифрової моделі ситуації на прикладі ділянки в Київці, Харківська область. З використанням Google Earth виконано виміри та обведено будівлі та городи з максимальною точністю. Кожній групі об'єктів присвоєно колір та назву, а об'єктам – нумерацію для легшого визначення координат. Далі зібрані дані використано для створення цифрової моделі ситуації з використанням системи автоматизованого проектування AutoCAD Civil 3D, оскільки Google Earth не дозволяє це робити безпосередньо в своєму середовищі, на відміну від інших геоінформаційних продуктів.*

*Стаття висвітлює можливості та обмеження геоінформаційної системи Google Earth для аналізу геодезичних даних. Дослідження процесу створення цифрової моделі ситуації на реальній ділянці в Київці надає важливі практичні висновки щодо використання цифрових технологій у геодезії та аналізі геопросторових даних.*

**Ключові слова:** геопросторові дані, геоінформаційні системи, цифрова модель ситуації, Google Earth.

**Постановка проблеми.** У сучасному світі геодезія використовується в різних сферах людської діяльності. Одним із ключових інструментів в геодезії є геоінформаційні системи (ГІС), які спрямовані на збір, зберігання, обробку, аналіз та візуалізацію геопросторових даних. ГІС дозволяє працювати з інформацією, що стосується конкретного місця або регіону на земній поверхні, такою як географічні координати, висоти, кліматичні характеристики, населення, дорожні мережі, топографічні карти, тощо. Геоінформаційна система складається з двох основних компонентів: бази

даних та програмного забезпечення для обробки та відображення даних [1].

Використання ГІС сприяє підвищенню ефективності та точності геопросторового аналізу, скороченню часу та зусиль, необхідних для отримання інформації, та забезпеченню більш точного та об'єктивного прийняття рішень на основі геопросторових даних. Однією з найпоширеніших та доступних ГІС є Google Earth, яка є сучасною геоінформаційною системою, що пропонує розширений набір інструментів для візуалізації та аналізу геодезичних даних на поверхні Землі [2].



**Метою статті** є отримання досвіду побудови плану місцевості на основі даних супутникових знімків геоінформаційної платформи Google Earth з їх подальшою обробкою у цифрову модель ситуації.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** В світі цифрових технологій, де геопросторові дані набувають все більшого значення для прийняття рішень у різних сферах, цифрова модель ситуації відіграє ключову роль у розумінні геометричних характеристик території.

Цифрова модель ситуації (ЦМС) – це геопросторова модель, яка відображає фізичні об’єкти та їх атрибути в певному регіоні. Вона зазвичай представляється у вигляді двовимірної моделі та може бути створена на основі зображень високої роздільної здатності, аерофотознімків, супутникових знімків, інженерних вишукувань та інших джерел інформації. Цифрова модель ситуації дозволяє відтворити реальний світ у віртуальному середовищі та допомагає зрозуміти просторові взаємозв’язки між об’єктами [3].

Для того, щоб отримати готовий результат цифрової моделі ситуації, потрібно зробити немало важливих дій [4–5]. Спочатку йде збір необхідних даних про об’єкти. ЦМС містять різні типи інформації (рис. 1). Метрична інформація визначає вимірювальні характеристики об’єктів. Дана інформація вміщує координатні дані і деякі атрибутивні дані. Атрибутивна інформація являє собою інформацію про властивості і зв’язки об’єктів. Даний тип інформації визначає приналежність точок або об’єктів до певного класу чи об’єкту, описує властивості об’єктів та їх частин, задає взаємозв’язки та умови обробки, умови відтворення. Семантична складова інформації визначає її змістовну сторону, вона пов’язана з кодуванням даних. Синтаксична частина інформації визначає набір правил і відношень роботи з цифровою моделлю, як зі звичайною інформаційною моделлю. Вона пов’язана з класифікацією і правилами побудови моделей [6].



Рис. 1. Основні типи інформації в цифровій моделі [6]

Зібрані дані необхідно обробити та підготувати, перш ніж починати побудову ЦМС. Це може включати пошук помилок, їх очищення та нормалізацію даних, щоб вони відповідали потрібному формату та стандартам. Під час введення даних важливо забезпечити точність інформації, використовуючи правильні терміни та коди. Введення інформації для створення ЦМС є складним та важливим процесом і є основою для подальшого аналізу та розуміння ситуації, що допомагає вирішувати проблеми та приймати обґрунтовані рішення.

При веденні даних необхідно використовувати спеціалізоване програмне забезпечення для зберігання та організації інформації. Геоінформаційні системи – це комп’ютерні технології, що застосовуються для створення карт та оцінки фактично існуючих об’єктів та подій [7]. Історія розвитку цих систем починається у 1960-х роках, коли комп’ютери стали доступнішими, а концепції просторового аналізу та візуалізації географічної інформації почали розвиватися. З тих пір ГІС постійно розширювали свої можливості і застосування. У 1970-ті роки вони почали використовуватися для конкретних завдань, таких як навігація або управління транспортом у надзвичайних ситуаціях, тощо. В цей період були створені системи для вивезення міських відходів та руху транспорту в екстрених ситуаціях. Це дало поштовх для подальшого розвитку геоінформаційних систем у різних галузях. У 1980-ті роки з поширенням комп’ютерів та розвитком баз даних компаній геоінформаційні системи стали все більш популярними у комерційних сферах. Вони використовувались для аналізу даних, планування та управління. Цей період також приніс інтеграцію ГІС з базами даних компаній, що розширило їх можливості. У 1990-ті роки відбулось значне зростання геоінформаційних систем завдяки відкритим стандартам для обміну геопросторовою інформацією. Це сприяло інтеграції різних систем та поліпшенню їх взаємопов’язаності. Водночас, з’явилися нові інструменти та методи аналізу геоданих, що зробило їх ще потужнішими для вирішення складних геопросторових завдань. В сучасному світі доступність програмних засобів дозволяє модифікувати геоінформаційні системи під різні завдання [8].

Геоінформаційна система Google Earth – надає широкий спектр можливостей для візуалізації та аналізу географічних даних з усього світу [9]. До переваг Google Earth можна віднести доступ-

ність, зручний інтерфейс, широкий функціонал та великий обсяг геопросторових даних. Крім того, програма постійно оновлюється, що дозволяє отримувати найновішу інформацію про місцевість. Але також потрібно враховувати і недоліки, а саме – обмежену точність вимірювань, більше по висотним відміткам – вони можуть варіюватись в залежності від регіону, тому для вимірювань високої точності все ж таки необхідні інженерно-геодезичні вишукування. Також програма вимагає підключення до Інтернету для доступу до геопросторових даних та функцій, це може створювати обмеження, особливо в умовах поганого інтернет-з'єднання або при роботі на територіях без доступу до мережі [10].

Для створення цифрової моделі ситуації була обрана ділянка, яка знаходиться в населеному пункті Кицівка у Харківській області. Google Earth дозволяє проводити виміри довжин сторін, периметру / площі будівель та меж ділянок. Виходячи з цього, маємо чіткі межі досліджуваної ділянки загальною площею 22370 м<sup>2</sup> (рис. 2).



Називання: Межа досліджуваної ділянки місцевості				
Описання	Стиль, колір	Вид	Висота	Ізмерення
Периметр:	600	Метри		
Площа:	22 370	Квадратні метри		

Рис. 2. Межа вибраної ділянки для дослідження

Далі за допомогою функціоналу Google Earth були обведені всі будівлі, споруди та городи на досліджуваній ділянці з дотриманням максимальної точності вимірів всіх відстаней та кутів. Також були враховані точкові об'єкти. При цьому було присвоєно кожній групі будівель та споруд свій колір та назву. Кожному об'єкту надана нумерація, за допомогою якої можна визначити координати будь-якої точки на плані (рис. 3).

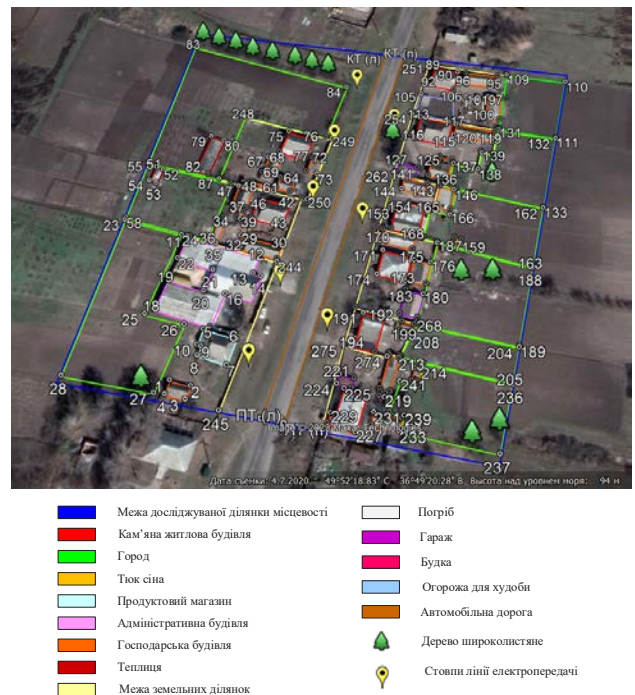


Рис. 3. План ділянки місцевості

Після створення плану ділянки місцевості були зібрані усі дані для створення цифрової моделі ситуації цієї ділянки. Для цього в програмі Google Earth можна отримати код KML для кожної із точок з координатами у системі координат WGS-84. Дані оброблялись у програмі Microsoft Excel. Збір даних продемонстровано на рисунку 4. Далі був виконаний розрахунок із географічної системи координат в прямокутну, що дозволить побудувати ЦМС із високою точністю. Але на цьому етапі, Google Earth більше не потрібна. Справа в тому, що на відміну від інших, більш спеціалізованих ГІС-продуктів, вона – не дозволяє будувати ЦМС, тож для побудови було додатково залучено систему автоматизованого проектування – AutoCAD Civil 3D. Результат побудованої ЦМС можна побачити на рисунку 5.

**Висновки.** У статті розглядаються можливості та обмеження геоінформаційної системи Google Earth для аналізу геодезичних даних, зосереджуючись на практичних висновках відносно створення цифрових моделей ситуації. Наведений процес створення цифрової моделі на конкретній ділянці, вказано переваги та обмеження використання Google Earth для цих цілей. Зазначено, що для повноцінної роботи з геопросторовими даними і побудови точних цифрових моделей ситуації, важливо враховувати особливості та обмеження обраного інструментарію, додатково залучаючи спеціалізовані програмні рішення.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
20	19	49.87232853310541	36.8204764060542	0			</icon>							
21	20	49.8722831133215	36.82065132578263	0			</iconStyle>							
22	21	49.87235239727216	36.82069564536762	0			</Style>							
23	22	49.87240205774719	36.82052081399834	0			<Style id="sn_placemark_circle0">							
24	23	49.87255556677191	36.82024514433138	0			<iconStyle>							
25	24	49.87248358153538	36.82053633585721	0			<scale>0.6</scale>							
26	25	49.87222254800781	36.82037007320463	0			<icon>							
27	26	49.87217786053968	36.820561576788	0			<href=http://maps.google.com/mapfiles/kml/shapes/placemark_							
28	27	49.87197302981828	36.82043031884071	0			</icon>							
29	28	49.8720475774663	36.81999547917221	0			</iconStyle>							
30	29	49.87246536415159	36.82083382779584	0			</Style>							
31	30	49.87241763757564	36.82103481118295	0			<Placemark>							
32	31	49.87237440327812	36.82101019747888	0			<name>1</name>							
33	32	49.87242113493419	36.82081093940594	0			<LookAt>							
34	33	49.87251808180671	36.82071686598966	0			<longitude>36.82052952799134</longitude>							
35	34	49.87250996350767	36.82074789352476	0			<latitude>49.87205722385221</latitude>							
36	35	49.87244444983651	36.82070998661597	0			<altitude>0</altitude>							
37	36	49.87245246472258	36.82067992560341	0			<heading>19.92521759101248</heading>							
38	37	49.8725583998648	36.8208297359944	0			<tilt>21.42251406569777</tilt>							
39	38	49.87255255000119	36.8208481799339	0			<range>49.18827116137437</range>							
40	39	49.87252611041255	36.8208316411946	0			<gx:altitudeMode>relativeToSeaFloor</gx:altitudeMode>							
41	40	49.87253183937478	36.82081327535279	0			</LookAt>							
42	41	49.8725927483302	36.82095417858164	0			<styleUri=#msn_placemark_circle</styleUri>							
43	42	49.87256288764957	36.82108160819627	0			<Point>							
44	43	49.8724893954329	36.82103780676657	0			<gx:drawOrder>1</gx:drawOrder>							
45	44	49.87252730113465	36.82088663209277	0			<coordinates>36.82050040962783,49.87200734656433,0</coordinates>							
46	45	49.87257329518357	36.82091113588491	0			</Point>							
47	46	49.87256440837119	36.8209394663098	0			</Placemark>							
48	47	49.87264900517816	36.82082437865391	0			</Document>							
49	48	49.87263213679334	36.82089370127909	0			</kml>							
50	49	49.87256627429957	36.82085825475076	0										
51	50	49.87258393192306	36.82078888223277	0										
52	51	49.87274805476194	36.82070474754652	0										

Рис. 4. Збір даних з програми Google Earth

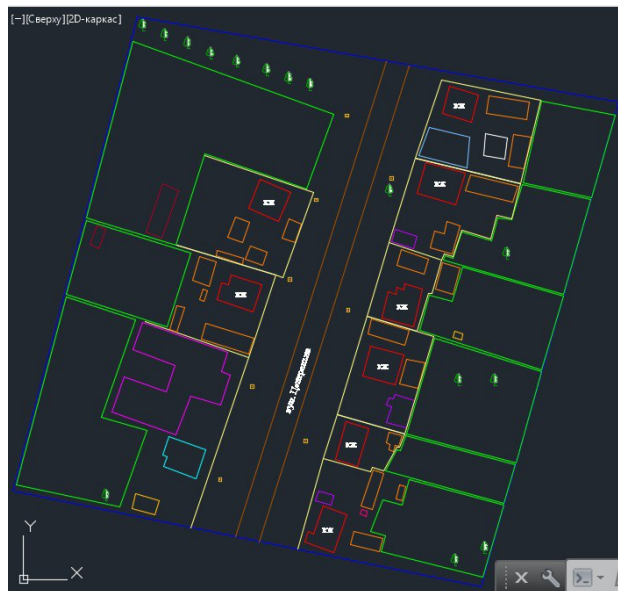


Рис. 5. Цифрова модель ситуації

**Список літератури:**

1. Геоінформаційні системи і бази даних: монографія. Кн. 2 / В. І. Зацерковний, В. Г. Бурачек, О. О. Железняк, А. О. Терещенко. Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, 2017. 237 с.
2. Гунько І. С., Коваленко Л. О. Платформа Google Earth, як геоінформаційна система та її можливості при вивченні дисциплін спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій» Харків: Комунальне господарство міст, 2022, том 6, випуск 173. С. 101-105.
3. Цифрова трансформація відкритих освітніх середовищ: колективна монографія, за ред. В.Ю. Бикова, О.П. Пінчук. Київ, 2019. 186 с.
4. Світличний О.О., Плотницький С.В. Основи геоінформатики: навчальний посібник. Суми: ВТД «Університетська книга», 2006. 295 с.
5. Геоінформаційні системи і бази даних: монографія / В. І. Зацерковний, В. Г. Бурачек, О. О. Железняк, А. О. Терещенко. Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, 2014. 492 с.
6. Методи моделювання та оптимізації в геодезії: методичні вказівки до курсового проекту та практичних занять / Дорожко Є.В., Казаченко Л.М., Коваленко Л.О., Урдзік С.М. Харків: ХНАДУ, 2019, 36 с.

7. What is GIS? Esri official websit. URL: <https://www.esri.com/en-us/whatis-gis/overview> (дата звернення 15.11.2023).
8. Lukar E Thornton, Jamie R Pearce, Anne M Kavanagh. Using Geographic Information Systems (GIS) to assess the role of the built environment in influencing obesity: a glossary. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*. 2011. Vol. 71. P. 1-9.
9. Офіційна сторінка Google Earth: веб-сайт. URL: <https://www.google.com/intl/uk/earth/versions/> (дата звернення 22.11.2023).
10. Мусієнко І. В., Казаченко Л. М. Досвід отримання вихідних даних з Google Планета Земля для побудови цифрової моделі місцевості. *Комунальне господарство міст*. 2022. Вип. 3 (170). С. 247-251.

### **Hunko I.S. EXPERIENCE OF USING GEOINFORMATION SYSTEM GOOGLE EARTH FOR DIGITAL SITUATION MODELING**

*In the modern era of digital technologies, geodesy finds extensive applications in various fields of human activity. The foundation for the analysis of geospatial data lies in geographic information systems, which enable the collection, storage, processing, and visualization of diverse information about geographical objects. This article highlights the importance of geographic information systems and their role in enhancing the efficiency and accuracy of geospatial analysis.*

*One of the most widespread and accessible geographic information systems is Google Earth. The article explores the capabilities of the Google Earth geoinformation system for the visualization and analysis of geographic data. The program's advantages include accessibility, user-friendly interface, extensive functionality, and the timeliness of information. However, it is crucial to consider the limited accuracy of measurements, especially in terms of elevation data, which may vary depending on the region. Another drawback is the mandatory internet connection requirement, which can pose challenges, especially in areas with unstable connectivity.*

*A digital situation model represents a geospatial model that reflects physical objects and their attributes in a specific region. The essence and structure of the digital situation model, encompassing metric, attributive, semantic, and syntactic information, are examined in detail. The article emphasizes the importance of accuracy and data organization for the successful creation of a digital situation model.*

*The article investigates the process of creating a digital situation model using a plot of land in Kytsevka, Kharkiv Oblast, as an example. Measurements were conducted using Google Earth, accurately outlining buildings and gardens. Each group of objects was assigned a color and name, while individual objects were numbered for easy coordinate identification. Subsequently, the collected data were utilized to create a digital situation model using the AutoCAD Civil 3D automated design system, as Google Earth does not permit this directly within its environment, unlike other geoinformation products.*

*The article elucidates the possibilities and limitations of the Google Earth geoinformation system for geodetic data analysis. The research into the process of creating a digital situation model on an actual plot in Kytsevka provides valuable practical insights into the use of digital technologies in geodesy and geospatial data analysis.*

**Key words:** geospatial data, geographic information systems, digital situation model, Google Earth.

# ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.314.58

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/48>**Арсенюк Д.О.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Зіньковський Ю.Ф.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## МОДЕЛЬ БЕЗМОСТОВОГО КОРЕКТОРА КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ КОНФІГУРАЦІЇ “ТОТЕМ ПОЛЕ” З ВИКОРИСТАННЯМ ШИРОКОЗОННИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ

У даній статті представлено результати дослідження та комп'ютерного моделювання безмостового коректора коефіцієнта потужності (ККП) конфігурації Totem Pole, який використовує напівпровідникові прилади з широкою забороненою зоною. Основна увага зосереджена на підвищенні енергоефективності імпульсних перетворювачів електроенергії AC-DC за допомогою активної фільтрації вхідного струму джерела живлення. Традиційні схеми ККП, що працюють на високих частотах, зазвичай зазнають значних втрат провідності через використання повномісного діодного випрямляча. Конфігурація Totem Pole вирішує цю проблему завдяки застосуванню двонаправленого перемикача, який безпосередньо випрямляє змінну напругу, знижуючи таким чином втрати провідності та кількість необхідних компонентів.

Дослідження акцентує на перевагах використання широкозонних напівпровідників, таких як транзистори на основі нітриду галію (GaN) та діоди з карбиду кремнію (SiC), які надають відмінні характеристики у порівнянні з традиційними кремнієвими компонентами. Ці матеріали характеризуються вищими значеннями електричного пробоя, підвищеною швидкістю перемикачання та кращою теплопровідністю. Інтеграція GaN і SiC у моделі ККП Totem Pole сприяє досягненню мети забезпечення вищої енергоефективності.

Стаття також розглядає останні дослідження, включаючи значні роботи щодо безмостових перетворювачів ККП на основі SiC, підкреслюючи важливість прогресивних напівпровідникових технологій у вдосконаленні конструкцій ККП. Метою дослідження є синтез теоретичних основ, презентація передових методів моделювання, аналіз даних та їх застосування у практичній сфері.

Основний матеріал статті включає моделювання за допомогою LTSpice XVII моделі безмостового ККП, яке демонструє принцип роботи, аналіз компонентів та механізм керування. Результати свідчать про високу ефективність та якість електроенергії, а розрахунок коефіцієнта потужності підтверджує його значення, що наближається до одиниці.

На завершення, стаття вносить значний вклад у сферу силової електроніки, пропонуючи модель, яка використовує новітні напівпровідникові технології для підвищення оперативної ефективності енергетичних систем, що є критично важливим для сталого розвитку силової електроніки.

**Ключові слова:** коректор коефіцієнта потужності, ККП, PFC, нітрид галію, карбід кремнію, GaN, SiC, широкозонні напівпровідники, SPICE, LTSpice XVII, силова електроніка.

**Постановка проблеми.** Коректор коефіцієнта потужності (ККП) відіграє роль активного фільтра для вхідного струму електромережі. Схеми ККП широко використовуються у перетворювачах потужності типу AC-DC, особливо в імпульсних перетворювачах.

Найбільш поширеною є схема активної корекції коефіцієнта потужності, яка використовує топологію підвищувального перетворювача для узгодження форми вхідного струму з фазою вхідної напруги, тим самим досягаючи коефіцієнта потужності, близького до одиниці. Однак, традиційний

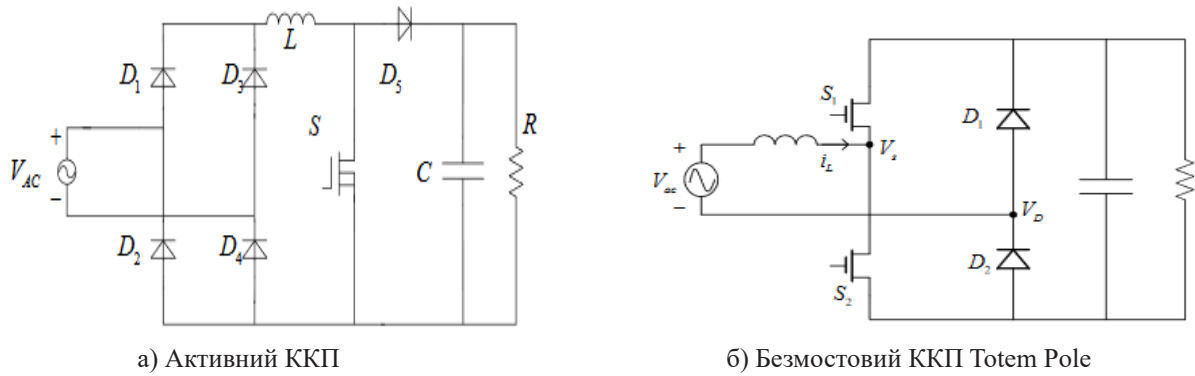


Рис. 1. Типи коректорів коефіцієнта потужності

підхід часто включає повномостовий діодний випрямляч, що призводить до значних втрат провідності через пряме падіння напруги на діодах.

Існують альтернативні топології, такі як ККП типу Totem Pole, які усувають мостовий випрямляч для зниження втрат потужності. У цій топології використовується двонаправлений перемикач на вході, який безпосередньо випрямляє вхідну змінну напругу, зменшуючи кількість компонентів, через які проходить струм. Це призводить до зниження втрат провідності та підвищення загальної ефективності, особливо на високих рівнях потужності. Така схема має ряд переваг у порівнянні з традиційними активними схемами ККП, включаючи зниження втрат потужності та підвищення енергоефективності завдяки відсутності мостового випрямляча, а також можливість зменшення форм-фактора через меншу кількість компонентів.

Однак, ця топологія має свої складності, зокрема у керуванні через двонаправлений характер перемикачів, що вимагає більш складних алгоритмів для забезпечення стабільної роботи. Високочастотне перемикання може також призвести до збільшення електромагнітних перешкод, що вимагає ретельного проектування для їх компенсації.

Важливим проривом у галузі силової електроніки стало введення широкозонних напівпровідників, таких як нітрид галію (GaN) та карбід кремнію [1]. Ці матеріали перевершують традиційні кремнієві компоненти за такими параметрами, як вищі електричні поля пробою, швидкість перемикання та теплопровідність. У контексті ККП Totem Pole, використання GaN-транзисторів та SiC-діодів є особливо вигідним. GaN-транзистори забезпечують нижчий опір у відкритому стані та менші втрати перемикання, що є критичним для високочастотних перетворювачів. SiC-діоди, у свою чергу, пропонують низьке падіння напруги

у прямому напрямку та відмінні характеристики зворотного відновлення, що підвищує ефективність схеми ККП.

Інтеграція цих широкозонних напівпровідників у ККП Totem Pole відповідає постійному прагненню галузі до підвищення енергоефективності. Завдяки зниженню втрат потужності та покращенню терморегулювання, ці напівпровідники дозволяють розробляти компактніші, надійніші та ефективніші рішення ККП, що є важливим для задоволення зростаючих вимог до енергоефективних систем.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сфері силової електроніки, розробка ефективних технологій корекції коефіцієнта потужності (ККП) є важливим напрямком досліджень. Одним із важливих внесків у цю галузь є дослідження під назвою «Дослідження безмостового перетворювача PFC на базі SiC та стратегії управління» [2]. У цьому дослідженні аналізуються загальні проблеми, такі як високий пусковий струм, втрати в комутаційних діодах при високих частотах та втрати в режимі граничної провідності (BCM) у перетворювачах PFC з тотемним полюсом.

Дослідники представили покращену конструкцію безмостового перетворювача ККП Totem Pole, що включає SiC-діоди Шоттки та SiC IGBT. Ця конструкція ефективно компенсує вплив пускового струму та втрат провідності, що сприяє підвищенню енергоефективності схеми. Автори також розробили вдосконалену систему управління перетворювачем, засновану на принципі прямого зв'язку по напрузі. Ця система дозволяє знижувати гармонійні перешкоди, викликані стрибками струму, особливо в моменти перехрестя через нуль, що значно покращує якість електроенергії. Імітаційна модель цього покращеного перетворювача та його системи управління була реалізована за допомогою Simulink. Результати експериментів, представлені у дослідженні,

демонструють, що перетворювач досягає високого коефіцієнта корисної дії (ККД) та високої якості електроенергії при належному регулюванні системи управління.

У дослідницькій роботі під назвою «Моделювання схем корекції коефіцієнта потужності за допомогою LTspice» [3], проведено детальний аналіз методів моделювання схем електронної корекції коефіцієнта потужності (ККП) за допомогою LTspice. Дослідження включає різноманітні приклади моделювання найбільш поширених схем ККП. У моделюванні застосовується метод поциклового перемикавання та усереднена за часом модель широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Швидка внутрішня струмова петля контролює форму вхідного струму, адаптуючи її до синусоїдальної форми вхідної змінної напруги. Модель ШІМ із усередненням за часом є ключовою для ефективного моделювання численних циклів, сприяючи розробці та аналізу систем управління з вторинним зворотним зв'язком, які регулюють вихідну напругу у розглянутих моделях пристроїв.

Це дослідження становить значний прогрес у моделюванні схем корекції коефіцієнта потужності за допомогою LTspice XVII, відкриваючи шлях для подальших досліджень, особливо у сфері інтеграції передових напівпровідникових технологій та їхнього впливу на продуктивність схем ККП. Майбутні дослідження можуть базуватися на цій роботі, адаптуючи методики до конкретних конфігурацій ККП.

Ці дослідження підкреслює значення інтеграції компонентів на основі SiC у ККП типу Totem Pole, що відповідає загальній тенденції в галузі використання напівпровідникових матеріалів з широкою забороненою зоною, таких як нітрид галію (GaN) та карбід кремнію (SiC), для досягнення високих характеристик.

**Постановка завдання.** Підвищення енергоефективності систем перетворення енергії є ключовим завданням у сфері силової електроніки. У цьому контексті, основною метою дослідження є розробка рішень для корекції коефіцієнта потужності з використанням інноваційних напівпровідникових технологій. Дослідження базується на всебічному аналізі сучасної літератури, що охоплює еволюцію та актуальний стан методологій ККП. Ця робота закладає фундамент для головної мети: створення та апробації новітньої моделі моделювання безмостових ККП Totem Pole.

Мотивацією дослідження є необхідність оптимізації експлуатаційної ефективності енергетич-

них систем, що набуває особливої актуальності в умовах глобального прагнення до енергозбереження та сталого розвитку. Використання напівпровідників із широкою забороненою зоною, таких як польові транзистори (FET) на основі нітриду галію (GaN) та діоди Шоттки з карбіду кремнію (SiC), відкриває перспективи для подолання обмежень традиційних кремнієвих рішень. Очікується, що застосування цих матеріалів сприятиме підвищенню швидкості перемикавання, теплових характеристик та загальної ефективності системи.

Конкретні цілі статті включають:

- Теоретична основа: розробка надійної теоретичної бази шляхом аналізу сучасних досліджень у галузі технології ККП, що дозволить виявити потенціал для прогресу в цій сфері.

- Методологія моделювання: представлення інноваційної методології моделювання для ККП Totem Pole, яка включає використання GaN-транзисторів з високою рухливістю електронів (HEMT) та SiC-діодів Шоттки. Методологія реалізована у середовищі симулятора LTSpice XVII, що підкреслює практичність та доступність запропонованого підходу.

- Аналіз та візуалізація даних: проведення ефективного моделювання для створення комплексного набору даних, який подається у вигляді графіків струму та напруги. Це дозволяє виявити первинні втрати потужності в компонентах ККП та визначити потенційні напрямки підвищення енергоефективності.

- Інтеграція теорії та практики: злагодження теоретичних досліджень та практичного застосування, надаючи модель, яка може слугувати основою для майбутнього проектування та оптимізації схем ККП.

Стаття має на меті зробити внесок у розвиток силової електроніки, зокрема в області технології ККП. Актуальність дослідження підкреслюється необхідністю розробки енергоефективних рішень, які відповідають вимогам сучасних електричних систем, враховуючи їх продуктивність та вплив на навколишнє середовище.

**Виклад основного матеріалу.** На рис. 1 представлена модель конфігурації безмостового коректора коефіцієнта потужності, розроблена у LTSpice XVII. Джерело синусоїдального вхідного змінного струму позначено як V1.

Принцип роботи базується на чергуванні переключень транзисторів залежно від полярності змінного струму [4]. Високочастотні транзистори разом з індуктором формують синхронний режим під-

Порівняння електричних характеристик польових транзисторів

Польовий транзистор	Електричні характеристики					
	$V_{DS}$ , В	$i_d$ , А	$Q_G$ , нКл	$Q_{GS}$ , нКл	$Q_{GD}$ , нКл	$R_{DS(ON)}$ , мОм
GS-065-060-3-B	650	60	14	3.8	4.3	25
IPW60R045CP	650	60	150	34	51	45

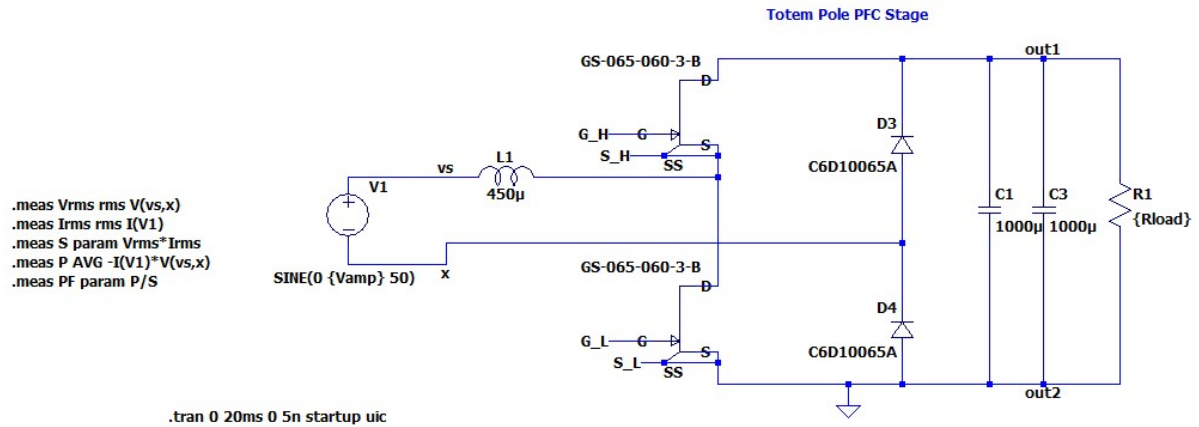


Рис. 1. Модель безмостового коректора коефіцієнта потужності у LTSpice XVII

вищуючого перетворювача. У позитивному циклі роботи один транзистор виступає перемикачем підсилення, активованим робочим циклом, тоді як протилежний ключ керується широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Протягом цього циклу діод, протилежний до робочого ключа, постійно проводить струм. У негативному циклі роботи пристрою ролі високочастотних перемикачів на верхньому та нижньому плечах міняються місцями.

Порівнюючи транзистори на основі нітриду галію та транзистори на основі кремнію з аналогічними електричними характеристиками (див. табл. 1), пристрої на основі нітриду галію, завдяки відсутності режиму зворотного відновлення (через відсутність вбудованого діоду) у посиленних структурах GaN-транзисторів, мають менші втрати провідності та нижчі втрати при перемиканні, що забезпечує більшу енергоефективність приладу. У представленій моделі використано GaN HEMT типу GS-065-060-3-B та SiC діоди типу C6D10065A із зворотною напругою 650 В та прямим струмом 10 А.

Коректний старт моделі забезпечується механізмом попередньої зарядки вихідних конденсаторів (C1, C3) до 400 В, який після цього відключається від схеми коректора коефіцієнта потужності шляхом розмикання ключа. Наступна підсхема зображена на рис. 2. Для забезпечення стабіль-

ності від'ємна шина на виході заземлюється опором у 1 МОм.

Precharge circuit

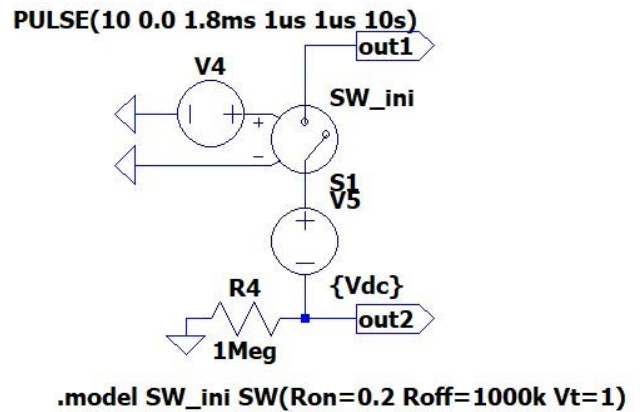


Рис. 2. Схема попередньої зарядки вихідного конденсатор

GaN транзистори керуються ШІМ-модулятором, підсхема якого представлена на рис. 3. Конструкція схеми є ключовою для правильної роботи перетворювача. Вихідна напруга ШІМ на затворі транзистора відноситься до витоку. При позитивній напрузі транзистор включається, а негативна напруга використовується для утримання його у вимкненому стані. Джерела напруги



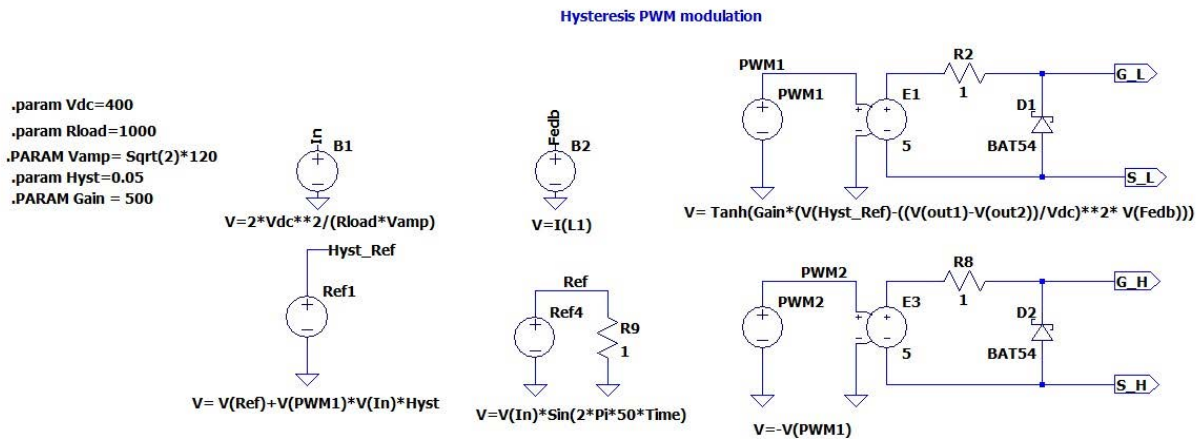


Рис. 3. Схема гістерезисного ШІМ модулятора

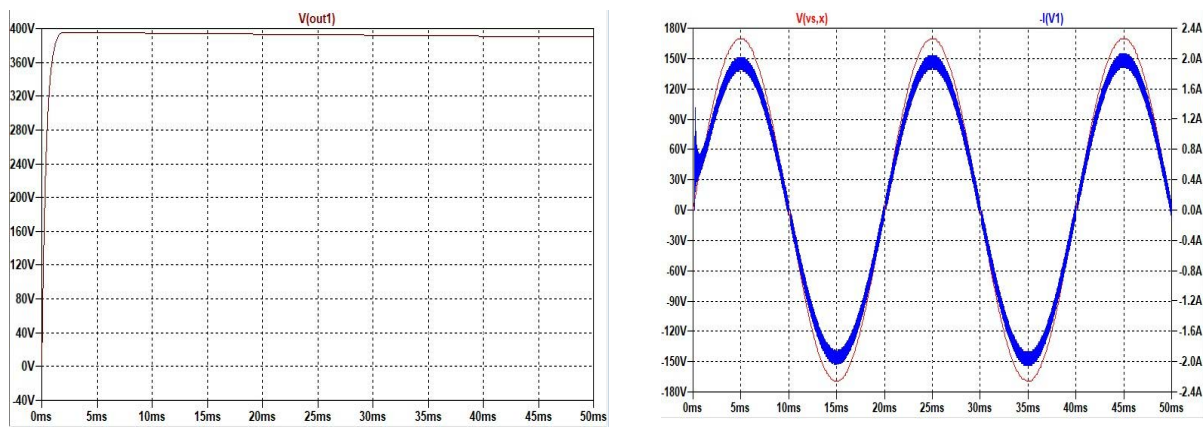


Рис. 4. Характеристики ККД: а) напруга на виході; б) напруга і струм на вході

E1 та E3 підвищують вихідну напругу джерела ШІМ з 1 до 5 В. Опорна напруга у вигляді синусоїди забезпечується джерелом Ref4. Джерело PWM1 порівнює опорну напругу з актуальним рівнем струму в індукторі L1 та виводить ШІМ-сигнал, використовуючи метод м'якого компаратора. Цей метод застосовує функцію гіперболічного тангенса для створення ШІМ-сигналу з плавними переходами, сприяючи конвергенції [5, с. 1404]. Параметр підсилення (Gain) використовується для посилення кривої, імітуючи реалістичні переходи ШІМ-сигналу. Джерело PWM2 генерує протилежне значення сигналу PWM1 для коректного перемикавання фаз роботи перетворювача. Джерело напруги Ref1 додає або віднімає компонент гістерезису на 5%, додаючи частину напруги ШІМ від PWM1 до Ref4, отримуючи значення Hyst\_Ref. Значення навантаження становить 1 кОм. Вихідна потужність пристрою 400 Вт.

На рис. 4а зображена напруга на виході коректора коефіцієнта потужності, яка становить 400 В

з пульсацією напруги 3 В. На рис. 4б представлено напругу та струм на вході перетворювача. Вони мають синусоїдну форму без фазового зсуву.

Розрахунок коефіцієнта потужності полягає у визначенні відношення робочої потужності до повної потужності. Значення повної потужності – це добуток середньоквадратичного вхідного напруги та струму, яке, за результатами аналізу, складає 166.27 ВА. Робоча потужність становить 166 Вт. Отже, коефіцієнт потужності складає  $PF = P/S \approx 0,998644$ .

**Висновки.** У рамках цього дослідження було розроблено новітній метод моделювання коректора коефіцієнта потужності типу Totem Pole, який базується на використанні напівпровідників з широкою забороненою зоною у програмному середовищі LTSpice XVII. Данаробота включає глибокий аналіз сучасних досліджень у сфері мережевих коректорів коефіцієнта потужності. В результаті були отримані графіки струму та напруги для моделі коректора коефіцієнта потужності

з номінальною потужністю 400 Вт. Результати моделювання демонструють коефіцієнт потужності на рівні 0,99, що підтверджує високу ефективність запропонованої моделі.

Це дослідження вносить значний вклад у розвиток силової електроніки, представляючи модель, що інтегрує передові напівпровідникові технології.

Таке досягнення є критично важливим для підвищення експлуатаційної ефективності енергетичних систем, що є ключовим аспектом для сталого розвитку у сфері силової електроніки. Інтеграція цих технологій не тільки сприяє оптимізації продуктивності, але й відкриває нові перспективи для інновацій у проектуванні енергетичних систем.

#### Список літератури:

1. Comparison of 600V Si, SiC and GaN Power Devices / S. Chowdhury та ін. Materials Science Forum. 2014. Т. 778-780. С. 971–974. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.778-780.971> (дата звернення: 11.11.2023).
2. Fan C., Liu F., Zhao S. Research on SiC-based Totem-pole Bridgeless PFC Converter and Control Strategy. 2023 6th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE), Guangzhou, China, 12–14 трав. 2023 р. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/ceepe58418.2023.10165796> (дата звернення: 11.11.2023).
3. Giesselmann M., Roy V. Modeling Power Factor Correction Circuits with LTspice. 2018 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), Jackson, WY, USA, 3–7 черв. 2018 р. 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/ipmhvc.2018.8936816> (дата звернення: 11.11.2023).
4. Su B., Zhang J., Lu Z. Totem-Pole Boost Bridgeless PFC Rectifier With Simple Zero-Current Detection and Full-Range ZVS Operating at the Boundary of DCM/CCM. IEEE Transactions on Power Electronics. 2011. Т. 26, № 2. С. 427–435. URL: <https://doi.org/10.1109/tpel.2010.2059046> (дата звернення: 11.11.2023).
5. Rashid M. H. Power Electronics Handbook. 4-те вид. Saint Louis, USA : Elsevier Science, 2017. 1522 с.

#### **Arseniuk D.O., Zinkovsky Yu.F. MODEL OF BRIDGELESS TOTEM POLE POWER FACTOR CORRECTOR USING WIDEBAND SEMICONDUCTOR DEVICES**

*This article presents a comprehensive study and computer modeling of a bridgeless power factor correction (PFC) Totem Pole configuration, leveraging the capabilities of wide-bandgap semiconductor devices. The primary objective is to augment the energy efficiency of AC-DC power converters through active input current filtering in power supplies. The research highlights the limitations of traditional PFC topologies, particularly the significant conduction losses incurred from the use of a full-bridge diode rectifier. To address this, the Totem Pole configuration is introduced, utilizing a bidirectional switch for direct rectification of alternating voltage, which results in reduced conduction losses and fewer components.*

*The study underscores the benefits of employing wide-bandgap semiconductors, specifically gallium nitride (GaN) based transistors and silicon carbide (SiC) diodes. These materials outperform traditional silicon components due to their higher breakdown voltages, faster switching speeds, and superior thermal conductivity. The integration of GaN and SiC into the Totem Pole PFC models is pivotal in achieving enhanced energy efficiency.*

*Additionally, the article delves into recent research developments, including significant advancements in bridgeless SiC-based PFC converters. This underscores the critical role of advanced semiconductor technologies in refining PFC designs. The research aims to amalgamate theoretical foundations with advanced modeling methods, data analysis, and practical applications.*

*The core of the article involves modeling using the bridgeless PFC model in LTSpice XVII, elucidating the operating principles, component analysis, and control mechanisms. The findings reveal high efficiency and power quality, with power factor calculations nearing unity.*

*In summary, this article contributes significantly to the field of power electronics by proposing a model that harnesses state-of-the-art semiconductor technologies. This model enhances the operational efficiency of energy systems, which is vital for the sustainable development of power electronics.*

**Key words:** Power Factor Correction, PFC, Gallium Nitride, Silicon Carbide, GaN, SiC, Wide-Bandgap Semiconductors, SPICE, LTSpice XVII, Power Electronics.

**Лук'янюк С.В.**

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз  
Служби безпеки України

## СТРАТЕГІЇ ВІДНОВЛЮВАНОВОГО ВИРОБНИЦТВА У ЕЛЕКТРОННІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

*Останніми роками сфера відновлюваного виробництва, зокрема відновлювальне виробництво у галузі електроніки, привертає до себе значну увагу завдяки своїм різноманітним перевагам і ключовій ролі у реалізації фундаментальних принципів циркулярної економіки та сталого розвитку. Позиціонуючись як незамінне рішення на завершальному етапі життєвого циклу продукту, відновлюване виробництво вирізняється своєю винятковою здатністю модернізувати продукцію, відновлюючи її якість на рівні з новими аналогами. Цей відновлювальний потенціал підкреслює нагальну необхідність надання пріоритету відновлюваному виробництву над іншими доступними альтернативами. У роботі досліджено різноманітні стратегії життєвого циклу, розроблені для підвищення ефективності процесів відновлення. У цих стратегіях висвітлюються процеси, які охоплюють весь життєвий цикл продукту – від заходів перед відмовою до втручань під час відмов і продовжуючи до втручань після закінчення життєвого циклу. Головна мета цих стратегій – суттєво підвищити ймовірність того, що виріб буде модернізовано, а не віддано на переробку чи утилізацію. У роботі проаналізовано ключові стратегії, кожна з яких представляє окремий аспект відновлюваного виробництва. Дослідження сфери дизайну, адаптованого до відновлюваного виробництва, висвітлює інноваційні шляхи в дизайні продукції, забезпечуючи її придатність до відновлення. Водночас, приділяється увага сфері оцінки залишкового ресурсу, використовуючи складні методології для прогнозування залишкового терміну корисного використання продуктів, що дозволяє приймати рішення щодо подальшого використання продукції. Разом з цим розглядається впровадження передових систем сервісу продукції, підкреслюючи їхню роль у інтеграції принципів відновлення у ринковий ландшафт. У роботі також досліджуються складні питання ефективного управління закінченням життєвого циклу, аналізуючи нюанси втручань, які можуть суттєво вплинути на долю продукту після його використання. Ретельно розглядаються критичні аспекти збору продукції та зворотної логістики, розкриваються тонкощі організації безперебійного потоку продукції від кінцевих споживачів назад в екосистему відновлюваного виробництва. Вкрай важливо визнати обмеження, притаманні цій парадигмі, а також те, що не всі продукти мають потенціал до відновлення. Як наслідок, цей огляд акцентує увагу, зосереджену саме на продуктах, які мають потенціал для повторного виробництва.*

**Ключові слова:** відновлюване виробництво, термін служби, економіка замкненого циклу, дизайн для відновлюваного виробництва, остаточний термін служби, електроніка.

**Постановка проблеми.** У промисловості електричного та електронного обладнання (EEE – electrical and electronic equipment) розгорнуто масове виробництво, що спричинене такими факторами, як технологічні інновації та зростання споживчого попиту. Як це не парадоксально, така масовість виробництва співпала зі скороченням середнього терміну служби продуктів EEE. Як прямий наслідок цього прискореного темпу виробництва, стався відповідний сплеск відходів електричного та електронного обладнання (WEEE – waste electrical and electronic equipment) або електронних відходів. У цьому контексті актуальною стає технологія відновлення, концепція, яка має величезні перспективи для впровадження в промисловості електронного виробництва.

Відновлення – є основним рішенням після завершення терміну служби (EoL – end-of-life), що включає ретельне розбирання, ретельне очищення, ретельну перевірку всіх компонентів, ремонт відновлюваних частин і заміну зношених елементів новими, що завершується ретельною перевіркою. Повторне складання та суворе тестування виробів для відновлення їх стану. У різноманітні альтернатив відновлення EoL, включаючи повторне використання, реконструкцію, переробку, спалювання та утилізацію, повторне виробництво стає першорядним вибором, ключовим для сприяння циркулярній економіці та підтримці чистого довкілля. Серед альтернативних процесів відновлення особливо виділяється повторне виробництво, яке створює продукти

еквівалентної якості, продуктивності та гарантії, що й їхні абсолютно нові аналоги. Проте можливість відновлення будь-якої інженерної системи потребує ретельної оцінки. Підкреслюючи свою ключову роль, переробка постає як трансформаційна сила, що відкриває великий потенціал для підтримки циркулярної економіки та досягнення цілей сталого розвитку. На практиці, у той час як більшість продуктів в кінцевому підсумку чекає доля, пов'язана з переробкою, спалюванням або сміттєзвалищем, повторне виробництво пропонує перспективу кількох життєвих циклів до досягнення точки відсутності залишкового терміну служби (RUL – residual useful life). Примітно, що економічна життєздатність переробки підкреслюється її прибутковістю. Кінцеві відновлені продукти, ціна яких приблизно на 40% нижча, ніж їхні нові аналоги, приносить значний прибуток, у середньому близько 20% [1]. Ця економічна привабливість підкреслює симбіотичний зв'язок між відновленням виробництва та трьома стовпами сталого розвитку – піклуванням про навколишнє середовище, економічним процвітанням і суспільним добробутом. Таким чином переваги для суспільства від відновлення виходять за рамки його економічного та екологічного впливу. Гнучкий характер процесів відновлення, що охоплює такі види діяльності, як розбирання, тестування та повторне складання, не тільки забезпечує відновлення продукту, але й створює можливості для працевлаштування та сприяє отриманню нових навичок. По суті, повторне виробництво виходить за рамки простого відновлення. Воно втілює зміну парадигми в бік стійких практик, демонструючи свою актуальність у прагненні до гармонійного співіснування між технологією та навколишнім середовищем.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Повторне виробництво, процес, який передбачає розбирання, відновлення та реконструкцію електронних пристроїв, стало багатообіцяючою технологією, яка сприяє пом'якшенню впливу електронних відходів на навколишнє середовище та швидке відновлення функціональності обладнання, а подекуди надає останнім і нові додаткові функції. Щоб всебічно окреслити стратегії, які сприяють розвитку сфери відновлювального виробництва, дослідниками було ретельно виконано структурований систематичний аналіз. Слід розглянути технології та методології, викладені у наукових статтях, що проливають світло на різноманітні методи та методології, які застосовуються у відновленні електронного обладнання.

У нещодавніх дослідженнях проведених в [2] дослідники проаналізували передові діагностичні інструменти і методології, які дозволяють точно ідентифікувати несправні компоненти. Використовуючи такі методи, як неруйнівний контроль і мікроелектронний аналіз, дослідники досягли значних успіхів у точному діагностуванні дефектів на мікроскопічному рівні, створюючи технологічну базу для цілеспрямованого ремонту на рівні компонентів.

Натомість застосування методів зворотного інжинірингу, які продемонстрували у [3], значно покращило ситуацію у відновленні електронного обладнання. Проводячи зворотній інжиніринг складних пристроїв та створюючи детальні цифрові моделі, інженери можуть оптимізувати конструкції, підвищити ефективність та зменшити витрати матеріалів під час процесів відновлення. Такий підхід не лише забезпечує збереження функціональних компонентів, але й полегшує інтеграцію екологічно чистих матеріалів.

У пошуках досконалості процесі відновлення дослідники у [4] вивчали нові методики очищення, зокрема плазмове очищення та лазерну абляцію. Ці методи дозволяють видаляти забруднення на молекулярному рівні, забезпечуючи ідеальні умови для відновлених компонентів. Крім того, досягнення в процесах відновлення, такі як парофазна пайка і прецизійна пайка, підвищили якість і надійність відновлених електронних збірок.

Ключовим аспектом сталого відновлюваного виробництва є проведення комплексних оцінок життєвого циклу. Дослідження проведені в [5] із застосуванням методологій LCA (life cycle assessment – оцінка життєвого циклу) надали детальну інформацію про вплив відновленого електронного обладнання на навколишнє середовище. Шляхом кількісної оцінки викидів парникових газів, споживання енергії та використання ресурсів дослідники визначили ключові сфери для вдосконалення, що дало змогу розробити екологічно чисті методи відновлюваного виробництва.

Створюючи замкнені ланцюги постачання, виробники оптимізують використання ресурсів, мінімізуючи утворення відходів та сприяючи повторному використанню електронних компонентів. І в цьому сенсі інтеграція принципів циркулярної економіки стала наріжним каменем відновлюваного виробництва [6]. Стратегії циркулярної економіки, що охоплюють дизайн продукції з урахуванням подальшого розбирання та процеси відновлення матеріалів, привертають значну увагу, формуючи майбутній ландшафт відновлення електронного обладнання.

У роботі [7] досліджується розвиток принципів еко-дизайну, який каталізував розробку електронних пристроїв та за своєю суттю сприяє повторному виробництву. Завдяки модульним конструкціям і стандартизованим інтерфейсам еко-дизайнерська електроніка полегшує розбирання та заміну компонентів. Крім того, дослідження екологічно чистих матеріалів, зокрема біорозкладних полімерів і сплавів припоїв, що не містять свинцю, мінімізувало вплив електронного обладнання на навколишнє середовище.

Незважаючи на значний прогрес, відновлення електронного обладнання пов'язане з певними технологічними проблемами. Мініатюризація, складна інтеграція компонентів і технології виробництва, що розвиваються, вимагають постійних інновацій [8]. Дослідники активно вивчають передову робототехніку, штучний інтелект та алгоритми машинного навчання, з ціллю підвищення ефективності процесів розбирання та уможливлення виявлення дефектів у реальному часі.

В той же час авторами в роботі [9] наголошується на регуляторних аспектах, які залишаються актуальним викликом в галузі відновлювального виробництва. Узгодження міжнародних стандартів, вирішення проблем інтелектуальної власності та стимулювання виробників до впровадження сталих практик є критично важливими аспектами, які потребують узгоджених зусиль з боку політиків, зацікавлених сторін у галузі та дослідницьких спільнот.

Забігаючи наперед, можна сказати, що інтеграція нових технологій, таких як 3D-друк для індивідуальних компонентів і нанотехнології для покращення властивостей матеріалів, має величезні перспективи [10]. Спільні дослідження між науковими колами, промисловістю та державними установами є вкрай важливими для вивчення цих передових напрямків, що виводить сферу відновлення електронного обладнання в новий рівень інновацій.

Навіть при великій кількості наукових публікацій, які досліджують проблеми розвитку методів і методологій відновлення електронного обладнання, швидкий прогрес у цій галузі спонукає до необхідності проведення подальших фундаментальних наукових досліджень.

**Метою статті** є проведення комплексного дослідження щодо повторного виробництва в секторі виробництва електроніки. Його головна мета – провести огляд різноманітних напрямків, пов'язаних зі зменшенням кількості електронних відходів. Концепція переробки електронних відходів розгортається як тема з нюансами та відмінностями, які відрізняються в різних регіонах

та ситуаціях. Тому актуальним є питання дослідження різноманітних методологій та ідеологій, які лежать в основі впровадження відновлювального виробництва. А завдяки ретельному аналізу формується цілісне розуміння основних проблем, що постають перед цією сферою.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** У сфері технологій відновлювального виробництва в електронному секторі прагнення до майбутнього повторного використання стає ключовим аспектом, представляючи собою стратегічну ініціативу з глибокими наслідками для мінімізації переробки брухту, як це висвітлено у роботі [11]. Цей ключовий аспект підкреслює фундаментальну зміну парадигми управління завершення життєвого циклу, що виходить за рамки традиційної сфери повторного виробництва. Складність цього виклику стає очевидною, коли розглядається складний взаємозв'язок між управлінням життєвим циклом, стійким відновленням та генеральним напрямком екологічно чистого виробництва, як це показано в роботах [12–14].

Сучасна галузь відновлення електроніки суттєво впливає і на інші сектори виробництва створюючи виклики та відкриваючи нові можливості, особливо щодо оновлених або відновлених електронних продуктів. Ця електроніка охоплює широкий спектр критичних компонентів, включаючи бортові комп'ютери, контролери, системи безпеки та різні спеціалізовані електронні елементи [15, 16]. Складна взаємодія між сферою відновлення електроніки та цими галузями потребує детального вивчення існуючих проблем і можливостей. У роботі [17] вдало підкреслено багатогранні проблеми, які переважають у переробці відпрацьованого електричного та електронного обладнання (WEEE). Проблеми охоплюють спектр процесів відновлення, включаючи перевірку, очищення, розбирання, повторну обробку, повторне складання та всебічне тестування. Ці процеси є ключовими у розв'язанні проблем, пов'язаних зі зберіганням WEEE, забрудненням навколишнього середовища та споживанням енергії [18]. Поєднання цих проблем підкреслює складну природу відновлення електроніки та необхідність розвитку екологічних практик у цій сфері. Важливо визнати, що до відходів електричного та електронного обладнання (WEEE) у контексті відновлення можна підходити з двох основних точок зору. По-перше, експлуатаційний рівень являє собою сукупність дій, які безперервно охоплюють етап завершення життєвого циклу продукту (EoL) до різних етапів процесу

відновлення. Це передбачає відповідні операції, включаючи розбирання, відновлення, повторну обробку компонентів, повторне складання та всебічне тестування для забезпечення функціональності та якості відновленого продукту [18]. По-друге, стратегії управління повторним виробництвом WEEE виходять за межі операційних процесів і відповідають основним принципам економіки замкнутого циклу. Ці стратегії охоплюють повторне використання активів, плани, політику та тактичні рамки, спрямовані на забезпечення економічної життєздатності та стійкості відновлюваного виробництва. Вони відіграють ключову роль в узгодженні практики переробки з ширшими цілями ефективності використання ресурсів, зменшення відходів та сприяння екологічно відповідальному виробництву та споживанню в рамках циклічної економіки [19].

У сфері технологій відновлювального виробництва в електронному секторі особливості продуктів, що відслужили свій термін експлуатації (EoL), вимагають всебічного аналізу різних чинників протягом усього їхнього життєвого циклу. Для того, щоб виріб, що відслужив свій термін, можна було переробити, він повинен мати певний залишковий термін експлуатації, що вимагає ретельної оцінки численних факторів. У контексті відновлювального виробництва, яке функціонує в рамках системи замкнутого циклу, ключові рішення повинні прийматися на окремих етапах, здійснюючи як прямий, так і непрямий вплив на процес відновлення. З точки зору сталого розвитку, початок життєвого циклу продукту, який часто називають початком життєвого циклу (BoL – beginning-of-life), означає зародження системи замкнутого циклу. Рішення, прийняті на цьому початковому етапі, впливають на весь життєвий цикл продукту, включаючи сценарії його потенційного завершення.

Проте життєвий цикл продукту EoL – це складний шлях, і ключові моменти існують і за межами фази життєвого циклу. Фаза середини життєвого циклу (MoL – middle-of-life) є проміжним етапом, який може суттєво вплинути на доцільність і перспективи відновлення. Зрештою, кульмінація настає на етапі кінця життєвого циклу (EoL), коли рішення і стратегії, реалізовані на попередніх етапах, призводять до утилізації продукту.

Стратегії, що лежать в основі ефективності процесів відновлення, нерозривно пов'язані з їхнім впливом на етапах BoL, MoL і EoL. Можливо виділити ключові стратегії, які виявилися важливими та визначають генеральну лінію в контек-

сті відновлення, кожна з яких робить свій внесок у покращення цього складного процесу. Важливо зазначити, що ці стратегії не є універсальними панацеями для кожного етапу ланцюга постачання. Натомість, вони стратегічно узгоджені з конкретними етапами, на яких їхній вплив є найбільш вираженим. До таких стратегій відносяться:

1. Збір продуктів, що вийшли з експлуатації. Ефективний збір відпрацьованих виробів має вирішальне значення для визначення їхньої придатності до повторного виробництва. Статус EoL зазвичай досягається, коли продукція викидається користувачами, тому своєчасний збір має вирішальне значення для запобігання подальшому погіршенню стану. У цьому сенсі збір продуктів EoL стає інструментом прийняття рішень [20]. У процесі збору продуктів EoL, використовуються три основні методи:

– система роздільного збору – цей метод орієнтований на переробні центри, які збирають відходи, що мають залишкову корисність для повторного виробництва, а решту відправляють на переробку. Ефективність збору становить 75% [21];

– існуюча система роздільного збору – відходи збираються з різних пунктів вивезення, що є трудомістким, але ефективним процесом з ефективністю збору 80% [21];

– система збору «від дверей до дверей» – передбачає збір продуктів EoL безпосередньо від домогосподарств, що вимагає більше персоналу та часу. Однак цей метод має 90% ефективність збору, забезпечуючи кращий стан продукції завдяки зменшенню забруднення.

Швидке збирання після утилізації має вирішальне значення, натомість затримки зменшують ймовірність повторного виробництва. Невизначеності, такі як стан і кількість повернутого продукту, вимагають багатоцільового підходу для прийняття рішень. Щоб підвищити придатність до повторного використання, продукти повинні бути зібрані швидко і правильно.

2. Класичний ланцюг постачання, відомий як прямий ланцюг постачання, складається з низки процесів за участю таких суб'єктів, як постачальники, виробники, транспортери, склади, роздрібні торговці та клієнти, і всі вони призначені для задоволення вимог клієнтів. І навпаки, зворотні ланцюги постачання починаються зі збору відпрацьованих продуктів, які потім реінтегруються в ланцюг постачання або належним чином утилізуються. Продукція, що відслужила свій термін, може бути повторно введена в ланцюг постачання за допомогою таких процесів, як повторне вико-

ристання, ремонт, реконструкція, модернізації, причому основна увага приділяється модернізації.

Відновлюване виробництво часто стикається з невизначеністю щодо термінів, якості та кількості повернень. Цю невизначеність можна зменшити завдяки ефективній співпраці між прямим і зворотним ланцюгами постачання. Безперешкодна співпраця між збирачами відпрацьованої продукції та переробниками забезпечує постійний потік компонентів і значно підвищує якість, кількість та своєчасність повернень [22].

3. Попередньо визначений час відновлення. Час, коли виріб з вичерпаним терміном експлуатації (EoL) розглядається на предмет відновлення, має першорядне значення. Тривала експлуатація на етапі середнього терміну служби (MoL) може зробити відновлення неможливим. У цьому сенсі концепція заздалегідь визначених термінів відновлення привернула значну увагу дослідників, що підкреслює її критичну роль в життєвому циклі продукту. Виявлення стадії EoL часто є складним завданням, що вимагає ретельного аналізу різних факторів, перш ніж приймати рішення.

Промислові дослідження, проведені в [23, 24] показали, що значний відсоток відходів не може бути відновлений і підлягає переробці як тверді промислові відходи. З точки зору життєвого циклу такі EoL продукти не можуть слугувати ядром для процесів відновлення. Щоб виправити цю ситуацію, заздалегідь визначені терміни передбачають оцінку експлуатаційних характеристик виробу, щоб гарантувати, що він не досягне точки, за якою його не можна буде переробити.

Відновлюване виробництво, по суті, представляється клієнтам як процес відновлення, спрямований на підвищення продуктивності та зниження загальних витрат. Тому відновлення слід розглядати як варіант технічного обслуговування, який слід розглядати в міру погіршення експлуатаційних характеристик виробу. Спочатку продуктивність виробу демонструє лише помірне зниження, але після певного періоду деградація прискорюється. Причина полягає в тому, що новий продукт досягає своєї пікової продуктивності на початку, але з часом ключові компоненти деградують, що призводить до більш швидкого загального погіршення. Коли продуктивність продукту падає нижче експлуатаційних вимог, продукт стає непридатним для відновлення на етапі EoL. Це зниження продуктивності виражається як спадна функція від часу експлуатації [25]. У визначенні часу відновлення основну роль відіграють три найважливіші фактори: економічні, екологічні

та технічні аспекти. В той же час експлуатаційні характеристики компонентів є невід'ємною частиною цього процесу прийняття рішень з двома основними варіантами:

– змінна продуктивність ключових компонентів – продукти складаються з різних компонентів, причому певні «ключові компоненти» мають вирішальне значення. Отже, їх продуктивність ретельно відстежується протягом життєвого циклу, щоб визначити точний період для відновлення;

– терміни відновлення за ключовими компонентами – враховуючи унікальні структурні характеристики виходу з ладу кожного компонента в різних умовах експлуатації, оцінка впливу кожного ключового компонента на продуктивність виробу стає вирішальною. Ключові компоненти відіграють центральну роль у розбиранні, огляді та відновленні.

4. Зворотна логістика. Зворотна логістика – це складний процес, що охоплює планування, виконання та контроль ефективного та економічно ефективного руху сировини, запасів у процесі виробництва, готової продукції та пов'язаної інформації з точки споживання назад до точки походження. Цей процес спрямований на повернення вартості або забезпечення належної утилізації [26]. Складність зворотної логістики виникає через різні рушійні сили, причини повернення, типи продукції та невизначеності всередині зворотного потоку. З огляду на те, що зворотна логістика охоплює серію процесів, включаючи повернення продукції, ремонт, демонтаж, реконструкцію, переробку, повторне виробництво та утилізацію використаних або продуктів, які вичерпали свій строк придатності, створення мережі зворотної логістики стає актуальним рішенням. Це рішення залежить від таких цілей, як мінімізація витрат, максимізація прибутку, задоволеність клієнтів і переваги для навколишнього середовища. Він передбачає визначення місць розташування, кількості та потужності об'єктів, а також кількості потоку між об'єктами.

4. Збір і обмін даними про життєвий цикл продукту. Це Одна з найбільш суттєвих проблем, яка полягає у відсутності повної інформації про життєвий цикл продукту. У випадку відсутності відповідної інформації, тонкощі розробки відповідного технологічного плану для продукту стають складними. Дані, що стосуються різних етапів життєвого циклу продукту, розпорошені між різними зацікавленими сторонами, які перебувають у системах планування виробництва, мережах

дистрибуції та фазах використання [27]. На жаль, ці дані залишаються розрізненими, оскільки компанії-виробники часто не поспішають ділитися такою інформацією через побоювання щодо конкуренції, як з боку прямих конкурентів виробників оригінального обладнання, так і з боку сторонніх переробників.

5. Залишковий термін корисного використання. Оцінка залишкового терміну служби (RUL – remaining useful life) продукту є критично важливим завданням. Вона передбачає оцінку ступеня корисності, яку ще зберігає вживана деталь або виріб, і як довго він може продовжувати ефективно функціонувати [28]. Це визначення є важливим для прийняття рішення про те, чи може використана деталь витримати ще один життєвий цикл. Оцінка RUL ґрунтується на трьох ключових факторах:

– фізичний залишковий термін служби – цей аспект ґрунтується на матеріальному стані виробу, який часто можна визначити за допомогою візуального огляду. Відповідні питання охоплюють здатність виробу витримувати експлуатаційні навантаження, необхідні для задоволення вимог користувача, і його постійну безпеку для користувачів;

– технічний залишковий строк служби – у технічній сфері оцінювання RUL, головна увага приділяється функціональності основних компонентів виробу. При цьому враховується, чи все ще ефективно виконують основні компоненти виробу свої функції;

– економічний залишковий строк служби – цей вимір особливо стосується продуктів, які зазвичай приносять дохід під час їх використання, наприклад, промислових машин. Основне питання тут полягає в тому, чи може продукт продовжувати приносити очікуваний дохід.

Ці три аспекти RUL можна кількісно оцінити за допомогою розрахункових методів, як це всебічно висвітлено в [29].

6. Дизайн електронної апаратури з врахуванням принципів відновлювального виробництва. Концепція дизайну для відновлення (DfRem – design for remanufacturing) набула популярності у відповідь на питання, що виникають на етапі відновлення, насамперед через неадекватний дизайн продукту, який створює перешкоди, особливо в процесі розбирання. DfRem, як описано в [30], слугує важливим засобом в організації та підтримки цілей виробництва. З екологічної точки зору вона є кращою за переробку, оскільки відновлює продукт до функціонального стану, а не перетворює його на сировину. Проте на практиці існують і ключові проблеми, пов'язані з DfRem.

Існує дефіцит знань і розуміння серед дизайнерів. Навіть коли концепція зрозуміла, існує дефіцит продуктів, розроблених з урахуванням відновлювального виробництва. Також, не вистачає інструментів для DfRem.

Кажучи іншими словами, основною метою DfRem є розробка продуктів, які можна легко розібрати, щоб полегшити відновлення матеріалів, придатних для вторинної переробки, і безпечну утилізацію матеріалів, що не підлягають переробці. Це особливо актуально, оскільки лише деякі компоненти певних продуктів можуть бути відновлені, що вимагає від виробників ретельного підходу. Реконструкція в першу чергу відповідає екологічним цілям, проте економічні фактори, включаючи обслуговування та ремонт, також значною мірою залежать від ефективності розбирання.

7. Сервіс система. Система «продукт-сервіс» (PSS – product-service system) виникає як парадигма, в якій виробники оригінального обладнання (OEM – original equipment manufacturers) продають послуги, що надаються їхніми продуктами, а не самі продукти [31]. Цей інноваційний підхід має явні переваги, зокрема, надає можливість ретельного контролю і моніторингу моделей використання продукту. Однак, з'являється і недолік у вигляді потенційної недбалості користувачів через відсутність права власності на продукт. Незважаючи на це, ефективність системи очевидна, насамперед тому, що виробники обладнання, а не кінцеві користувачі, несуть відповідальність за варіанти відновлення продукції після закінчення терміну експлуатації (EoL), тим самим популяризуючи відновлення, як домінуючий метод на етапі EoL [32].

В рамках цієї системи підвищується ймовірність прогнозованого відновлення, особливо коли вироби оснащені пристроями передачі даних, здатними сигналізувати про те, що виріб підлягає ремонту або відновленню. У сучасному контексті існує безліч аналогічних реалізацій PSS, включаючи громадські банки електроенергії, електросамокати, велосипеди для спільного користування та різні інші інноваційні програми, які підкреслюють універсальність і практичність цього підходу у сприянні безперервним процесам відновлювального виробництва.

8. Модернізація продукту – процес слугує трансформаційним механізмом, перетворюючи вживані вироби на функціонально еквівалентні новим. Традиційно відновлені вироби максимально наближені до оригіналу як за функціональністю, так і за зовнішнім виглядом. Однак



останні тенденції свідчать про зміну практик відновлюваного виробництва. Новий підхід передбачає модернізацію продуктів, що відслужили свій термін експлуатації, в результаті чого відновлені вироби можуть не бути схожими на оригінал, але при цьому мати кращі експлуатаційні характеристики [33]. Ця тенденція у відновлюваному виробництві ґрунтується на тому, що деякі товари, які повертаються після закінчення терміну експлуатації, мають потенціал для відновлення, хоча їм не вистачає потужності, щоб працювати на рівні з оригінальними виробами. Таким чином модернізація продукту дозволяє продавати відновлені товари за вищими цінами, ніж їхні стандартні аналоги, що підвищує їхню привабливість для виба-

гливого споживача. Наприклад, 50-кубовий мотоцикл можна перетворити на 100-кубову модель за допомогою відновлення, що демонструє потенціал для значних удосконалень [34].

**Висновки.** Таким чином, інтеграція можливості повторного використання в майбутньому як основного принципу відновлення продукції вимагає міждисциплінарного підходу, що ґрунтується на знаннях з управління життєвим циклом, сталого оновлення продукції, економічної доцільності та принципів еко-дизайну. Синергія між цими елементами має вирішальне значення для створення міцної основи для екологічно відповідальної практики відновлюваного виробництва в електронній промисловості.

#### Список літератури:

1. C. C. L. Silva, J. S. Santos, J. C. C. Silva, A. M. T. Monteiro Economic viability of plastic recycling: A review, *Waste Management*, vol. 114, pp. 62–74, 2022
2. Smith A. Advances in Component-level Diagnostics for Electronic Equipment Remanufacturing. *Journal of Sustainable Electronics*, 10(2), 2021, pp.45-58.
3. Johnson B. Reverse Engineering Techniques for Design Optimization in Electronic Equipment Remanufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(5-8), 2020, pp.1203-1216.
4. Gupta R., Patel S. Advanced Cleaning and Refurbishment Techniques in Electronic Equipment Remanufacturing. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, 9(9), 2019, pp.1730-1742.
5. Chen X. Life Cycle Assessment of Remanufactured Electronic Equipment: A Comparative Analysis., *Journal of Cleaner Production*, 354, 2022, pp.122-119.
6. Wang L., Li H. Circular Economy Strategies in Electronic Equipment Remanufacturing, *Resources, Conservation & Recycling*, 168, 2021, p.105.
7. Jones D., Lee M. Eco-design Principles and Green Materials in Electronic Equipment Remanufacturing, *Journal of Environmental Management*, 265, 2020, p.110.
8. Zhang Q. Technological Challenges in Remanufacturing Miniaturized Electronic Devices: A Review, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 145(1), p.108, 2023.
9. Regulatory Challenges in Remanufactured Electronic Equipment: A Policy Perspective, *Environmental Protection Agency Report*, EPA, EPA-345/2022-789, 2022.
10. Liu Y. 3D Printing and Nanotechnology in Electronic Equipment Remanufacturing: A Future Outlook, *Additive Manufacturing*, 50, p.518, 2023.
11. Rubio A., Jiménez-Parra B. Advancing Remanufacturing Strategies: Future Reusability and Scrap Recycling Minimization, *Journal of Sustainable Manufacturing*, 6(3), pp.213-229, 2014 .
12. Parra L., Rubio A. Holistic Approaches to End-of-Life Management: Strategies for Sustainable Product Updating, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 9(5), pp.1602-1620, 2012.
13. Agrawal V., Atasu A. Remanufacturing, Third-Party Competition, and Consumers' Perceived Value of New Products, *Management Science*, 56(8), pp.1272-1284, 2010.
14. Zanghelini G.M. Eco-Design and Remanufacturing: A Multi-Objective Optimization Approach, *Journal of Cleaner Production*, 59, pp.260-270, 2013.
15. Abdulrahman M. D. The Impact of Product Life Cycle on Supply Chain Network Design, *Computers & Industrial Engineering*, 87, pp.196-210, 2015 .
16. Wang Y. A Life Cycle Analysis for Remanufacturing Automotive Components, *Journal of Cleaner Production*, 64, 2014, pp.324-332.
17. Busu C. Challenges in Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Management: A Holistic Perspective, *Journal of Cleaner Production*, 90, 2015, pp.1-8.
18. Smith J Operational Aspects of Electronics Remanufacturing: A Comprehensive Review, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(9-12), pp.3337-3351, 2016.
19. Robinson C.M. Strategic Management of Circular Economy Business Models: An Analysis of Opportunities and Impediments, *California Management Review*, 60(2), pp.5-26, 2017.

20. Angouria-Tsorochidou M. Efficient Recovery of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) at End-of-Life: A Comprehensive Review, *Journal of Environmental Science and Engineering B* 42(2), 2019, pp. 153-170.
21. Kasper G. Optimizing End-of-Life Product Collection Systems: A Case Study Approach, *Waste Management* 82, 2018, pp. 213-224.
22. Guide J. Production Planning and Control for Remanufacturing: Industry Practice and Research Needs, *Journal of Operations Management*, 18(4), 2000, pp.467-483.
23. Zhang X., Liu Z. A Method of Determining the Best Time to Remanufacture, In *Proceedings of the 2nd International Conference on Contemporary Marketing Issues (ICCM)*, Athens, Greece, 2019, pp. 71-79.
24. Wang Q. A Real-Time Decision-Making Framework for Remanufacturing, In *Proceedings of the 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Madrid, Spain, 2018, pp. 2207-2213.
25. Huang X., Zhang Q. Closed-Loop Supply Chain Network Equilibrium with Technical Improvement and Abandonment of Products, *International Journal of Production Economics* 190, 2017, pp.104-116.
26. Rogers D.S., Tibben-Lembke R.S. An Examination of Reverse Logistics Practices, *Journal of Business Logistics*, 22(2), 2001, pp. 129-148.
27. Lee L., Tang C. Modelling the Costs and Benefits of IT Sharing between Manufacturers and Retailers, *Production and Operations Management*, 16(5), 2007, pp. 599-612.
28. Jardine A.K. Review of Current Approaches for Defining the Remaining Useful Life of Mechanical Equipment, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(4), 2006, pp.719-737.
29. Saxena A. Damage Prognosis for Fatigue Cracks in High-Stress Environments, *International Journal of Fatigue*, 30(9), 2008, pp. 1435-1449.
30. Pigosso D.C. Design for Remanufacturing in the Internet of Things, *Procedia CIRP*, 72, 2018, pp.1507-1512.
31. Mont O.K. Clarifying the concept of product-service system, *Journal of Cleaner Production*, 10(3), 2002, pp. 237-245.
32. Sakao T., Sundin E. Collaborative product and service life cycle management for a circular economy, *Procedia CIRP*, 64, 2017, pp. 9-14.
33. Liu C., Lund R.T. Remanufacturing and optimal cannibalization, *Management Science*, 48(8), 2002, pp. 1031-1045.
34. Guide V.D. Sustainable product-service systems, *International Journal of Production Research*, 49(18), 2011, pp. 5601-5619.

### **Lukyanuk S.V. STRATEGIES FOR RENEWABLE PRODUCTION IN THE ELECTRONICS INDUSTRY**

*In recent years, the field of remanufacturing, in particular remanufacturing in the electronics industry, has attracted considerable attention due to its diverse benefits and key role in the implementation of the fundamental principles of the circular economy and sustainable development. Positioned as an indispensable solution at the end of a product's life cycle, remanufacturing stands out for its exceptional ability to upgrade products, restoring their quality to the same level as new products. This regenerative potential underscores the urgent need to prioritise renewable manufacturing over other available alternatives. This paper explores various life cycle strategies developed to improve the efficiency of recovery processes. These strategies cover processes that span the entire product lifecycle, from pre-failure activities to interventions during failures and continuing to end-of-life interventions. The main goal of these strategies is to significantly increase the likelihood that the product will be upgraded rather than recycled or disposed of. This paper analyses the key strategies, each of which represents a different aspect of renewable production. The study of design adapted to renewable production highlights innovative ways of designing products to ensure their suitability for recovery. At the same time, attention is paid to the area of residual life assessment, using sophisticated methodologies to predict the remaining useful life of products, which allows decisions to be made on the further use of products. It also examines the introduction of advanced product service systems, emphasising their role in integrating the principles of remanufacturing into the market landscape. The paper also explores the complex issues of effective end-of-life management, analysing the nuances of interventions that can significantly affect the fate of a product after its use. The critical aspects of product collection and reverse logistics are thoroughly examined, revealing the intricacies of organising an uninterrupted flow of products from end users back to the renewable production ecosystem. It is crucial to recognise the limitations inherent in this paradigm and that not all products have the potential to be recovered. As a result, this review focuses on products that have the potential for remanufacturing.*

**Key words:** *remanufacturing, end-of-life, circular economy, design for remanufacturing, remaining useful life, electronics.*

## Відомості про авторів

**Андрушак В.С.** – доктор філософії, старший викладач кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка»

**Антошук С.Г.** – доктор технічних наук, професор, директор Інституту комп'ютерних систем Національного університету «Одеська політехніка»

**Арсенюк Д.О.** – аспірант кафедри прикладної радіоелектроніки радіотехнічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Баган Т.Г.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Баришич Л.М.** – аспірант кафедри інформатики та програмної інженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Безродний М.К.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Берднченко Ю.А.** – кандидат історичних наук, доцент, доцент кафедри технологій транспорту та управління процесами перевезень Державного університету інфраструктури та технологій

**Берднченко Ю.А.** – кандидат історичних наук, доцент, доцент кафедри «Технологій транспорту та управління процесами перевезень» Державного університету інфраструктури та технологій

**Бешлей Г.В.** – доктор філософії, доцент кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка»

**Бешлей М.І.** – доктор технічних наук, доцент кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка»

**Богза М.С.** – аспірант кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Боровик С.С.** – кандидат технічних наук, доцент, старший викладач кафедри Експлуатація флоту і технологія морських перевезень Одеського національного морського університету

**Бурковський Я.Ю.** – аспірант кафедри прикладної радіоелектроніки радіотехнічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Буткевич Г.Ю.** – студентка 2-го курсу магістратури групи ТК-21мн кафедри телекомунікацій Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Вакалюк Т.А.** – доктор педагогічних наук, професор, завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

**Вернівський С.М.** – заступник начальника кафедри автомобільної техніки Військової академії (м. Одеса)

**Войченко Т.О.** – кандидат економічних наук, доцент, в.о. завідувача кафедри природничо-математичних та інженерно-технічних дисциплін Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Волощук В.А.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Гаврилко Д.Д.** – студентка 3-го курсу кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

**Гайтан О.М.** – старший викладач кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

**Гікало П.В.** – старший викладач кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Гладка О.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних технологій та економічної кібернетики Національного університету водного господарства та природокористування

**Готорук А.Є.** – студентка кафедри хімічної технології кераміки та скла хіміко-технологічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Грушевська Т.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Управління комерційною діяльністю залізниць» Державного університету інфраструктури та технологій

**Гулько І.С.** – асистент кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

**Дакі О.А.** – доктор технічних наук, професор, директор Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Демиденко О.А.** – студент 2-го курсу магістратури кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Дерій В.О.** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу трансформації структури паливно-енергетичного комплексу Інституту загальної енергетики Національної академії наук України

**Довбиш І.О.** – студентка 3-го курсу групи ПК-11 кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю приладобудівного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Доля К.В.** – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобілів та транспортної інфраструктури Національного аерокосмічного університету імені М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

**Доля О.Є.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних управляючих систем Харківського національного університету радіоелектроніки

**Заболотний О.В.** – доктор технічних наук, доцент, декан факультету систем управління літальними апаратами Національного аерокосмічного університету імені М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

**Зінковський Ю.Ф.** – доктор технічних наук, професор, Академік Національної академії наук України, професор кафедри прикладної радіоелектроніки радіотехнічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Іваненко В.М.** – старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Іванова О.М.** – старший викладач кафедри комп'ютерних систем Національного університету «Одеська політехніка»

**Карпенко А.А.** – магістр Державного університету інфраструктури та технологій

**Карпович І.М.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних технологій та економічної кібернетики Національного університету водного господарства та природокористування

**Кириленко М.І.** – вчитель фізики Комунального закладу «Харківський ліцей № 161 «Імпульс» Харківської міської ради»

**Кириллова В.Ю.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації флоту і технологій морських перевезень Навчально-наукового інституту морського бізнесу Одеського національного морського університету

**Кириллова О.В.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри експлуатації портів і технологій вантажних робіт Навчально-наукового інституту морського бізнесу Одеського національного морського університету

**Кисельов В.Б.** – доктор технічних наук, професор, директор навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

**Кішнян І.В.** – старший викладач кафедри автомобільної техніки Військової академії (м. Одеса)

**Климаш М.М.** – доктор технічних наук, професор кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка»

**Колодежний В.А.** – старший викладач кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Котенко М.М.** – аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

**Кравченко О.А.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Експлуатація флоту і технологія морських перевезень Одеського національного морського університету

**Криволапов Г.Я.** – студент факультету інформаційних технологій та математики Київського університету імені Бориса Грінченка

**Криволапов Я.В.** – асистент кафедри прикладних інформаційних технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка

**Кривошеєва В.С.** – учень Комунального закладу «Харківський ліцей №161 «Імпульс» Харківської міської ради»

**Кривчик М.А.** – магістрант кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції Національного університету харчових технологій

**Куприєнко П.Д.** – магістрант Київського національного університету технологій та дизайну

**Курилех А.С.** – студентка 3-го курсу кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

**Латанська Л.О.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Лебедев Д.Ю.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри конструювання електронно обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Лісовець С.М.** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

**Лук'янюк С.В.** – старший науковий співробітник, Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Майзеліс А.О.** – доктор технічних наук, старший дослідник, доцент кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Макарова Л.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Малий В.С.** – системний адміністратор Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія»

**Малиновський О.А.** – старший викладач кафедри автотехнічного забезпечення Військової академії (м. Одеса)

**Маннапова О.В.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри природничо-математичних та інженерно-технічних дисциплін Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Матияшук О.В.** – старший викладач кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції Національного університету харчових технологій

**Мельник О.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри судноводіння і морської безпеки Одеського національного морського університету

**Муковська Д.Я.** – аспірант кафедри транспортних систем і логістики Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

**Муравйов О.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Наритник Т.М.** – кандидат технічних наук, професор, директор Інституту електроніки та зв'язку Української академії наук

**Некрашевич О.В.** – старший викладач кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Нікішин В.А.** – викладач кафедри автомобільної техніки Військової академії (м. Одеса)

**Олещенко Л.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Ольхович В.М.** – магістр 2-го курсу групи РТ-22м кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

**Павлюченко О.С.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції Національного університету харчових технологій

**Пастух В.А.** – аспірант кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка»

**Петренко О.І.** – кандидат економічних наук, доцент, завідувачка кафедри бізнес-логістики та транспортних технологій Державного університету інфраструктури та технологій

**Петрик В.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Петров Л.М.** – кандидат технічних наук, доцент, викладач кафедри автомобільної техніки Військової академії (м. Одеса)

**Петросян А.Р.** – аспірант, асистент кафедри комп'ютерних наук Державного університету «Житомирська політехніка»

**Пилипенко Ю.М.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Київський національний університет технологій та дизайну

**Пінаєв Б.О.** – аспірант 4-го курсу групи 172-20а кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

**Пліга Л.Л.** – доктор філософії, старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Попель В.А.** – начальник відділу науково-технічної експертизи Державного науково-дослідного інституту технологій кібербезпеки та захисту інформації

**Притула Н.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Равлюк В.В.** – викладач кафедри телекомунікаційних та інформаційних систем Національної академії Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького

**Римша О.Ю.** – магістр Державного університету інфраструктури та технологій

**Роботько С.П.** – аспірант Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Рувінська В.М.** – кандидат технічних наук, професор, професор кафедри інженерії програмного забезпечення Національного університету «Одеська політехніка»

**Рященко О.І.** – старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Сайко В.Г.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри прикладних інформаційних технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка

**Семенов А.О.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

**Сех О.Б.** – магістрант за спеціальністю 126 – Інформаційні системи та технології Навчально-наукового інституту автоматики, кібернетики та обчислювальної техніки Національного університету водного господарства та природокористування

**Силка І.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції Національного університету харчових технологій

**Сліжевський К.Д.** – магістрант кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Солтис І.В.** – магістр Державного університету інфраструктури та технологій

**Спасьонова Л.М.** – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної технології кераміки та скла хіміко-технологічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Стеба А.А.** – старший викладач кафедри Експлуатація флоту і технологія морських перевезень Одеського національного морського університету

**Стрелко О.Г.** – доктор історичних наук, професор, професор кафедри «Технології транспорту та управління процесами перевезень» Державного університету інфраструктури та технологій

**Суббота І.С.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної технології кераміки та скла хіміко-технологічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Сушин І.О.** – аспірант 3-го курсу групи ТЗ-11ф кафедри телекомунікацій Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Темчур В.С.** – аспірант кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Тесленко О.І.** – кандидат технічних наук, старший дослідник, провідний науковий співробітник відділу трансформації структури паливно-енергетичного комплексу Інституту загальної енергетики Національної академії наук України

**Тірон-Воробйова Н.Б.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри управління в транспортній галузі Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія»

**Топалов А.М.** – викладач кафедри комп’ютеризованих систем управління Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Тройніна А.С.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення Національного університету «Одеська політехніка»

**Трофименко І.В.** – кандидат технічних наук, в.о. завідувача кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Трубачев С.І.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Трушина Д.В.** – студентка кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

**Федоскіна С.В.** – учень Комунального закладу «Харківський ліцей № 161 «Імпульс» Харківської міської ради»

**Федунов В.М.** – старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Фоменко Г.Р.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

**Хльоба А.А.** – магістр 2-го курсу групи РТ-22м кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

**Ходсєв А.А.** – аспірант кафедри інтелектуальних вимірювальних систем та інженерії якості Національного аерокосмічного університету імені М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

**Цзяньцзюнь Ванг** – дослідник Юньчжоу (Янчен), Інноваційна технологічна компанія, Китай

**Ченьцзянь Донг** – дослідник, Школа автомобільного транспорту, Янченський політехнічний коледж, Янчен, Китай

**Чимшир В.І.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри судових енергетичних установок і систем, директор Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія»

**Чичуліна К.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри економіки, підприємництва та маркетингу Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

**Чумаченко С.М.** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського; голова ГО Асоціація фахівців цивільного захисту

**Шевченко А.П.** – доктор філософії, старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Шелухін С.В.** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри автомобільної техніки Військової академії (м. Одеса)

**Шик Е.** – асистент професора, доктор, доктор кафедри морського транспорту та інженерії управління Стамбульського технічного університету

**Штрибець В.В.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Шурхал М.Ю.** – магістр 2-го курсу групи РТ-22м кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

**Щур-Дунець О.І.** – студент Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

**Щур-Дунець О.І.** – студент Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

**Юе Чженг** – дослідник відділення науки та технологій, Янченський політехнічний коледж, Янчен, Китай

**Ющенко Н.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції Національного університету харчових технологій

Науковий журнал

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ  
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

**Серія: Технічні науки**

**Том 34 (73) № 6 2023**

Коректура • *Н. Славогородська*

Комп'ютерна верстка • *Н. Кузнєцова*

Адреса редакції:

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

м. Київ, вул. Джона Маккейна, 33

Електронна пошта: [editor@tech.vernadskyjournals.in.ua](mailto:editor@tech.vernadskyjournals.in.ua)

Сторінка журналу: [www.tech.vernadskyjournals.in.ua](http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua)

Формат 60×84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 32,01. Ум. друк. арк. 39,06. Зам. № 0124/051

Підписано до друку 28.12.2023. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1

Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: [mailbox@helvetica.ua](mailto:mailbox@helvetica.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р.