

**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 32 (71) № 5 2021**



Видавничий дім  
«Гельветика»  
2021

## **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 інженерної екології 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 технології 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 № 5 від 25.11.2021 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, 2021

## ЗМІСТ

### ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

**Панасюк І.В., Залюбовський М.Г.**

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ  
ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ У СЕРЕДОВИЩІ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР (ЧАСТИНА 2:  
ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИВАЛОСТІ ПРОМЕРЗАННЯ І ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ГАЛТУВАННЯ).....1

### АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

**Гобатюк Т.П.**

НЕЙРОМЕРЕЖЕВЕ КЕРУВАННЯ АВІАЦІЙНИМ ТРИФАЗНИМ ІНВЕРТОРОМ..... 5

### КОРАБЛЕБУДУВАННЯ

**Коваленко І.В.**

ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ НАДІЙНОСТІ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВИХ ВІСЕЙ  
ТА ВАЛІВ МЕТОДОМ БАНДАЖУВАННЯ.....11

### ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

**Кривонос В.Є., Василенко С.В., Скосирев В.Г.**

ОЦІНКА ВПЛИВУ КЛАСІВ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ЗАСОБІВ ПІД ЧАС ВИЯВЛЕННЯ  
ПОЧАТКОВОГО МОМЕНТУ ВИТКОВОГО ЗАМИКАННЯ В ОБМОТЦІ СТАТОРА  
АСИНХРОННОГО ДВИГУНА.....16

### ПРИЛАДИ

**Петрик В.Ф., Протасов А.Г., Галаган Р.М., Муравйов О.В., Момот А.С.**

БЕЗДРОТОВІ ТЕХНОЛОГІЇ В АВТОМАТИЗАЦІЇ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ..... 25

**Романюк В.А., Стародубцев С.О., Драган Ю.А., Літвінов А.Г.**

ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО ТА ОПТОЕЛЕКТРОННОГО ОЗБРОСННЯ  
У ВІЙСЬКОВИХ ФОРМУВАННЯХ НАЦІОНАЛЬНОЇ ГВАРДІЇ УКРАЇНИ.....30

### РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

**Бешлей М.І., Прислупський А.І., Бешлей Г.В.**

МЕТОДИ РОЗПОДІЛУ РАДІОРЕСУРСІВ ТА БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ  
В МЕРЕЖІ 5G / NB-IOT ДЛЯ НАДАННЯ КРИТИЧНО ВАЖЛИВИХ СЕРВІСІВ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ...36

**Гарист А.В., Білевська О.С.**

ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ПРИЙМАЧІВ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ ПРОГРАМНО-ОБУМОВЛЕНОГО РАДІО... 46

**Лисенко О.І., Тачиніна О.М., Новіков В.І., Гуйда О.Г., Фургат О.В., Юсипів Т.В.**

СПОСІБ НАЛАШТУВАННЯ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОЛОЖЕННЯМ  
ВІСІ ЧУТТЕВОСТІ МОБІЛЬНОГО СЕНСОРА..... 51

### ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

**Анищенко О.С.**

СИНТЕЗ ШВИДКОДІЮЧОГО АЛГОРИТМУ ФРАКТАЛЬНОГО СТИСНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ.....58

**Батюк С.Г., Лобзов Н.С.**

ФУНКЦІОНАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ  
ЕНЕРГЕТИЧНОГО БАРАБАНОВОГО КОТЛА..... 65

**Батюк С.Г., Лобзов Н.С.**

СТРУКТУРНЕ (ІМІТАЦІЙНЕ) МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО  
КОМПЛЕКСУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО БАРАБАНОГО КОТЛА.....74

**Захарчин Н.Г., Захарчин Н.Р.**

РІСТ СТРУКТУРОВАНИХ ТА НЕСТРУКТУРОВАНИХ ДАНИХ ТА УПРАВЛІННЯ НИМИ:  
ЗАГАЛЬНІ АСПЕКТИ..... 83

<b>Зелінський Ю.П., Кравченко С.М.</b> РОЗПІЗНАВАННЯ ЕМОЦІЙНИХ ВИРАЗІВ ОБЛИЧЧЯ ЛЮДИНИ ЗА ДОПОМОГОЮ ЗГОРТКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ.....	88
<b>Кваша Ю.В.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ЕНЕРГОБЛОКУ АТОМНОЇ СТАНЦІЇ ВВЕР-1000 В РЕЖИМІ «Н».....	94
<b>Козак Є.Б.</b> АНАЛІЗ ДАНИХ І МАШИННЕ НАВЧАННЯ У ХМАРНИХ І ТУМАННИХ ПЛАТФОРМАХ ЯК ОСНОВА ЕФЕКТИВНОЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ.....	100
<b>Мелешко М.А., Дмитренко Т.В.</b> АЛГОРИТМ РЕАЛІЗАЦІЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ З АДАПТИВНИМ КОДУВАННЯМ МІЖ ГРУПОЮ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ В ЄДИНОМУ ПРОСТОРИ.....	108
<b>Муравйов О.В., Нижник Ю.М., Петрик В.Ф., Протасов А.Г., Серий К.М.</b> СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....	114
<b>Несук О.О., Потапова К.Р., Тарасенко-Клягченко О.В.</b> ПРО ОСОБЛИВОСТІ ЗОБРАЖЕННЯ ГРАФІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ З УРАХУВАННЯМ АПАРАТНО ПРИСКОРЕНОГО ПІДХОДУ.....	120
<b>Нікітенко Є.В., Омечинська Н.В., Гуйда О.Г., Лісовець С.М., Скрипка К.І.</b> ЧАТ-БОТ У TELEGRAM ДЛЯ ПОШУКУ МАРШРУТНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ У МІСТІ ЧЕРНІГОВІ.....	125
<b>Oleshchenko L.M., Medvedev M.G., Kobryn D.R., Sukalo M.L.</b> AGENT MODELLING SOFTWARE OF POPULATION BEHAVIOR IN EMERGENCY SITUATIONS.....	132
<b>Пасєка Н.М., Шекета В.І., Пасєка М.С., Кулинич М.М.</b> РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СТАНДАРТІВ GRPD ДЛЯ ЗАХИСТУ ПЕРСОНАЛЬНИХ ДАНИХ.....	139
<b>Піткевич П.І.</b> МЕТОДИКА СТВОРЕННЯ РОЗПОДІЛЕНОГО СХОВИЩА ДАНИХ У БАНКІВСЬКІЙ СФЕРІ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ.....	146
<b>Шувалов Д.Р.</b> АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ПЕЧІ ДЛЯ СПАЛЮВАННЯ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ.....	153
<b>ЕНЕРГЕТИКА</b>	
<b>Беднарська І.С., Риндюк Д.В., Лементар С.Ю.</b> МОДЕЛЮВАННЯ ГАЗОДИНАМІКИ ВОЛОГОЇ ПАРИ В ГОЛОВНИХ ПАРОПРОВОДАХ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ.....	159
<b>Волошук В.А., Любичький С.В., Поліщук І.А., Поліщук М.А.</b> ЗАСТОСУВАННЯ ХМАРНОЇ ПЛАТФОРМИ COLABORATORY ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ЕКСЕРГЕТИЧНОГО АНАЛІЗУ ТЕПЛОНАСОСНИХ УСТАНОВОК.....	168
<b>Волошук В.А., Некрашевич О.В., Гікало П.В.</b> ЕКСЕРГЕТИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ КОГЕНЕРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ З УРАХУВАННЯМ ЗМІННИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ.....	177
<b>Самойлик О.В., Ткаченко В.Ф.</b> ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ У СКЛАДІ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ.....	184
<b>Семичаєвський С.В., Якіменко М.Л., Осадчук М.В.</b> ПРО НЕОБХІДНІСТЬ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ ВАЛІДАЦІЇ МОДЕЛІ ГОРІННЯ ТУРБІННОГО МАСЛА МАРКИ ТП-22.....	192
<b>Шрайбер О.А., Дубровський В.В., Тесленко О.І.</b> СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ У СВІТІ .....	199
<b>РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН</b>	
<b>Коновал В.М., Іщенко К.С.</b> ОЦІНКА ЕНЕРГОЄМНОСТІ РУЙНУВАННЯ АНІЗОТРОПНИХ ГІРСЬКИХ ПОРІД СКЛАДНОЇ БУДОВИ ЗА РІЗНИХ УМОВ ЇХ ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ.....	210

## **ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ**

<b>Zabiiaka N.A., Kanunnikova N.A., Pyrozhenko E.V., Bairachniy V.B., Tykhomyrova T.S.</b> INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE RATE OF RELEASE OF HYDROGEN THROUGH THE INTERACTION OF AK7 ALLOY WITH ALKALINE-CHLORIDE SOLUTION.....	218
<b>Майзеліс А.О., Пінчук Н.В., Волощук В.В.</b> ВПЛИВ УМОВ ОСАДЖЕННЯ БАГАТОШАРОВИХ ПОКРИТТІВ НА ЇХ МІКРОТВЕРДІСТЬ.....	223

## **ТРАНСПОРТ**

<b>Бурлакова Г.Ю., Букіна М.Д.</b> ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ СКЛАДОВИХ КОМПОНЕНТІВ ПОКАЗНИКА «НАДІЙНІСТЬ» У СИСТЕМІ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ НАДАННЯ ПОСЛУГ ПІД ЧАС ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ .....	229
<b>Гімпель Р.М., Ткаченко В.В., Рященко О.І., Тришин В.В.</b> МЕТОДИКИ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ТУРБОВАНИХ ДВИГУНІВ ШВИДКІСНИХ СУДЕН ІЗ ЧАСТКОВО ЗАНУРЕНИМИ ГВИНТАМИ.....	234
<b>Дакі О.А., Штрибець В.В., Ткаченко В.В., Рященко О.І.</b> МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СУДНОВИХ КОТЛІВ-УТИЛІЗАТОРІВ ТЕПЛА.....	242
<b>Дакі О.А., Якусевич Ю.Г., Колесник В.В., Тришин В.В.</b> ІМПУЛЬСНО-МОДУЛЯЦІЙНЕ РЕГУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СУДНОВИХ СИСТЕМ.....	247
<b>Іваненко В.М., Федунів В.М., Ліганенко В.В., Тришин В.В.</b> ПОБУДОВА ОНТОЛОГІЧНОЇ МОДЕЛІ НЕСЕННЯ ВАХТИ НА МОРСЬКОМУ СУДНІ.....	253
<b>Іваненко В.М., Федунів В.М., Урум Н.С., Бажак О.В.</b> АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОРЕХІДНОЇ АСТРОНОМІЇ.....	259
<b>Кара І.А.</b> ПРИМІСЬКИЙ ГРОМАДСЬКИЙ ТРАНСПОРТ В УКРАЇНІ: ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ.....	265
<b>Разумова К.М., Темченко О.А., Шевчук Н.А.</b> ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ТРАНСПОРТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ЗАБЕСПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ РОЗРОБКИ ЗАЛІЗОРУДНИХ РОДОВИЩ.....	270
<b>Стрелко О.Г., Бердниченко Ю.А., Соловійова О.С., Кравченко О.В., Дорошенко М.М.</b> ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАЛІЗНИЧНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ЗА РАХУНОК МОДЕРНІЗАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ЗАГАЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ.....	279
<b>Урум Н.С., Рященко О.І., Ліганенко В.В., Бабере О.С.</b> МЕТОД ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ ЗГОРЯННЯ ПАЛИВА У СУДНОВОМУ ДИЗЕЛІ.....	286
<b>ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....</b>	291

# CONTENTS

## INDUSTRIAL ENGINEERING

**Panasyuk I.V., Zalyubovskiy M.G.**

EXPERIMENTAL STUDY OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMER MATERIALS IN THE ENVIRONMENT OF LOW TEMPERATURES (PART 2: STUDY OF THE DURATION OF FREEZING AND TECHNOLOGICAL PROCESS OF TUMBLING).....1

## AIRCRAFT AND AEROSPACE TECHNIQUES

**Hobatiuk T.P.**

NEURAL NETWORK CONTROL OF AVIATION THREE-PHASE INVERTER.....5

## SHIPBUILDING

**Kovalenko I.V.**

IMPROVING THE LEVEL OF RELIABILITY IN THE OPERATION OF SHIP AXLES AND SHAFTS BY THE BANDING METHOD.....11

## ELECTRICAL ENGINEERING

**Kryvonosov V.E., Vasilenko S.V., Skosyrev V.G.**

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF ACCURACY CLASSES OF MEASURING INSTRUMENTS IN THE DETECTION OF THE INITIAL MOMENT OF A TURN CIRCUITS IN THE STATOR WINDING.....16

## EQUIPMENT

**Petryk V.F., Protasov A.G., Galagan R.M., Muraviov O.V., Momot A.S.**

WIRELESS TECHNOLOGIES IN THE NON-DESTRUCTIVE TESTING AUTOMATION.....25

**Romanyuk V.A., Starodubtsev S.O., Dragan Y.A., Litvinov A.G.**

APPLICATION OF LASER AND OPTOELECTRONIC WEAPONS IN MILITARY FORMATIONS NATIONAL GUARD OF UKRAINE.....30

## RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

**Beshley M.I., Pryslupskiy A.I., Beshley H.V.**

RADIO RESOURCE ALLOCATION AND LOAD BALANCING METHODS IN A 5G / NB-IOT NETWORK TO PROVIDE CRITICAL IOT SERVICES.....36

**Garyst A.V., Bilevska O.S.**

PRINCIPLES OF BUILDING RECEIVERS ON SOFTWARE DEFINED RADIO TECHNOLOGY.....46

**Lysenko O.I., Tachinina O.M., Novikov V.I., Guida O.G., Furtat O.V., Yusypiv T.V.**

THE WAY OF ADJUSTING THE DIGITAL SYSTEM AND ENSURING THE POSITION OF THE MOBILE SENSOR.....51

## INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

**Anyshchenko O.S.**

SYNTHESIS OF HIGH-SPEED FRACTAL IMAGE COMPRESSION ALGORITHM.....58

**Batiuk S.G., Lobzov N.S.**

FUNCTIONAL MODELING OF AUTOMATED TECHNOLOGICAL COMPLEX OF HEAT POWER DRUM BOILER.....65

**Batiuk S.G., Lobzov N.S.**

STRUCTURAL MODELING OF AUTOMATED TECHNOLOGICAL COMPLEX OF HEAT POWER DRUM BOILER.....74

**Zakharchyn N.H., Zakharchyn N.R.**

GROWTH AND MANAGEMENT OF STRUCTURED AND UNSTRUCTURED DATA: GENERAL ASPECTS....83

**Zelinskyi Yu.P., Kravchenko S.N.**

RECOGNITION OF EMOTIONAL EXPRESSIONS OF HUMAN FACE USING CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK.....88

<b>Kvasha Yu.V.</b>	
RESEARCH OF THE AUTOMATED SYSTEM OF REGULATION OF THE POWER PLANT WITH THE WWER-1000 NUCLEAR UNIT IN THE “N” MODE.....	94
<b>Kozak Ye.B.</b>	
DATA ANALYSIS AND MACHINE LEARNING IN CLOUD AND FOG PLATFORMS AS A BASIS FOR EFFICIENT DATA TRANSFER.....	100
<b>Meleshko M.A., Dmytrenko T.V.</b>	
ALGORITHM FOR IMPLEMENTING DATA TRANSMISSION WITH ADAPTIVE CODING BETWEEN A GROUP OF UAVS IN A SINGLE SPACE.....	108
<b>Muraviov O.V., Nyzhnyk Yu.M., Petryk V.F., Protasov A.G., Syeryy K.M.</b>	
CURRENT STATE AND DEVELOPMENT PROSPECTS OF ADDITIVE TECHNOLOGIES.....	114
<b>Nesuk O.O., Potapova K.R., Tarasenko-Klyatchenko O.V.</b>	
ON THE FEATURES OF DISPLAYING GRAPHIC OBJECTS TAKING INTO ACCOUNT A HARDWARE ACCELERATED APPROACH.....	120
<b>Nikitenko Ye.V., Ometsynska N.V., Guida O.G., Lisovets S.M., Skrypka K.I.</b>	
TELEGRAM CHATBOT TO SEARCH FOR ROUTE VEHICLES IN CHERNIHIV.....	125
<b>Oleshchenko L.M., Medvedev M.G., Kobryn D.R., Sukalo M.L.</b>	
AGENT MODELLING SOFTWARE OF POPULATION BEHAVIOR IN EMERGENCY SITUATIONS.....	132
<b>Pasiaka N.M., Sheketa V.I., Pasiaka M.S., Kulynych M.M.</b>	
DEVELOPMENT OF SOFTWARE USING GRPD STANDARDS FOR PERSONAL DATA PROTECTION.....	139
<b>Pitkevich P.I.</b>	
METHODS OF CREATING A DISTRIBUTED DATA STORAGE IN THE BANKING SPHERE IN REAL TIME.....	146
<b>Shuvalov D.R.</b>	
AUTOMATED FURNACE CONTROL SYSTEM FOR ORGANIC WASTE INCINERATION.....	153
 <b>POWER ENGINEERING</b>	
<b>Bednarska I.S., Rindyuk D.V., Lementar S.Yu.</b>	
SIMULATION OF WET STEAM GAS DYNAMICS IN MAIN STEEL PIPELINES.....	159
<b>Voloshchuk V.A., Liubytyskyi S.V., Polishchuk I.A., Polishchuk M.A.</b>	
APPLICATION OF CLOUD PLATFORM COLABORATORY FOR IMPLEMENTATION OF EXERGETIC ANALYSIS OF HEAT PUMP SYSTEMS.....	168
<b>Voloshchuk V.A., Nekrashevych O.V., Hikalo P.V.</b>	
EXERGETIC PERFORMANCE ESTIMATION OF COGENERATION SYSTEM TAKING INTO ACCOUNT VARIABILITY OF OPERATION MODES.....	177
<b>Samoilyk O.V., Tkachenko V.F.</b>	
INCREASE OF THE DISTRIBUTED GENERATION EFFICIENCY IN THE ELECTROTECHNICAL COMPLEX.....	184
<b>Semichaevsky S.V., Yakimenko M.L., Osadchuk M.V.</b>	
ON THE NECESSITY OF EXPERIMENTAL VALIDATION OF THE TP-22 TURBINE OIL COMBUSTION MODEL.....	192
<b>Shraiber O.A., Dubrovskyi V.V., Teslenko O.I.</b>	
CURRENT STATE AND PROSPECTS OF HYDROGEN ENERGY DEVELOPMENT IN THE WORLD.....	199
 <b>RESOURCE DEVELOPMENT</b>	
<b>Konoval V.M., Ishchenko K.S.</b>	
ESTIMATION OF ENERGY CONTAINMENT OF ANISOTROPIC DESTRUCTION OF ROCKS THE COMPLEX STRUCTURE UNDER DIFFERENT CONDITIONS OF THEIR DYNAMIC LOAD.....	210
 <b>CHEMICAL TECHNOLOGY</b>	
<b>Zabiiaka N.A., Kanunnikova N.A., Pyrozhenko E.V., Bairachnyi V.B., Tykhomyrova T.S.</b>	
INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE RATE OF RELEASE OF HYDROGEN THROUGH THE INTERACTION OF AK7 ALLOY WITH ALKALINE-CHLORIDE SOLUTION.....	218

<b>Maizelis A.O., Pinchuk N.V., Voloshchuk V.V.</b> INFLUENCE OF CONDITIONS OF DEPOSITION OF MULTILAYER COATINGS ON THEIR MICROHARDNESS.....	223
--	-----

## **TRANSPORT**

<b>Burlakova H.Yu., Bukina M.D.</b> DETERMINATION OF THE CONTENT OF THE COMPONENTS OF “RELIABILITY” IN THE SYSTEM OF QUALITY ASSESSMENT OF SERVICES IN PASSENGER TRANSPORTATION....	229
<b>Himpel R.M., Tkachenko V.V., Ryashchenko O.I., Trishin V.V.</b> TECHNIQUES FOR CONTROL OF PARAMETERS OF TURBOED ENGINES OF SPEED VEHICLES WITH PARTIALLY SUBMERSIBLE SCREWS.....	234
<b>Daki O.A., Shtrybets V.V., Tkachenko V.V., Ryashchenko O.I.</b> METHODS OF INCREASING THE EFFICIENCY OF SHIP BOILERS – HEAT RECOVERY.....	242
<b>Daki O.A., Yakusevich Yu.G., Kolesnik V.V., Trishin V.V.</b> PULSE-MODULATORY REGULATION OF ELECTRIC POWER SYSTEMS.....	247
<b>Ivanenko V.M., Fedunov V.M., Trishin V.V., Liganenko V.V.</b> BUILDING AN ONTOLOGICAL MODEL FOR WATCHKEEPING ON SHIPS.....	253
<b>Ivanenko V.M., Fedunov V.M., Urum N.S., Bajak O.V.</b> ANALYSIS OF THE BASIC ELEMENTS OF NAVIGATION ASTRONOMY.....	259
<b>Kara I.A.</b> SUBURBAN PUBLIC TRANSPORT IN UKRAINE: GENERAL CHARACTERISTICS AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT.....	265
<b>Razumova K.M., Temchenko O.A., Shevchuk N.A.</b> JUSTIFICATION EXPEDIENCY OF APPLICATION COMBINED TRANSPORT TECHNOLOGIES TO ENSURE EFFICIENT DEVELOPMENT OF IRON DEPOSITS.....	270
<b>Strelko O.H., Berdnychenko Yu.A., Soloviova O.S., Kravchenko O.V., Doroshenko M.M.</b> IMPROVING THE EFFICIENCY OF RAILWAY TRANSPORTATION DUE TO THE MODERNIZATION OF GENERAL RAILWAY TRANSPORT FACILITIES.....	279
<b>Urum N.S., Ryashchenko O.I., Liganenko V.V., Babere O.S.</b> METHOD OF INTENSIFICATION OF FUEL COMBUSTION PROCESS IN MARINE DIESELS.....	286
<b>INFORMATION ABOUT AUTHORS.....</b>	291



# ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.924.7

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/01>**Панасюк І.В.**

Київський національний університет технологій та дизайну

**Залюбовський М.Г.**

Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ У СЕРЕДОВИЩІ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР (ЧАСТИНА 2: ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИВАЛОСТІ ПРОМЕРЗАННЯ І ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ГАЛТУВАННЯ)

Підвищення продуктивності виготовлення деталей із полімерних матеріалів багато в чому залежить від скорочення часу підготовчих і фінішних оздоблювально-зачищувальних операцій. На такі операції витрачається до 80% загального технологічного часу. У легкій промисловості деякі типи фурнітурних деталей, а також полімерні деталі взуття (каблуки, задники, вставки в каблуки) виготовляються литтям. Як правило, такі деталі вимагають проведення дуже трудомісткої фінішної галтувальної обробки, в ході виконання якої реалізується відділення відлитих деталей від їх ливників. Така обробка реалізується з використанням різного галтувального обладнання: машини з обертальними барабанами, вібраційні й роторні машини, машини з планетарним або зі складним просторовим рухом робочих ємкостей тощо. Крім того, така обробка можлива лише за крихкості полімерних деталей. Крихкість полімерних деталей досягається значним зниженням їх температури шляхом охолодження в рідкому азоті, який забезпечує їх охолодження до температури  $-195,8^{\circ}\text{C}$ . Ударний вплив на охолоджені деталі призводить до руйнування найменш міцних їх елементів – облоя, ливників. Для можливості успішного застосування в промисловості такого методу обробки деталей були проведені експериментальні дослідження тривалості промерзання полімерних деталей, а також зачистки полімерних деталей у середовищі низьких температур із використанням планетарно-відцентрової машини з перпендикулярними осями обертання барабана й водила. Знання основних характеристик полімерних матеріалів у середовищі низьких температур дозволяє створювати високоефективні технологічні процеси й обладнання для видалення облоя та ливників формованих із них деталей. Результати досліджень можуть бути використані на стадії проєктування відповідних технологічних процесів обробки полімерних деталей.

**Ключові слова:** полімер, температура крихкості, рідкий азот, робоча ємкість, ударна дія, тривалість промерзання.

**Постановка проблеми.** Одним із видів галтування є технологічна операція відділення металевих або полімерних деталей від ливників [1, с. 11–15]. Така технологічна операція виконується з використанням спеціального обладнання. До такого обладнання відносяться різні типи машин – машини з обертається барабанами, вібраційні і роторні машини, машини з планетарним або зі складним просторовим рухом робочих ємкостей [2, с. 544] та інші.

Відділення деталей від ливників в такому обладнанні [3, с. 8–10] відбувається внаслідок

зіткнення рухомих деталей між собою, зі стінками ємкості та з частками наповнювача (якщо він використовується) [4, с. 19–22; 5, с. 48–54]. Така обробка ефективна, якщо деталі металеві або виготовлені з крихких полімерних матеріалів, відповідно легко руйнуються при ударній дії.

Для відділення від ливників деталей, виготовлених з полімерних матеріалів необхідно попередньо піддавати їх охолодженню рідким азотом для досягнення стану крихкого руйнування [6, с. 20–100]. Таким чином, тонкі елементи полімерних деталей (облой, задирки, залишки ливників)

будуть руйнуватися як крихкі тіла при величині деформації ( $< 10\%$ ) [7, с. 5–85].

Для успішного застосування цього методу обробки необхідно знати ряд фізико-механічних властивостей полімерних матеріалів в середовищі низьких температур, зокрема, тривалість промерзання облоя і деталі до заданої температури.

**Постановка задачі.** Мета роботи – експериментальне дослідження тривалості промерзання і зачистки деталей з полімерних матеріалів в середовищі низьких температур.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

**Дослідження тривалості промерзання.** Тривалість повного промерзання зразків досліджували на двох полімерних матеріалах: гумі стиропіпу (ОСТ 17-226 - 73) і пористому поліуретані (рідке формування). Були обрані зразки товщиною  $10^{-2}$  м та площиною  $2 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>. Вони мали по своїх боках облоя товщиною  $(0,4 \dots 0,5) \cdot 10^{-3}$  м. Маса гумового зразка становила  $25 \cdot 10^{-3}$  кг, поліуретанового –  $12 \cdot 10^{-3}$  кг. Зразки були оснащені термопарами, які встановлювалися в наступних місцях (рис. 1): термопара 1 – облоя; термопара 2 – відстань  $10^{-3}$  м від нижньої поверхні зразка; термопара 3 – відстань  $2 \cdot 10^{-3}$  м від нижньої поверхні зразка; термопара 4 – середина зразка,  $5 \cdot 10^{-3}$  м від поверхні.

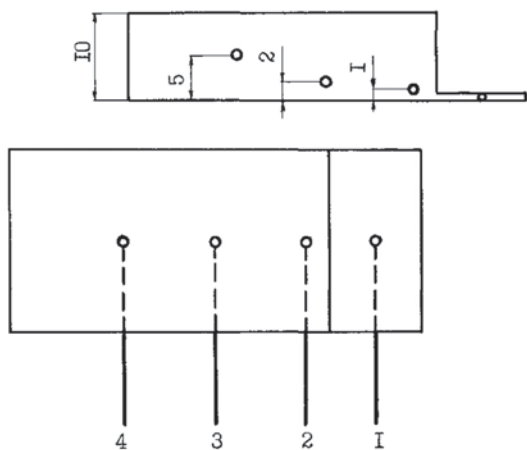


Рис. 1. Схема розташування термопар у зразку досліджуваного матеріалу

Експеримент виконувався на експериментальній установці, кінематична схема якої представлена на рис. 2. Установка складається з столу 1, на якому встановлені посудина Дьюара 2 з рідким азотом, механізм опускання зразка, що складається із опори з направляючою втулкою 3, штока 4 з затискачем. Шток підпружинений і утримується в піднятому стані фіксатором 5, з'єднаним з мікровимикачем 6. На столі встановлено ударний меха-

нізм, що включає ударник 7 з бойком, корпус 8, ударну пружину 9, фіксатор 10, електромагніт 11. Ударний механізм змонтований на столі за допомогою регульованої опори 12.

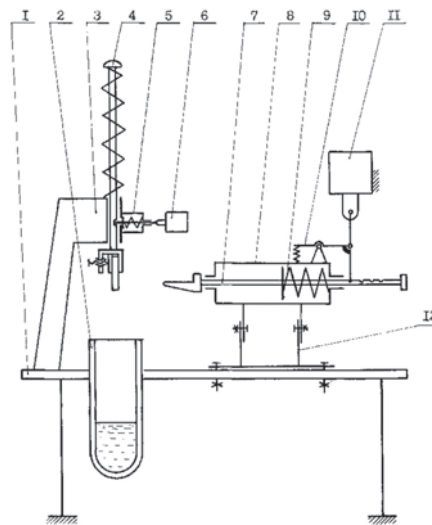


Рис. 2. Кінематична схема експериментальної установки для дослідження фізико-механічних властивостей полімерних матеріалів в середовищі низьких температур

Експеримент проводився в такий спосіб. Зразок, оснащений термопарами закріплювався в затискачі штока. Шток плавно опускався в зону охолодження. Час опускання становив 30 секунд. Витримка зразка в зоні охолодження проводилася до температури  $-100^{\circ}\text{C}$ . Після повного промерзання зразка шток піднімався у вихідне положення.

Температура облоя і матеріалу зразка вимірювалася за допомогою термопар мідь-константан. Для вимірювань були відібрані чотири термопари з найменшим розкидом показань. Термопари підключалися до дванадцятиканального самописного потенціометра КСП-4.

Термопари були встановлені в тілі зразків, у каналах. Канали з термопарами були ущільнені і герметизувалися відповідно до існуючих рекомендацій [8, с. 52–198].

У результаті проведених експериментів отримано залежності, що показують зміну температури матеріалу в різних точках зразків в залежності від часу охолодження (рис. 3). Криві 1, 2, 3, 4 на рисунках 3 а і 3 б показують зміну температури в різних точках зразків, що відповідають місцям установки термопар з тими ж номерами.

Аналіз отриманих залежностей показує, що тривалість промерзання облоя товщиною  $0,5 \cdot 10^{-3}$  м до температури  $-100^{\circ}\text{C}$  становить (з урахуванням часу опускання зразка в зону охолодження):

- гуми «стіраніп» – 2 хвилини;
- пористого поліуретану – 1,5 хвилини.

Промерзання всього зразка до температури  $-100^{\circ}\text{C}$  відбувається упродовж наступних проміжків часу:

- гума «стіраніп» – 15 хвилин;
- пористий поліуретан – 12 хвилин.

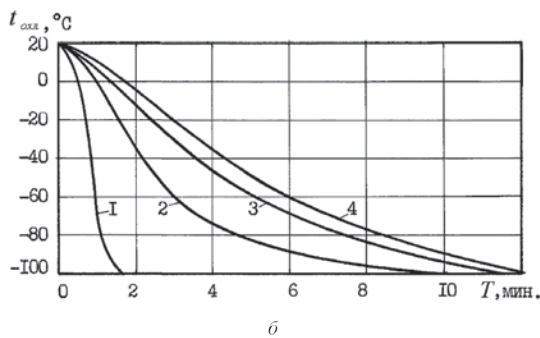
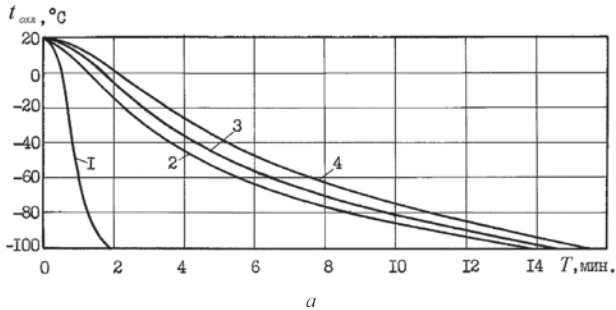


Рис. 3. Залежність температури  $t_{\text{охл}}$  в різних точках зразка від тривалості його охолодження  $T$ : а – гума «стіраніп»; б – пористий поліуретан

Температура матеріалу в різних точках зразків при досягненні облоєм температури  $-100^{\circ}\text{C}$  вказана в таблиці 1.

Таблиця 1

№	Місце розташування термопари	Зразок із гуми	Зразок із поліуретану
1	облой	$-100^{\circ}\text{C}$	$-100^{\circ}\text{C}$
2	Відстань від нижньої поверхні зразка $1 \cdot 10^{-3}$ мм	$-10^{\circ}\text{C}$	$-26^{\circ}\text{C}$
3	Відстань від нижньої поверхні зразка $2 \cdot 10^{-3}$ мм	$0^{\circ}\text{C}$	$-10^{\circ}\text{C}$
4	середина зразка	$5^{\circ}\text{C}$	$0^{\circ}\text{C}$

Таким чином, отримані дані дозволяють проводити ефективну оздоблювально-зачищувальну обробку в середовищі низьких температур деталей, відформованих з полімерів, широко застосовуваних у легкій промисловості.

**Експериментальне дослідження зачистки полімерних деталей в середовищі низьких температур.**

В експериментальній планетарно-відцентрової машині [9, с. 3–20] з перпендикулярними осями обертання барабана і водила обробляли деталі з полімерних матеріалів. Для експерименту використовували деталі (каблуки, задники, вставки в каблуки) з поліетилену і вторинного поліаміду (рис. 4), отримані литтям під тиском і оброблені в середовищі низьких температур. Деталі охолоджували в барабані установки за допомогою рідкого азоту, який подавався безпосередньо в барабан, до температури крихкості матеріалу (поліетилен:  $-113^{\circ}\text{C}$ ; поліамід:  $-43^{\circ}\text{C}$ ). Температуру в барабані контролювали за допомогою термопари мідь-константан. В якості наповнювача використовували сталеві поліровані кулі діаметром 4–5 мм, які забезпечували в даній установці необхідну енергію удару ( $20 \cdot 10^{-3}$  Дж) для видалення облоя товщиною до 0,5 мм. Барабан заповнювався робочим середовищем до 50% свого об'єму.

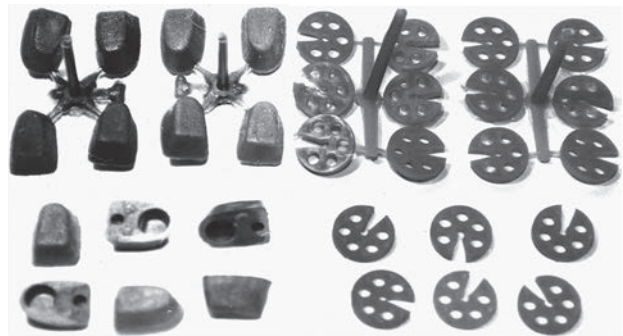


Рис. 4. Деталі взуття, виготовлені з поліаміду й поліетилену до й після обробки в установці

У процесі експерименту визначали час до повного видалення ливників та облоя з поверхні деталей. Відповідно до технологічного регламенту, що застосовуються у виробництві, допускалося наявність на поверхні слідів від ливників та облоя висотою до 0,5 мм.

Оброблювані деталі поміщали в барабан установки і охолоджували упродовж 1,5–2 хв (відповідно до отриманих даних) до повного промерзання облоя. Потім установку приводили в дію і відбувалося видалення облоя і ливників.

Отримані дані показують, що тривалість обробки деталей знаходиться в межах 1–5 хв. Таким чином, весь технологічний цикл становив 3–7 хв. У процесі проведення технологічної операції не спостерігалось пошкоджень поверхні деталей, забезпечувалася висока якість обробки.

### Висновки.

1. Виконано експериментальні дослідження тривалості промерзання полімерних деталей, в результаті яких отримано залежності температури в різних точках деталей від тривалості їх охолодження.

2. Проведено експериментальні дослідження зачистки полімерних деталей в середовищі низьких температур з використанням планетарно-відцентрової машини з перпендикулярними осями обертання барабана і водила. Отримані дані пока-

зують, що тривалість обробки деталей знаходиться в межах 1–5 хв, а весь технологічний цикл становив 3–7 хв.

3. Отримані дані є вихідними при створенні технологічних процесів і обладнання для видалення облоя, ливників і задирок із деталей з полімерних матеріалів в середовищі низьких температур. Проведені експерименти показали ефективність процесів оздоблювально-зачищувальної обробки деталей з полімерних матеріалів в середовищі низьких температур.

### Список літератури:

1. Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., Малишев В.В. Аналітичне визначення часу виконання технологічної операції відділення металевих деталей замка «блискавка» від ливників. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2019. № 6 (140). С. 9–18.

2. Marigo M., Cairns D. L., Davies M., Ingram A., Stitt E.H. A numerical comparison of mixing efficiencies of solids in a cylindrical vessel subject to a range of motions. *Powder Technology*. 2012. No. 217. P. 540–547.

3. Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., Малишев В.В. Перспективні технології обробки деталей і змішування сипких речовин у рухомих робочих ємкостях (частина 2: типи обладнання з рухомими ємкостями). *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2020. № 3. Том 31 (70). С. 7–13.

4. Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., Малишев В.В. Експериментальне визначення енергії необхідної для відділення металевих деталей від ливників. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2019. № 5 (138). С. 17–26.

5. Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., Малишев В.В. Машини зі складним рухом робочих ємкостей для обробки полімерних деталей : монографія. Київ : Університет «Україна», 2018. 228 с.

6. Копин В.А., Макаров В.Л., Ростовцев А.М. Обработка изделий из пластмасс. Москва : Химия, 1988. 176 с.

7. Бурмістенков О.П. Виробництво литих деталей та виробів з полімерних матеріалів у взуттєвій та шкіргалантерейній промисловості. Хмельницький : ХНУ, 2007. 255 с.

8. Орлова М.П., Погорелова О.Ф., Улыбин С.А. Низкотемпературная термометрия. Москва : Энергоатомиздат, 1987. 280 с.

9. Бурмістенков О.П., Панасюк І.В., Ломака В.О. Планетарно-відцентрова установка для видалення ливників. *Легка промисловість*. 1989. № 4. С. 23.

### **Panasyuk I.V., Zalyubovskyi M.G. EXPERIMENTAL STUDY OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMER MATERIALS IN THE ENVIRONMENT OF LOW TEMPERATURES (PART 2: STUDY OF THE DURATION OF FREEZING AND TECHNOLOGICAL PROCESS OF TUMBLING)**

*Increasing the productivity of manufacturing parts from polymeric materials largely depends on reducing the time of preparatory and finishing operations. Up to 80% of the total technological time is spent on these operations. In light industry, some types of fittings, as well as polymer parts of shoes (heels, heels, heel inserts) are made by casting. As a rule, these parts require a very laborious finishing tumbling, during the execution of which the separation of the cast parts from their sprues is realized. Such processing is carried out using various tumbling equipment: machines with rotating drums, vibrating and rotary machines, machines with planetary or with complex spatial movement of working containers, and others. In addition, such processing is possible only if the polymer parts are brittle. The fragility of polymer parts is achieved by a significant decrease in their temperature by cooling in liquid nitrogen, which ensures their cooling to a temperature of -195.8° C. Impact on cooled parts leads to the destruction of their least durable elements – flash, sprues. For the possibility of successful application in industry of this method of processing parts, experimental studies of the freezing time of polymer parts were carried out, as well as experimental studies of cleaning of polymer parts in a low temperature environment using a planetary centrifugal machine with perpendicular axes of rotation of the drum and carrier. Knowledge of the main characteristics of polymer materials in a low-temperature environment allows you to create highly efficient technological processes and equipment for removing flash and sprues of molded parts. The research results can be used at the design stage of the corresponding technological processes for processing polymer parts.*

**Key words:** polymer, brittleness temperature, liquid nitrogen, working capacity, shock impact, freezing duration.

# АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

УДК 004.032.26:629.7.058.6 (045)

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/02>**Гобатюк Т.П.**

Національний авіаційний університет

## НЕЙРОМЕРЕЖЕВЕ КЕРУВАННЯ АВІАЦІЙНИМ ТРИФАЗНИМ ІНВЕРТОРОМ

За останні роки тенденція розвитку і вдосконалення електронних пристроїв із високою потужністю і частотою, а також передача високовольтного постійного струму посідають провідне місце у розвитку авіаційної енергетичної системи. Новий авіаційний інвертор із високим коефіцієнтом потужності та його цифрове забезпечення є наразі однією із пріоритетних напрямів дослідження. Одним із таких напрямів є вибір параметрів ПІД-регулятора. Це завдання є складним процесом, а конструкція інвертора виключає можливість здійснення функції самообертання в онлайн-режимі параметрів ПІД-регулятора.

У цій роботі розглянуто нейромережеве керування авіаційним трифазним інвертором, оскільки нині використання підходів на основі штучних нейронних мереж стрімко зростає у сфері силової електроніки і приводів. Окрім того, аналізується принцип ШІМ-випрямлення джерела напруги на основі традиційного SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation) та покращується алгоритм керування інвертором задля ефективного зменшення вмісту гармонік і забезпечення високого коефіцієнту потужності. До того ж алгоритм керування і схема перевіряються експериментально із використанням інструментів MATLAB / Simulink. Задля вимірювання коефіцієнту потужності інвертора нами використано лабораторний модуль системи для дослідження електричних параметрів літака і відповідного аналізу даних. Цей інвертор має такі параметри ПІД-регулятора, які можуть здійснювати функцію самоповороту в онлайн-режимі.

Результати експерименту свідчать про те, що трифазний ШІМ-випрямляч на основі керування нейронною мережею може зменшити гармонічні спотворення, а коефіцієнт потужності досягає максимальних показників. Ці результати допоможуть у подальшому проєктуванні авіаційного трифазного інвертора з високим коефіцієнтом потужності. Водночас, якщо порівняти звичайне ПІД-керування з удосконаленою нейронною мережею, керування нейронною мережею здійснюється в режимі онлайн-налаштування параметрів ПІД, зменшуючи пропорційний, інтегральний і диференціальний час коригування параметрів, що також покращує ефективність проєктування пристрою.

**Ключові слова:** нейромережеве керування, трифазний інвертор, моделювання, коефіцієнт потужності, ПІД-регулятор.

### Постановка проблеми.

Недостатній коефіцієнт потужності випрямленої напруги, гармонічне забруднення електроенергії створюють підґрунтя для дослідження нового типу інвертора і стратегії керування ним. Досліджується трифазне джерело напруги з ШІМ-випрямлячем, яке має стабільну вихідну напругу та одиниці коефіцієнта потужності. Методи керування постійним струмом мають переваги швидкого динамічного реагування. У трифазному джерелі напруги ШІМ-випрямляча сучасні методи керування переважно містять одноцикловий контроль [1], ШІМ-регулювання струму із фіксованою частотою перемикавання

[2], прогнозований струм керування [3-4], пряму потужність, метод контролю [5] тощо. Порівняно із традиційною синусоїдою модуляції (SPWM) трифазне джерело напруги випрямляча із векторним керуванням ШІМ (SVPWM) не тільки використовує напругу постійного струму і швидкі динамічні характеристики, але і схильне до легкої цифровізації, тому цей тип випрямляча глибоко вивчається.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Останні дослідження показують, що інкрементний ПІД-регулятор має простий і легкий для здійснення алгоритм, але керування параметрами налаштування ПІД-регулятора у режимі онлайн має певні труднощі. Отже, новий нейромережевий

ПІД-регулятор, який поєднує нейронну мережу і ПІД-контроль, можна одержати завдяки онлайн ПІД-налаштуванню параметрів контролера через Інтернет-навчання і таким чином досягти хорошого контрольного ефекту. У дослідженні [5], де розглядалося пряме керування потужністю [6] випрямляча на основі контролю SVPWM, перевірено доцільність та ефективність схеми керування. Інкрементний алгоритм ПІД вивчено також у роботі [7], де результати моделювання показали, що цей контролер має високу точність керування порівняно із традиційним ПІД-регулятором, тоді як нейронна схема ПІД-контролера мережі за допомогою DSP вже була реалізована і досягла хороших результатів [9].

**Постановка завдання.**

Принципова схема трифазного випрямляча джерела напруги на основі керування SVPWM показана на рис. 1. Він працює за допомогою теорії опорних кадрів, яка передає трифазну статичну систему координат у двофазну обертову систему координат. Тоді за допомогою алгоритму керування космічним вектором можна генерувати шість ШІМ-сигналів керування, що дозволяє досягти точного керування вимикачем. Отже, випрямляч отримує потрібну постійну напругу. Двоконтурна система керування системою керування містить одну зовнішню петлю напруги і два внутрішні контури струму. Шлейф напруги переважно використовується для керування вихідною напругою постійного струму трифазного реле-VSR. Основною функцією контуру струму є регулювання струму.

Випрямляч, заснований на традиційному алгоритмі керування SVPWM та використовує

ПІД-регулювання, простий і легкий у роботі, але параметри керування ПІД-регулятором не здатні здійснювати функцію самообертання у режимі онлайн та отримати задовільні результати, тому він потребує доопрацювання і покращення.

**Виклад основного матеріалу.**

Традиційний ПІД-регулятор відноситься до реалізації виходу цифрового контролера для керування поступовим  $\Delta u(k)$ . Коли виконавчим установам потрібен поступовий контроль, ми маємо використовувати інкрементний ПІД-контроль. Відповідно до посилань на ПІД-регулювання ми знаємо, що формула ПІД-регулятора виглядає так:

$$u(k-1) = K_p e(k-1) + K_I \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + K_D [e(k-1) - e(k-2)],$$

де,  $K_p$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  – пропорційний коефіцієнт, інтегральний коефіцієнт і диференціальний коефіцієнт відповідно;  $e(j)$  – значення вхідного відхилення  $j$ -ї вибірки;  $u(k-1)$  – це вихід  $(k-1)$ -ї вибірки. Інкрементальний алгоритм ПІД-регулювання відповідно виглядає так:

$$\Delta u(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) + K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]$$

У традиційному поступовому ПІД-регуляторі  $K_p$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  – три параметри, які важко регулювати. Це, у свою чергу, збільшує складність проектування системи. Однак нейрони мають характеристики самонавчання, адаптаційної здатності і простоти обчислення, тому вдосконалений алгоритм інкрементного ПІД-контролю нейронної мережі може здійснюватися налаштуванням параметрів у режимі онлайн, що може ефективно вирішити проблему на відміну від традиційного налаштування параметрів ПІД-регулятора.

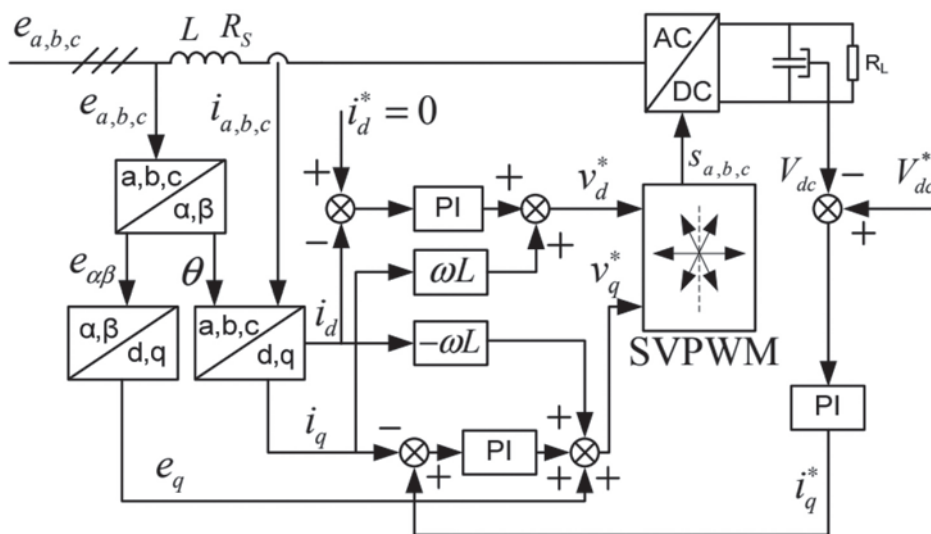


Рис. 1. Принципова схема трифазного реле-VSR

Вхід нейронів можна визначити так:

$$\begin{cases} x_1(k) = e(k) - e(k-1) + \Delta e(k) \\ x_2(k) = e(k) \\ x_3(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \end{cases}$$

Відповідна функція з одним виходом:

$$u(k) = u(k-1) + \omega_1 x_1(k) + \omega_2 x_2(k) + \omega_3 x_3(k),$$

де  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  - вагові коефіцієнти, що відповідають  $x_i(k)$  ( $i = 1, 2, 3$ ). Наведені вище три параметри із використанням контрольованих правил навчання та алгоритму навчання визначаються так:

$$\begin{cases} \omega_1(k) = \omega_1(k-1) + \eta_p e(k-1) u(k-1) x_1(k-1) \\ \omega_2(k) = \omega_2(k-1) + \eta_I e(k-1) u(k-1) x_2(k-1) \\ \omega_3(k) = \omega_3(k-1) + \eta_D e(k-1) u(k-1) x_3(k-1) \end{cases}$$

де  $\eta_p, \eta_I, \eta_D$  використовують три види швидкості навчання. Отже, інкрементний ПІД-контроль нейронної мережі може досить просто реалізуватися налаштуванням параметрів вагових коефіцієнтів. Тоді ми зможемо зменшити труднощі вибору пропорційного, інтегрального і диференціального коефіцієнтів та покращити ефективність системи проектування загалом.

Розглянемо будову принципової схеми трифазного ШІМ-випрямляча джерела напруги на основі ПІД-регулювання нейронної мережі (рис. 2). Інвертором управляють переважно за допомогою

шести вмикачів та вимикачів. За умов традиційного керування SVPWM вимикач живлення верхнього моста VSR має перемикатися 6 разів за один період перемикання, що призводить до більших втрат під час перемикання. Задля зменшення частоти перемикання і втрат перемикача у цій роботі використано п'ять елементів керування SVPWM [8]. Тому під час перемикання вимикач живлення верхнього мосту VSR слід перемикати лише 4 рази. Гармоніка переважно є цілим числом, кратним частоті перемикання через симетрію форми хвилі функції перемикання. В інверторі керування SVPWM використовується двоконтурна структура керування. Зовнішня петля напруги переважно використовується для керування вихідною напругою трифазного випрямляча. Внутрішній контур струму використовується для керування струмом відповідно до інструкції струму ПІД-регулятора зовнішньої петлі.

Схема керування представлена на рис. 2. ПІД-регулятор трьох петель використовує ПІД-контроль нейронної мережі, що є корисним для навчання і процесу реалізації ПІД-параметрів задля отримання бажаного ефекту керування. Показано, що трифазний струм передається від С і Р для отримання двофазного струму  $d$  і  $q$  в обертовій рамі. Сигнал про помилку напруги через

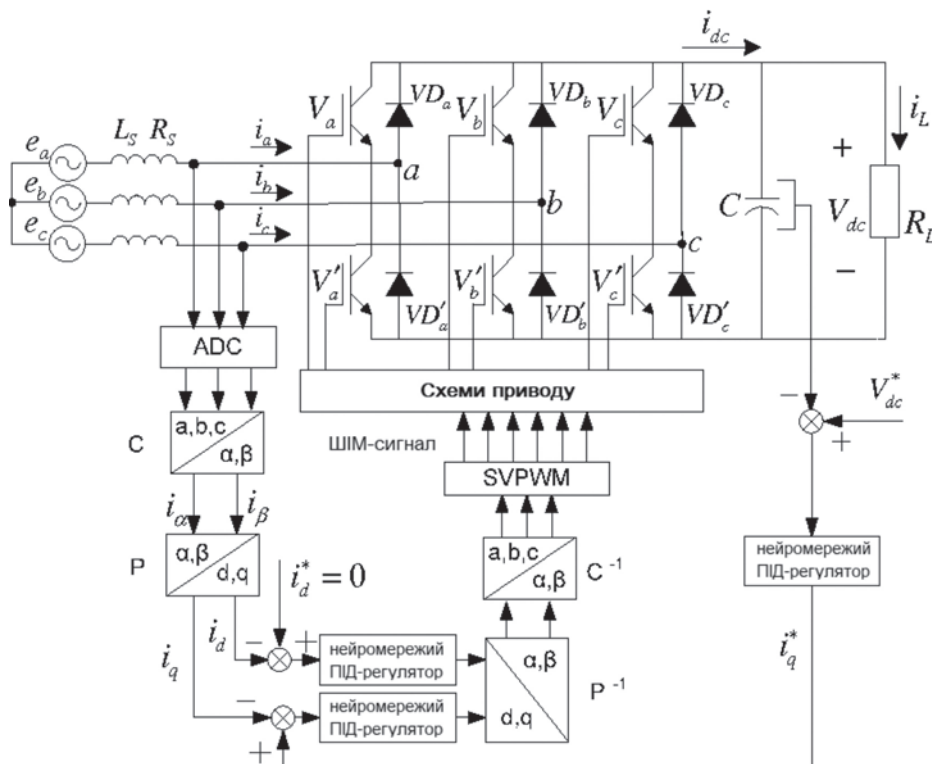


Рис. 2. Принципова схема трифазного VSR на основі ПІД-контролю нейронної мережі

ПІД-контролер нейронної мережі може отримати значення команди активного струму, одночасно значення команди реактивного струму встановлено на нуль. Потім команда подачі напруги трифазного випрямляча отримується шляхом роз'єднання. Нарешті, сигнал керування трифазним випрямлячем отримується за алгоритмом SVPWM, а потім реалізується керування вимикачем випрямляча.

У цій роботі було використано алгоритм ПІД-контрольної нейронної мережі [6]. Здійснення алгоритму таке:

1) параметр ініціалізації ( $k = 2$ ), такий як  $\eta_p$ ,  $\eta_I$ ,  $\eta_D$  та коефіцієнт інерції;

2) отримуємо значення  $r(k)$  та  $y(k)$  та обчислюємо відхилення:

$$e(k) = r(k) - y(k) \text{ та } \Delta e(k);$$

3) обчислюємо  $x_1(k), x_2(k), x_3(k)$  як вхідний сигнал нейронної мережі;

4) обчислюємо вхід і вихід нейронної мережі, а потім визначаємо вихідні параметри вихідного шару як  $K_p, K_I, K_D$ ;

5) обчислюємо вихід контролера  $\Delta u(k) + U(k)$ ;

6) встановлюємо ліміт на вихідне значення;

7) налаштовуємо вагові коефіцієнти за допомогою навчання нейронної мережі;

8) визначаємо  $k = k + 1$  і повертаємося до кроку (2).

Отже, можна отримати значення  $x_1(k), x_2(k), x_3(k)$  і вони є входами нейронної мережі. Три вихідних параметри відповідно трьом вихідним параметрам ПІД-регулятора реалізують онлайн налаштування.

Під час проектування трифазного випрямляча джерела напруги цифровий процесор сигналу, що використовується: TMS320F2812, - це основна частина всієї системи керування, що застосовується переважно для завершення процедур розрахунку і виведення його результату. Під час розрахунку налаштування ПІД-регулятора є складними; контур напруги і струмовий контур використовують налаштування параметрів ПІД-регулятора нейронної мережі.

Ми використаємо вдосконалений алгоритм для отримання результатів після відповідного перетворення на підпрограму SVPWM. Підпрограма SVPWM [13] є важливою частиною програмного забезпечення; діаграма програми представлена на рис. 3.

Ця підпрограма спочатку відповідно до даних  $u_a$  та  $u_b$  потрібна для визначення опорного вектора напруги  $V^*$  розташованих секторів, потім - для обчислення  $X, Y, Z$ ; потім - відповідно до вектора опорної напруги  $V^*$  і розташованих секторів до визначених  $T_1$  і  $T_2$ . Надалі потрібно зробити висновок щодо наявності надмірної модуляції. Якщо вона існує, нові  $T_1$  і  $T_2$  слід обчислити відповідно до такого рівняння:

$$\begin{cases} T_1 = \frac{T_1}{T_1 + T_2} \\ T_2 = \frac{T_2}{T_1 + T_2} \end{cases}$$

Нарешті визначаємо точки перемикання вектора і виробляємо вихідні сигнали ШІМ-хвилі.

Із метою перевірки доцільності і правильності алгоритму керування розробляють прототип і проводять відповідні експерименти. Для прототипу частина апаратного забезпечення містить

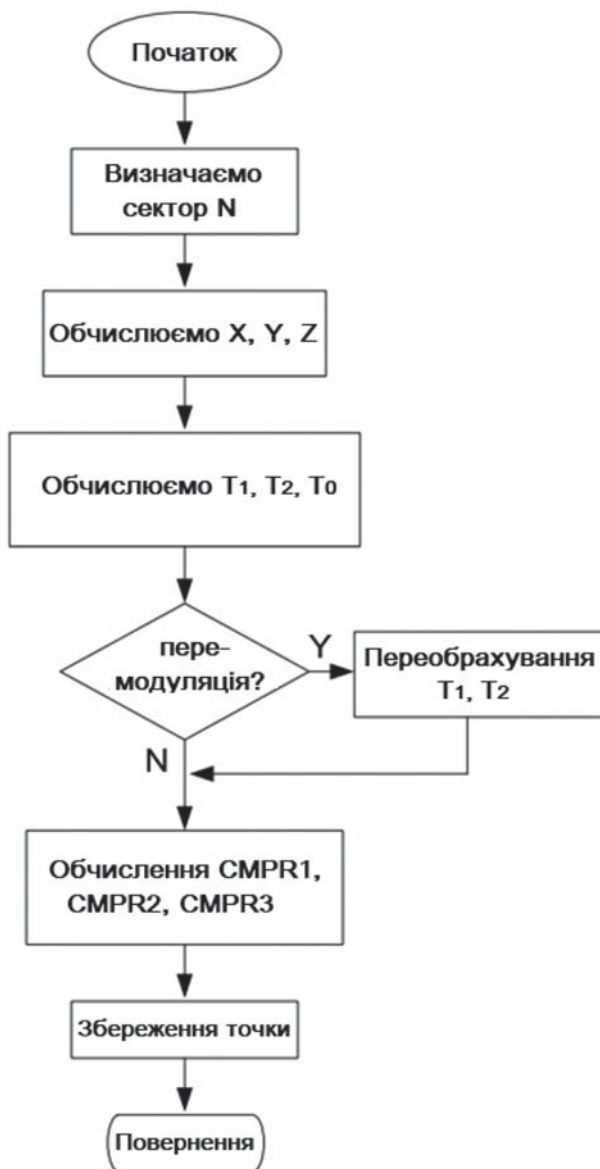


Рис. 3. Блок-схема алгоритму SVPWM



основну схему і схему керування, цифровий процесор сигналу типу TMS320F2812. Індуктивність чистої сторони розрахована відповідно до вимог вихідної потужності та обраного значення трифазної індуктивності 4 мГн. Значення конденсатора постійного струму становить 2200 мкФ; програмне забезпечення містить основну програму, підпрограму обслуговування переривань тощо. Відповідно до проектних вимог вихідна потужність становить 3 кВт, трифазна вхідна потужність - 115 В/400 Гц, частота перемикавання - 5 кГц, вихідна напруга постійного струму - 350 В. Перевірка вхідної напруги фази С на стороні мережі подібна до струму вхідної форми сигналу фази С, як показано на рис. 4. На рис. 6 представлено навантаження вихідної напруги постійного струму за стабільності її на рівні приблизно

350 В. За даними рис. 5, вхідна напруга фази С – це переважно та ж сама фаза, що і вхідний струм.

Для вимірювання значення загального вмісту гармонік випрямляча і коефіцієнта потужності його конструкції ми використовуємо наявний лабораторний модуль системи випробування електричних параметрів літака для відповідного аналізу даних. Запустивши модуль аналізу гармонік і модуль аналізу коефіцієнта потужності системи та проаналізувавши зібрані результати, ми досягли загального вмісту гармонік струму фази С 5,23%, а також основної частоти 400,01 Гц та випрямляча коефіцієнта потужності 0,991, як це показано на рис. 7. Коли ми використовували традиційний ПІД-регулятор на тому ж експериментальному прототипі, то досягли загального вмісту гармонік фази струму С 7,84 % із коефіцієнтом потужності 0,963.

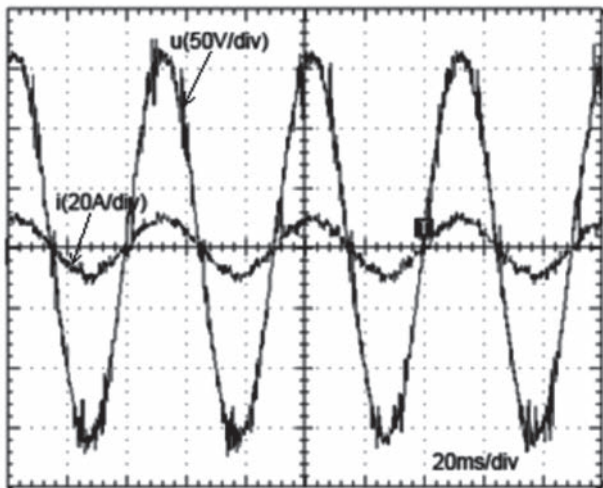


Рис. 4. Форми хвиль напруги і струму фази С

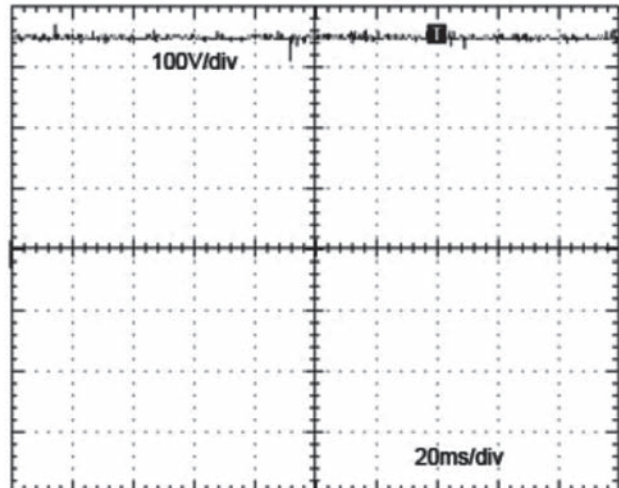


Рис. 5. Форми хвиль напруги на стороні постійного струму

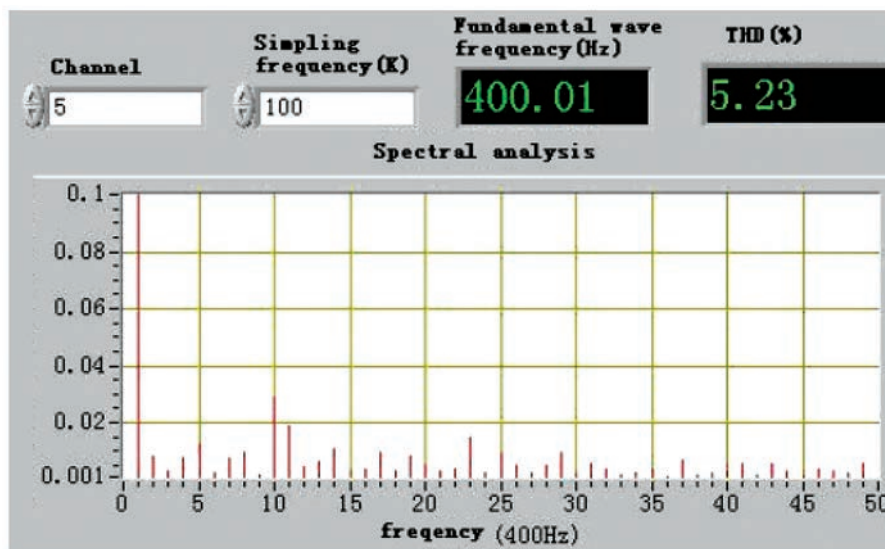


Рис. 6. Спектр гармонік струму

## 5. Висновки.

Методика, представлена у цій роботі з використанням нейронної мережі для поліпшення налаштування параметрів ПІД-регулювання, дозволяє налаштувати параметри ПІД-регулювання у режимі онлайн. Завдяки експерименту ми знаємо, що трифазне джерело напруги інвертора хвилі

випрямляча і хвилі струму, що використовується у нейронній мережі, є базовою однією фазою і може досягти єдності коефіцієнта потужності.

Легко помітити, що вдосконалення алгоритму керування інвертором може ефективно зменшити вміст гармонік і досягти високого коефіцієнту потужності.

## Список літератури:

1. Wu R., Dewan S. B., Slemmon G. R. A PWM AC-to-DC Converter with fixed switching frequency. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1990. Vol. 26, Issue 5.
2. Rodriguez J., Pontt J., Silva C.A., Correa P., Lezana P., Cortes P., Ammann U. Predictive current control of a voltage source inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2007. Vol. 54, Issue 1. P. 495-503.
3. Fang Yu, Qiu Xun, Xing Yan, Hu Yuwen. Research on three-phase high power factor correction based on predictive digital current controller. *Proceedings of the CSEE*. 2006. Vol. 26, Issue 20. P. 69-73.
4. Rusheng J., Chen Biaoxian C., Chen Yan. A novel PWM rectifier. *Transactions of China Electrotechnical Society*. 2002. Vol. 17, Issue 6. P.48-52.
5. Wang Jiuhe, Li Huade, Wang Liming. Direct power control system of three phase boost type PWM rectifiers, *Proceedings of the CSEE*. 2006. Vol. 26, Issue 18. P. 54-60.
6. Wang Junqin. Research on incremental PID algorithm and simulation based on neural network. *Modern Electronics Technique*. 2010. Vol. 18. P. 121-123.
7. Chang L. Design of BP neural network PID controllers based on DSP. *Computer Engineering & Science*. 2011. Vol. 33, Issue 4. P. 154-158.
8. Zhang Chun, Han Ruihua, Jiang Ming. Research on simplifier algorithm of the three-phase voltage rectifier with SVPWM. *Mechanical & Electrical Magazine*. 2006. Vol. 23, Issue 10. P. 39-41.
9. Yang H. Modeling, analysis and design of feedback operational amplifier for undergraduate studies in electrical engineering. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*. 2012. Vol. 10, Issue 8. P. 2295-2303.
10. Савёлов А.А., Сапожникова Е.Ж. Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Системы электроснабжения воздушных судов». Москва: МИИГА, 1992. 234 с.

## Hobatiuk T.P. NEURAL NETWORK CONTROL OF AVIATION THREE-PHASE INVERTER

*In recent years, the trend of development and improvement of electronic devices with high power and frequency, the transmission of high-voltage direct current has led to the development of the aviation energy system. The new aircraft power inverter with a high power factor and its digital implementation is currently one of the priority branches of the study. One of such directions is a choice of parameters of the PID regulator. This task is in itself a complex process, and the design of the inverter eliminates the possibility of implementing the function of self-rotation in the online mode of the parameters of the PID controller.*

*In this paper, the neural network control of an aviation three-phase inverter is considered, as today the use of approaches based on artificial neural networks is growing rapidly in the field of power electronics and drives. The principle of PWM rectification of a voltage source based on traditional SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation) is also analyzed and the inverter control algorithm is improved in order to effectively reduce the content of harmonics and provide a high power factor. In addition, the control algorithm and circuit are tested experimentally using MATLAB / Simulink tools. In order to measure and determine the power factor of the inverter, we use the laboratory module of the system to study the electrical parameters of the aircraft and to analyze the data. The considered inverter has such parameters of the PID regulator which can implement the function of self-rotation in the online mode.*

*The results of the experiment show that a three-phase PWM rectifier based on neural network control can reduce harmonic distortion, and the power factor reaches its maximum. These data will help in the future design of a three-phase aircraft inverter with a high power factor. At the same time, when comparing conventional PID control with an advanced neural network, neural network control is implemented in the online setting of PID parameters, reducing the proportional, integral, and differential adjustment time, which also improves the efficiency of the device design.*

**Key words:** neural network control, three-phase inverter, simulation, power factor, PID controller.

# КОРАБЛЕБУДУВАННЯ

УДК 524.8.06765765

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/03>**Коваленко І.В.**

Азовський морський інститут Національного університету «Одеська морська академія»

## ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ НАДІЙНОСТІ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВИХ ВІСЕЙ ТА ВАЛІВ МЕТОДОМ БАНДАЖУВАННЯ

*Під час розвитку сучасних умов кораблебудування та виконання ремонту суднових агрегатів особливу роль приділяють використанню основних елементів конструкцій, які складаються з технологічних частин. Під час виконання цих кроків важливо зробити аналіз властивостей матеріалів, з яких виготовляються технологічні складові частини вузлів суднового обладнання. Проведення випробувань повинне бути наближене до умов експлуатації суднових вісей і валів, а саме до циклічного навантаження, агресивного й адгезійного середовища.*

*Тому особливим фактором є технологічний контроль за послідовністю виготовлення, підбором матеріалів, технологією наплавки. Усі названі вимоги можливо проаналізувати й спрогнозувати за допомогою комп'ютерного модулювання. Дослідження властивостей перехідних шарів шва й основного металу та їх вплив на кількість циклів навантаження під час випробувань також є ключовими. Усі умови будуть виконані за оптимального підбору хімічної складової частини Ni – Cr, яка забезпечує необхідний рівень легування. Твердість матеріалів визначається наявністю частки Mg у складі металу. Також важливі режими термообробки, які зумовлюють отримання необхідної кінцевої структури матеріалу для механічної обробки й наплавки. Для такої деталі та її елементів найкращі властивості з боку експлуатації – в дрібнодисперсній аустенітній і перлітній структурі.*

*Під час експлуатації суднових валів і вісей виконується розповсюдження прокольних навантажень шляхом виникнення остаточних напруг за малоциклових і багатоциклових навантажень і подальшої втоми структурної решітки.*

*Під час розгляду номенклатури матеріалів, використовуваних у комбінованих конструкціях, їх кількість дуже велика й містить більшість зварюваних сталей. За поєднанням матеріалів в одному вузлі доцільно виділити дві основні групи конструкцій: зі зварними з'єднаннями сталей одного структурного класу, але різного легування, та зі зварними з'єднаннями сталей різних структурних класів. У зв'язку із цим рішення з отримання збалансованого бандажного з'єднання лежить в отриманні мілко зернистої структури металу шва й наволошовної зони.*

**Ключові слова:** бандаж, напруження матеріалу, суднове обладнання, перехідний шар, структура металу, судновий насос.

**Постановка проблеми.** За широкого спектру даних про технологічне забезпечення необхідно виконати обґрунтування застосування технології бандажування як методу підвищення службових характеристик і технологічності виготовлення деталей та обладнання суднових енергетичних установок. Дуже важливо надати оцінку факторів, що впливають на ефективність і надійність фіксації бандажа на осі в процесі експлуатації виробу, та проаналізувати способи виготовлення бандажованих виробів.

У зв'язку з інтенсифікацією виробництва, з появою суднових механізмів та енергетичних систем великої маси і ваги виникає необхідність у виготовленні складових елементів такого обладнання. Складові елементи, по-перше, дозволяють

збільшити масогабаритні показники обладнання. По-друге, виникає питання про можливість забезпечення регламентованого розподілу властивостей між елементами – віссю та бандажем.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Широке застосування в промисловості знайшла технологія бандажування [1]. Однією з областей застосування складеного інструменту є суднове обладнання. У зв'язку з тенденцією збільшення ширини валів та вісей потрібно застосування необхідних початкових деталей із довжиною 3–5 метрів і масою до 25 тонн. Виготовити якісні валок чи вісь суднового обладнання такої маси з одного зливка практично неможливо. Тому очевидно виробництво таких виробів

в складеному варіанті, коли вісь та бандаж виготовляються із злитків меншого розважування, а отже, більш якісних [2].

Складові вироби з регламентованими параметрами посадки можуть бути широко використані при виготовленні запобіжних пристроїв для важко навантажених судових вузлів і механізмів, що запобігають поломкам агрегатів при перевищенні експлуатаційних навантажень і в аварійних ситуаціях [3].

Застосування литих бандажів з заевтектоїдних марок сталей і кованих вісей веде до підвищення стійкості прокатних валків в три рази в порівнянні з цільнокованими валками [4].

Експлуатація бандажованих вісей додатково дозволяє багаторазово використовувати вісь, змінюючи зношені бандажі. У такому випадку в балансі витрати металу бере участь в основному тільки матеріал бандажу [5].

Застосування зварювальних технологій при виготовленні бандажованого судового обладнання дозволить різко знизити трудомісткість формування складених механічних елементів, значно зменшити енергетичні витрати, підвищити надійність фіксації бандажа на вісі [6]. У зв'язку з цим вдосконалення технології виготовлення складових судових деталей є актуальною науковою задачею. Наведена інформація вимагає додаткового аналізу та дослідженню.

**Постановка завдання.** Мета статті:

– обґрунтувати розробку технології виготовлення складових судових вузлів, заснованої на виникненні зварювальних напруг і деформацій при впливі локального джерела тепла, наприклад, зварювальної дуги;

– виконати дослідження напружено - деформованого стану елементів складових конструкцій і оцінки ефективності запропонованої технології.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

Номенклатура виробів судового обладнання має широкий спектр. Найбільше розповсюдження отримали вироби з механічним з'єднанням або термічним з'єднанням за рахунок натягу.

Основними методами фіксації бандажа на вісі є:

- механічні, замкові з'єднання;
- адгезійні з'єднання гальванічні покриття ;
- термічні з гарантованим натягом

Особливо важливо провести оцінку ефективності та надійності фіксації бандажа на осі. У процесі експлуатації можливе зниження надійності кріплення шляхом впливу різних чинників: різна жорсткість сполучених деталей; вплив згинаючих навантажень і крутного моменту; наявність вологи і окислення і, як наслідок, корозія [7].

Механічні методи фіксації не завжди можливі. В основному вони можуть бути застосовані для деталей, в яких необхідна часта зміна бандажа, наприклад, для прокатних валків сортопрокатних станів. А для деталей, що працюють в умовах великих навантажень, найчастіше застосовуються саме нероз'ємні види з'єднань шляхом термічної фіксації бандажа на осі, тобто з гарантованим натягом [8].

Посадка бандажа на вісь із забезпеченням гарантованого натягу також пов'язана з рядом складнощів [9]. Тому необхідно забезпечити високу точність виготовлення сполучених елементів. По-друге, необхідно забезпечити постійну величину натягу по всій довжині за рахунок виконання рівномірного нагріву і подальшого рівномірного охолодження деталей. Відхилення величини натягу від регламентованого рівня може призвести або до сповзання бандажа з осі, або до його руйнування. Також, для забезпечення нагріву великотоннажних виробів необхідні великі енергетичні витрати, які виникають при виготовленні циліндричних виробів, дослідження деформацій і напружень, що виникають в циліндричних виробах при впливі локальним джерелом нагрівання [10].

Для вимірювання залишкових напружень і деформацій проведені дослідження на моделях у вигляді кілець у вільному стані, а також посаджених на вісь з натягом (рис. 1).

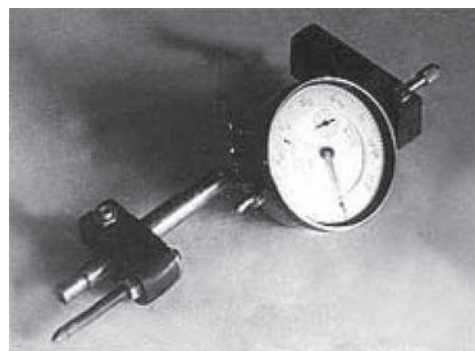


Рис. 1. Індикатор для вимірювання усадки наплавлених зразків

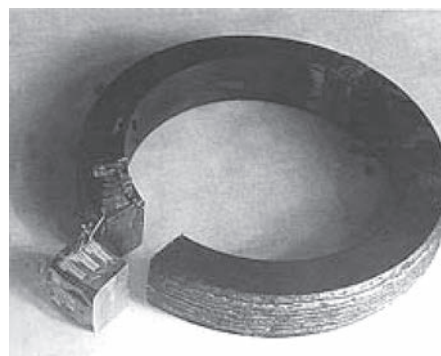
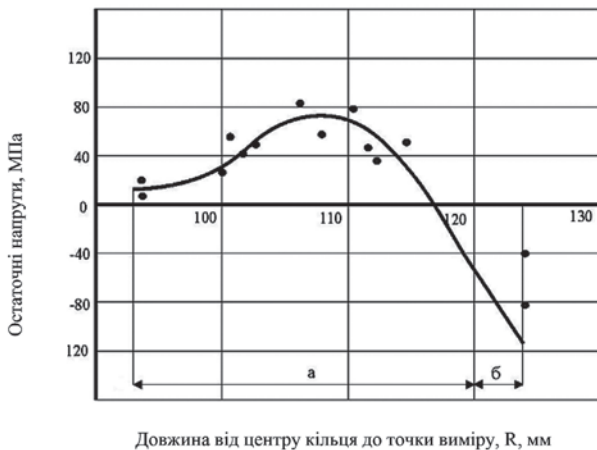


Рис. 2. Наплавлене кільце судового відцентрового насосу з тензодатчиками після вирізки

Визначення залишкових деформацій і напружень виконувалося наступним чином. Виконувався ряд експериментів та проводилися вимірювання характеру зміни внутрішнього діаметра за допомогою індикатора (рис. 1), а залишкових напруг із застосуванням методу тензометрування (рис. 2) [11]. Результати вимірювань тангенціальних залишкових зварювальних напружень у кільці показали, що в наплавленому шарі сформувалися стискаючі залишкові напруги, які врівноважено розповсюджують напруги у тілі кільця (рис. 3).



**Рис. 3.** Епюри залишкових напруг після наплавлення циліндричного зразка: а – товщина кільця; б – товщина наплавленого металу

Наявність стискаючих напруг призводить до виникнення деформацій і усадки. Використову-

ючи ефект усадки, а також деякі конструктивні елементи поверхні бандажу і вісі можна надійно закріпити бандаж на поверхні вісі.

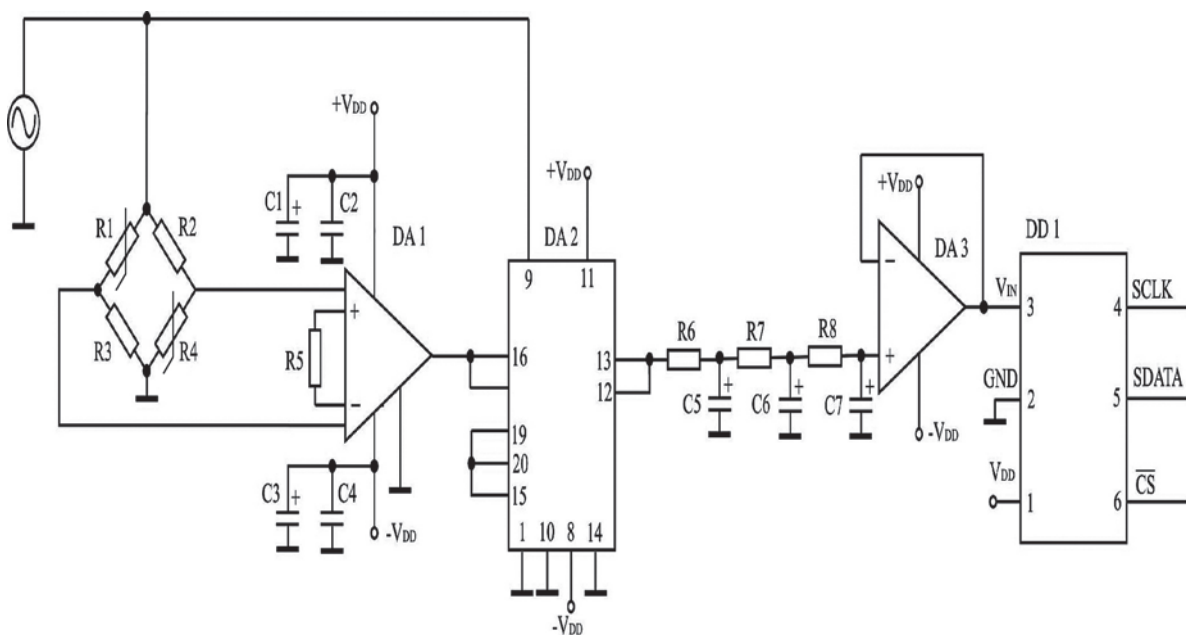
Для вимірювання величини залишкових напруг за допомогою тензометричних перетворювачів і наступної цифрової обробки сигналу розроблений модуль інтерфейсу, принципова схема якого наведена на рис. 4.

В основі дії пристрою лежить принцип мікросхематичного керування. Сигнал з тензометричного моста R1–R4 подається на диференційний вхід інструментального підсилювача DA1. Після обробки здійснюється демодуляція мікросхемою DA2 з подальшою фільтрацією низькочастотним фільтром R6C5, R7C6, R8C7. Далі сигнал через повторювач DA3 надходить на вхід послідовного 12-ти розрядного аналого-цифрового перетворювача DD1.

З виходу SDATA DD1 отриманий цифровий код передається в мікропроцесорний модуль по стандартному послідовному інтерфейсу RS232 (рис. 5) для подальшого аналізу і обробки із застосуванням математичного моделювання.

Така схема вимірювання деформацій та напружень, дозволяє отримати вихідні данні із дуже високим рівнем точності, яка на декількох рівнях вища ніж дані отримані від тензодатчиків спротиву [12].

У рамках досліджень для оцінки надійності бандажованих деталей судових механічних установок в умовах реальних робочих навантажень розроблена методика із застосуванням модернізованої випробувальної установки на контактну витривалість рис. 6.



**Рис. 4.** Принципова схема модуля інтерфейсу

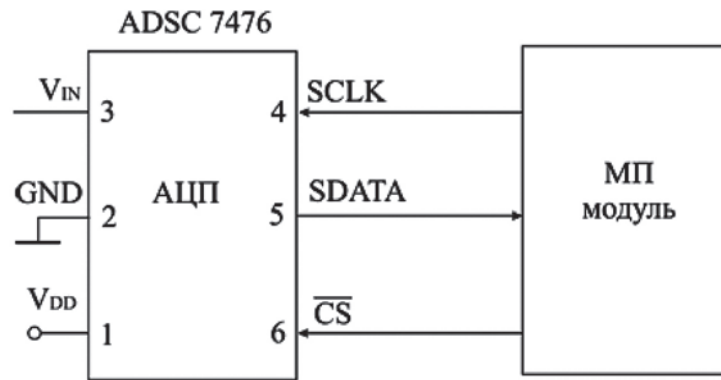


Рис. 5. Схема підключення модуля інтерфейсу

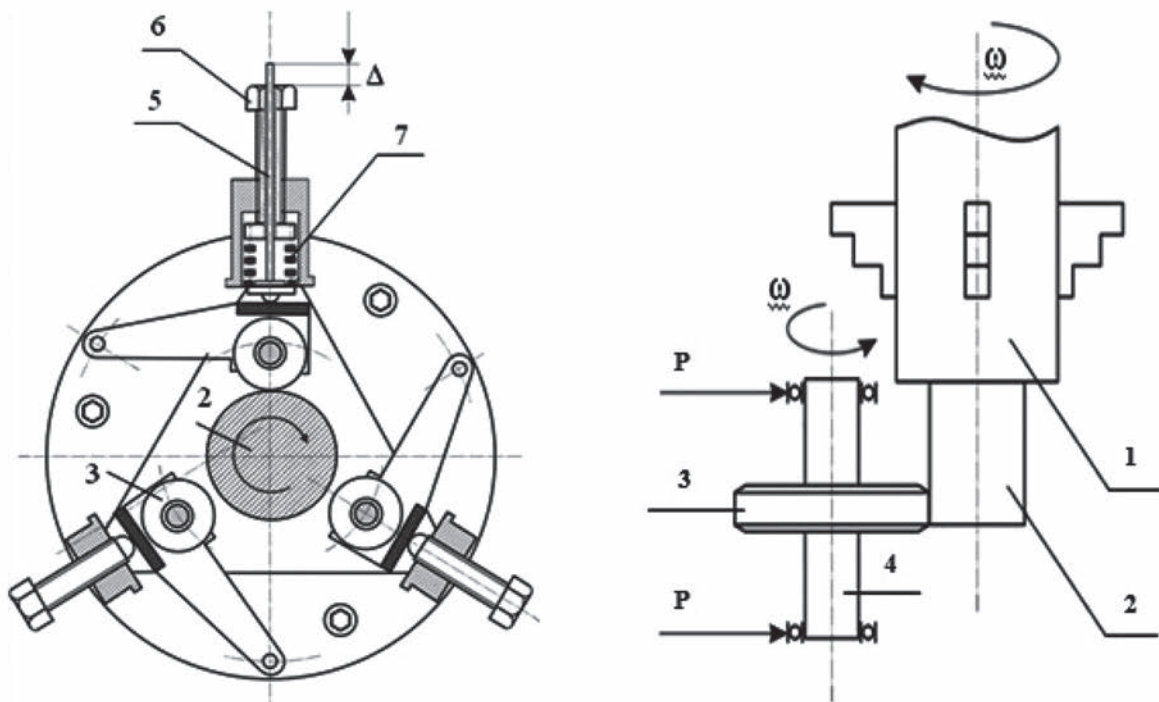


Рис. 6. Схема випробувальної установки: 1 – патрон; 2 – випробуваний зразок; 3 – натискний ролик; 4 – вісь ролика; 5 – штифт; 6 – гвинт навантаження; 7 – пружина

Випробування виконувались таким чином, що в процесі обертання робочого вала двигуна натяжний ролик 3 (рис. 5) натискає із зусиллям  $P$  на консольну частину зразка 2, завдяки чому останній відчуває изгибаючи навантаження, що імітують роботу реального виробу [13]. Швидкість обертання двигуна складає 2820 об / хв. Загальна кількість циклів навантаження 11 106 одиниць.

Для чисельного моделювання напружено-деформованого стану деталей складових конструкцій при впливі локального джерела нагріву розроблена методика із застосуванням багатofункціональної системи кінцево-елементних розрахунків ANSYS, яка складається з декількох етапів: розробка геометричної моделі деталі, вибір

типу вузлів, побудова кінцево-елементної схеми і підготовка вихідних даних; виконання розрахунку; обробка результатів розрахунку.

Отримання результатів вимірювань відбувається після кожного блоку циклів навантаження на спеціалізований електронний блок.

Отримані результати дозволяють отримати масив числових значень які дозволяють прогнозувати подальший стан деталей виготовляємих методом бандажування.

#### Висновки.

1. У ході дослідження виконали обґрунтування розробки технології виготовлення складових суднових вузлів, у основі технології знаходиться метод зварювання із застосуванням інверторного

цифрового контролю впливу дуги на проплавлення основного металу.

2. Виконано дослідження напружено – деформованого стану елементів складових конструкцій та означена міра ефективності запропонованої

технології виготовлення суднових та енергетичних вузлів.

3. Удосконалена конструкція випробувальної установки, та за рахунок цього вдалося визначитися з тривалістю руйнування зразка у інтервалі 10000-15000 циклів.

#### Список літератури:

1. Chigarev V.V., Belik A.G. Flux-cored strips for surfacing. *Welding International*. 2012. V. 26. P. 975–979.
2. Фока А.А. Судовой механик. Одесса : Феникс, 2010. Т. 1. 1030 с.
3. Kovalenko I., Spiridonov V. Operation reliability evolution of the ship power pipelines with application of mathematical modeling and ultrasonic testing methods. *The scientific heritage*. 2016. V. 6. P. 88–91.
4. Chigarev V.V., Belik A.G., Zarechenskii D.A. Optimization of the fractional composition and performance melting powder tapes with exothermic mixture in the filler. *Welding International*. 2016. V. 30. № 7. P. 557–559.
5. Чигарев В.В., Коваленко И.В. Способ увеличения срока службы металлургического оборудования. *Вестник ПГТУ*. 2010. № 20. С. 231.
6. Чигарев В.В., Коваленко И.В. Исследование эксплуатационных свойств биметаллических сварных соединений. *Вестник ПГТУ*. 2011. № 22. С. 161.
7. Готальский Ю.Н. Сварные соединения разнородных сталей. Москва : Техника, 1981. 185 с.
8. Перспективы производства толстостенных биметаллических корпусов высокого давления / Б.Е. Патон, А.Д. Чепурной, В.Я. Саенко и др. *Автомат. сварка*. 2004. № 1. С. 30.
9. Махненко В.И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. Киев: Наукова думка, 2006. 618 с.
10. Essa Ahmad Mohammad, Chigarev W.W., Belik A.G. Application of flux-cored strips for ruggedization and reconditioning of machine parts. *Modern Developments in Renewable Energy and Sustainability*. Kuala Lumpur, Malaysia, 2008. P. 110.
11. Стафаков Ю.П., Побаль И.Л., Князева А.Г. Рост трещин вблизи границы раздела разнородных материалов в условиях сжатия. *Физ. мезомеханика*. 2002. № 1. С. 81.
12. Харин В.М. Судовые машинные установки устройства и системы. Одесса : Феникс, 2010. 648 с.
13. Muller E. Geschweisste Turbinenlaufer. *BBC. Nachr. Shweissenund Schneiden*. 1995. V. 47. № 6. S. 277.

#### Kovalenko I.V. IMPROVING THE LEVEL OF RELIABILITY IN THE OPERATION OF SHIP AXLES AND SHAFTS BY THE BANDING METHOD

*In the development of modern shipbuilding conditions and the repair of ship units, a special role is given to the use of basic structural elements consisting of technological parts. When performing these steps, it is important to analyze the properties of the materials from which the technological components of ship equipment are made. Testing should be close to the operating conditions of ship axles and shafts, namely cyclic loading, aggressive and adhesive environment.*

*Therefore, a special factor is the technological control over the sequence of manufacture, selection of materials, surfacing technology. All these requirements can be analyzed and predicted using computer modulation. Investigations of the properties of the transition layers of the weld and the base metal and their effect on the number of load cycles in the tests are also key. All conditions will be met with the optimal selection of the chemical component Ni – Cr, which provide the required level of doping. The hardness of the materials is ensured by the presence of Mg in the metal. Also important are the heat treatment modes that provide the desired final structure of the material for machining and surfacing. For this part and its elements, the best properties in terms of operation in fine austenitic and pearlitic structures.*

*During the operation of ship shafts and axles, the propagation of puncture loads is performed due to the occurrence of final stresses at low-cycle and multi-cycle loads and subsequent fatigue of the structural lattice.*

*When considering the range of materials used in combined structures is very large and includes most welded steels. According to the combination of materials in one unit, it is advisable to distinguish two main groups of structures: with welded joints of steels of the same structural class, but different alloying, and with welded joints of steels of different structural classes. In this regard, the decision to obtain a balanced bandage connection lies in obtaining a fine-grained structure of the weld metal and the seam area.*

**Key words:** bandage, material stress, ship equipment, transition layer, metal structure, ship pump.

## ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.313.33

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/04>

**Кривонос В.Є.**

Азовський морський інститут  
Національного університету «Одеська морська академія»

**Василенко С.В.**

Азовський морський інститут  
Національного університету «Одеська морська академія»

**Скосирев В.Г.**

Приазовський державний технічний університет

### ОЦІНКА ВПЛИВУ КЛАСІВ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ЗАСОБІВ ПІД ЧАС ВИЯВЛЕННЯ ПОЧАТКОВОГО МОМЕНТУ ВИТКОВОГО ЗАМИКАННЯ В ОБМОТЦІ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

*Виявлення виткового замикання в обмотці статора асинхронного двигуна на ранній стадії (до 10% замкнутих витків) його появи є дефектом, який важко діагностується. Існуючі методи діагностування виткових замикань (вібродіагностика, метод спектрального аналізу споживаного струму, метод визначення спотворення магнітного поля в повітряному зазорі) володіють необхідною чутливістю та достовірністю під час діагностики двигунів потужністю понад 25 кВт, а для двигунів потужністю до 15 кВт дозволяють виявляти замикання понад 30% витків. У роботі [3] запропонований спосіб виявлення виткового замикання на ранній стадії для асинхронних двигунів потужністю до 15 кВт. На чутливість і достовірність запропонованого способу впливає вибір класу точності вимірювальних приладів. У дослідженні розглянуто вплив класу точності вимірювальних приладів на достовірність і чутливість виявлення початкового моменту виникнення виткового замикання в обмотці статора асинхронних двигунів потужністю до 15 кВт. Запропоновано критерій виявлення початкового моменту виникнення виткового замикання, яким є порівняння вимірюваного фазного струму з розрахунковим струмом з урахуванням зони довірчого інтервалу. Величина довірчого інтервалу залежить від класів точності вимірювальних приладів, розкиду фізичних величин опорів схеми заміщення двигуна, методів вимірювання та швидкості зміни параметрів мережі живлення. Оцінка впливу класу точності вимірювальних приладів на величину довірчих інтервалів розглянута залежно від класу точності вимірювальних приладів за стаціонарної зміни параметрів мережі. Отримано аналітичний вираз, що дозволяє оцінити вплив класу точності вимірювальних приладів на зміну похибки під час визначення розрахункового струму як за окремого, так і за спільного обліку похибок усіх приладів. Визначено необхідну чутливість вимірювальної системи для виявлення початкового моменту виникнення виткового замикання. Проведено апробацію отриманих результатів, для досліджуваних двигунів визначені класи точності вимірювальних приладів, необхідні для виявлення 2, 5 і 10% замкнутих витків у пазу обмотки статора.*

**Ключові слова:** асинхронний двигун, обмотка статора, виткові замикання, чутливість, вимірювальний прилад, клас точності.

**Постановка проблеми.** Асинхронні двигуни (далі – АД) завдяки надійності й простоті експлуатації є основним елементом електроприводу як в електротехнічних комплексах промислових підприємств, так і в портових і суднових електротехнічних установках. Масове виробництво й доступна ціна пристроїв тиристорних перетво-

рювачів частоти (далі – ТПЧ) значно розширили сферу застосування АД у керованому й некерованому електроприводах. Своєчасне виявлення дефектів в АД дозволяє підвищити надійність, безпеку й безперебійність роботи електротехнічних систем, відповідальних за забезпечення безперервності технологічних процесів, а в деяких



випадках – за життя обслуговуючого персоналу. У портах і на судах системи «АД + ТПЧ» застосовуються в системах пожежогасіння, охолоджуючих системах забортною водою, в системі забезпечення кренування та деферентності судна, осушувальної та вентиляційної системи, в системах забезпечення роботи головних рушійних приводів і генераторів, у приводах розвантажувально-навантажувальних комплексів портів, у системах забезпечення безперервності циклів металургійного виробництва й іншому. Потужність АД у таких системах, як правило, коливається від 0,75 кВт до 15 кВт. Проведені дослідження причин скорочення термінів експлуатації АД показують, що в 45% випадків причиною виходу АД із ладу є пошкодження обмотки статора через появу в них виткових замикань. Виткові замикання виникають під час локального зниження діелектричних властивостей ізоляції обмоток статора внаслідок механічних і теплових перевантажень [1; 2].

Виявлення виткового замикання в статорних обмотках АД на ранній стадії їх появи є одним із найважче діагностованих дефектів. Відомі способи виявлення виткових замикань у статорних обмотках АД, застосовні для АД потужністю 25 кВт і вище, для АД потужністю нижче 15 кВт, відомі методи, характерні низькою чутливістю та невисокою достовірністю. Для АД малої потужності розроблений спосіб виявлення початкового моменту виткових замикань [3]. На достовірність визначення початкового моменту появи виткового замикання впливає вибір класу точності вимірювальних засобів. Питання впливу класу точності вимірювальних засобів на достовірність і чутливість виявлення початкового моменту виткового замикання в статорних обмотках АД малої потужності є актуальним і недостатньо дослідженим завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Відомий метод вібродіагностики для виявлення виткового замикання [4; 5]. Метод заснований на амплітудно-частотному аналізі вібраційних сигналів, виміряних у різних точках АД із використанням одного з вимірювальних комплексів, таких як Fluke 180, ExtechVB-500, BalltechVP-3470, КОМПАС-РПЕ та інші. Класи точності вимірювальних комплексів у середньому відповідають 0,01 (за датчиком обертання валу), 0,5 (за датчиком вібрації корпусу АД), 0,01 (за датчиком вібрації) і 0,25–0,4 (за датчиками вібропереміщення та віброприскорення корпусу АД) відповідно. Такі класи точності комплексів дозволяють використовувати цей метод для діагностики АД потужністю понад 30 кВт, що мають обмотки із числом витків у пазу

статора АД не більше 12 провідників. Для АД потужністю до 22 кВт, що мають у пазу статора АД понад 20 провідників, метод не володіє достатньою чутливістю, тому що струми зворотної послідовності, які виникають за такої умови, складають до 1% від робочого струму АД і не викликають зміни амплітуди шумового сигналу, що не перевищує шумовий фон. Поява початкового моменту виткового замикання характеризується появою несиметрії фазних струмів. Несиметрія фазних струмів приводить до появи тангенціальної вібрації в АД із подвоєною частотою  $f_u$  промислової мережі згідно із [6], що відповідає аналогічним ефектам за коефіцієнта несиметрії напруг мережі живлення  $k_{2U}$ , який змінюється від 0 до 2%.

Метод амплітудно-частотної діагностики стану АД заснований на спектральному аналізі фазного струму [7; 8]. У методі використовуються аналізатори спектра, такі як PQM-703 (виробництва Sonel), Fluke 434 (виробництва Fluke), MI 2390 (виробництва Metrel) і інші. Виткові замикання викликають підвищення амплітуд непарних гармонік:  $v = 3, 5, 7$  і  $9$  гармоніки. На достовірність і чутливість результатів спектрального аналізу впливають якість напруги мережі живлення, зовнішні електромагнітні поля, різке збільшення зубцових гармонійних складових частин у фазних токах, які спостерігаються під час зміни навантаження на вал АД. Застосування такої методики ефективно для АД потужністю понад 15 кВт, що працюють із постійним навантаженням і мають не більше 25 витків у пазу статора АД. Наприклад, для АД потужністю до 15 кВт із числом у пазу статора понад 25 витків замикання до 15% витоків викликає появу гармонійних складових частин у токах  $v = 3, 5, 7$  і  $9$ , що в порівнянні з амплітудами гармонійних складових частин фазних струмів викликає наявність несиметричних напруг до 1% і несинусоїдальності напруг мережі живлення до 2%. Проведені вимірювання показників якості електроенергії (далі – ПКЕ) мереж Маріупольського державного порту показали, що несиметрія напруг мережі коливається від 0,5% до 1,5%, несинусоїдальності напруги – від 0,3% до 1%. За наявності в мережі живлення таких ПКЕ метод дозволяє виявляти виткові замикання в обмотці статора АД у разі виходу з ладу понад 30% витків у пазу статора, що відповідає чутливості 12 витків у пазу.

Метод аналізу спотворення магнітного поля в повітряному зазорі [9], заснований на виділенні зі спектра просторових гармонік індукції тих, які відповідають появі виткового замикання,

в основному застосовують для АД потужністю понад 55 кВт із числом провідників у пазу обмотки не більше 18. Для АД потужністю до 55 кВт метод має низьку чутливість і становить 40–60 % замкнених витків у пазу.

Методи діагностики, засновані на контролі експлуатаційних параметрів АД, таких як напруга живлення, споживаний струм, частота мережі й обороти АД, застосовні для АД потужністю нижче 15 кВт. Такі методи дозволяють виявити початковий момент виткового замикання [3; 10] і залежно від класу точності вимірювальних засобів володіють необхідною чутливістю та достовірністю.

Чутливість методів функціональної діагностики безпосередньо залежить від класів точності застосовуваних вимірювальних приладів. Натепер вивчення питання актуальне.

**Постановка завдання.** Мета роботи – дослідження впливу класу точності (далі – КТ) вимірювальних засобів для оцінки достовірності й чутливості виявлення початкового моменту виткових замикань у статорних обмотках асинхронних двигунів потужністю до 15 кВт.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Розроблений спосіб [3] заснований на порівнянні результатів вимірювань фазних струмів АД  $I_\phi$  з їх розрахунковими значеннями  $I_p$ . Критеріальною залежністю виявлення початкового моменту виявлення виткового замикання є вираз:

$$I_\phi \neq I_p + \delta_w, \quad (1)$$

де  $I_\phi$  – вимірюваний струм в фазі АД у разі виткового замикання;  $I_p$  – розрахунковий струм у фазі АД у разі виткового замикання,  $\delta_w$  – величина зони довірчих інтервалів, пов’язана з КТ вимірювальних приладів, розкидом фізичних величин опору АД та аналітично отриманих величин елементів схеми заміщення АД методами вимірювань і

швидкістю зміни величин режимних параметрів навантаження та живлячої мережі.

Оцінка впливу КТ вимірювальних приладів на величину зони довірчих інтервалів розглянута за стаціонарною зміною величин параметрів мережі й АД, а величини елементів схеми заміщення визначені згідно з методикою [11].

У табл. 1 наведено перелік вимірювальних приладів та їх КТ.

Абсолютна похибка вимірювального приладу визначається виразом згідно з [12]:

$$\Delta_{np} = \frac{\gamma_{np} \cdot X_{II}}{100}, \quad (2)$$

де  $\gamma_{np}$  – приведена похибка приладу (клас точності);  $X_{II}$  – свідчення цифрового вимірювального приладу.

Розрахункові похибки вимірювальних приладів у відносних одиницях (в.о.) представлені в табл. 2.

Розрахункове значення фазного струму  $I_p$  в обмотці АД визначається за виразом згідно з [3]:

$$I_{pi} = \frac{U_i}{|Z_i|} = \frac{U_i}{\sqrt{R_i^2 + X_i^2}}, \quad (3)$$

де  $U_i$  – значення фазної напруги мережі живлення, виміряне в  $i$ -й фазі;  $X_i$  – індуктивна складова частини повного опору  $i$ -ї фази АД;  $R_i$  – активна складова частини повного опору  $i$ -ї фази АД.

Повний комплексний опір  $Z_i$   $i$ -ї фази АД згідно з [13] визначиться за формулою:

$$\underline{Z}_i = (r_1 + jx_1) + \frac{\left(\frac{r_2'}{s} + jx_2'\right) \cdot (r_\mu + jx_\mu)}{\left(\frac{r_2'}{s} + jx_2'\right) + (r_\mu + jx_\mu)}, \quad (4)$$

де  $r_1$ ,  $x_1$  – активний та індуктивний опір розсіювання обмотки статора;  $r_2'$ ,  $x_2'$  – наведені до обмотки статора активний та індуктивний опір розсіювання роторної обмотки;  $r_\mu$ ,  $x_\mu$  – активний та індуктивний опір намагнічуючого контуру,  $s$  – ковзання.

Таблиця 1

Сучасні цифрові вимірювальні прилади

КТ	0,1	0,2	0,5	1,0	1,5
Амперметри	СА 3010 PM800***	СА 3021 Д5075	ЩП 120П 7КТ1120* AMTD-1-R**	ЩП-72 DJ-A965	А-72-6
Вольтметри	ЩП20-П PM800***	Серія Р	VMD-933 7КТ1110*	V-03	ВМ-3
КТ	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2
Тахометри	ДО-03	Testo-465	DT-2234C+ DT-30 LK	ТЭ-Д	ТЭМП-4 ЗТСТ
Частотоміри	СС3021	ЩЧ02	ЦП85/12 ЧС-01-ТК	Ф5043	ЩЧ120

Примітки: \* – виробництва Siemens;  
\*\* – виробництва АВВ;  
\*\*\* – виробництва Schneider Electric.

Поява виткового замикання викликає зміни активного й індуктивного опорів обмотки статора й індуктивного опору намагнічуючого контуру, які залежать від кількості замкнутих витків. Згідно з [3] відносний коефіцієнт зміни числа витків  $k_w$  визначається за виразом:

$$k_w = 1 - \frac{w_k}{w_1}, \quad (5)$$

де  $w_k$  – кількість замкнутих витків у пазу обмотки статора АД;  $w_1$  – загальне число витків в обмотці.

За наявності виткового замикання з урахуванням коефіцієнта  $k_w$  вираження (4) запишеться у вигляді:

$$\underline{Z}_i = (r_1 \cdot k_w + jx_1 \cdot k_w^2) + \frac{\left(\frac{r_2'}{s} + jx_2'\right) \cdot (r_\mu + jx_\mu \cdot k_w^2)}{\left(\frac{r_2'}{s} + jx_2'\right) + (r_\mu + jx_\mu \cdot k_w^2)}, \quad (6)$$

Використання методики [11] визначення величин елементів схеми заміщення АД у порівнянні з методами, наведеними в [13; 14; 15], дозволило підвищити чутливість виявлення початкового моменту виткового замикання, наприклад, для АД потужністю до 15 кВт до 1,5%, що склало 3 витки.

Введемо коефіцієнт чутливості  $\beta_I$ , що характеризує відношення розрахункового фазного струму за виразом (3) до фактично виміряного струму, який за виткового замикання змінюється залежно від кількості коротко замкнутих витків у пазу статора  $w_k$ . Коефіцієнт  $\beta_I$  є функцією коефіцієнта зміни числа витків  $k_w$  і визначається виразом:

$$\beta_I = f(k_w) = \frac{I_p}{I_b(k_w)}, \quad (7)$$

де  $I_b(k_w)$  – вимірний фазний струм за виткового замикання у фазі обмотки статора, що залежить від коефіцієнта  $k_w$ ; у нормальному режимі роботи  $I_b = I_p$ , а коефіцієнт чутливості  $\beta_I$  дорівнює 1.

Величина зони довірчих інтервалів як функція КТ вимірювальних приладів повинна задовольняти умові:

$$\delta_w > f(\Delta \tilde{I}_{np} + \Delta \tilde{I}_k), \quad (8)$$

де  $\tilde{I}_{np}$  – похибка виміряного струму, відповідна до КТ амперметрів, що застосовуються

для визначення величини виміряного струму  $I_p$ ;  $\tilde{I}_k$  – похибка розрахункового струму, що залежить від КТ вольтметрів, частотомірів і тахометрів під час визначення величини розрахункового струму  $I_p$ .

Похибка виміряного струму  $\tilde{I}_{np}$  відповідає значенням, представленим у табл. 2 для амперметрів різних КТ, тобто  $\Delta \tilde{I}_{np} = \Delta_{npA}$ .

Похибка  $\tilde{I}_k$  під час визначення розрахункового струму непрямим способом є функцією трьох змінних: похибки вольтметра, похибки частотомера й похибки тахометра. Похибка знаходиться як різниця значень розрахункового струму у функції від КТ приладів (коли значення змінних взяті з урахуванням похибок) і розрахункового струму з нульовою похибкою за висловом:

$$\Delta \tilde{I}_k = \pm (I_p (f(\Delta_{npv}, \Delta_{npn}, \Delta_{npr})) - I_p), \quad (10)$$

де  $I_p (f(\Delta_{npv}, \Delta_{npn}, \Delta_{npr}))$  – значення розрахункового струму з урахуванням похибок вольтметра, тахометра й частотомера за різних КТ приладів.

За стаціонарного режиму мережі й незмінного навантаження АД відхилення контрольованих параметрів від дійсних значень зумовлено похибками приладів вимірювання. Розкид вимірних значень напруг, оборотів і частоти мережі визначається виразами:

$$U_\Delta = U \pm \Delta_{npv}; \quad (11)$$

$$n_\Delta = n \pm \Delta_{npn}; \quad (12)$$

$$f_\Delta = f \pm \Delta_{npr}. \quad (13)$$

Підставами вираження (12), (13) у вираз (4) і визначимо похибку визначення опору залежно від КТ частотомера й тахометра:

$$\underline{Z}_{\Delta s} = (r_1 + jx_1) + \frac{\left(\frac{r_2'}{s \pm \Delta_s} + jx_2'\right) \cdot (r_\mu + jx_\mu)}{\left(\frac{r_2'}{s \pm \Delta_s} + jx_2'\right) + (r_\mu + jx_\mu)}, \quad (14)$$

де  $\Delta_s$  – похибка визначення ковзання залежно від КТ частотомера й тахометра, визначається за виразом:

$$\Delta_s = \pm \frac{n \cdot (\Delta - 1)}{n_o}, \quad (15)$$

Таблиця 2

Похибки приладів  $\Delta_{np}$  різних КТ

КТ		0,1	0,2	0,5	1,0	1,5
Амперметри	$\Delta_{npA}$ , в.о.	±0,001	±0,002	±0,005	±0,01	±0,015
Вольтметри	$\Delta_{npV}$ , в.о.					
КТ		0,01	0,02	0,05	0,1	0,2
Тахометри	$\Delta_{npr}$ , в.о.	±0,0001	±0,0002	±0,0005	±0,001	±0,002
Частотоміри	$\Delta_{nps}$ , в.о.					

де  $n$  – робочі обороти АД,  $n_o$  – частота обертання поля статора,  $\Delta$  – коефіцієнт, що враховує похибки частотоміра й тахометра:

$$\Delta = \frac{1 \pm \frac{\Delta_{np\ n}}{n}}{1 \pm \frac{\Delta_{np\ f}}{f}} \quad (16)$$

Розрахунковий струм  $I_p(f(\Delta_{np\ v}, \Delta_{np\ n}, \Delta_{np\ f}))$  з урахуванням (11) і (14) запишеться як:

$$I_p(f(\Delta_{np\ v}, \Delta_{np\ n}, \Delta_{np\ f})) = \frac{U \pm \Delta_{np\ v}}{(r_1 + jx_1) + \frac{\left(\frac{r_2'}{s \pm \Delta_s} + jx_2'\right) \cdot (r_\mu + jx_\mu)}{\left(\frac{r_2'}{s \pm \Delta_s} + jx_2'\right) + (r_\mu + jx_\mu)}} \quad (17)$$

Вираз (10) з урахуванням виразу (17) дозволяє оцінити:

1) вплив КТ кожного вимірювального приладу (вольтметра, тахометра й частотоміра) на зміну похибки під час визначення розрахункового струму, тобто  $\Delta \tilde{I}_{kU} \rightarrow I_p(f(\Delta_{np\ v}))$ ,  $\Delta \tilde{I}_{kn} \rightarrow I_p(f(\Delta_{np\ n}))$ ,  $\Delta \tilde{I}_{kf} \rightarrow I_p(f(\Delta_{np\ f}))$ ;

2) спільний вплив КТ всіх застосовуваних приладів на похибку під час визначення розрахункового струму, тобто  $\Delta \tilde{I}_k \rightarrow I_p(f(\Delta_{np\ v}, \Delta_{np\ n}, \Delta_{np\ f}))$ .

Оцінка похибки розрахункового фазного струму проведена для АД потужністю до 15 кВт, модель АД 4А80А4У3. Приймаємо КТ для всіх вимірюваних приладів відповідно до табл. 1. Мінімальна похибка під час визначення відповідає КТ 0,1 для вольтметрів, 0,01 для тахометрів і 0,01 для частотомірів. На рис. 1 представлені графіки залежності похибки розрахункового струму від КТ приладів кожного контрольованого параметра окремо. На рис. 2 представлена залежність зміни похибки

визначення розрахункового струму під час зміни КТ приладів всіх вимірюваних параметрів, також пунктиром показані графіки, зображені на рис. 1.

Залежності, наведені на рис. 1, показують, що найбільший вплив на інтервали меж похибки надають КТ приладів, що вимірюють частоту й обороти АД.

Відповідно до рис. 1 похибка розрахункового струму  $\Delta \tilde{I}_k$ :

- збільшується з 0,2 % за КТ вольтметра 0,1 до 3,2 % за КТ 1,5;
- збільшується з 0,3 % за КТ тахометра 0,01 до 38,7 % за КТ 1,5;
- збільшується з 0,3 % за КТ частотоміра 0,01 до 37,4 % за КТ 1,5.

Аналіз залежності похибок розрахункового струму від зміни КТ вимірювальних приладів, наведених на рис. 2, показує, що зміна похибки під час розрахунків фазного струму від зміни КТ приладів має лінійну залежність. Для вольтметра КТ = 0,1, тахометра КТ = 0,01 і частотоміра КТ = 0,01 загальна похибка розрахункового струму становить 0,8%. Під час використання вольтметра КТ = 0,2, тахометра КТ = 0,02 і частотоміра КТ = 0,02 загальна похибка розрахункового струму становить 1,3%. Під час використання вольтметра КТ = 0,5, тахометра КТ = 0,05 і частотоміра КТ = 0,05 загальна похибка розрахункового струму становить 2,8%.

Найбільша величина похибки розрахункового струму виникає за умови відхилень контрольованих параметрів:  $U_\Delta = U + \Delta_{np\ v}$ ;  $n_\Delta = n - \Delta_{np\ n}$ ;  $f_\Delta = f + \Delta_{np\ f}$ . Величина  $\Delta \tilde{I}_{k\ max}$  буде критерієм визначення довірчого інтервалу чутливості  $\delta_w$ .

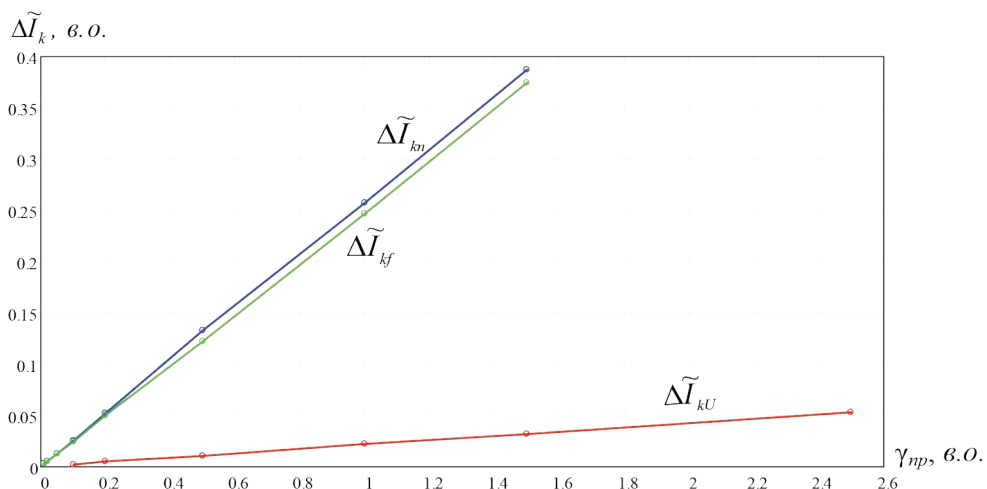


Рис. 1. Графіки залежності похибки розрахункового струму  $\Delta \tilde{I}_k$  від КТ вольтметрів (крива  $\Delta \tilde{I}_{kU}$ ), частотомірів (крива  $\Delta \tilde{I}_{kf}$ ) і тахометрів (крива  $\Delta \tilde{I}_{kn}$ )

Приріст виміряного струму  $\Delta I_e$  щодо розрахункового струму  $I_p$  за наявності виткового замикання в обмотці пов'язаний із коефіцієнтом чутливості  $\beta_l$  співвідношенням:

$$\Delta I_e = (1 - \beta_l) \cdot I_e. \quad (18)$$

Чутливість вимірювальної системи під час виявлення початкового моменту виткового замикання у відносних одиницях з урахуванням (18) визначиться за формулою:

$$1 - \beta_l \geq \delta_w. \quad (19)$$

Виконання умови (19) є критерієм виявлення початкового моменту появи виткового замикання в обмотці статора АД.

**Апробація отриманих результатів.** Оцінка коефіцієнта чутливості  $\beta_l$  залежно від кількості замкнутих витків у пазу статора  $w_k$  проведена для АД типів: 4A71A2Y3 потужністю 0,75 кВт,  $n_o = 3000$  об/хв, кількість витків в обмотці  $w_l = 356$ , кількість витків у пазу  $S_n = 89$ , робочий струм  $I_p = 1,007$  А; 4A80A4Y3 потужністю 1,1 кВт,  $n_o = 1500$  об/хв,  $w_l = 360$ ,  $S_n = 60$ ,  $I_p = 2,127$  А; 4A160M6Y3 потужністю 15 кВт,  $n_o = 1000$  об/хв,  $w_l = 102$ ,

$S_n = 34$ ,  $I_p = 21,33$  А. Розрахунок параметрів схеми заміщення проведений за уточненою методикою [11]. Відповідні графіки наведені на рис. 3.

Залежності на рис. 3 дозволяють оцінити початковий момент утворення виткового замикання на виході з роботи витків у пазу статора. Для АД потужністю 0,75 кВт початковий момент виявляється під час замикання 3 витків, коефіцієнт чутливості дорівнює 0,993; для АД потужністю 1,1 кВт початковий момент виявляється під час замикання 2 витків, коефіцієнт чутливості дорівнює 0,991; для АД потужністю 15 кВт початковий момент виявляється під час замикання 2 витків, коефіцієнт чутливості дорівнює 0,99.

У табл. 3 представлені зміни коефіцієнта чутливості  $\beta_l$  під час замикання до 10% витків у пазу статора для досліджуваних АД.

Результати розрахунку приросту виміряного струму  $\Delta I_e$  при 2, 5 і 10 % замкнутих витків у пазу для розглянутих АД представлені в табл. 4.

У табл. 5 наведені результати розрахунку похибок розрахункового струму залежно від КТ застосованих амперметрів.

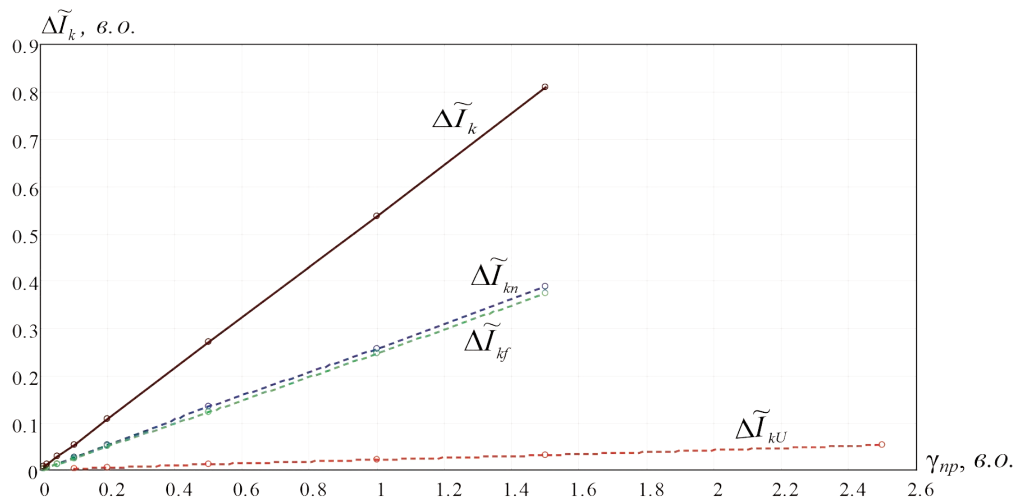


Рис. 2. Графік залежності похибки розрахункового струму від зміни КТ вимірювальних приладів

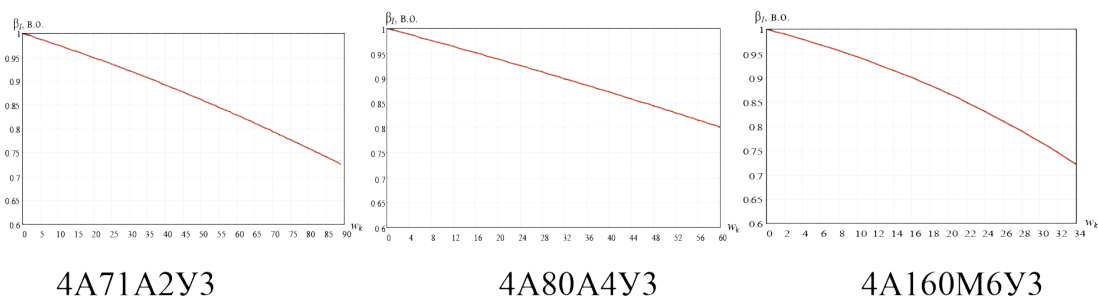


Рис. 3. Графіки залежності коефіцієнта чутливості  $\beta_l$  від зміни числа замкнутих витків у пазу статора  $w_k$

У табл. 6 наведені результати розрахунку похибки розрахункового струму  $\tilde{I}_{k \max}$  для досліджуваних АД залежно від КТ застосованих вимірювальних приладів, довірчі інтервали  $\delta_w$  і коефіцієнт чутливості вимірювальної системи.

Аналіз даних, наведених у табл. 6, показав:

– чутливість виявлення 2–5% замкнутих витків у пазу забезпечується застосуванням:

– амперметрів і вольтметрів КТ 0,2, частотомірів КТ 0,02 / 0,01 і тахометрів КТ 0,01 / 0,02 для АТ 4А71А2У3;

– амперметрів і вольтметрів КТ 0,2, частотомірів і тахометрів КТ 0,01 для АТ 4А80А4У3 або КТ амперметрів / вольтметрів 0,1 / 0,2 і частотомірів / тахометрів КТ 0,02 / 0,01;

– амперметрів КТ 0,2 і вольтметрів КТ 0,1, частотомірів і тахометрів КТ 0,01 для АТ 4А160М6У3;

– чутливість виявлення 6–10% замкнутих витків у пазу забезпечується застосуванням:

– амперметрів КТ 0,5 / 0,2 і вольтметрів КТ 0,2 / 0,5, частотомірів КТ 0,02 / 0,05 і тахометрів КТ 0,05 / 0,02 для АТ 4А71А2У3 і 4А80А4У3;

– амперметрів / вольтметрів КТ 0,2 / 0,1, частотомірів і тахометрів КТ 0,01 для АТ 4А160М6У3.

Отримані результати показують, що для виявлення початкового моменту появи виткового замикання з чутливістю 2–5 витків для АД потужністю від 0,5 до 15 кВт необхідне застосування приладів амперметрів / вольтметрів із КТ не вище 0,5 / 0,2 для частотомірів / тахометрів із КТ не вище 0,02 / 0,02.

**Висновки.**

1. Визначено межі зміни похибок вимірюваного фазного струму й значення розрахункового струму й установлено, що зміна КТ вольтметра від 0,1 до 1,5 приводить до збільшення похибки

Таблиця 3

**Коефіцієнт чутливості відношення розрахункового фазного струму за виразом (3) до фактично вимірюваного струму  $\beta_I$  залежно від  $w_k$**

$w_k$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	<b>4А71А2У3</b>								
$\beta_I$	0,998	0,995	0,993	0,990	0,988	0,985	0,983	0,980	0,978
	<b>4А80А4У3</b>								
$\beta_I$	0,997	0,994	0,991	0,988	0,985	0,982			
	<b>4А160М6У3</b>								
$\beta_I$	0,995	0,990	0,984	0,979					

Таблиця 4

**Приріст струму  $\Delta I_\epsilon$  під час зміни числа замкнутих витків у пазу  $w_k$**

$w_k$	%	2			5			10		
	ВІТКИ	2	1	1	5	3	2	9	6	4
$\beta_I$ , в. о.		0,995	0,997	0,995	0,988	0,991	0,990	0,978	0,982	0,979
$\Delta I_\epsilon$ , А	4А71А2У3	0,005			0,012			0,022		
	4А80А4У3		0,006			0,019			0,038	
	4А160М6У3			0,11			0,21			0,45

Таблиця 5

**Похибка  $\tilde{I}_{np}$  амперметрів різних КТ**

$\gamma_{np}$	0,1	0,2	0,5	1,0	1,5
	<b>4А71А2У3 (<math>I_p = 1,007</math> А)</b>				
$\tilde{I}_{np}$ , А	0,001	0,002	0,005	0,010	0,015
	<b>4А80А4У3 (<math>I_p = 2,127</math> А)</b>				
$\tilde{I}_{np}$ , А	0,002	0,004	0,011	0,021	0,032
	<b>4А160М6У3 (<math>I_p = 21,33</math> А)</b>				
$\tilde{I}_{np}$ , А	0,02	0,04	0,11	0,21	0,32

Наведені похибки  $\tilde{\Delta}I_{np}$  і  $\tilde{\Delta}I_{k\max}$  залежно від КТ приладів, довірчі інтервали  $\delta_w$  і чутливість вимірювальної системи

$\gamma_{np}$ амперметр	$\gamma_{np}$ вольтметр	$\gamma_{np}$ тахометр	$\gamma_{np}$ частотомір	$\tilde{\Delta}I_{np}$ , А	$\tilde{\Delta}I_{k\max}$ , А	$\delta_w$ , А	$(1-\beta_I) I_{изм}$ , А	Чут-ть, $w_k$
<b>4A71A2Y3</b>								
0,1	0,1	0,01	0,01	0,001	0,005	0,007	0,007	3
0,2	0,2	0,01	0,01	0,002	0,006	0,009	0,010	4
0,2	0,2	0,02	0,01	0,002	0,008	0,011	0,012	5
0,2	0,2	0,01	0,02	0,002	0,008	0,011	0,012	5
0,2	0,2	0,02	0,02	0,002	0,010	0,013	0,015	6
0,5	0,5	0,01	0,01	0,005	0,009	0,015	0,015	6
0,5	0,5	0,02	0,02	0,005	0,013	0,019	0,020	8
0,2	0,2	0,05	0,02	0,002	0,015	0,018	0,020	8
0,2	0,5	0,02	0,05	0,002	0,018	0,021	0,022	9
0,2	0,2	0,05	0,05	0,002	0,021	0,024	0,025	10
<b>4A80A4Y3</b>								
0,1	0,1	0,01	0,01	0,002	0,007	0,010	0,013	2
0,2	0,1	0,01	0,01	0,004	0,007	0,011	0,013	2
0,1	0,2	0,01	0,01	0,002	0,010	0,013	0,013	2
0,2	0,2	0,01	0,01	0,004	0,010	0,016	0,019	3
0,2	0,1	0,01	0,02	0,004	0,010	0,016	0,019	3
0,2	0,2	0,02	0,02	0,004	0,015	0,021	0,026	4
0,5	0,5	0,02	0,02	0,011	0,021	0,032	0,032	5
0,2	0,2	0,05	0,02	0,004	0,023	0,029	0,032	5
0,2	0,5	0,02	0,05	0,004	0,029	0,035	0,038	6
0,5	0,5	0,05	0,02	0,011	0,029	0,041	0,045	7
<b>4A160M6Y3</b>								
0,1	0,1	0,01	0,01	0,02	0,15	0,17	0,21	2
0,2	0,1	0,01	0,01	0,04	0,15	0,20	0,21	2
0,2	0,2	0,01	0,01	0,04	0,21	0,27	0,34	3
0,2	0,1	0,02	0,01	0,04	0,27	0,33	0,34	3
0,1	0,2	0,01	0,02	0,02	0,30	0,33	0,34	3
0,2	0,2	0,02	0,02	0,04	0,38	0,44	0,45	4
0,5	0,2	0,02	0,01	0,11	0,30	0,43	0,45	4
0,2	0,5	0,01	0,02	0,04	0,36	0,42	0,45	4
0,5	0,2	0,02	0,02	0,11	0,38	0,51	0,58	5
0,5	0,5	0,02	0,02	0,11	0,45	0,57	0,58	5

під час визначення струму на 3%, зміна КТ частотоміра від 0,01 до 1,5 приводить до зростання похибки на 37,1%, а зміна КТ тахометра від 0,01 до 1,5 приводить до зростання похибки на 38,4%.

2. Для достовірного виявлення виткового замикання не більше 5% замкнутих витків у пазу статора АД потужністю до 15 кВт необхідно засто-

сування амперметрів і вольтметрів КТ не вище 0,2, а частотомірів і тахометрів – КТ не вище 0,02.

3. Для достовірного виявлення виткового замикання 6–10% замкнутих витків у пазу статора для АД потужністю до 15 кВт необхідно застосування амперметрів і вольтметрів КТ не вище 0,5, а частотомірів і тахометрів – КТ не вище 0,05.

#### Список літератури:

1. Кривонос В.Е., Василенко С.В. Влияние запыленной среды на срок службы обмоток статора асинхронных двигателей. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2015. Вып. № 6. С. 35–40.
2. Кривонос В.Е., Василенко С.В. Управление ресурсом работы асинхронного двигателя в условиях не симметрии питающей сети. *Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии*. 2012. Вып. № 2 (10Е). С. 14–24.
3. Кривонос В.Е., Василенко С.В., Бухлал Н.А. Розробка програмного забезпечення виявлення міжвиткового замикання в статорних обмотках електродвигуна в умовах несиметрії напруг. *Наука та виробництво* : міжвуз. темат. зб. наук. праць. 2020. Вип. № 23. С. 131–141.

4. Браташ О.В., Калинов А.П. Анализ методов вибродиагностики асинхронных двигателей. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2012. Вып. № 5. С. 43–50.
5. Николайчук Ю.С., Дорошев Ю.С. Методы вибродиагностики электрических машин. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2011. Вып. № 10. С. 56–61.
6. Чепульский Ю.П., Замираев К.С. Вибродиагностика деталей машин : Учебное пособие. Москва, 2009. 75 с.
7. Губаревич О.В., Гулак С.О., Поляков А.П. Діагностування обмоток статора асинхронних двигунів з використанням моделювання на основі годографа вектора парка. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2020. Вып. № 3. С. 29–36.
8. Барков А.В., Борисов А.А. Современные возможности диагностирования машин с электроприводом по току двигателя. *Металлургические процессы и оборудование*. 2013. Вып. № 1 (31). С. 61–65.
9. Гуторова М.С. Моделирование магнитного поля в промежутке асинхронных двигателей за витковых замыканий обмотки статора. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2012. Вып. № 40. С. 90–94.
10. Устройство для контроля и защиты электродвигателя от неполнофазных режимов и витковых замыканий : авторское свидетельство № 1584028 А1 SU: H02H 7/085, 7/08 ; заявл. 09.03.88 ; опубл. 07.08.90. Бюл. № 29. 6 с.
11. Krivosov V.E., Vasilenko S.V. Comparative analysis of methods for calculating the parameters of asynchronous engines for reference data. *ÖsterreichischesMultiscience Journal*. 2019. Vol. 1. № 18. P. 36–42.
12. Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю., Долгополов В.П., Грумінська Л.В. Метрологія та вимірювальна техніка : Навчальний посібник. Вінниця, 2004. 252 с.
13. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. Москва, 1984. 240 с.
14. Мощинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным. *Электричество*. 1998. Вып. № 4. С. 38–42.
15. Усольцев А.А., Лукичев Д.В. Определение параметров схемы замещения АД по справочным данным. *Известия ВУЗов. Серия Приборостроение*. 2008. Т. 51. № 10. С. 35–41.

**Kryvonosov V.E., Vasilenko S.V., Skosyrev V.G. ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF ACCURACY CLASSES OF MEASURING INSTRUMENTS IN THE DETECTION OF THE INITIAL MOMENT OF A TURN CIRCUITS IN THE STATOR WINDING**

*Detection of a turn circuit in the stator winding of an induction motor at an early stage (up to 10% of closed turns) of its appearance is the most difficult defect to diagnose. Existing methods for diagnosing short circuits (vibration diagnostics, method of spectral analysis of current consumption, method for determining the distortion of the magnetic field in the air gap) have the necessary sensitivity and reliability in diagnosing motors with a power over 25 kW, and for motors with a power up to 15 kW allow detecting short circuits of more than 30 % of turns. In [3], a method is proposed for detecting turn-to-turn short circuits at an early stage for asynchronous motors up to 15 kW. The sensitivity and reliability of the proposed method is influenced by the choice of the accuracy class of the measuring instruments. The paper investigates the influence of the accuracy class of measuring instruments on the reliability and sensitivity of detecting the initial moment, the occurrence of a turn circuit in the stator winding of asynchronous motors with a power of up to 15 kW. A criterion for identifying the initial moment of occurrence of a turn circuit is proposed, which is a comparison of the measured phase current with the calculated current, taking into account the confidence interval. The value of the confidence interval depends on the accuracy classes of the measuring instruments, the spread of the physical values of the resistances of the equivalent circuit of the motor, the measurement methods and the rate of change of the parameters of the supply network. Assessment of the influence of the accuracy class of measuring instruments on the value of the confidence intervals is considered with a stationary change in the network parameters. An analytical expression has been obtained that makes it possible to evaluate the influence of the accuracy class of measuring instruments on the change in the error in determining the rated current, both separately and when the errors of all instruments are taken into account together. The required sensitivity of the measuring system for detecting the initial moment of occurrence of a turn circuit has been determined. The results obtained have been tested; for the motors under study, the accuracy classes of the measuring instruments are determined, which are necessary to identify 2, 5 and 10% of closed turns in the groove of the stator winding.*

**Key words:** induction motor, stator winding, turn-to-turn short circuits, sensitivity, measuring instrument, accuracy class.



## ПРИЛАДИ

УДК 620.179.14

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/05>

### **Петрик В.Ф.**

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

### **Протасов А.Г.**

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

### **Галаган Р.М.**

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

### **Муравйов О.В.**

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

### **Момот А.С.**

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

## **БЕЗДРОТОВІ ТЕХНОЛОГІЇ В АВТОМАТИЗАЦІЇ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ**

*Використання бездротових технологій нині спостерігається в багатьох галузях промисловості, і неруйнівний контроль не є винятком. Можливості сучасних смартфонів, які мають значну обчислювальну потужність і великі ресурси пам'яті, роблять їх привабливими для застосування в таких областях неруйнівного контролю, як моніторинг стану конструкцій, контроль цілісності об'єктів підвищеної небезпеки, діагностика роботи обладнання тощо.*

*Розвиток технологій неруйнівного контролю як основи для попередження техногенних катастроф і надзвичайних ситуацій, а також забезпечення експлуатації промислового обладнання та перевірки якості продукції, нині виходить на новий рівень.*

*В умовах промислової революції «Індустрія 4.0» величезними темпами зростає ступінь автоматизації виробництва завдяки впровадженню все більш складних і взаємопов'язаних промислових систем, що забезпечують оперативний обмін даними. Рушійними силами такої тенденції є:*

- зростаюча доступність мініатюрних бездротових датчиків;
- повсюдність зв'язку через Інтернет;
- найкоротші витрати на хмарне зберігання / обробку даних;
- можливості швидкого аналізу й отримання рекомендацій, заснованих на отриманих даних, із використанням все більш доступних та ефективних сценаріїв штучного інтелекту.

*У зв'язку з розвитком ІТ технологій у сучасному промисловому виробництві можна сформулювати основні цілі, що стоять перед неруйнівним контролем в умовах Індустрії 4.0. Це підвищення швидкодії контролю, стійкості отриманих даних та оперативності прийняття рішення. Отже, майбутнє неруйнівного контролю тісно пов'язане з процесами, що характеризуються вищою точністю, меншою кількістю помилок і, отже, підвищеною ймовірністю виявлення дефектів, а також детальними цінними даними, які доступні в будь-який час із будь-якої точки світу. Оцінка результатів контролю може проводитися групами людей, а не окремими людьми, з вищою дисперсією навичок. Продуктивність і швидкість будуть відігравати все більшу роль. Таким чином, можна передбачити, що неруйнівний контроль, орієнтований на майбутнє, забезпечить економію коштів за одночасного поліпшення результатів, значною мірою допомагаючи користувачам скоротити або навіть повністю уникнути додаткових операцій контролю.*

*Метою статті є огляд літератури, що присвячена популяризації впровадженню смартфонів у технологічні процеси традиційних методів неруйнівного контролю.*

**Ключові слова:** неруйнівний контроль, бездротові технології, смартфон, дефектоскоп, Інтернет речей.

**Постановка завдання. Основні проблеми в галузі неруйнівного контролю та шляхи їх вирішення.** Складні інтерфейси: більша частина обладнання неруйнівного контролю (далі – НК) виглядає складним у використанні, тому що воно зазвичай розробляється для фахівців в галузі НК. Не тільки сам процес вимірювання, але і правильне налаштування обладнання в деяких випадках видаються вельми складними для розуміння.

Неефективні робочі процеси: Наприклад, створення та маркування тестової сітки на досліджуваному об'єкті забирає багато часу та є громіздкими. Сучасні рішення вимагають фіксованої сітки, яка зазвичай наноситься крейдою, вимірювальною стрічкою і маркером. Точність результату залежить від точності розташування сенсора на заданій сітці.

Складна інтерпретація даних: при аналізі результатів вимірювань томографічних технологій компетентність в аналізі і якість результатів можуть сильно відрізнятись у різних операторів.

Неможливість повністю відслідкувати метрологічні характеристики приладів: як правило, оператори обладнання НК повинні вручну документувати процедури вимірювання таким чином, щоб вони могли довести дотримання необхідних керівних принципів, а використовувані інструменти і датчики були належним чином відкалібровані і перевірені. До цих пір цей вид діяльності був повністю ручним. Крім того, він страждає від фрагментованих джерел інформації, відсутності огляду покрокового робочого процесу оператора і будь-яких змін або відхилень від початкової процедури. Ці проблеми призводять до скрутного простежування процедури в процесі контролю.

Складний обмін даними: одне з найбільш трудомістких завдань нині – опрацювання результатів після збору даних в польових умовах. Спостереження показали, що час, який витрачається на цю задачу, може в два рази перевищувати фактичний час, що використовується безпосередньо для вимірювання. Поширення результатів стало важливим елементом при взаємодії з колегами на крупному дослідницькому майданчику, в офісі, з постачальниками або клієнтами. Крім того, обсяг зібраних даних, особливо при використанні таких технологій, як радіолокаційні, ультразвукові або вихроструміві, значно збільшився. Поки що дані зазвичай зберігаються на папері, в самому пристрої НК або на окремому носії. Деякі пристрої потребують ручного вводу даних у вказане сховище з подальшим аналізом даних за допомогою комп'ютера.

Для розв'язання перерахованих проблем у деяких приладах НК вже використовуються роботизовані сканери під час проведення ультразвукового і оптичного контролю зварних з'єднань, вимірювання геометричних параметрів металопрокату, тощо. Спостерігається тенденція до відходу від створення портативних приладів і їх мініатюризації. Стійким трендом стає виробництво приладів НК, що мають канали передачі вимірювальної інформації і можливість її документування. Це обумовлює відхід від окремих вимірювань і обробки результатів контролю безпосередньо на місці проведення робіт. Збір інформації від різних типів первинних перетворювачів (датчиків) і її обробка з метою отримання того чи іншого показника (наприклад, величини корозії, структурного параметра матеріалу та ін.) будуть здійснюватися централізовано. Дані будуть накопичуватися і переміщуватися в сховище для виявлення нових залежностей між вимірюваними параметрами і станом об'єкта контролю на основі алгоритмів обробки великих об'ємів даних і хмарних обчислень.

У зв'язку із цим виникає необхідність розглянути в НК нові інформаційні технології, засновані на інтелектуальному сприйнятті, технології розпізнавання, складних обчислень, повсюдної мережевої інтеграції та розвитку інформаційної індустрії, відомої як Інтернет Речей (IP).

**Постановка завдання.** Метою статті є огляд літератури, яка присвячена популяризації впровадження смартфонів у технологічні процеси традиційних методів неруйнівного контролю.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Сучасні смартфони – це високо інтегровані пристрої, що мають значну обчислювальну потужність, великий ресурс пам'яті і можуть працювати в мережі з різноманітними датчиками. Це робить їх привабливими для використання в області моніторингу, де дані повинні записуватися, оброблятися, зберігатися, передаватися і навіть бути візуалізованими. У зв'язку з цим смартфони з датчиками і виконавчими механізмами можна широко використовувати в світі IP.

Можливості Інтернету речей і великих даних сьогодні розуміють і приймають практично всі галузі промисловості і все більше і більше компаній. Бездротове підключення до випробувальних зондів та датчиків знаходить використання і в секторі НК. Хмарне сховище даних може бути задіяно у сфері НК і практично кожен може використовувати його для виробничих даних, інструментів обробки і звітності.

**Впровадження бездротових технологій.**

Яскравим прикладом використання Інтернету Речей є моніторинг стану конструкцій (Structural Health Monitoring), який став загальноприйнятим галузевим стандартом для розміщення датчиків моніторингу працездатності деяких великих споруд, що дасть можливість завчасно вжити заходів, які попередять аварійні ситуації. В роботі [1, с. 745] автори спробували оцінити та підтвердити використання смартфонів для моніторингу стану у тривимірній сталевій конструкції, яка може бути пошкоджена під час землетрусу, а в роботі [2, с. 1] представлена система моніторингу стану мостових конструкцій. У обох роботах смартфон було використано для мережевої передачі даних, їх зберігання та наступної обробки.

Перспективи застосування бездротового зв'язку для технічної діагностики з відомими методами НК розглянуто в роботах [3, с. 28; 4, с. 1]. Автори статей демонструють основні недоліки сьогоденних робочих процесів НК. На прикладах з різних галузей вони ілюструють, як можна підвищити рівень продуктивності, заощадити кошти і збільшити загальну швидкість перевірки, що врешті-решт приводить до підвищення конкурентоспроможності НК в цілому.

Використання нових інструментів Індустрії 4.0 в НК знаходить безліч застосувань, наприклад, моніторингу стану промислового обладнання [5, с. 136]. У статті описується інтеграція ультразвукового неруйнівного контролю з бездротовими сенсорними мережами для постійного контролю цілісності матеріалу під час роботи. Мережа бездротових датчиків полегшує спільні зусилля з моніторингу об'єкту без необхідності в дорогих мережах з дрютяними лініями. Автори описують архітектуру системи неруйнівного контролю, яка відрізняється наднизьким енергоспоживанням, низькою вартістю, простотою у використанні і автономно інтегрується в платформу бездротових сенсорних мереж. Система була успішно розгорнута для контролю товщини листів з металевих сплавів (вольфраму і сталі), які використовуються в вібраційних екранах.

Другий приклад – система виявлення та визначення місця розташування пошкодження ізоляції силового трансформатора [6, с. 420]. У роботі була запропонована система онлайн-моніторингу виявлення та визначення місця розташування часткових розрядів за допомогою бездротової сенсорної мережі. Частковий розряд є важливим індикатором стану ізоляції силового трансформатора, тому контроль його стану є актуальною задачею. Викор-

истання бездротових сенсорів дозволило досягти простоти розгортання цих сенсорів і отримати низьку вартість. Авторам вдалося вирішити головну проблему бездротової сенсорної мережі – це забезпечити високу точність синхронізації роботи сенсорів за часом. Система також змогла не тільки виявити часткові розряди, але і визначати їх місцезнаходження з достатньою точністю.

У роботі [7, с. 1271] представлена мобільна система обробки ультразвукових сигналів з використанням смартфона для віддаленого ультразвукового тестування і обробки зображень. Автори використовували обчислювальні можливості операційної системи смартфона Android для порівняльного аналізу ультразвукових сигналів. Результати аналізу відображалися на екрані смартфона в режимі реального часу і передавалися диспетчеру через Wi-Fi зв'язок або стільникові мережі передачі даних для зберігання і подальшого аналізу даних.

Автори роботи [8, с. 1048] пропонують систему моніторингу, яка використовується для відстеження руху і орієнтації балки при підйомі на морський міст в режимі реального часу. Морське будівництво набагато складніше, ніж наземне, особливо із-за підйомних операцій. Таким чином, для безпеки операторів потрібен моніторинг в реальному часі орієнтації і руху підйомної конструкції. Ця проблема була вирішена шляхом використання смартфонів в системі моніторингу підйому, що включає мережу телефонів, контролер і сервер. Ця система використовує смартфони, оснащені внутрішніми датчиками, які видають інформацію про рух балки. Дані датчиків спочатку завантажуються на сервер, а потім повертаються до контролера. Індикація результатів моніторингу з'являється на телефоні диспетчера, коли отримані дані перевищать порогове значення. Отже, спроектована система зручна у використанні і підвищує безпеку роботи операторів.

Потенційні можливості смартфонів в системах для моніторингу небезпечних зсувів конструкцій представлені в роботі [9, с. 149]. Акселерометри, а також аудіо пристрої з динаміками і мікрофонами використовувались у цих системах як датчики, котрі прикріплювались до конструкції. Результати досліджень показали, що пристрій з високим ступенем інтеграції і великими ресурсами пам'яті є привабливими для використання в області моніторингу переміщення, зміщення і нахилу будівельних конструкцій в динаміці. Ще один додаток, який розглядався авторами, це вимірювання нахилу конструкцій. Смартфони також можуть бути незамінними елементами систем

моніторингу внутрішнього зміщення конструкцій під час стихійних лих, наприклад землетрусів [10, с. 1].

Смартфони зробили революцію в способах роботи застосунків для моніторингу стану інфраструктури, тому особливий інтерес представляє робота з використанням смартфона в техніці агрегування і візуалізації для безперервного моніторингу транспортної інфраструктури на базі краудсорсингу, при якому компанії-виробники покладаються на користувачів не тільки в питанні формулювання потреб, а й у визначенні виробів і удосконалень, які б задовольнили ці потреби. Можливості смартфонів зробили дані вимірювань для застосунків моніторингу стану інфраструктури легкодоступними [11, с. 1].

У медицині смартфон використовується в структурних системах діагностики захворювань, їх моніторингу та лікувань. Автори статті [12, с. 293] показали, що використання смартфона є ефективним і дієвим методом поліпшення догляду за пацієнтами і медичної освіти в галузі охорони здоров'я. Доступ до медичного обслуговування також поліпшується завдяки використанню цього інструменту.

Застосування бездротових технологій в задачах НК розглянуто в роботах [13, с. 12; 14, с. 74]. Автори досліджують можливості використання смартфонів для організації ультразвукового та вихрострумowego НК. Розширені функції смартфона привносять інноваційні особливості для звичайних методів неруйнівного контролю. Наприклад, користувач може зберегти координати місця, де проводиться огляд, або фотографувати матеріали, які тестуються.

До функцій, які виконує смартфон в системах НК, відносяться мережева передача даних, їх збе-

рігання та вбудована обробка, бездротове тестування і експертиза матеріалів в режимі реального часу, а також визначення координат місця розташування дефектів в межах певного діапазону помилок. Тому використання смартфонів в системах НК окреслили нову проблему, яка полягає в можливості отримання величезної кількості даних. Ця нова реальність викликає потребу в ефективних методах їх обробки і візуалізації.

**Висновки.** Проведений огляд застосування бездротових технологій в НК показав, що використання потужних можливостей смартфонів дозволяє перевести процес проведення контролю на зовсім інший якісний рівень. Смартфони спроможні передавати дані на значні відстані, записувати їх, опрацьовувати, зберігати, а також розміщувати інформацію у хмарних сховищах, звідки ця інформація може бути доступною різним фахівцям з НК для прийняття рішення та звітності. Смартфони, у поєднанні з бездротовими датчиками і виконавчими механізмами, можуть бути широко використані для різноманітних цілей, у тому числі для моніторингу стану об'єктів підвищеної небезпеки. Бездротове тестування і експертиза матеріалів в режимі реального часу, а також визначення координат місця розташування дефектів є відчутною перевагою систем на базі смартфонів. Застосування бездротових технологій в НК підвищує рівень продуктивності операцій контролю, зменшує витрати на обладнання і збільшує загальну швидкість перевірки, що підвищує конкурентоспроможність неруйнівного контролю в цілому.

Разом із тим велика кількість інформації, яку система на базі смартфона здатна генерувати, породжує нову проблему. Виникає потреба у ефективних методах опрацювання великого масиву даних.

#### Список літератури:

1. Xie B., Li J., Zhao X. Research on Damage Detection of a 3D Steel Frame Model Using Smartphones. *Sensors*. 2019. Vol. 19. No. 3. P. 745–762. DOI: 10.3390/s19030745.
2. Yu Y., Han R., Zhao X., Mao X., Hu W., Jiao D., Li M., Ou J. Initial validation of mobile-structural health monitoring method using smartphones. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. February, 2015. P. 1–14.
3. Kren A.P., Delendyk M.N., Ivanov V.P. Industry 4.0: Transformations in Non-Destructive Testing. *Science and innovation*. 2019. No. 2 (192). P. 28–32.
4. Meier J, Tsalicoglou I., Mennicke R. The future of NDT with wireless sensors, A.I. and IoT. *Proceedings 15th Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing*, Singapore, November 13–17, 2017. P. 1–11.
5. El Kouche A., Hassanein H.S. Ultrasonic Non-Destructive Testing (NDT) Using Wireless Sensor Networks. *Procedia Computer Science*. 2012. Vol. 10. P. 136–143. DOI: 10.1016/j.procs.2012.06.021.
6. He X., Xie G., Jiang Y. Online Partial Discharge Detection and Location System Using Wireless Sensor Network. *Energy Procedia*. 2011. Vol. 12. P. 420–428. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.10.056.
7. Yi W., Gilliland S.S., Saniie J. Mobile ultrasonic signal processing system using Android smartphone. *Circuits and Systems (MWSCAS), 2013 IEEE 56th International Midwest Symposium on*. 4–7 August, 2013. P. 1271–1274. DOI: 10.1109/MWSCAS.2013.6674886 ; 10.1155/2015/274391.

8. Han R., Zhao X., Yu Y., Guan Q., Hu W., Li M. A Cyber-Physical System for Girder Hoisting Monitoring Based on Smartphones Sensors. *Sensors*. 2016. Vol. 16. No. 7. P. 1048–1064. DOI: 10.3390/s16071048.
9. Morgenthal G., Höpfner H. The application of smartphones to measuring transient structural displacements. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2012. No. 2 (3–4). P. 149–161. DOI: 10.1007/s13349-012-0025-0.
10. Li J., Xie B., Zhao X. Measuring the interstory drift of buildings by a smartphone using a feature point matching algorithm. *Structural Control and Health Monitoring*. January, 2020. P. 1–17. DOI: 10.1002/stc.2492.
11. Seraj F., Meratnia N., Havinga P. An aggregation and visualization technique for crowd-sourced continuous monitoring of transport infrastructures. *Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops), 2017 IEEE International Conference on*, USA, March, 2017. P. 1–6. DOI: 10.1109/PERCOMW.2017.7917561.
12. Valle J., Godby T., Paul D.P., Smith H., Coustasse A. Use of Smartphones for Clinical and Medical Education. *The Health Care Manager*. 2017. Vol. 36 (3). P. 293–300. DOI: 10.1097/HCM.000000000000176.
13. Петрик В.Ф., Протасов А.Г., Серий К.Н., Повшенко А.А. Використання серійних мобільних пристроїв при проєктуванні портативних дефектоскопів. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2019. Том 30 (69). Ч. 2. № 6. С. 12–16. DOI: DOI.org/10.32838/2663-5941/2019.6-2/03.
14. Petrik V.F., Protasov A.G., Syeryy K.M., Lysenko I.I. Using wireless data transmission in eddy current nondestructive testing. *Instrument Engineering – 2017 : materials of the 10th International Scientific and Technical Conference*, Minsk, November 1–3, 2017. BNTU, 2017. P. 74–76.

### **Petryk V.F., Protasov A.G., Galagan R.M., Muraviov O.V., Momot A.S. WIRELESS TECHNOLOGIES IN THE NON-DESTRUCTIVE TESTING AUTOMATION**

*The use of wireless technology is now seen in many industries and non-destructive testing (NDT) is no exception. The capabilities of modern smartphones, which have significant computing power and large memory resources, makes them attractive for use in such areas of non-destructive testing as structural control and health monitoring, the integrity of high-risk objects monitoring, equipment diagnostics and others.*

*The development of non-destructive testing technologies as a basis for the prevention of man-made disasters and emergencies, as well as ensuring the operation of industrial equipment and product quality control today reaches a new level.*

*The degree of production automation is growing rapidly in the conditions of the industrial revolution “Industry 4.0”. This is due to the introduction of increasingly complex and interconnected industrial systems that provide operational data exchange. The driving forces of this trend are:*

- increasing availability of miniature wireless sensors;
- the ubiquity of their interconnection via the Internet;
- the shortest consumption for cloud storage / data processing;
- rapid improvement of analysis capabilities and recommendations based on the obtained data, using more and more affordable and effective methods of the artificial intelligence application.

*Because of development of IT technologies in modern industrial production, it is possible to formulate the main goals for NDT in the conditions of Industry 4.0. This is to increase the speed of control, the stability of the data and the efficiency of decision-making. Thus, the future of non-destructive testing is closely linked to processes characterized by higher accuracy, fewer errors and, as a result, increased probability of a flaw detection, as well as availability of valuable data at anytime from anywhere in the world. The groups of people with a higher variance of skills can evaluate obtained results instead of individuals. Productivity and speed will matter more. Thus, it is possible to predict that the future-oriented NDT will save money while improving results, greatly helping users to reduce or even completely avoid rework.*

*The purpose of this article is to review the literature on the introduction of smartphones in the technological processes of the traditional NDT methods.*

**Key words:** non-destructive testing, wireless technologies, smartphone, flaw detector, Internet of Things.

**Романюк В.А.**

Національна академія Національної гвардії України

**Стародубцев С.О.**

Національна академія Національної гвардії України

**Драган Ю.А.**

Національна академія Національної гвардії України

**Літвінов А.Г.**

Національна академія Національної гвардії України

## **ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО ТА ОПТОЕЛЕКТРОННОГО ОЗБРОЄННЯ У ВІЙСЬКОВИХ ФОРМУВАННЯХ НАЦІОНАЛЬНОЇ ГВАРДІЇ УКРАЇНИ**

*До основних задач Національної гвардії України відносяться: охорона важливих державних об'єктів, об'єктів матеріально-технічного та військового забезпечення МВС України, супроводження спеціальних вантажів, протидія терористичним загрозам. Вирішення таких задач потребує широкого застосування сучасних ефективних і надійних засобів озброєння особового складу підрозділів Національної гвардії України.*

*У ряді держав активно ведуться роботи з вдосконалення комплексів лазерної зброї. За окремими програмами йде вдосконалення лазерної зброї тактичного призначення. Воно дозволяє виводити з ладу оптико-електронні прилади і вражати незахищені органи зору обраних особливо важливих цілей серед особового складу противника (командири, навідники, снайпери і т. п.). Для створення ефективних систем такої зброї найкращим варіантом вважається використання лазерів, що генерують випромінювання в тих областях електромагнітного спектра, в яких працюють розвідувальні оптико-електронні прилади і головки самонаведення керованих ракет, а очі людини мають максимальну спектральну чутливість.*

*Унікальні властивості лазера представляють високу небезпеку ураження органів зору людини. Лазерне випромінювання має високу енергію, яка здатна викликати в тканинах організму теплові, фотохімічні, ударно-акустичні та інші ефекти. Висока потужність лазерного випромінювання може призвести до ураження тканини за короткий проміжок часу. Щільність енергії випромінювання досягає високих вражаючих значень за допомогою малого розміру пучка. Пучок, поширюючись, змінюється незначно в силу невеликої розбіжності, відповідно, є присутнім ризик ураження навіть на великій відстані.*

*Поразка органів зору розглядається фахівцями як найбільш перспективний напрямок виведення особового складу з ладу при веденні бойових дій. Це пояснюється перш за все тим, що людина є кінцева і головна ланка в системі «машина (апаратура) – людина».*

*Потенційно висока бойова ефективність при прийнятних вартісних характеристиках є визначальним фактором для переходу до реалізації програм розробки комплексів лазерної зброї різного призначення з метою подальшого прийняття на озброєння.*

**Ключові слова:** лазерна зброя, лазерне випромінювання, оптико-електронні прилади, органи зору, бойова ефективність.

**Постановка проблеми.** Сучасні конфлікти низької інтенсивності різко підвищили роль снайперів в бойових діях. Дійсно, бойова практика показує, що кілька добре підготовлених і екіпірованих стрільців здатні в деяких ситуаціях зіграти вирішальну роль у результаті бойового зіткнення. У сучасних умовах оптичні засоби прицілювання і спостереження дозволяють ідентифікувати ціль діаметром 10 см на

відстані до 1000 метрів. На багатьох західних снайперських гвинтівках встановлюються оптичні приціли з кратністю збільшення до 10х, 16х і навіть 20х. [1].

Останнім часом серед снайперів почастишали розмови про лазерну зброя. На передовій вже зафіксовано випадки, коли снайпери сліпили на робоче око внаслідок нанесеного по ньому лазерного удару – просто через оптичний приціл.

Також стали дуже поширені ситуації, коли снайперів на позиціях швидко виявляють за допомогою портативних лазерних детекторів і наносять удар за допомогою традиційних засобів вогневого ураження – міномети, гранатомети, крупнокаліберні кулемети, ПТУРи тощо.

Як уберегтися? Питання дійсно непросте, але важливе. Для початку давайте розбиратись, із чим саме ми маємо справу.

Оптичний приціл через велику лінзу свого об'єктиву може давати відблиск від сонця, який буде видно за кілька кілометрів. Про це відомо усім, навіть початківцям. Але важливо розуміти, що подібний відблиск від прицілу можна побачити не лише за допомогою сонця. Замість нього можна використати лазерний промінь.

Принцип дії таких пристроїв побудовано на використанні фізичного ефекту світлоповернення, який полягає у властивості оптичних систем відображати зондує випромінювання у зворотньому напрямку під кутом, близьким до кута падіння.

Лазерні детектори оптичних систем працюють в інфрачервоному діапазоні, і ловлять відблиск зондує променя від лінзи оптичного прицілу чи іншого оптичного приладу. Вони бувають досить різні: найкомпактніші моделі за габаритами нагадують бінокль чи лазерний далекомір, сканування ними відбувається у ручному режимі. Більш складні мобільні лазерні радари мають систему розгортки променя і здатні автоматично сканувати заданий сектор простору, приблизно так само, як і звичайний радар.

Нарешті, найпотужніші та найсучасніші системи лазерної зброї, окрім модулю детектора, оснащені ще й бойовим лазером, який здатен засліпити та вивести з ладу оптико-електронні прилади або самого снайпера після того, як вони будуть знайдені лазерним радаром-детектором [2, с. 3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** До сучасної стрілецької зброї та засобів ближнього бою висуваються підвищені вимоги по влучності стрільби, оперативності відкриття вогню на поразку, можливості ведення озброєної боротьби як вдень, так і вночі [1, с. 2]. При цьому в умовах збройного конфлікту потрібно враховувати, що цілі, закриті засобами індивідуального захисту, можна вразити тільки в відкриті місця, що час, який встановлено на вибір найбільш важливої (небезпечної) цілі, дуже малий, а противник, який убезпечив себе маскуванню, веде снайперський вогонь у відповідь.

Реалізація цих вимог можлива, в першу чергу, за рахунок оснащення озброєння оптичними при-

цілами. А такий приціл можливо виявити і вразити противника за допомогою активної лазерної установки, малогабаритного локаційного пристрою [2, с. 2].

Будь-який локаційний пристрій складається з передавача, який здійснює генерацію і передачу зондує імпульсу у простір, та приймача, який сприймає випромінювання, відбите від цілі. Залежно від вимог, які висуваються до комплексу, таких як імовірності виявлення, робота в різних метеоумовах, висуваються ті чи інші вимоги до передавача та приймача, базовими з яких є вимоги до їх енергетичних параметрів.

Відповідно, розраховуючи величину енергії передавача, необхідно врахувати те, що енергія випромінювання не повинна бути дуже великою, щоб не осліпити випадково не тільки снайпера, а й «звичайну» людину, або не демаскувати процес лоціювання, а з іншого боку, досить великою, щоб атмосфера та інші фактори не впливали на роботу комплексу.

Рівень розвитку технологій лазерних високоенергетичних установок в останні роки показав, що стало можливим їх використання в якості засобів ураження вже в поточному десятилітті. Така зброя, за оцінкою зарубіжних фахівців, має суттєво підвищити ефективність застосування підрозділів збройних сил і змінити сам характер ведення бойових дій, особливо на театрі військових дій. Вона призначена, в першу чергу, для оснащення підрозділів поліції, але може застосовуватися і військовослужбовцями, наприклад, при веденні бойових дій в умовах міста і при несенні служби на блокпостах в ході контртерористичних операцій.

До числа пріоритетних відносяться програми розробки лазерної зброї (ЛЗ) різного базування, здатної вирішувати завдання протиповітряної оборони (ППО), протиракетної оборони (ПРО), протисупутникової боротьби, оптоелектронної протидії (ОЕП), нелетальної дії на живу силу противника тощо [3, с. 43].

Метою роботи є обґрунтування напрямків удосконалення озброєння на основі лазерних інформаційних технологій для забезпечення виконання основних завдань підрозділів Національної гвардії України.

**Виклад основного матеріалу.** Оптичні та оптико-електронні засоби (ОЕЗ) розвідки та прицілювання – найважливіший компонент забезпечення бойових дій в денних та нічних умовах. Від ОЕЗ залежить наведення зброї та отримання до 80% інформації про противника.

Широке застосування оптики зумовлено:

- високою інформативністю оптичного діапазону;
- високою достовірністю інформації;
- мобільністю засобів оптичної розвідки;
- високим ступенем підготовленості особового складу до роботи з оптико – електронними засобами.

Оптичні приціли стрілецького озброєння дозволяють виявити противника, який використовує засоби маскування, виконати оцінку дальності до цілі, використовуючи вимірні дальнощі, більш точно вводити кути прицілювання в залежності від дальності до цілі, напрямку та сили вітру тощо.

Тому залишається актуальним створення оптичних прицілів для автоматичної стрілецької зброї, побудованих за традиційними оптичними схемами.

Із підвищенням частки прицільного (снайперського) вогню різко збільшились поразки від стрілецької зброї, різко підвищились вимоги до засобів протидії їй. Необхідно забезпечити високоєфективний пошук малорозмірних цілей на всьому діапазоні дальності бойового застосування снайперської зброї, а також поразку цілей з першого пострілу, створивши максимально сприятливі умови для ведення бойових дій протягом тривалого часу. Виконання таких суперечливих вимог можливо тільки за рахунок розширення можливостей засобів протидії. Для вирішення, у одній конструкції, задач ефективного пошуку цілей та прицілювання в найбільш уразливі місця в сучасних засобах протидії використовуються нові технічні рішення.

Поява нових зразків стрілецької зброї, зокрема крупнокаліберних снайперських гвинтівків, висунуло нові вимоги до засобів протидії на великі відстані.

Ще один клас оптичних прицілів для стрілецької зброї, який бурно розвивається в теперішній час, – клас колімаційних прицілів. Незважаючи на простоту конструкції, колімаційні приціли при виконанні досить жорстких вимог, які висуваються до них, можуть забезпечити суттєвий приріст ефективності при стрільбі по цілях, які раптово з'являються та рухаються.

Але найбільш складним з технологічної точки зору залишається ведення бойових дій та прицільна стрільба вночі. Сучасні бойові статутні збройних сил розглядають нічний бій як звичайний вид бойової діяльності військ: «Хто погано бачить вночі, буде переможений».

На теперішній час оптоелектроніка переживає підйом. На початку 80-х років революцією в техніці нічного бачення стало поява електронно-оптичних перетворювачів (ЕОП) – підсилювачів

яскравості другого покоління, які дозволили відмовитись від активної підсвітки. З'явилась можливість, при збереженні основної технологічної характеристики нічних приладів – дальності виявлення, принципово зменшити їх розміри, працювати в умовах зоряного неба та підвищити витривалість приладів до засвічування.

Але усі нічні прилади мають один суттєвий недолік – залежність технічних параметрів від умов нічної освітленості. Постійне оптичне спостереження можуть забезпечити тільки тепловізійні прилади.

Тепловізійні прилади (ТВП) в ролі джерела інформації використовують власне випромінювання нагрітих тіл, яке не залежить від часу доби та освітленості. Випромінювання теплової енергії властиво усім об'єктам, температура яких більше цілкового нуля за шкалою Кельвіна. Тобто за допомогою ТВП можна спостерігати всі тіла і об'єкти в спектрі їх власного випромінювання, в області довжин хвиль, які відповідають робочому діапазону цих приладів. Виділення тепла займає значний діапазон довжин хвиль в середній і дальній областях інфрачервоного спектру – спектру з довжинами хвиль 3-5 мкм та 8-14 мкм.

Основні зусилля при вдосконаленні оптоелектронних приладів направлені на їх функціонування незалежно від часу доби та погоди (дощ, туман, тощо), наявності завад природного та штучного походження, застосування засобів маскування. Забезпечити виконання бойової задачі в таких умовах можливо тільки при об'єднанні в одній схемі каналів, які працюють в різних спектральних діапазонах [4, с. 4; 5, с. 26].

Виходячи з наведеного аналізу розвитку оптоелектронних приладів розвідки та прицілювання, можна зробити висновок про високу актуальність задачі розробки системи протидії таким засобам. Можливо також сформулювати основні вимоги до систем чи комплексів, які розробляються.

До них слід віднести в першу чергу такі вимоги:

- висока оперативність виявлення цілей;
- система повинна забезпечувати виконання бойової задачі в любий час доби, незалежно від умов спостереження;
- всі операції в роботі системи не повинні демаскувати її місце дислокації.

Досить давно був помічений цікавий ефект «зворотного відблиску» при підсвічуванні майже будь-якого оптичного приладу вузьконаправленим пучком світла. Ефект неважко спостерігати самостійно, достатньо направити промінь потужного



ліхтаря точно по осі прицілу, фотоапарата або монокуляра. Яскравий контрастний відблиск буде помітний, якщо дивитися в об'єктив під мінімально можливим кутом, майже паралельно променю ліхтаря. Причому абсолютно неважливо, що знаходиться по ту сторону оптики – матриця камери, око спостерігача або порожнеча – ефект буде [6, с. 330].

На вірогідність виявлення дуже мало впливають сторонні фактори, як, наприклад, конструкція прицілу або знаходження спостерігача за склом.

Обійти оптичний локатор складно. Саме цим способом оптичної локації і користуються «мисливці за мисливцями». Головною особливістю конструкції оптичних прицілів є наявність телескопічної системи (об'єктив, обертаюча система, прицільна планка, окуляр). Телескопічна система містить порядку шість лінз і прицільну планку, які мають велике (до 8 і більше) граничних по коефіцієнту заломлення поверхонь (повітря-скло). Кожна така поверхня є такою, що відбиває з коефіцієнтом 4,8%. Все це створює умови появи відбитого прицілом сигналу, в разі його освітлення, або сонячним світлом, або світловим сигналом спеціального джерела. Цей відбитий сигнал (відблиск) може бути демаскуючим чинником прицілу і снайпера в цілому.

Проте при цьому потрібно враховувати, що віддзеркалення від опуклих і увігнутих поверхонь лінз прицілу буде таким, що сильно розходиться, і у напрямі джерела підсвічування приходиться дуже мала частина падаючого на приціл сигналу. Відбитий сигнал від прицільної пластинки буде цілком направлений на джерело підсвічуючого сигналу. При цьому, оскільки пластинка знаходиться у фокусі об'єктиву, відбитий від неї

сигнал може складати до 10% величини енергії падаючого сигналу. Величина сфокусованого на пластинці сигналу в основному визначатиметься розміром вхідної апертури об'єктиву прицілу [6, с. 281].

Виходячи з характеристик оптичних прицілів приведених в таблиці 1, можна приблизно спрогнозувати, у яких оптичних прицілів імовірність виявлення буде найбільша.

Поклавши в основу побудови комплексу протидії снайперу з оптичним прицілом на зброї цей оптичний ефект, слід відмітити, що завдяки властивостям оптичних прицілів збільшувати віддалені від нас об'єкти, можна говорити про можливість використання в якості засобу ураження лазера великої потужності, внаслідок дії якого буде пошкоджено зір снайпера.

Але як в будь-якій справі завжди при використанні того чи іншого механізму або фізичного явища виникають технічні та теоретичні особливості.

Так, ураження снайпера комплексом протидії можливо у випадку забезпечення на вході його оптичного прицілу критичної частини енергії Q. Внаслідок фокусування на сітчатці утворюється густина енергії в  $10^5$  разів більше, ніж на роговиці, що призводить до опіку або розриву сітчатки і веде до повної втрати зору.

Густина енергії на сітчатці  $W_c$  збільшується при збільшенні діаметра зіниці, тому ймовірність ураження зростає для очей, які пристосовуються до темряви, тобто для більш розширеної зіниці.

$$W_c = W_p \frac{D_3^2}{2,30^2} \quad (1)$$

де  $W_p$  – густина енергії на роговиці;  
 $D_3$  – діаметр зіниці;  
 $\theta = 0,001$  рад. – кутовий розмір ока.

Таблиця 1

**Характеристики оптичних прицілів**

Основні характеристики оптичних прицілів					
Параметр	ПСП1	ПО 3,5х 21	ПО3,5х 17,5	ЦСП – 1	ПСО – 1
Збільшення, крат.	3-9	3,5	3,5	4	4
Кут поля зору, град	6°30' - 2° 30'	12°	5°	8°	6°
Діаметр вхідного зрачка, мм.	-	21	17,5	-	-
Діаметр вихідного зрачка, мм.	4,2 – 4,3	6	5	6,5	6
Віддалення вхідного зрачка, мм.	76 – 73	48	50	35	68
Максимум розрізнювання	10'' при 9 крат; 20'' при 3 крат	13''	-	13''	12''
Діапазон вивірки за висотою та напрямком	0 – 0,4	+36''	+1	0 – 0,4	-
Крок вивірки	0-0,025	17''	36''	-	0 – 0,05
Габарити (довжина, ширина, висота) мм.	400x83x144	190x71x63	135 (довж)	203x80x178	375x70x 132
Маса кг.	1,25	1,2	0,16	0,8	0,58

Імпульсне лазерне випромінювання на довжині хвилі 0,4–1,4 мкм. являє собою більшу загрозу ніж безперервне. Імпульсне випромінювання викликає як термічні так і механічні пошкодження ока.

Тиск  $P$ , здійснений лазерним випромінюванням на об'єкт, який опромінюється, визначається відповідним виразом:

$$P = I(1 + \rho) / C . \quad (2)$$

де  $C$  – швидкість світла,

$I$  – інтенсивність випромінювання,

$\rho$  – коефіцієнт відбиття випромінювання. Механічне пошкодження обумовлено появою ударної хвилі, що зумовлено появою градієнту тиску за рахунок об'ємного розширення ділянки нагріву тканини та віддачі матеріалу, що випаровується з поверхні.

Унаслідок випадкового руху променя і ока область пошкодження збільшується.

При використанні оптичних приладів враження очей прямим чи відбитим випромінюванням збільшується густина потоку енергії в число разів, яке дорівнює кратності збільшення оптичного приладу.

$$I_{вих} = I_{вх} \tau T_n \quad (3)$$

де:  $I_{вих}$ ,  $I_{вх}$  – вхідна та вихідна густина потоку потужності випромінювання;

$T_n$  – кратність збільшення оптики прицілу;

$\tau$  – коефіцієнт пропускання оптики приладу.

Приблизні значення того чи іншого результату враження представлені в таблиці 2.

Комплекс протидії діє в умовах ряду невизначеностей, важливішими з яких є:

1) характеристика снайпера (досвід, особливості виконання задачі, інформованість, тощо);

2) характеристика умов протидії (коефіцієнт прозорості атмосфери, умов видимості, освітленість об'єкта);

3) характеристика оптики прицілу (коефіцієнт пропускання, коефіцієнт зворотнього перевідбиття – «відблиск», вхідна апертура, поле зору).

Для того, щоб з урахуванням вказаних умов забезпечити враження ока снайпера, необхідно виявити приціл і навести на нього вражаюче випромінювання. Виявлення проводиться по «відблиску». Відблиск може бути створений сонячним випромінюванням. Але це значною мірою обмежує часовий інтервал виявлення та різко знижує

імовірність виявлення. Тому і використовується активне підсвічування [7, с. 160–162, 174].

Найважливішою умовою є орієнтування прицілу на комплекс враження. Якщо воно виконується в момент  $t$  і знаходиться в цьому положенні  $t_p$  одиниць часу, то ймовірність того що в інтервалі  $t = t_p + t_n + t_n$  відбудеться відворот прицілу або постріл снайпера, тобто комплекс не виконає задачу виявлення, може бути визначена таким співвідношенням:

$$1 - P(A_1) = \frac{F(t_p + t_n + t_n) - F(t_p)}{1 - F(t_p)} , \quad (4)$$

Звідси

$$P(A_1) = \frac{1 - F(t_p + t_n + t_n)}{1 - F(t_p)} , \quad (5)$$

де:  $t_p$  – час від моменту появи «відблиску»;

$t_n$  – час, який затрачено на наведення каналу ураження;

$t_n$  – час від моменту закінчення процесу наведення до моменту впливу вражаючого випромінювання;  $F(t)$  – інтегральний закон розподілення часу орієнтації у вказаному напрямку.

Ураховуючи тривалість імпульсу впливу  $\tau_i$  випромінювання, а також залежність величини помилок наведення від часу наведення, отримуємо:

$$P(A_1) = \frac{F(t_p + t_n + t_n + \tau_u)}{1 - F(t_p)} . \quad (6)$$

У більшості випадків

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} . \quad (7)$$

Тоді ймовірність впливу на снайпера буде визначатися виразом

$$P(A_1) = \exp \left\{ -\frac{t_p + t_n + t_n + \tau_u}{2b^2} \right\} . \quad (8)$$

За умови неавтоматизованого вирішення цієї задачі значення вказаної ймовірності для різних ситуацій (1- прозорість атмосфери – 0.7; 2 – прозорість атмосфери – 0.4 ) представлені на графіку рисунок 1.1.

Представлені в результаті розглядалися для неавтоматизованого виявленні і наведення вражаючого випромінювання комплексу придушення.

Але з аналогічних позицій можливо оцінювати діяльність снайпера. За умови руху мішені найбільш оптимальним часом для кінцевого при-

Таблиця 2

Оцінка параметрів впливу на снайпера

Об'єкт впливу	Оцінка параметрів впливу			Q (I)	Результат впливу
	$\lambda$ , мкм	E, Дж	F, Гц		
Оптико-візуальні засоби	0,512	$4 \times 10^{-8}$	$3 \times 10^{-3}$	$10 \text{ Вт/см}^2$	Осліплення оператора на $t$ дії
	0,58	$4 \times 10^{-8}$	$3 \times 10^{-3}$		

цілювання слід вважати 3 секунди, тому що для меншого часу різко збільшуються помилки прицілювання, а для більшого часу збільшується імовірність втрати цілі і власного виявлення.

Тому темп огляду простору системою виявлення слід мати не більш 3 секунди ( $t_p < \text{або} = 3 \text{ секунд}$ ). Крім того, значне підвищення імовірності може бути забезпечено за рахунок скорочення часу наведення ( $t_n$ ) та часу ураження ( $t_u$ ). Вирішення цієї задачі може бути забезпечено лише за умови автоматизації процесу виявлення та впливу.

**Висновки.** Необхідність широкого використання оптичних та оптоелектронних засобів у сучасному озброєнні зумовлене його високою інформативністю, мобільністю розвідки, високої готовності.

Протидія снайперу може бути забезпечено шляхом реалізації потужного випромінювання у спрямуванні оптичної осі прицілу чи другого оптоелектронного засобу. Енергія випроміню-

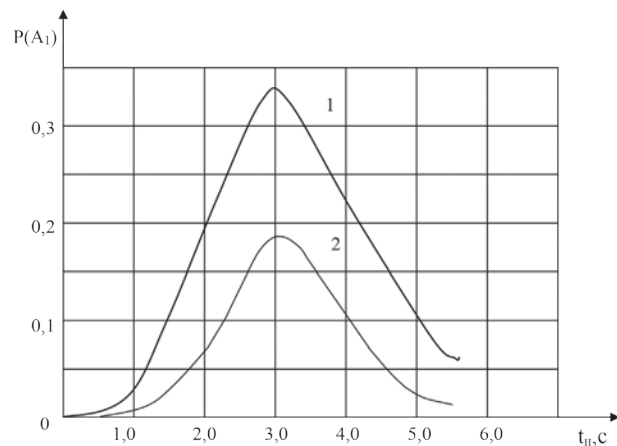


Рис. 1. Ймовірність ураження снайпера лазерним променем

вання повинна забезпечити ураження сітчатки ока снайпера чи приймальних елементів приймача наведення снайпера.

#### Список літератури:

1. Охота на снайпера. URL : [http://weaponland.ru/publ/okhota\\_na\\_snajpera/](http://weaponland.ru/publ/okhota_na_snajpera/) 19-1-0-253 (дата звернення: 05.11.2020).
2. Лазер проти снайпера: протидія сучасним лазерним детекторам оптичних приладів. URL : <http://ukrmilitary.com/2018/05/laser-vs-sniper.html> (дата звернення: 15.12.2020).
3. Фомкин Н. Приоритетные направления развития лазерного оружия за рубежом. *Зарубежное военное обозрение*. № 12. 2011. С. 43–46.
4. Волков В.Г. Применение активно-импульсных приборов наблюдения для видения бликующих элементов. *Вопросы оборонной техники*. 1995. Серия 11, вып. 1-2 Т. 144-145. С. 3–7.
5. Волков В.Г. Активно-импульсные ПНВ и тепловизионные приборы. Анализ возможностей применения. *Фотоника*. 4/2007. С. 24–28.
6. Прикладная оптика / Под редакцией А.С. Дубовика. Москва : Машиностроение, 1992. 480 с.
7. Дозиметрия лазерного излучения / Под редакцией Н.Д. Устинова. Москва : Радио и связь, 1983. 192 с.

#### Romanyuk V.A., Starodubtsev S.O., Dragan Y.A., Litvinov A.G., APPLICATION OF LASER AND OPTOELECTRONIC WEAPONS IN MILITARY FORMATIONS NATIONAL GUARD OF UKRAINE

*The main tasks of the National Guard of Ukraine include: protection of important state facilities, facilities of logistics and military support of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine, support of special cargoes, counteraction to terrorist threats. Solving such problems requires the widespread use of modern effective and reliable weapons of the personnel of divisions of the National Guard of Ukraine.*

*In a number of countries, work is underway to improve laser weapon systems. Some programs are improving tactical laser weapons. It allows you to disable optoelectronic devices and hit the unprotected organs of vision of selected particularly important targets among the enemy personnel (commanders, gunners, snipers, etc.). To create effective systems of such weapons, the best option is to use lasers that generate radiation in those areas of the electromagnetic spectrum in which reconnaissance optoelectronic devices and homing heads of guided missiles, and human eyes have maximum spectral sensitivity.*

*The unique properties of the laser pose a high risk of damage to human eyesight. Laser radiation has a high energy that can cause thermal, photochemical, shock-acoustic and other effects in body tissues. High power laser radiation can damage tissue in a short period of time. The radiation energy density reaches high impressive values due to the small size of the beam. The beam, spreading, changes slightly due to a small discrepancy, respectively, there is a risk of damage even at a great distance.*

*Defeat of the visual organs is considered by experts as the most promising area for the decommissioning of personnel during hostilities. This is due primarily to the fact that man is the final and main link in the system machine (equipment) - man.*

*Potentially high combat effectiveness with acceptable cost characteristics is a determining factor for the transition to the implementation of programs for the development of laser weapons for various purposes for further adoption.*

**Key words:** laser weapon, laser radiation, optoelectronic devices, visual organs, combat effectiveness.

## РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.396

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/07>

**Бешлей М.І.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Прислупський А.І.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Бешлей Г.В.**

Національний університет «Львівська політехніка»

### МЕТОДИ РОЗПОДІЛУ РАДІОРЕСУРСІВ ТА БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ В МЕРЕЖІ 5G / NB-IOT ДЛЯ НАДАННЯ КРИТИЧНО ВАЖЛИВИХ СЕРВІСІВ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

*Очікується, що 5G стане ключовим фактором нової хвилі розвитку систем Інтернету речей (IoT, Internet of things), а саме в збільшенні числа підключених розумних пристроїв і поліпшенні архітектури платформ. Нині технологія вузькосмугового Інтернету речей (NB-IoT, Narrowband Internet of Things) розрекламована як найкращий варіант зі співвідношення можливостей і вартості розгортання, оскільки для мережі не потрібен мережевий шлюз. Інші варіанти інфраструктури вимагають наявності шлюзів для збору даних із пристроїв і потім передавання їх до головного сервера. Не дивлячись на ряд істотних переваг використання технології NB-IoT у теперішніх 4G мережах, недоліком є те, що вона не придатна для критично важливих сервісів IoT, які вимагають забезпечення ультра надійного зв'язку з наднизькими затримками. Незважаючи на те, що стандарт NB-IoT досі перебуває на стадії тестування та вдосконалення, за технологією – велике майбутнє, оскільки саме вона повинна стати однією зі складових частин специфікації 5G-мереж для критично важливих сервісів IoT.*

*Саме тому в роботі запропоновано архітектуру мережі мобільного зв'язку 5G для надання критично-важливих сервісів Інтернету речей (IoT, Internet of things) шляхом виділення вузькосмугового спектра й перенесення частини функцій із базової станції eNodeB на контролер IoT. Розроблено метод пріоритетизації IoT трафіку для забезпечення якості обслуговування (QoS, Quality of service) у гетерогенній 5G / NB-IoT мережі. Запропоновано метод розподілу радіоресурсів у каналі зв'язку NB-IoT із метою забезпечення якості обслуговування з кінця в кінець. Розроблено алгоритми управління «розумною чергою» на основі методів пріоритетизації IoT трафіку й балансування навантаження в мережах 5G. Запропоновано метод балансування навантаження з урахуванням пріоритетів даних на основі зібраної статистики системи моніторингу ресурсів мережі LTE/IoT. Суть методу полягає в забезпеченні якості обслуговування пріоритетного трафіку IoT в умовах недостатності необхідних частотно-часових ресурсів у межах основної комірки обслуговування. Доведено, що комплексне використання розроблених методів пріоритетизації IoT трафіку й балансування навантаження дають змогу зменшити середню затримку передавання повідомлень реального часу з кінця в кінець до 3 разів, водночас роблячи систему NB-IoT придатною для забезпечення ультра надійного зв'язку з низькими затримками, що є важливим для розвитку мереж 5G.*

**Ключові слова:** Інтернет речей, вузькосмуговий Інтернет речей, якість обслуговування, критично важливі сервіси 5G, балансування навантаження.

**Постановка проблеми.** Пандемія, яка сколихнула світ, наочно продемонструвала бізнесу, наскільки важливо мати рішення, які допомагають зменшити витрати, дозволяють працівникам працювати віддалено, замінювати ручну працю тощо. Багато таких ноу-хау пов'язані з викорис-

танням Інтернету речей (IoT). NB-IoT – це вузькосмугова безпроводна технологія Інтернету речей, яка надає користувачам великий набір інструментів для оптимізації бізнес-процесів, зменшення експлуатаційних витрат за допомогою віддаленого моніторингу різних пристроїв. Проект

партнерства третього покоління (3GPP), який визначає стандарти 5G, зазначив, що NB-IoT буде частиною мереж 5G для масового розгортання сервісів Інтернету речей у найближчому майбутньому, проте з деякими відмінностями від сучасної технології NB-IoT, яка успішно розгортається в нинішніх мережах LTE 4G [1]. Це пов'язано з тим, що традиційна технологія NB-IoT / LTE не в змозі забезпечити вимоги щодо надійності чи затримки передавання даних для критичних IoT сервісів. Не дивлячись на те, що більшість нинішніх сервісів IoT не покладають таких вимог, проте в ближчому майбутньому такі сервіси, як тактильний та індустріальний Інтернет речей, зобов'язані збільшити затримку з кінця в кінець величиною в 10 мс, що своєю чергою є найскладнішим завданням з боку розгортання IoT у мережах 5G [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі [3] основна увага приділяється побудові імітаційної моделі NB-IoT на основі OPNET і тестуванню її характеристик в умовах високого навантаження на канали. Автори головним чином розглядають розробку й впровадження існуючої технології NB-IoT із боку характеристик фізичного рівня NB-IoT на основі LTE. Результати моделювання підтвердили продуктивність NB-IoT, де затримка висхідної лінії зв'язку менша за 10 с, використання каналу вище, ніж у мережі LTE, а зону покриття більшу, ніж у мережі LTE. Також показано, що NB-IoT у нинішньому вигляді не може використовуватися для критично важливих Інтернет-додатків через обмеження якості обслуговування. Якщо потрібно впровадити NB-IoT на основі мереж доступу LTE для критичних сервісів, потрібна модернізація NB-IoT.

Автори [4] систематично вимірюють фізичний рівень, а також перевіряють ефективність прикладного рівня. Особлива увага приділяється впливу радіопараметрів на прикладний рівень якості обслуговування. Робота досліджує послуги в режимі нереального часу через те, що існуюча технологія NB-IoT не підходить для критично важливих сервісів, які зобов'язують низьку затримку, і вимагає вдосконалення технології NB-IoT.

Нещодавно Чен і співавтори в [5] запропонували рішення щодо управління якістю послуг для IoT. Зокрема, автори вдосконалили алгоритм k-means для кластеризації пристроїв NB-IoT і встановлення пріоритету кластеру. Згідно з пріоритетами планувальник базової станції розподіляє сервіси IoT для завдань очікування в черзі. Недоліком такого рішення є складність реалізації в реальній мережі, оскільки такий підхід вимагає повного оновлення

планувальника програмних ресурсів на базовій станції. Неясно, як таке рішення вплине на роботу всієї мобільної мережі 5G.

**Постановка завдання.** В умовах поступового впровадження сервісів IoT на мережі оператора мобільного зв'язку однією з основних задач є адаптування якості сервісу (QoS) згідно з вимогами конкретного класу сервісу. Таким чином, механізми пріоритезації трафіку в мережах 4-го та 5-го покоління для систем IoT є одним із найважливіших аспектів, від якого надалі буде залежати розвиток Інтернету речей у світі. Одним з ефективних шляхів покращення основних параметрів якості обслуговування (QoS) в мережах 4G / 5G, що базуються на технології LTE, є застосування принципів оптимального розподілу мережевих ресурсів. Функції розподілу мережевих ресурсів у технології LTE покладені на систему управління радіоресурсами (RRM, Radio Resource Management) [6], а саме на планувальника (scheduler), відповідального за проектування ресурсів для станцій користувачів (UE, Users Equipment) і пристроїв IoT. До таких ресурсів насамперед належать символи (часовий ресурс) і частотні піднесучі (частотний ресурс). Найменшою структурною одиницею радіоресурсу, яку можна виділити тій чи іншій станції користувача, є ресурсний блок (RB, Resource Block) [7]. Необхідно зауважити, що рішення RRM про виділення мережевих ресурсів передусім ґрунтується на вимогах до QoS, а під час впровадження сервісів IoT з'являється необхідність у нових механізмах пріоритезації трафіку й управління якістю обслуговування в мережах 4G / 5G для забезпечення гарантованого QoS.

Метою роботи є забезпечення гарантованої якості обслуговування сервісів IoT шляхом розроблення методів управління якістю обслуговування з кінця в кінець, а саме методів пріоритезації трафіку, формування вузькосмугового NB-IoT каналу й розподілу його ресурсів у мережах 4G / 5G.

#### **Виклад основного матеріалу дослідження.**

Метод розподілу радіоресурсів у мережах 4G / 5G для надання критично важливих сервісів IoT у вузькосмуговому спектрі.

З розвитком сервісів IoT однією з основних задач є адаптування QoS згідно з вимогами конкретного виду сервісу. Таким чином, механізми пріоритезації трафіку в мережах 5G для систем IoT є одним із найважливіших аспектів, від якого надалі буде залежати розвиток Інтернету речей у світі.

У роботі вперше розроблено метод розподілу частотно-часових ресурсів низхідного

й висхідного каналу зв'язку гетерогенної мережі LTE / NB-IoT, який на відміну від відомих урахує вимоги щодо рівня якості надання критично-важливих сервісів Інтернету речей і проводить адаптивне інтелектуальне планування процесом виділення радіоресурсів на основі аналізу пріоритетності даних, зокрема у вузькосмуговому NB-IoT спектрі, що дало змогу забезпечити необхідну якість обслуговування з кінця в кінець.

Визначення класу, до якого належить той чи інший трафік UE, пропонуємо проводити на основі параметру QCI (QoS Class Identifier). Параметр QCI може приймати один із дев'яти станів, кожен з яких, відповідно, асоціюється з певним видом сервісу, а отже, і з видом каналу передачі, швидкістю, коефіцієнтом помилок і затримкою. QCI є міткою в пакеті IPv6 «ID каналу». Для сервісів IoT запропоновано метод пріоритизації трафіку, який базується на основі критерію допустимих затримок і середньої кількості відмов в обслуговуванні. Згідно з роботою [8], авторами запропоновано 4 класи (L1, L2, L3 та L4) сервісів IoT із різними вимогами до QoS. QCI<sub>IoT</sub> є міткою в пакеті IPv6, значення якої записується в полі ToS. Зокрема, критично важливими сервісами IoT є L1 та L2 класи.

На рис. 1 показано процедуру оптимального використання схеми модуляції та кодування для забезпечення QoS на фізичному рівні в мережі NB-IoT / 5G, після чого механізм планування пропускної здатності використовується LTE та IoT планувальниками для виділення UE та IoT пристрою ресурсу для забезпечення QoS.

Найменшим елементом у частотно-часовій області кадру IoT є ресурсний блок, який складається з 12 згрупованих частотних піднесучих. Ресурсний блок займає 180 кГц у частотній і 0,5 мс у часовій області. Конфігурацію RB у частотно-часовій області ілюструє рис. 2. Кількість піднесучих OFDM або SC-FDMA символів в одному ресурсному блоці залежить від відстані між піднесучими, а також від значення циклічного префікса (CP, Cyclic Prefix).

Таким чином, запропоновано розподіляти ресурси в низхідному й висхідному каналах IoT, використовуючи запропоновані алгоритми управління «розумною чергою», зокрема алгоритм для каналу вниз показаний на рис. 2.

Детальний принцип роботи алгоритмів управління чергою розглядається далі. Для цього в роботі здійснено модифікацію логічних каналів управління з метою гнучкого управління QoS на каналному рівні. Зокрема, додатково введено нові

Таблиця 1

Характеристики QCI<sub>IoT</sub>

QCI <sub>IoT</sub>	Тип	Пріоритет	Допустима затримка T, мс	Допустимі відмови в обслуговуванні, P <sub>v</sub> %	Клас IoT
1	Гарантований час передавання даних (GBR <sub>IoT</sub> ), трафік реального часу	1	10	0,01	L1
2		2	20	0,1	L2
3	Гарантований час передавання даних (GBR <sub>IoT</sub> ), трафік нереального часу	3	1000	5	L3
4	Негарантований час передавання даних (Non-GBR <sub>IoT</sub> )	4	t <sub>невизначене</sub>	P <sub>невизначене</sub>	L4

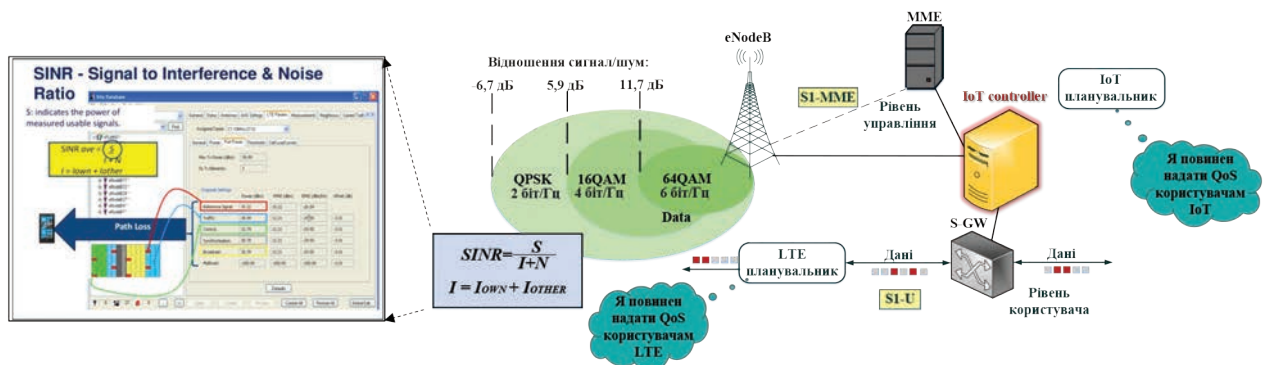


Рис. 1. Процес розподілу ресурсів у пропонуваній мережі 5G / NB-IoT

канали, які передають сигнальну інформацію про блок ресурсів для конкретного сенсора IoT із його пріоритетом та унікальним ідентифікатором пристрою. На відміну від відомих рішень, ці канали дають змогу виділити один ресурсний блок для передавання невеликого повідомлення від датчика IoT і забезпечити мінімальну затримку 0,5 мс у кадрі. Ці затримки особливо важливі для тактичних даних IoT у реальному часі, які забезпечити в традиційній NB-IoT неможливо. У роботі проведено модифікацію для контрольних каналів, які складаються з LTE PDCCN, каналів опорних сигналів, специфічних для комірок LTE, і інтелектуальних каналів управління узгодженості черг на контролері IoT, що взаємодіють із кінцевим пристроєм IoT. Канал управління також передає інформацію контролеру про використання ресурсів. Ці канали управління пропонуються для гнучкості управління QoS на рівні зв'язку, який передає сигналізаційну інформацію про блок ресурсів для конкретного повідомлення датчика IoT із його пріоритетом та унікальним ідентифікатором пристрою.

**Метод балансування навантаження в мережі 4G / 5G для забезпечення сервісам IoT ультра-надійного зв'язку з низькими затримками.**

Одним зі способів, пропорованих у роботі, є забезпечення необхідної якості обслуговування на

основі використання засобів моніторингу мережі. Використання централізованого моніторингу дає змогу визначити пріоритетні напрями розвитку цілої мережі. Визначивши стан мережі рівня радіодоступу, можна знайти й передбачити вузькі місця під час обслуговування користувачів та IoT пристроїв. У роботі запропоновано метод балансування навантаження з урахуванням пріоритетів даних на основі зібраної статистики системи моніторингу ресурсів 5G / NB-IoT. Суть методу полягає в забезпеченні якості обслуговування пріоритетного трафіку IoT в умовах недостатності необхідних частотно-часових ресурсів у межах основної комірки обслуговування.

У такому випадку пропонується за допомогою системи моніторингу ресурсів, за яку відповідає нововведений в архітектуру LTE IoT контролер, перенаправляти трафік IoT реального часу класу L1 на обслуговування альтернативної (додаткової) базової станції eNodeB (рис. 3).

Таким чином, у роботі набув подальшого розвитку метод балансування навантаження в мережі LTE / NB-IoT, який на відміну від відомих в умовах недостатності необхідних ресурсів для обслуговування критично-важливих IoT даних у межах основної базової станції дав змогу на основі розробленої централізованої системи моніторингу частотно-

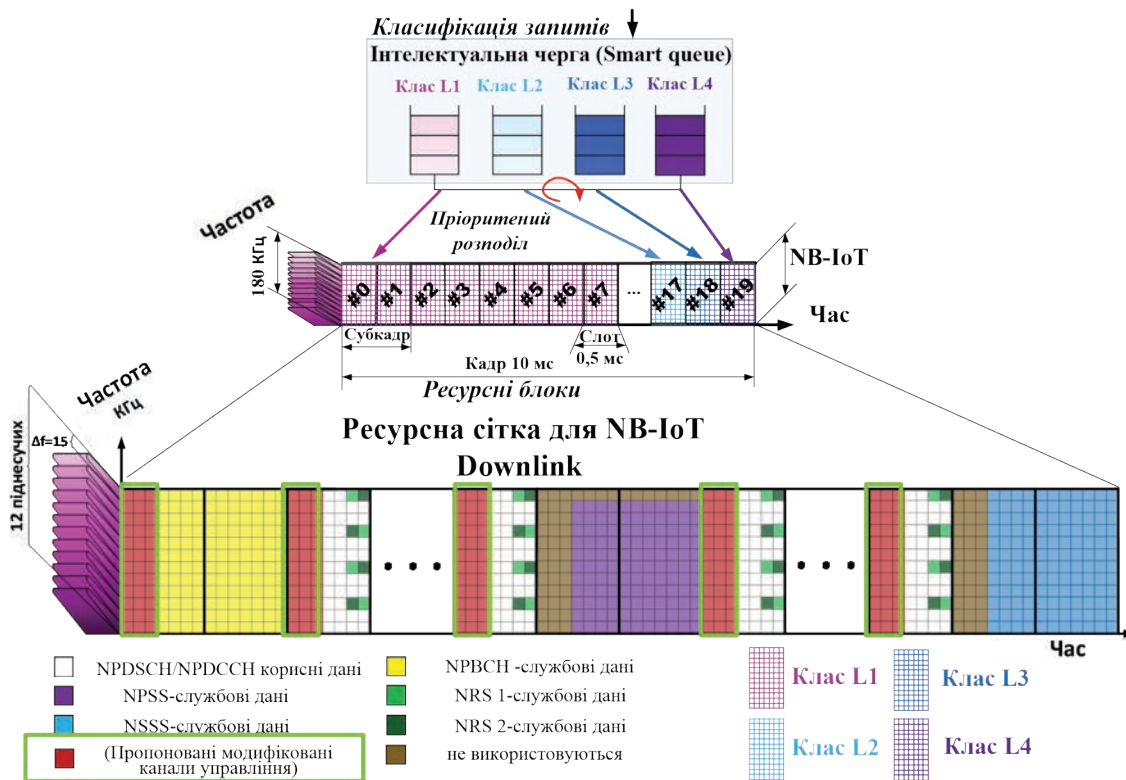


Рис. 2. Ресурсна сітка NB-IoT для низхідного каналу зв'язку

часових ресурсів та аналізу пріоритету забезпечити ультранадійний зв'язок із низькими затримками шляхом перенаправлення на обслуговування менш завантаженої альтернативної базової станції.

Розроблення алгоритмів управління «розумною чергою» на основі методів пріоритизації та балансування IoT трафіку в мережах 4G / 5G.

У роботі запропоновано алгоритми управління «розумною чергою» на основі запропонованого методу пріоритизації та балансування IoT трафіку в гетерогенній мобільній мережі 5G.

*Для критично важливого сервісу IoT класу L1.*

Під час запуску алгоритму базова станція очікує на запит на передавання даних (блок 1). Після цього проходить аналіз пріоритету пристрою, з якого відбуватиметься передавання. Установлюється, що пріоритет пристрою є L1 (найвищий). Проводиться аналіз черги й ресурсів мережі для здійснення передавання даних (блок 2). Якщо є наявні ресурси, то здійснюється конфігурація базової станції (блок 3) і відправляються сигналізаційні дані й запит на передавання до IoT пристрою (блок 4). Після успішної передачі відбувається збереження статистики (блок 12) для подальшого прогнозування активності IoT пристрою. У протилежному випадку перевіряється можливість звільнення ресурсів шляхом пристроїв класу L3 (блок 7). Якщо можна звільнити ресурси, то IoT device класу L3 відтермінується, черга реорганізовується (блок 8) і можна переходити з блоку 6 у блок 3. Якщо наявних ресурсів недостатньо, відбувається

пошук альтернативних базових станцій (блок 5), в яких є вільні ресурси для передавання даних. Якщо існує така базова станція (блок 6), то резервуються ресурси в спектрі частот для IoT сервісів (блок 7) і конфігурується альтернативна базова станція (блок 8). Відправляються сигналізаційні дані й запит на передавання до IoT пристрою (блок 9). Після успішної передачі відбувається збереження статистики (блок 12). У випадку, якщо ресурсів у спектрі для IoT сервісів на альтернативній базовій станції недостатньо, здійснюється передача обслуговування з'єднання в загальний канал зв'язку (блок 10). Відправляються сигналізаційні дані й запит на передавання до IoT пристрою (блок 11), і він обслуговується як абонент мобільної мережі. Після успішної передачі відбувається збереження статистики (блок 12). Завершується робота алгоритму (блок 13). Блок-схема алгоритму роботи зображена на рис. 4а.

*Для критично важливого сервісу IoT класу L2.*

Під час запуску алгоритму базова станція eNodeB очікує на запит встановлення з'єднання (блок 1). Після оброблення всіх запитів проводиться аналіз класу пристроїв, які підключилися, і трафіку, який вони будуть передавати. Усі під'єднані пристрої заносяться в чергу відповідно до класів яким вони належать (по пріоритетах). На основі отриманих даних перевіряється доступність ресурсів для передавання трафіку від пристроїв класу L2 (блок 2). Якщо ресурсів достатньо, то застосовується алгоритм для L1 (блок 3).

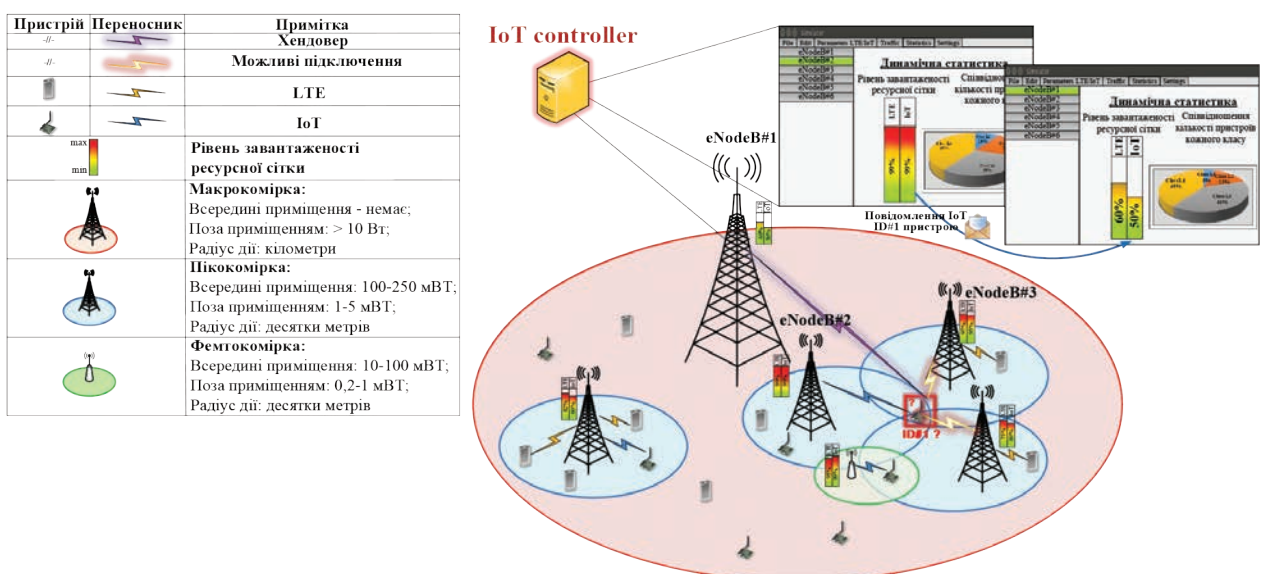


Рис. 3. Принцип роботи методу балансування навантаження з урахуванням пріоритетів даних на основі зібраної статистики системи моніторингу ресурсів LTE / IoT



Якщо ресурсів не вистачає, то аналізується черга й визначається час відтермінування передавання (блок 4). Перевіряється доступність ресурсів у межах допустимої затримки для класу (блок 5). У випадку доступності ресурсів для передавання трафіку впродовж допустимого часу затримки вносимо IoT пристрій у чергу й переходимо до алгоритму для L1 (блок 6→3). У протилежному випадку перевіряється можливість звільнення ресурсів шляхом пристроїв класу L3 (блок 7). Якщо можна звільнити ресурси, то IoT пристрій класу L3 відтермінується, черга реорганізується (блок 8) і можна перейти з блоку 6 у блок 3. Якщо ресурси неможливо звільнити, то проводиться пошук альтернативних базових станцій (блок 9). Далі виконується перевірка того, чи можна здійснити передавання трафіку в межах допустимої затримки в разі використання альтернативної базової станції (блок 10). Якщо можна, то відбувається резервування ресурсів на альтернативній базовій станції та конфігурація альтернативної базової станції (блок 11–12). Після

цього відбувається налаштування IoT пристроїв для роботи з альтернативною базовою станцією (блок 13). Далі відбувається збереження статистики для подальшого прогнозування (блок 14). Якщо не можна, то у власній черзі резервується доступний ресурс (блок 15). Далі конфігурується базова станція (блок 16), а також IoT пристрій для передавання через деякий час (блок 17). Далі відбувається збереження статистики для подальшого прогнозування (блок 14). Наприкінці відбувається повернення на початок алгоритму (блок 18). Блок-схема алгоритму роботи зображена на рис. 4б.

Моделювання та дослідження ефективності запропонованих рішень на основі розробленої імітаційної моделі мережі LTE / NB-IoT.

Для дослідження ефективності запропонованих рішень розроблено імітаційну модель гетерогенної мобільної мережі LTE/NB-IoT. Така модель реалізована у вигляді java симулятора дискретних подій, для цього використано Discrete-Event Simulation and Modelling in Java DESMO-J (DESMO-J), що містить такі функціональні кла-

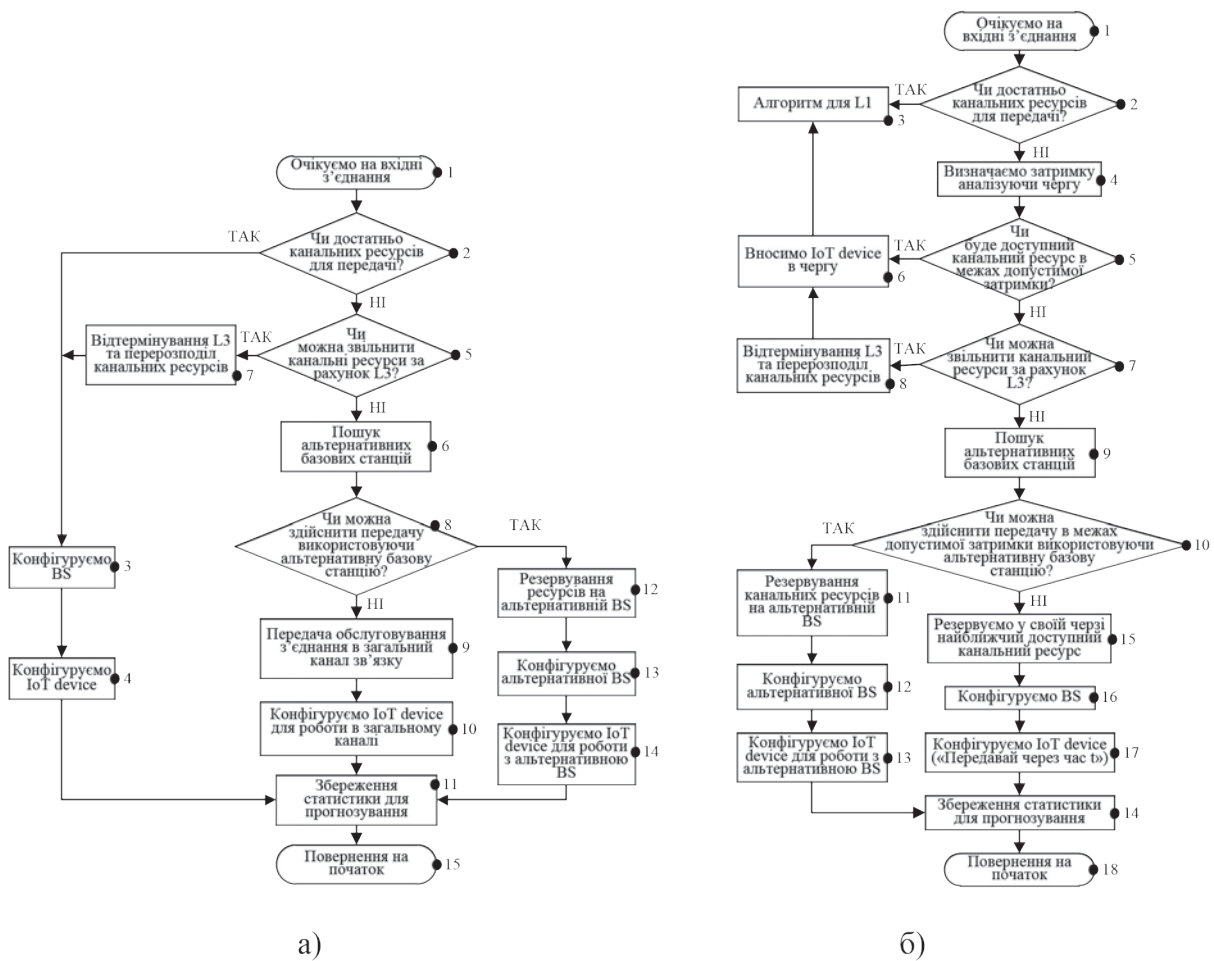


Рис. 4. Блок-схема алгоритму управління «розумною чергою» для класу L1 – а) та L2 – б)

сові блоки, як черги, генерація випадкових чисел і різних статистичних розподілів.

Спрощена структурно-функціональна схема моделі зображена на рис. 5, де червоним кольором показано нововведені блоки, реалізовані у вигляді додаткових програмних надбудов.

*IBN / IoT контролер* забезпечує моніторинг стану каналних ресурсів базових станцій для передавання повідомлень, виділення необхідних каналних ресурсів для конкретних IoT пристроїв, перерозподіл каналних ресурсів між кінцевими пристроями, а також збір, опрацювання та аналіз статистичних даних підключень.

Якщо каналні ресурси забезпечують обслуговування в межах допустимої затримки, то вони закріплюються за IoT пристроєм. IoT контролер відправляє відповідь із номером каналних ресурсів на поточну базову станцію. Базова станція перенаправляє відповідь на IoT пристрій, який аналізує її та очікує на свій каналний ресурс, в якому й буде передавати інформаційне повідомлення через базову станцію на IoT брокер. Останній зберігає інформацію, передану в повідомленні. Якщо немає вільних каналних ресурсів, то запит обслуговується згідно з вищеописаними алгоритмами.

Основні вхідні дані для моделі:

- кількість IoT пристроїв – 2 000;
- кількість ресурсних блоків у вузькосмуговому спектрі – 200 кГц;
- види модуляції – BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM;
- середня довжина повідомлення від IoT пристроїв залежно від обраної модуляції – 10 ресурсних блоків;
- середнє навантаження –  $\rho_i$ , де  $i = 1, 2, 3, 4, 5$  що враховується для контролера IoT, зокрема  $\rho_1 = 0.12$ ,  $\rho_2 = 0.18$ ,  $\rho_3 = 0.5$ ,  $\rho_4 = 0.75$ ,  $\rho_5 = 1$ ;

– співвідношення розподілу IoT пристроїв по класах –  $R\_L1 = 10\%$ ,  $R\_L2 = 20\%$ ,  $R\_L3 = 30\%$  та  $R\_L4 = 40\%$ ;

– допустимі затримки для кожного класу пристроїв –  $D\_L1 = 10$  мс,  $D\_L2 = 20$  мс,  $D\_L3 = T_{з.допустима}$ ,  $D\_L4 = T_{з.допустима}$ ;

– типи тривалості затримок: поширення сигналу за безпроводним каналом, за часом оброблення сигналу на базовій станції, за провідним середовищем, за часом оброблення IoT контролером, IoT пристроєм і часом очікування передавання даних.

Тривалість передавання даних IoT пристроїв із кінця в кінець визначається за формулою 1.

$$T_{3.E2E} = 3 \cdot t_{\text{пош.сигн.безпров.}} + 3 \cdot t_{\text{обр. BS.}} + 3 \cdot t_{\text{пош.сигн.пров.}} + t_{\text{обр. IoT контрол.}} + t_{\text{обр. IoT пристр.}} + t_{\text{очікув. передаванн}} \quad (1)$$

де  $t_{\text{пош.сигн.безпров.}}$  – затримка поширення сигналу за безпроводним каналом;  $t_{\text{обр. BS.}}$  – затримка оброблення сигналу на базовій станції;  $t_{\text{пош.сигн.пров.}}$  – затримка поширення сигналу за провідним середовищем;  $T_{\text{обр. IoT контрол.}}$  – затримка оброблення IoT контролером;  $t_{\text{обр. IoT пристр.}}$  – затримка оброблення IoT пристроєм і затримка очікування передавання даних  $t_{\text{очікув. передаванн}}$ .

#### Етапи моделювання.

Моделювання проводиться в три етапи:

*Перший етап* (I) полягає в дослідженні E2E QoS під час обслуговування потоку вхідних запитів за принципами існуючого методу (*Proportional Fair Scheduling*). *Другий етап* (II) полягає в дослідженні E2E QoS під час обслуговування потоку вхідних запитів згідно із запропонованим методом пріоритизації трафіку IoT (*P.IoT*).

*Третій етап* (III) полягає в дослідженні E2E QoS під час обслуговування потоку вхідних запитів за одночасної реалізації методів пріоритизації трафіку (*P.IoT*) і балансуванні навантаження (*LB.IoT*).

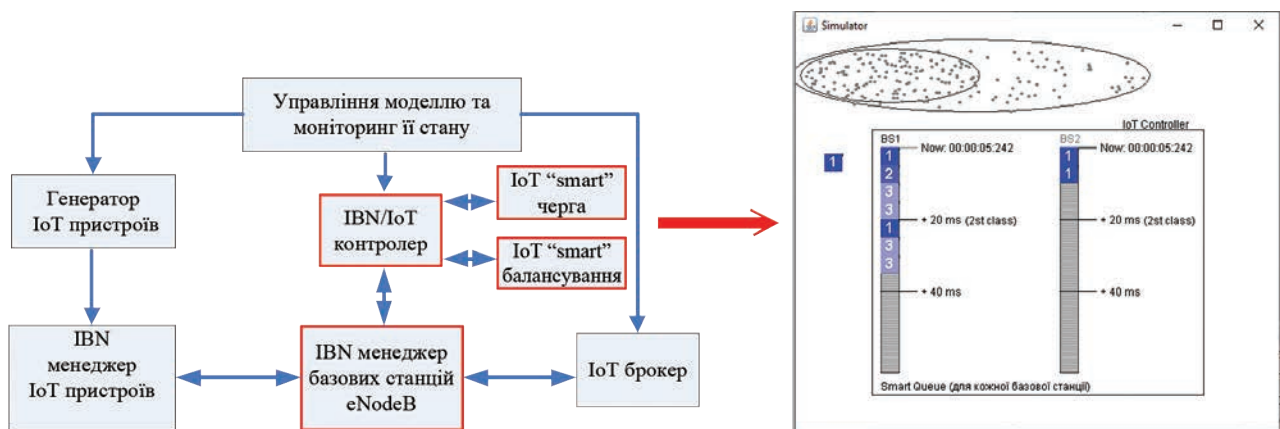


Рис. 5. Структурно-функціональна схема імітаційної моделі мережі 5G / NB-IoT

Одночасна робота методу пріоритизації IoT трафіку й методу балансування навантаження забезпечує зменшення середньої затримки E2E для пристроїв, які передають дані в режимі реального часу (L1, L2), шляхом збільшення середньої затримки передавання для пристроїв, які не чутливі до затримки (L3, L4) (рис. 6а). Відсоток відмов в обслуговуванні для пріоритетних пристроїв у разі застосування запропонованих методів зображений на рис. 6б.

На такому етапі моделювання одночасно працює метод пріоритизації IoT трафіку й метод балансування навантаження. Унаслідок цього в разі перевантаження поточної базової станції частина пріоритетних пристроїв передається на обслуговування іншій базовій станції, як показано на рис. 6в.

На основі імітаційного моделювання встановлено, що методи пріоритизації IoT трафіку й балансування навантаження дають змогу зменшити середню затримку передавання повідомлень реального часу з кінця в кінець на 68,8% у гетерогенній мережі LTE / NB-IoT (рис. 7б). У разі використання механізму пріоритизації зменшується кількість відмов в обслуговуванні на 58% для класу L1 і 76% – для L2 у порівнянні з існуючими методами в умовах високого навантаження (рис. 7в). У випадку одночасного використання запропонованих рішень досягається мінімальна кількість відмов для сервісів IoT класу L1 і L2 в умовах недовантаженості альтернативних базових станцій.

**Висновки.** Розроблено алгоритми управління «розумною чергою» для розподілу радіоресурсів у вузькосмуговому спектрі 5G мережі на основі методу пріоритизації IoT трафіку. Використання алгоритмів дасть змогу операторам мобільного зв'язку забезпечити необхідний рівень якості обслуговування сервісів IoT у мережах 5G. Запропоновано метод балансування навантаження з урахуванням пріоритетів даних на основі зібраної статистики системи моніторингу ресурсів мережі 5G. Суть методу полягає в забезпеченні якості обслуговування пріоритетного трафіку IoT в умовах недостатності необхідних частотно-часових ресурсів у межах основної комірки обслуговування. На основі отриманих результатів моделювання доведено, що метод балансування навантаження та метод пріоритизації трафіку дають змогу забезпечити якість обслуговування трафіку реального й нереального часу з кінця в кінець, а саме зменшити середню затримку передавання повідомлень реального часу з кінця в кінець на 68,8% у гетерогенній мережі LTE / NB-IoT. Під час використання механізму пріоритизації, зменшується кількість відмов в обслуговуванні на 58% для класу L1 і 76% – для L2 у порівнянні з існуючими методами. В умовах одночасного використання запропонованих рішень досягається мінімальна кількість відмов для сервісів IoT класу L1 і L2 в умовах низького навантаження альтернативних базових станцій.

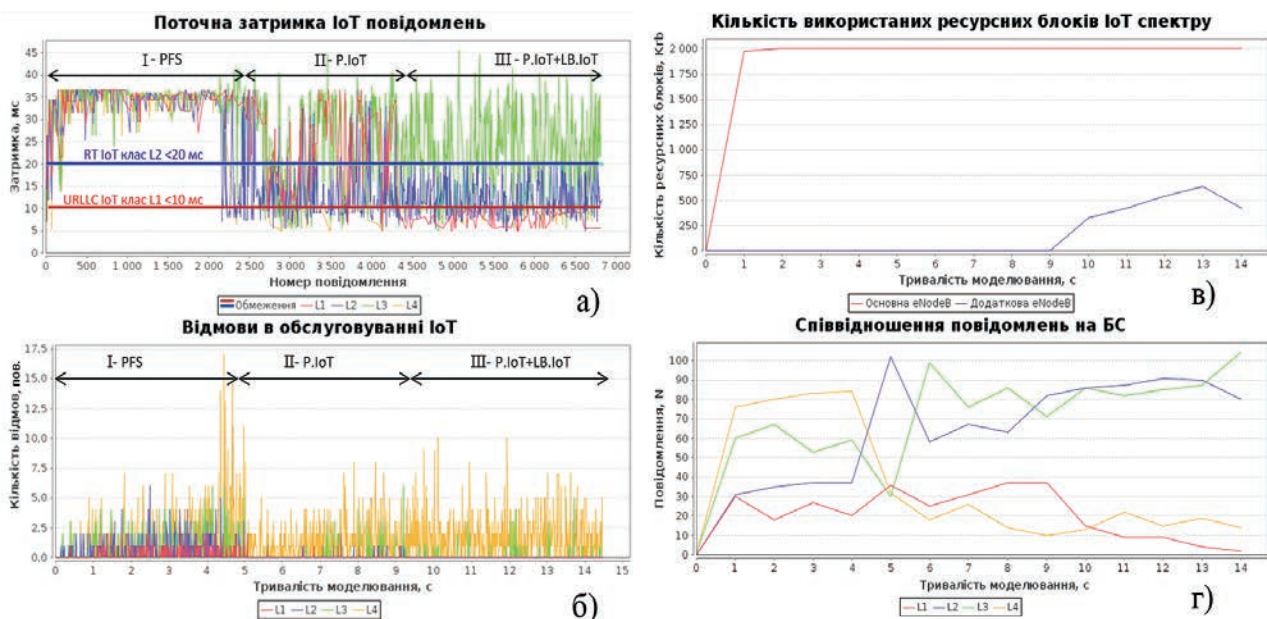


Рис. 6. Поточна затримка в процесі передавання IoT повідомлень – а), кількість відмов – б), кількість використаних ресурсних блоків IoT спектру – в) і співвідношення кількості переданих повідомлень різних пріоритетів – г)

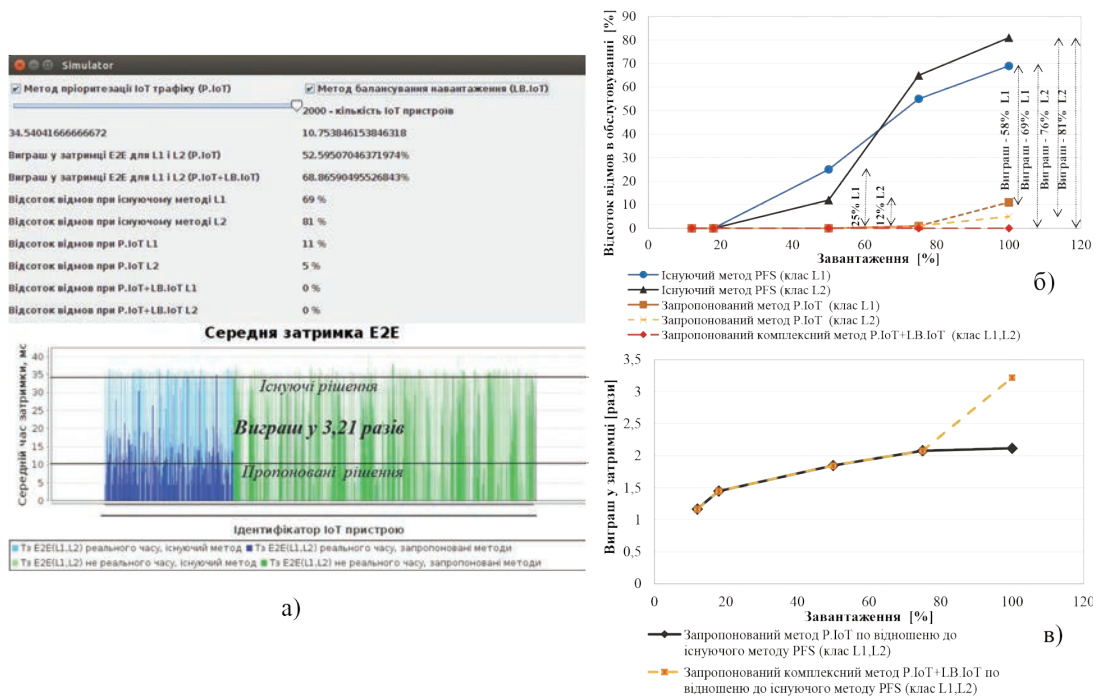


Рис. 7. Графічний інтерфейс імітаційної моделі результатів порівняння ефективності запропонованих рішень – а), оцінка ефективності запропонованих методів у порівнянні з відомим PFS методом за критерієм «відмов в обслуговуванні» для пріоритетних IoT пристроїв (класів L1, L2) – б) і «затримки обслуговування» – в) в умовах різного завантаження IoT контролера

**Список літератури:**

- Rahimi R., Zibaenejad A., Safavi A. A Novel IoT Architecture based on 5G-IoT and Next Generation Technologies. *2018 IEEE 9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*. 2018. P. 81–88.
- Akprakwu G.A., Abu-Mahfouz A.M. A Survey on 5G Networks for the Internet of Things: Communication Technologies and Challenges. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 3619–3647.
- Miao Y., Li W., Tian D., Hossain M.S., Alhamid M.F. Narrowband Internet of Things: Simulation and Modeling. *IEEE Internet of Things Journal*. 2018. Vol. 5. No. 4. P. 2304–2314.
- Matz A.P., Fernandez-Prieto J.-A., Cañada-Bago J., Birkel U. A Systematic Analysis of Narrowband IoT Quality of Service. *Sensors*. 2020. Vol. 20. No. 6. P. 1636–1672.
- Chen X., Li Z., Chen Y., Wang X. Performance Analysis and Uplink Scheduling for QoS-Aware NB-IoT Networks in Mobile Computing. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 44404–44415.
- Гаркуша С.В., Гаркуша О.В. Розробка математичної моделі управління пропускнуою здатністю низхідного каналу зв'язку технології LTE, що використовує перший вид розподілу ресурсів. *Вісник Національного університету Львівська політехніка. Радіоелектроніка та телекомунікації*. 2015. № 818. P. 211–219.
- Kim Y., Park S. Analytical Calculation of Spectrum Requirements for LTE-A Using the Probability Distribution on the Scheduled Resource Blocks. *IEEE Communications Letters*. 2018. Vol. 22. No. 3. P. 602–605.
- Beshley M., Kryvinska N., Seliuchenko M., Beshley H., Shakshuki E., Yasar A. End-to-End QoS “Smart Queue” Management Algorithms and Traffic Prioritization Mechanisms for Narrow-Band Internet of Things Services in 4G / 5G Networks. *Sensors*. 2020. Vol. 20. No. 8. P. 2324-1–2324-30.

**Beshley M.I., Pryslupskyi A.I., Beshley H.V. RADIO RESOURCE ALLOCATION AND LOAD BALANCING METHODS IN A 5G / NB-IOT NETWORK TO PROVIDE CRITICAL IOT SERVICES**

It is expected that 5G will be a key factor in the new wave of IoT (Internet of things) development, namely the increase in the number of connected smart devices and improvements in platform architecture. Today, NB-IoT (Narrowband Internet of Things) technology is touted as the best option for features and deployment costs since the network does not require a gateway. Other infrastructure options need gateways to collect data from devices and then transmit it to a master server. While there are some significant advantages to using

*NB-IoT on today's 4G networks, the main drawback is that it is not suitable for mission-critical IoT services that require ultra-reliable, ultra-low latency connectivity. Although the NB-IoT standard is still in the testing and improvement phase, the technology has a great future. It should become one of the components of the 5G-network specification for critical IoT services.*

*That's why this paper proposes a 5G mobile network architecture is proposed to provide critical IoT services by allocating narrowband spectrum and transferring part of the functions over the base station eNodeB to the IoT controller. A method for prioritizing IoT traffic to provide QoS in a heterogeneous 5G / NB-IoT network is developed. A method for allocating radio resources in the NB-IoT communication channel to ensure end-to-end quality of service is proposed. Smart queue management algorithms based on IoT traffic prioritization and load balancing methods in 5G networks are developed. A method of load balancing with data priorities based on the collected statistics of the LTE / IoT network resource monitoring system is proposed. The essence of this method is to ensure the quality of service of priority IoT traffic in the absence of necessary frequency-time resources within the main service cell. It is proved that the integrated use of the developed methods of IoT traffic prioritization and load balancing, can reduce the average latency of real-time end-to-end messages up to 3 times, while making the NB-IoT system suitable for providing ultra-reliable communication with low latency, which is important for the development of 5G networks.*

**Key words:** *Internet of things, narrowband Internet of things, quality of service, 5G mission-critical services, load balancing.*

**Гарист А.В.**

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз  
Служби безпеки України

**Білевська О.С.**

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз  
Служби безпеки України

## ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ПРИЙМАЧІВ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ ПРОГРАМНО-ОБУМОВЛЕНОГО РАДІО

*Використання і застосування приймальних пристроїв для вирішення різноманітних завдань у сучасних умовах потребує уніфікації обладнання, тобто можливості використання для різних завдань і цілей. Спочатку всі приймальні пристрої створювалися з окремих компонентів, які склалися у блоки та виконували певні математичні перетворення сигналу, що приймався антеною для отримання корисного сигналу на виході. Наприклад, супергетеродинний приймач здійснює попереднє підсилення сигналу, перетворення частоти, фільтрацію отриманого сигналу смуговим фільтром та декодування сигналу.*

*Незважаючи на аналогову елементну базу, проектування складного радіоелектронного пристрою подібне до проектування програмної системи, тобто ми розбиваємо систему на функціональні блоки, а блоки на підблоки, поки не дійдемо до елементарних операцій, таких як підсилення, фільтрація, детектування та інших.*

*Нині є можливість спочатку перетворити сигнал із антени у цифрову форму, а потім здійснити перераховані операції на цифрових процесорах. Водночас проектування систем можна здійснювати як за допомогою блок-схем, так і різноманітних мов програмування.*

*У зовсім недавньому минулому бездротові радіосистеми мали таку конструкцію, що пристрій підтримував один або два типи сигналу і між собою могли зв'язуватися тільки однотипні пристрої, що було і є сильним обмеженням і значно ускладнювало організацію зв'язку між різнотипними пристроями. Через те постійно відчувалася потреба у гнучкій архітектурі, яка могла б змінюватися за допомогою програмного забезпечення.*

*Технологія програмно-обумовлених радіосистем (Software Defined Radio) — це відносно нове слово у галузі розроблення бездротових пристроїв. Суть технології програмно-обумовленого радіо (далі — ПОР) полягає в тому, що базові параметри приймально-передавального пристрою визначаються саме програмним забезпеченням, а не апаратною конфігурацією, яку ми звикли бачити у класичних конструкціях. Йдеться не тільки про радіочастотні параметри систем, такі як вид модуляції, потужність високочастотного сигналу, чутливість, вибірковість, пригнічення гармонік, яке можна зробити за допомогою комутації відповідних вузлів приладу, але і про протокольну частину. Ми можемо спостерігати повне переродження апаратури, яка раніше могла виконувати тільки одну суворо задану функцію. Наприклад, вид модуляції передавача управляється вбудованим мікроконтролером. Відповідно і приймач для демодуляції сигналу також використовує програмні засоби. Це актуально для безлічі вузлів пристроїв бездротового інтерфейсу, для підсистем модулювання і кодування, аналого-цифрового і цифро-аналогового перетворення.*

**Ключові слова:** Програмно-обумовлене радіо, аналогово-цифровий перетворювач, цифро-аналоговий перетворювач, цифровий сигнальний процесор, супергетеродинний приймач, проміжна частота, цифрова обробка сигналу, ФНЧ, Software Defined Radio.

### Постановка проблеми.

Сучасне використання радіопристроїв вимагає уніфікації обладнання задля забезпечення можливості їх застосування під час виконання різних задач і цілей. Пристрої зв'язку, в яких передбачена можливість зміни робочого діапазону, типу модуляції, стандарту зв'язку і низки інших параметрів, можна назвати справжньою панацеєю у нинішній ситуації,

коли ми маємо декілька різних стандартів і технологій, націлених на різні додатки, та безліч найчастіше несумісного радіообладнання. Технологія ПОР створена для вирішення проблем несумісності і дозволяє створювати уніфіковані багатофункціональні бездротові пристрої із великим терміном служби.

Термін ПОР має розмите значення, але зазвичай він використовується для позначення

радіоприймачів і передавачів, основні параметри яких визначаються програмним забезпеченням і основні аспекти роботи яких змінюються за допомогою внесення змін у програмне забезпечення. Таке визначення прийнято міжнародною організацією з питань програмованого радіо під назвою SDR Forum [1], сформованою у 2001 році. До неї увійшли традиційні лідери галузі розробників, а саме Fujitsu, Intel, Motorola, NEC, Samsung, Siemens та інші.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Дослідження проблемних питань створення приймачів на основі технології ПОР здійснювали такі вітчизняні науковці, як І.В. Пампуха, С.В. Бурий, В.В. Пусан [9], М.М. Охрамович, В.В. Шевченко, О.І. Кравченко [10] та інші.

Серед закордонних досліджень заслуговують на увагу праці А. Виглінського [7], Ю. Грейвера [8], П. Кенінгтона [3] та інші.

Водночас, незважаючи на значну кількість наукових публікацій, присвячених методам і принципам побудови ПОР пристроїв, дослідження з метою створення вітчизняного виробництва не проводилися. Стрімкий розвиток технологій дозволяє вдосконалювати компоненти для цифрової обробки та перетворення сигналу, що зумовлює потребу у подальших дослідженнях цієї тематики.

#### Постановка завдання.

Метою роботи є розгляд питання про засади і принципи побудови приймачів на основі застосування компонентів технологій ПОР. Основним призначенням приймачів на основі ПОР є постійний або періодичний контроль завантаженості ефіру в широкому діапазоні частот, виявлення та аналіз нових випромінювань, виявлення випадкових або спеціально організованих радіоканалів витоку інформації.

#### Виклад основного матеріалу дослідження.

ПОР-система є однією із форм приймача-передавача, в якому всі аспекти його роботи обумовлені за допомогою універсальних апаратних засобів загального призначення, що конфігуруються програмно. В ідеальному вигляді ПОР-пристрій повинен складатись із аналогово-цифрового перетворювача (далі – АЦП), цифро-аналогового перетворювача (далі – ЦАП), антени і пристрою цифрової обробки сигналів (рис. 1).

На рисунку 1 відображено основний принцип побудови ПОР-системи, а саме мінімальна кількість апаратних модулів. ПОР-система містить блоки

аналого-цифрового, цифро-аналогового перетворення, антени, ланцюги обробки цифрових сигналів та інші допоміжні блоки.

За створення ідеального ПОР-приймача прямо до антени підключається АЦП, під'єднаний до ПЕОМ. У такому випадку програмне забезпечення, встановлене на ПЕОМ, забезпечувало б обробку потоку даних, який надходить на нього, і перетворювало у необхідну форму. Ідеальний ПОР-передавач працював би аналогічно, але у зворотному напрямку. Цифровий сигнальний процесор генерує потік чисел, що надходять на вхід ЦАП, вихід якого підключається прямо до антени [3].

Наведена ідеальна схема не може бути реалізованою за технічних обмежень. Основне обмеження полягає у перетворенні сигналу з аналогової форми у цифрову і зворотне перетворення, причому ці перетворення повинні відбуватись одночасно з високою швидкістю і точністю, без появи перешкод і без допомоги електромагнітного резонансу.

Тому на практиці застосовуються більш складні схеми. Доступні АЦП ще не мають достатньої швидкості для роботи в широкій смузі радіоспектру або достатнього динамічного діапазону, щоб оперувати сигналами, які мають велику різницю за рівнями.

Нині втілення ПОР-системи можливе поки що лише на дуже низьких частотах (десятки кілогерц), тому у реальних пристроях проблема високоякісної обробки ВЧ-сигналів вирішується шляхом їх перенесення на низьку частоту, для чого використовується змішувач та опорний генератор. Отже, нам потрібно знайти певне аналогове обладнання для спрямування частини спектру частот на оброблення у ПЕОМ. У професійних ПОР-системах аналогова частина будується зазвичай за супергетеродинним принципом, а в аматорських пристроях широке застосування знаходить принцип прямого перетворення [4]. Отже, можна визначитися, що існують два найпопулярніших принципи побудови ПОР-приймачів: на основі супергетеродинного приймача і приймача прямого перетворення. Кожна схема має переваги та недоліки. Основні переваги приймача прямого перетворення – це простота і відсутність бічних каналів, які виникають

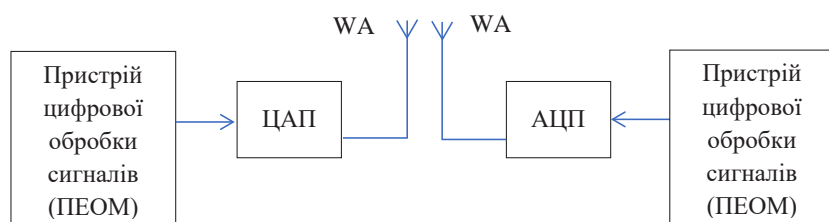


Рис. 1. Структурна схема ідеальної ПОР-системи

за наявності проміжної частоти. Супергетеродинний приймач не має цих переваг, проте має кращу вибірковість. Окрім того, існує істотне обмеження можливостей АЦП, пов'язане зі смугою перестроювання ПОР-приймача. Наприклад, за здійснення ПОР на ПЕОМ зі звуковою картою із частотою дискретизації 44100 Гц смуга перестроювання становитиме близько 20 кГц.

У традиційному супергетеродинному приймачі обробка сигналу повністю виконується електронними схемами. Структурна схема супергетеродинного приймача представлена на рис. 2. Частота сигналу знижується до проміжної частоти (далі – ПЧ), після чого проводиться обробка.

Проте цей метод оброблення сигналу має і недолік – наявність бічних дзеркальних каналів приймання. Попередня селекція за входом у разі такої будови радіоприймача має тепер основне завдання – пригнічення дзеркальних каналів приймання.

Окрім того, побічними наслідками застосування класичної структури побудови радіоприймального тракту з однією або декількома ПЧ є підвищений рівень шумів на виході радіоприймача; це шуми всіх напівпровідникових елементів тракту. Чим більше у тракці елементів перетворення і підсилення, тим, відповідно, вищим є рівень шумів на виході. Сюди ж додаються шуми синтезаторів та інших генераторів. Застосування автоматичного регулювання підсилення слабо впливає на загальний шум тракту, оскільки кількість елементів підсилення і пере-

творення залишається постійною. Позбутися більшості описаних вище проблем дозволили методи прямого перетворення сигналів із радіодіапазону у спектр звукових частот і обробка кінцевого сигналу фазовим способом. Спочатку цей метод не знайшов широкого розвитку за аналогової будови приймачів унаслідок складності втілення. Із поширенням цифрової техніки та алгоритмів цифрової обробки сигналу (далі – ЦОС) у тракці обробки ПЧ почали застосовувати мікропроцесори, що дозволило значно покращити якість основної селекції сигналу (полоса фільтру – від 50 Гц, рівень пригнічення сусіднього каналу – до 100 дБ) і ввести безліч додаткових корисних функцій, починаючи з очищення спектру сигналу, що приймається, від шумів і завад, до декодування цифрових видів модуляції.

У перших ПОР-приймачах замість демодуляторів використовувався АЦП. Демодуляція і частково фільтрація виконувались у цифровому сигнальному процесорі (Digital Signal Processor – DSP). Супергетеродинні приймачі поділяються на приймачі з аналоговою проміжною частотою і програмованою проміжною частотою.

Структурна схема сучасного ПОР-приймача прямого перетворення представлена на рис. 3.

Вхідний сигнал підсилюється малошумним підсилювачем (МШП) та поділяється на компоненти I та Q шляхом змішування сигналу із гетеродину синтезатора частот із фазовим авто-

підстроюванням частоти. Задля отримання квадратурної компоненти він змішується на  $90^\circ$ . Частота гетеродину підстроюється під частоту сигналу для того, щоб різниця вихідних сигналів змішувача дорівнювала нулю за відсутності модуляції. Для модульованого сигналу вона дорівнює сигналу основної смуги або вихідному модульованому сигналу. Ця побудова отримала назву прямого перетворення або перетворення з нульовою проміжною частотою. Після фільтрації сигналів основної смуги фільтри нижніх частот (далі – ФНЧ) оцифровуються у АЦП. Далі за допомогою перетворювача частота сигналу знижується до робочого діапазону сигнального процесора. Для роботи процесора потрібно знати амплітуду і

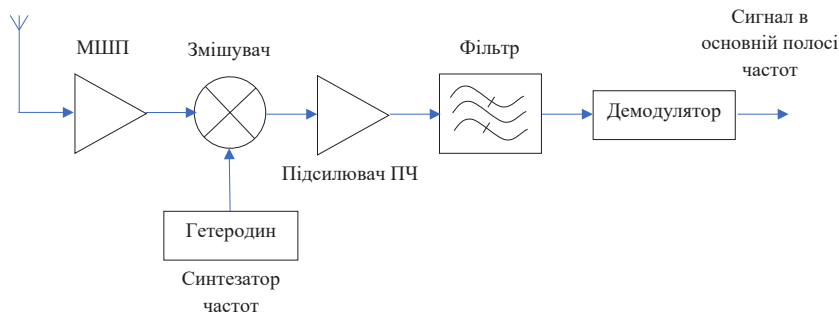


Рис. 2. Структурна схема супергетеродинного приймача

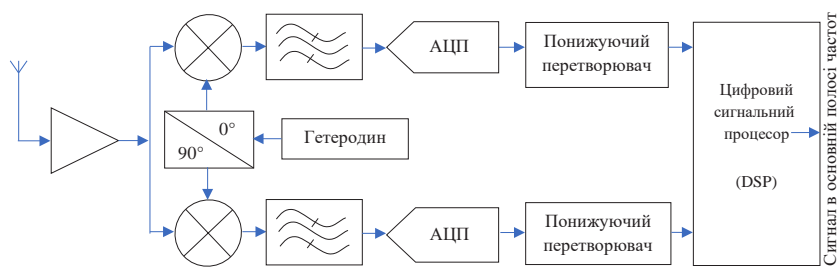


Рис. 3. Структурна схема сучасного ПОР приймача



фазу сигналів. Прийнятий сигнал ділиться на два компоненти: синфазну (I) та квадратурну (Q).

Реалізація I та Q сигналів можлива як в аналоговій частині, так і цифровими засобами. Частіше обирають варіант реалізації I/Q сигналів в аналоговій частині, адже таким чином вдається розширити смугу передачі сигналу. Для цифрової системи обробки можна розширити смугу прийому так, щоб частота дискретизації як мінімум удвічі перевищувала частоту сигналу, що дискретизується, тобто АЦП зможе відтворити лише ті сигнали, які вдвічі є нижчими за його частоти дискретизації. Якщо використовувати технологію приймача з одним АЦП, отже, із цифровим виділенням I/Q сигналів, то смуга буде вдвічі нижчою за частоту АЦП.

Проте, якщо використовувати реалізацію приймача з аналоговим виділенням I/Q сигналів (два АЦП), то частота прийому стає рівною частоті дискретизації АЦП. Це стає можливим саме завдяки I/Q сигналам, адже вони представляють собою компоненти того ж самого сигналу, проте зсунуті за фазою на  $90^\circ$ . Якщо обидва АЦП пов'язані за такою частотою, то під час надходження сигналу беруться одночасно відліки за I і Q сигналами. Отже, за кожен такт дискретизації береться відлік того ж самого сигналу. Відлік – це рівень одного сигналу, зсунутий за фазою (у часі). Так ми отримуємо смугу частот, рівну частоті АЦП.

Для реалізації ПОР приймача на базі персонального комп'ютера логічно застосовувати схеми супергетеродинного приймача із програмною проміжною частотою. Апаратна частина дозволить здійснювати настроювання в широкому діапазоні частот, а програмний гетеродин буде відповідати за точне підстроювання сигналу. Крім того, варто відзначити, що у більшості ПОР-приймачів відбувається обробка синфазного (I) і квадратурного сигналів (Q), саме тому перед ЦОС у всіх схемах сигнал спочатку розділяється на I і Q компоненти.

Основними перевагами ПОР-приймачів є такі:

1) панорамний огляд ефіру. Це досить зручно як у плані наочності, так і у плані пошуку нових сигналів. На екрані одразу видно корисні сигнали, перешкоди, нові та особливо короткі сигнали, сигнали зі швидко змінюваною частотою;

2) цифрові фільтри і звукові ефекти, що регулюються. У ПОР усі фільтри задаються математично, тому будь-яку ширину фільтра можна встановити у налаштуваннях. Прямокутність фільтрів теж може бути практично ідеальною – математично можна вибрати будь-який порядок фільтрів. Усе обмежено лише алгоритмом. Аналогічно можуть задаватися

налагодження шумозаглушення, коефіцієнти автоматичного регулювання підсилення та інше;

3) можливість вимірювань отриманого сигналу. За допомогою ПОР можна візуально відображати рівні різних випромінювань у децибелах, проводити оцінку перешкод, якості сигналу та багато іншого. Всі недоліки свого або чужого сигналу відмінно видно у спектрі. Окрім того, можна використовувати ПОР-приймач як аналізатор спектру;

4) широкопasmовою обробка сигналу: ПОР дозволяє здійснювати приймання сигналу в широкому діапазоні частот (декілька МГц);

5) приймання і передавання практично будь-яких видів модуляції. Оскільки обробка сигналів здійснюється на ПЕОМ, тому обчислювальні можливості обмежені лише наявністю потрібних декодерів. Нині існує багато відкритих протоколів декодерів, такі як AM, FM, WFM, DRM, DAB+, TETRA та інші;

6) широкопasmовий запис і відтворення. У ПОР усі дані пишуться у цифровому вигляді, тому є можливість записати всю смугу відразу і повністю для прослуховування або подальшого аналізу. В одному записі може розміститися смуга частоти, яка містить одразу кілька радіовипромінювань;

7) віддалена робота. Деякі ПОР-приймачі і трансивери мають можливість доступу за IP-адресою. Бітрейт передавання даних потрібно налаштувати відповідно до ширини інтернет-каналу.

Основними недоліками ПОР-приймачів є такі:

1) стаціонарна робота. ПОР – це фактично стаціонарний настільний прилад, брати його із собою вельми незручно і некомфортно;

2) ціна. Вартість якісних ПОР починається від 500 у.о. через те, що в них застосовані надшвидкі АЦП і програмовані логічні інтегральні схеми, малозумні каскади на вході, багатошарові друковані плати, якісні фільтри та інше. Професійні приймачі (USRP, Winradio) коштують від 1500 у.о. і вище;

3) енергоспоживання і процесорні вимоги. Для якісної роботи ПОР потрібно мати ПЕОМ із потужними процесором і відеокартою. Струм споживання під час роботи становить від 1 А до 2 А.

#### **Висновки.**

Отже, ПОР-приймач є універсальним пристроєм, який може поєднувати функції різноманітних радіопристроїв. Дотримуючись концепції ПОР, ідеальний ПОР-приймач повинен містити у своєму складі як можна менше елементів. Важливим фактором використання ПОР-пристроїв є заміна більшості аналогових компонентів. Пристрої, побудовані на аналоговій елементній базі, мають значно вищу складність конструкції, ніж ПОР-пристрої, та не мають гнучкості, необхідної у сучасних умовах швидкої зміни стандартів зв'язку.

**Список літератури:**

1. SDR forum. URL: <http://www.wirelessinnovation.org/> (дата звернення 20.09.2020).
2. Рембовський А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг, задачи, методы, средства. Москва, Горячая линия – Телеком. 2012. 281 с.
3. Peter Kenington: RF and Baseband Techniques for Software Defined Radio, Artech House, 2005. 281 p.
4. Проектирование радиоприемных устройств. под ред. А.П. Сиверса. Москва : «Сов. радио», 1976. 487 с.
5. Трусов В.А., Горячев Н.В., Баннов В.Я. Программно-определяемые приемопередатчики и их применение. *Ежемесячный научный журнал «Молодой учёный»* № 21(80). С. 234-236.
6. Brenner S. Cybercrime : criminal threats from cyberspace. Praeger, 2006. 281 p.
7. Alexander M. Wyglinski. Digital Communication Systems Engineering with Software-Defined Radio, Artech House, 2013. 289 p.
8. Eugene Grayver: Implementing Software Defined Radio, Springer, 2012. 267 p.
9. Пампуха І.В., Бурій С.В., Пусан В.В. Аналіз сучасних автоматичних систем моніторингу радіо простору на базі SDR технологій для ведення завдань радіоелектронної розвідки. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. 2017. № 56. С. 40-46.
10. Охрамович М.М., Шевченко В.В., Кравченко О.І. Аналіз способів ведення моніторингу радіопростору за допомогою SDR технології. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. 2018. № 59. С. 37-45.

**Garyst A.V., Bilevska O.S. PRINCIPLES OF BUILDING RECEIVERS ON SOFTWARE DEFINED RADIO TECHNOLOGY**

*The use and application of receiving devices for solving various problems in modern conditions requires the unification of equipment so that it can be used for various tasks and purposes. Initially, all receiving devices were created from separate components. They were compiled into blocks that applied certain mathematical transformations to the signal that was received by the antenna in order to obtain a useful signal at the output. For example, a super heterodyne receiver performs pre-amplification, frequency conversion, bandpass filtering of the received signal, and decoding of the signal.*

*Despite the analogue element base, the design of a complex electronic device is similar to the design of a software system, that is, we divide the system into functional blocks, and blocks into sub-blocks, until we reach elementary operations, such as amplification, filtering, detection, and others.*

*Currently, it is possible to first convert the signal from the antenna to digital form, and then perform the listed operations on digital processors. In this case, the design of systems can be carried out both using block diagrams and using various programming languages.*

*In the very recent past, wireless radio systems were designed in such a way that a device supported one or two types of signal and only devices of the same type could communicate with each other. This was and is a strong limitation, which greatly complicates the organization of communication between different types of devices. In this regard, there was a constant need for a flexible architecture that could be changed by software.*

*Software Defined Radio technology is a relatively new development in wireless devices. The essence of software-defined radio technology is that the basic parameters of the transceiver device are determined by the software, and not by the hardware configuration, as we are used to seeing in classical designs. We are talking not only about the radio frequency parameters of the systems, such as the type of modulation, the power of the high-frequency signal, sensitivity, selectivity, harmonic suppression, which can be done by switching the corresponding nodes of the device, but also about the protocol part. That is, we can observe a complete degeneration of equipment, which previously could perform only one rigidly specified function. For example, the type of transmitter modulation is controlled by the built-in microcontroller. Accordingly, the receiver also uses software to demodulate the signal. This is relevant for many nodes of wireless interface devices, for modeling and coding subsystems, analog-to-digital and digital-to-analog conversion.*

**Key words:** *analog-to-digital converter; digital-to-analog converter; digital signal processor; super heterodyne receiver; intermediate frequency; digital signal processing, LPF, PLL, Software Defined Radio.*

УДК 519.6: 681.3

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/09>**Лисенко О.І.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Тачиніна О.М.**

Національний авіаційний університет

**Новіков В.І.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Гуйда О.Г.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

**Фуртат О.В.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

**Юсипів Т.В.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

**СПОСІБ НАЛАШТУВАННЯ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОЛОЖЕННЯМ ВІСІ ЧУТТЕВОСТІ МОБІЛЬНОГО СЕНСОРА**

*Стаття присвячена викладенню способу налаштування параметрів каналів цифрової системи автоматичного керування положенням вісі чутливості мобільного сенсора, що застосовується як мобільна платформа, на якій розташовують зондуєчий пристрій прецизійної цілеспрямованої дії. Основна ідея способу полягає в застосуванні методу Зіглера-Ніколса для отримання початкових умов, які забезпечують швидке наближення до точки оптимуму за подальшого застосування чисельних методів. Запропонований спосіб простий у використанні й дозволяє виконувати за короткий час параметричне налаштування окремого каналу цифрової системи прецизійної та квазіінваріантної автоматичної стабілізації вісі чутливості мобільного сенсора. У статті підкреслено, що загалом спосіб налаштування цифрового регулятора складається з двох типів способів: віртуального й реального налаштування. Спосіб віртуального налаштування використовує комп'ютерну математичну модель каналу цифрової системи автоматичного керування віссю чутливості мобільного сенсора. Спосіб реального налаштування використовує реальну цифрову систему автоматичного керування положенням вісі чутливості мобільного сенсора. У статті детально викладено саме спосіб віртуального параметричного налаштування окремого каналу цифрової системи прецизійної автоматичної стабілізації вісі чутливості мобільного сенсора. Шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання продемонстровано, що застосування способу віртуального налаштування як мінімум у декілька разів зменшує середню квадратичну помилку стабілізації вісі чутливості мобільного сенсора в порівнянні з результатом застосування для налаштування лише способу (метода) Зіглера-Ніколса. У розглянутому прикладі показник ефективності (критерій), за яким оцінювалась якість налаштування, покращився майже в сім разів.*

**Ключові слова:** чисельні методи, оптимізація, цифровий пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор, математичне моделювання.

**Постановка проблеми.** Мобільні сенсори все більше застосовуються як мобільні платформи, на яких розташовують пристрої прецизійної цілеспрямованої дії (далі – ППЦД) [1]. Такими пристроями можуть бути або відеокамери, або антени направленої дії, або лазерні передавачі та приймачі інформації. Для ефективного використання пристроїв пре-

цизійної цілеспрямованої дії необхідно прецизійно (квазіінваріантно до зовнішніх впливів) утримувати в заданих межах вісь чутливості пристрою. Ця обставина вимагає прецизійної стабілізації вісі чутливості мобільного сенсора у кожному каналі (за кожним ступенем рухомості вісі чутливості). Прецизійність стабілізації у цілому практично повністю визначається

прецизійністю налаштування кожного окремого каналу цифрової системи стабілізації вісі чуттєвості мобільного сенсора. Окремий канал складається із двох контурів: контуру корекції динамічних властивостей приводу (внутрішній контур) та контуру керування переміщенням вісі чуттєвості вздовж відповідного ступеня рухомості. У кожному контурі кожного каналу цифрової системи прецизійної автоматичної стабілізації вісі чуттєвості мобільного сенсора, за звичай, використовується цифровий пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор (далі – ЦПД-регулятор) [1–5]. Застосування ЦПД-регуляторів дозволяє, як відомо, забезпечити квазіінваріантність (або квазіадаптивність) каналу цифрової системи прецизійної автоматичної стабілізації [3–5]. Задача попереднього налаштування параметрів ЦПД-регуляторів розв’язується як задача параметричної оптимізації багатоконтурних цифрових систем автоматичного керування із використанням комп’ютерних математичних моделей цих систем. Це означає, що залежність критерію оптимальності від параметрів ЦПД-регуляторів задається алгоритмічно. Такий підхід пов’язано із тим, що встановити явну, записану у вигляді формули, аналітичну залежність критерію від  $3N$  параметрів ( $N$  – кількість контурів, в які включено ЦПД-регулятори) практично не можливо [1–5]. Алгоритм, який обчислює значення критерію оптимальності при певних значеннях параметрів ЦПД-регуляторів базується на використанні комп’ютерних математичних моделей елементів цифрової системи автоматичного керування, що підключені у відповідний ЦПД-регулятору контур каналу. Підкреслимо, що спосіб повинен дозволяти виконувати саме прецизійне налаштування і, при цьому, за короткий час. При налаштуванні одного ЦПД-регулятора вектор параметрів, що налаштовується (оптимізується) дорівнює 3. Під час налаштування  $N$  ЦПД-регуляторів, що входять до складу каналу цифрової системи прецизійної автоматичної стабілізації ця кількість збільшується в  $N$  разів. При квазіінваріантному (квазіадаптивному) цифровому управлінні приводом за одним ступенем рухомості вісі чуттєвості мобільного сенсора використовують (за звичай) два контури [3; 4; 5]. Найпоширеніші сучасні системи прецизійної стабілізації вісі чуттєвості мобільного сенсора мають від трьох до шести приводів (каналів) [6–10]. Як бачимо, у крайньому випадку, налаштуванню (переналаштуванню при підготовці до виконання конкретного завдання) підлягатимуть як мінімум 18 параметрів. Виникає наукове завдання щодо скорочення часу і підвищення точності та якості (прецизійності) налаштування кожного окремого каналу.

Тому наукове завдання щодо розробки способу параметричного налаштування окремого каналу цифрової системи прецизійної та квазіінваріантної автоматичної стабілізації положення вісі чуттєвості мобільного сенсора є актуальним.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Згідно з класичною теорією автоматичного керування параметричну оптимізацію (налаштування) для стаціонарних лінійних систем керування можливо виконувати із використанням частотних, часових та інтегральних критеріїв [2–6]. Враховуючи значну кількість приводів бажано мати можливість швидко і майже оптимально налаштовувати і пере налаштовувати регулятори. На сьогодні для налаштування ЦПД-регуляторів найширше застосовується метод Зіглера-Ніколса [2–5], що базується на часових критеріях якості функціонування цифрових систем автоматичного керування (далі – ЦСАК). Але при налаштуванні параметрів ЦПД-регуляторів багатоконтурних систем якість налаштування із використанням лише цього методу значно погіршується [9; 10]. Наявність ЦПД-регулятора в кожному з контурів дозволяє надати цьому контуру властивості квазіінваріантності та квазіадаптивності, що є принципово важливим для мобільних сенсорів, які за звичай працюють в умовах суттєвих параметричних і не параметричних збурень [2–6]. Формальне застосування лише чисельних методів багатовимірної оптимізації за звичай потребує значного часу і суттєво залежить від вдалого першого наближення [11–13]. Так, наприклад, застосування NCD-технології системи комп’ютерної математики MATLAB+Simulink при багато параметричній оптимізації перетворюється майже на мистецтво.

Тому актуальною є прикладна математична задача, що стосується розробки ефективного способу попереднього (під час підготовки до застосування) налаштування та оперативного (в реальному часі) переналаштування багатоконтурних систем управління із цифровими ПД-регуляторами.

**Постановка завдання.** Завдання полягає в розробці способу зручного для практичного використання при параметричному налаштуванні (параметричній оптимізації за скалярним інтегральним критерієм) каналів багатоконтурних цифрових систем прецизійної квазіінваріантної стабілізації вісі чуттєвості мобільного сенсора із цифровими ПД-регуляторами у кожному з контурів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Як вихідні дані розглянемо скалярну лінійну стаціонарну математичну модель окремого каналу цифрової системи прецизійної автоматичної стабілізації вісі чуттєвості мобільного сенсора

(див. рис. 1.) [1]. Керуюча дія в окремому каналі керування створюється окремим приводом. Тобто, кількість каналів керування дорівнює кількості степенів рухомості вісі чуттєвості мобільного сенсора. Математична модель об'єкта керування в окремому каналі описує динаміку зміни положення вісі чуттєвості мобільного сенсора (рис. 1 Transfer Fnc<sup>1-4</sup> та Integrator1). В цілому, комп'ютерна математична модель окремого каналу стабілізації складається із наступних блоків (рис. 1): Gain1, Gain2 та Discrete Transfer Fnc<sup>2</sup>, Gain3 та Discrete Transfer Fnc<sup>3</sup> – математична модель ЦПД-регулятора зовнішнього контуру із параметрами  $Gp2, Gi2, Gd2$ ; Gain4, Gain5 та Discrete Transfer Fnc<sup>5</sup>, Gain6 та Discrete Transfer Fnc<sup>6</sup> – математична модель ЦПД-регулятора внутрішнього контуру із параметрами  $Gp1, Gi1, Gd1$ ; Transfer Fnc<sup>1</sup>, Transfer Fnc<sup>2</sup>, Transfer Fnc<sup>3</sup>, 4 – математичні моделі відповідно підсилювача постійного струму, підсилювача потужності та приводу постійного струму; Gain7 та Transfer Fnc<sup>5</sup> – математичні моделі відповідно датчика швидкості обертання ротора приводу та датчика переміщення вісі чуттєвості мобільного сенсора; Step, Step1 разом із Step2, а

також Step3 разом із Step4 - математичні моделі відповідно вхідної дії, імпульсних електромагнітного та механічного збурень. Параметрами, які необхідно налаштувати, є коефіцієнти передачі ЦПД-регуляторів  $Gpj, Gij, Gdj$  відповідно за пропорційним, інтегральним та диференціальним сигналами для першого ( $j = 1$ ) та другого ( $j = 2$ ) регуляторів. В якості критерію оптимальності обираємо усереднений на інтервалі спостереження  $T$  інтеграл від квадрату відхилення  $\varphi_x(t)$  вихідного сигналу математичної моделі руху вісі чуттєвості мобільного сенсора  $X(t)$  вздовж окремого степеня рухомості від еталонної (бажаної) зміни в часі цього сигналу  $X_b(t)$ :

$$Q(Gp1, Gi1, Gd1; Gp2, Gi2, Gd2) = \frac{1}{T} \int_0^T (\Delta_x(t))^2 dt, \quad (1)$$

де  $\Delta_x(t) = X_b(t) - X(t)$ ; еталонний (бажаний) сигнал  $X_b(t)$  та критерій оптимальності  $Q(Gp1, Gi1, Gd1; Gp2, Gi2, Gd2)$  обчислюються (задаються алгоритмічно) із використанням блоків відповідно Transfer Fnc та Dot Product, Gain8, Integrator (рис. 1); тривалість часу моделювання  $T=10$  с.

Загалом спосіб налаштування окремого каналу цифрової системи прецизійної автоматичної

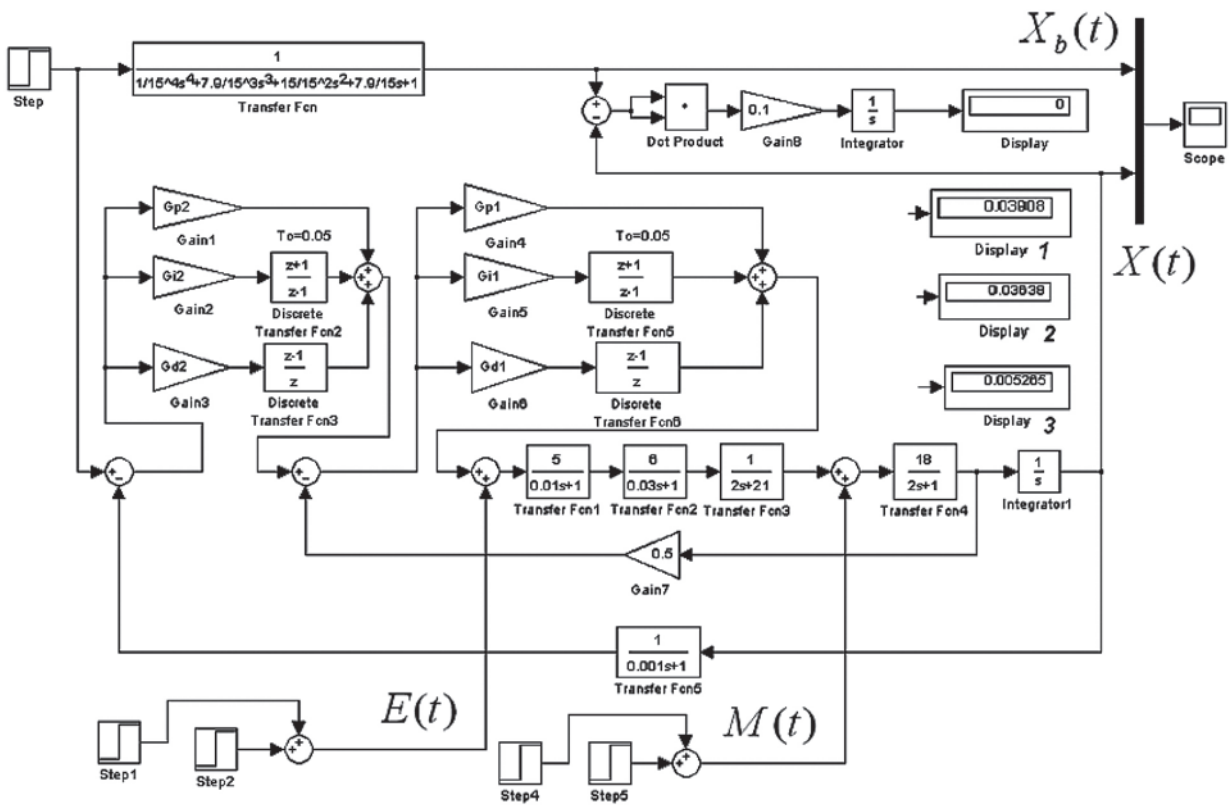


Рис. 1. Комп'ютерна математична модель окремого каналу цифрової системи прецизійної автоматичної стабілізації вісі чуттєвості мобільного сенсора :  $T_0$  – період дискретизації за часом ( $T_0 = 0.05$  с, обрано у відповідності із рекомендаціями [2–5])

стабілізації вісі чуттєвості мобільного сенсора складається із двох типів налаштувань: віртуального – на комп'ютерній математичній моделі каналу цифрової системи автоматичного керування положенням вісі чуттєвості мобільного сенсора та реального – виконується на реальному мобільному сенсорі, для каналу керування (ступені рухомості), який попередньо був налаштований за віртуальним типом налаштування.

**Спосіб віртуального налаштування складається із двох операцій:**

**1 операція** – обираємо еталонну (бажану) модель зміни в часі перехідного процесу на виході системи керування;

**2 операція** – застосовуємо трьох- або чотириетапну процедуру налаштування параметрів ЦПД-регуляторів.

**Налаштування** ЦПД-регуляторів за трьохетапною процедурою полягає у застосуванні методу Зіглера-Ніколса для налаштування ЦПД-регулятора внутрішнього контуру (перша процедура), методу Зіглера-Ніколса для налаштування ЦПД-регулятора зовнішнього контуру (друга процедура) та методу чисельної оптимізації для корекції параметрів ЦПД-регуляторів обох контурів (третья процедура).

Застосування методу Зіглера-Ніколса дозволяє знайти значення параметрів  $Gp1o, Gi1o, Gd1o; Gp2o, Gi2o, Gd2o$ , які використовуються на наступному етапі як початкові значення в чисельних методах пошуку мінімуму критерію  $Q(Gp1, Gi1, Gd1; Gp2, Gi2, Gd2)$ .

**Налаштування** ЦПД-регуляторів за чотириетапною процедурою: полягає у застосуванні методу Зіглера-Ніколса для налаштування ЦПД-регулятора внутрішнього контуру (перша процедура) та методу чисельної оптимізації для корекції параметрів ЦПД-регулятора внутрішнього контуру (друга процедура), застосуванні методу Зіглера-Ніколса для налаштування ЦПД-регулятора зовнішнього контуру (третья процедура) та методу чисельної оптимізації для корекції параметрів ЦПД-регуляторів обох контурів (четверта процедура).

Перша процедура дозволяє знайти прийнятні значення параметрів ЦПД-регулятора внутрішнього контуру  $Gp1o, Gi1o, Gd1o$ , які у другій процедурі використовуються як перше (початкове) наближення до оптимальних значень параметрів ЦПД-регулятора внутрішнього контуру при його окремому налаштуванні. Третя процедура дозволяє знайти параметри ЦПД-регулятора зовнішнього контуру  $Gp2o, Gi2o, Gd2o$ , які за допомогою четвертої процедури корегуються разом із пара-

метрами ЦПД-регулятора внутрішнього контуру, що були знайдені за допомогою другої процедури.

Таким чином, остання процедура в трьох- та чотириетапних процедурах налаштування параметрів ЦПД – регуляторів розв'язує оптимізаційну задачу

$$Q \rightarrow \min_{Gp1, Gi1, Gd1; Gp2, Gi2, Gd2} \quad (2)$$

Підкреслимо, що при виконанні останньої процедури виконується перевірка знайденого оптимального розв'язку на чуттєвість до зміни параметрів об'єкту керування. Ці зміни можуть бути, як детермінованими (відбуватися у відомі моменти часу і на відомі величини), так випадковими.

**Спосіб реального налаштування** дозволяє виконати (при необхідності) уточнення значень параметрів цифрового регулятора, що отримані при віртуальному налаштуванні.

Обидва типи способу налаштування повинні входити до складу загальної методики, яка стосується синтезу цифрової системи автоматичного керування положенням вісі чуттєвості мобільного сенсора в загалі. Дана стаття присвячена викладенню саме способу віртуального налаштування окремого каналу цифрової системи прецизійної автоматичної стабілізації вісі чуттєвості мобільного сенсора.

Розглянемо результат застосування способу віртуального налаштування, тобто способу, що використовує комп'ютерні математичні моделі (рис. 1).

**Перша операція.** Як модель еталонної (бажаної) зміни в часі сигналу на виході окремого каналу цифрової системи прецизійної автоматичної стабілізації вісі чуттєвості мобільного сенсора обираємо сигнал, що діє на виході моделі стандартної форми 4-того порядку із розподілом коренів характеристичного полінома за законом геометричної прогресії [2-5] зменшивши при цьому час тривалості перехідного процесу в 15 разів.

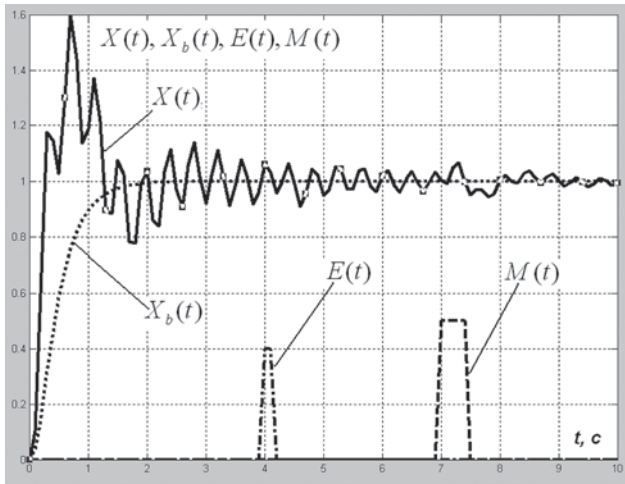
**Друга операція. Розглянемо два перші етапи трьох етапної процедури.**

**Перший етап.** Застосовуємо методу Зіглера-Ніколса та отримуємо наступні значення параметрів першого ЦПД-регулятора  $Gp1o=3; Gi1o=0.3750; Gd1o=3$ .

**Другий етап.** Застосовуємо методу Зіглера-Ніколса та отримуємо наступні значення параметрів другого ЦПД-регулятора  $Gp2o=1.2; Gi2o=0.1333; Gd2o=1.35$ .

Результат комп'ютерного моделювання після виконання першого та другого етапів, отриманий із використанням комп'ютерної математичної моделі (рис. 1), показує, що вихідний сигнал каналу  $X(t)$  має коливальний характер і суттєво відрізняється від сигналу на виході еталонної

(бажаної) моделі  $X_b(t)$  (див. рис. 2). Числове значення критерію оптимізації дорівнює 0.03908 (див. Display 1, рис. 1).



**Рис. 2.** Перехідні процеси на виході еталонної(бажаної) математичної моделі  $X_b(t)$  і математичної моделі окремого каналу цифрової системи прецизійної автоматичної стабілізації вісі чуттєвості мобільного сенсора  $X(t)$  із параметрами ЦПД-регуляторів  $Gp1o = 3$ ;  $Gi1o = 0.3750$ ;  $Gd1o = 3$ ;  $Gp2o = 1.2$ ;  $Gi2o = 0.1333$ ;  $Gd2o = 1.35$ :  $E(t)$  та  $M(t)$  – відповідно, імпульсне електромагнітне та механічне збурення

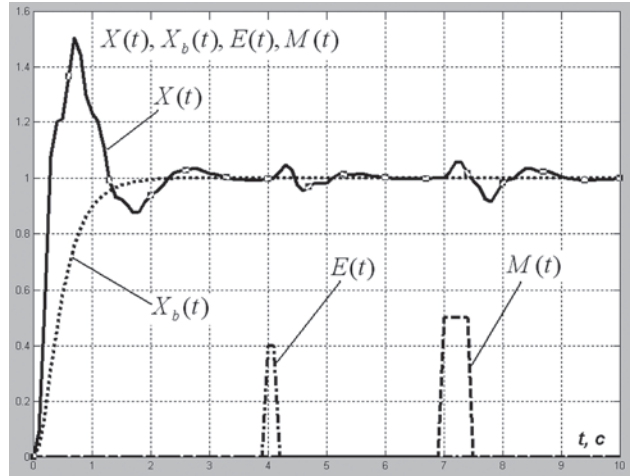
**Друга операція.** Розглянемо три перші етапи чотирьохетапної процедури.

В результаті виконання першого, другого та третього етапів отримуємо наступні значення параметрів ЦПД-регуляторів  $Gp1o = 2.5$ ;  $Gi1o = 0.25$ ;  $Gd1o = 3$ ;  $Gp2o = 1.2$ ;  $Gi2o = 0.1333$ ;  $Gd2o = 1.35$ .

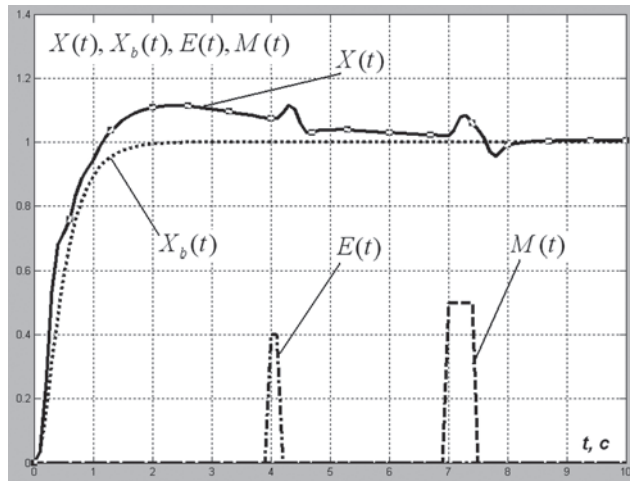
Результат комп'ютерного моделювання після виконання першого та другого етапів, отриманий із використанням комп'ютерної математичної моделі (рис.1), показує, що вихідний сигнал каналу  $X(t)$  згладжено, але він ще суттєво відрізняється від сигналу на виході еталонної (бажаної) моделі  $X_b(t)$  (див. рис.3). Числове значення критерію оптимізації дорівнює 0.03641 (див. Display 2, рис. 1).

Для виконання останньої процедури у трьох- та чотирьохетапних процедурах налаштування параметрів ЦПД-регуляторів розв'яжемо оптимізаційну задачу із використанням чисельного методу нульового порядку, який носить назву метод Хука-Дживса [11; 12]. У результаті отримуємо оптимальні: перехідний процес  $X(t)$  на виході математичної моделі окремого каналу цифрової системи прецизійної автоматичної стабілізації вісі чуттєвості мобільного сенсора (див. рис. 4); точку  $Gp1opt = 2.4$ ;  $Gi1opt = 0.28$ ;  $Gd1opt = 3.1$ ;  $Gp2opt = 0.9$ ;  $Gi2opt = 0.008$ ;  $Gd2opt = 0.001$  у шестивимірному просторі параметрів, які налаштовувалися; значення критерію

$Qopt(Gp1opt, Gi1opt, Gd1opt; Gp2opt, Gi2opt, Gd2opt) = 0.005273$  (див. Display 3, рис. 1). Як бачимо (рис. 2, 3, 4), вдалося покращити якість перехідного процесу (перехідний процес був коливальним, а став аперіодичним, який майже співпадає із еталонним (бажаним) процесом), а також вдалося майже у сім разів ( $0.03641 / 0.005273 = 6.9050$ ) зменшити середньоквадратичну помилку.



**Рис. 3.** Перехідні процеси на виході еталонної(бажаної) математичної моделі  $X_b(t)$  і математичної моделі окремого каналу цифрової системи прецизійної автоматичної стабілізації вісі чуттєвості мобільного сенсора  $X(t)$  із параметрами ЦПД-регуляторів  $Gp1o = 2.5$ ;  $Gi1o = 0.25$ ;  $Gd1o = 3$ ;  $Gp2o = 1.2$ ;  $Gi2o = 0.1333$ ;  $Gd2o = 1.35$ :  $E(t)$  та  $M(t)$  – відповідно, імпульсне електромагнітне та механічне збурення



**Рис. 4.** Перехідні процеси на виході еталонної(бажаної) математичної моделі  $X_b(t)$  і математичної моделі окремого каналу цифрової системи прецизійної автоматичної стабілізації вісі чуттєвості мобільного сенсора  $X(t)$  із оптимальними параметрами ЦПД - регуляторів  $Gp1opt = 2.4$ ;  $Gi1opt = 0.28$ ;  $Gd1opt = 3.1$ ;  $Gp2opt = 0.9$ ;  $Gi2opt = 0.008$ ;  $Gd2opt = 0.001$ :  $E(t)$  та  $M(t)$  – відповідно, імпульсне електромагнітне та механічне збурення

Запропонований спосіб можливо використувати на етапі підготовки мобільного сенсора до використання (попередній параметричний синтез цифрової системи автоматичної стабілізації) або для переналаштування цифрової системи автоматичної стабілізації в реальному часі (оперативний параметричний синтез).

У разі попереднього параметричного синтезу можливо врахувати усі детерміновані зміни параметрів окремого каналу цифрової системи прецизійної автоматичної стабілізації вісі чуттєвості мобільного сенсора і запам'ятати відповідні цим змінам найкращі значення параметрів ЦПД-регуляторів.

Під час оперативного параметричного налаштування в умовах невизначеності щодо знання моментів часу та величини зміни параметрів мобільного сенсора (далі – МС), пропонується виконати такі дії:

- перед початком застосування методики оперативно ідентифікувати параметри МС;
- застосувати в наведених процедурах оновлену в результаті ідентифікації математичну модель МС.

#### Висновки.

1. Наукова новизна способу полягає у комплексному застосуванні методу Зіглера-Ніколса та чисельних методів оптимізації для параметричного налаштування окремого каналу цифрової системи прецизійної автоматичної стабілізації вісі чуттєвості мобільного сенсора. Метод Зіглера-Ніколса

дозволяє отримати початкові умови, які забезпечують швидке наближення до точки оптимуму при подальшому застосуванні чисельних методів. Якщо початкові умови задавати випадковим чином, то це призводить, у більшості випадків, до нестійкості окремого каналу цифрової системи прецизійної автоматичної стабілізації вісі чуттєвості мобільного сенсора і неможливості алгоритмічно обчислювати значення критерію і виконувати налаштування параметрів регуляторів.

2. Розрахунки підтвердили високу ефективність запропонованого способу порівняно із випадком застосування лише метода Зіглера-Ніколса. У розглянутому прикладі показник ефективності (критерій), за яким оцінювалась якість налаштування покращився майже у сім разів.

3. Хронометраж показав: час, який витрачає досвідчений експерт на налаштування параметрів окремого каналу цифрової системи прецизійної автоматичної стабілізації вісі чуттєвості мобільного сенсора із використанням запропонованого способу порівняно із часом витраченим тим же експертом на налаштування тих самих параметрів із використанням NCD – технології MATLAB+Simulink зменшується більше ніж у десять разів.

4. Напрямом подальшого дослідження можливо вважати розробку способу реального налаштування каналу цифрової системи прецизійної автоматичної стабілізації вісі чуттєвості мобільного сенсора.

#### Список літератури:

1. Моделі застосування інформаційно-телекомунікаційних технологій на основі безпілотних авіаційних комплексів у надзвичайних ситуаціях / І.С. Романченко, О.І. Лисенко, С.М. Чумаченко, С.Л. Данилюк, В.І. Новіков, О.М. Тачиніна, П.І. Кірчу, С.В. Валуйський. Київ : НАУ, 2016. 332 с.
2. Репнікова Н.Д. Теорія автоматичного керування: класика і сучасність : Підручник. Київ : НТУУ «КПІ», 2011. 328 с.
3. Каргин А.А. Введение в интеллектуальные машины. Книга 1. Интеллектуальные регуляторы. Донецк : Норд Пресс., Дон. НУ, 2010. 526 с.
4. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. Москва : Бингом ; Лаборатория базовых знаний, 2002. 832 с.
5. Гудвин Г.К., Гребе С.Ф., Сильгадо М.Э. Проектирование систем управления. Москва : Бином ; Лаборатория базовых знаний, 2004. 911 с.
6. Введение в мехатронику / О.М. Яхно, А.В. Узунов, А.Ф. Луговской и др. Киев : НТУУ «КПІ», 2008. 528 с.
7. Boudiba O., Firsov S., Zhezhera I. Development of a functionally stable orientation systems for an unmanned aerial vehicle. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2017. № 6/9 (90). P. 22–29. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118640>.
8. Boudiba O., Jijira I.V., Firsov S.N. Functionally stable motion control of small autonomous aircraft. *Revue des Sciences et de la Technologie, Synthèse / Université Badji Mokhtar Annaba. Algerie*, 2018. Num. 36. P. 74–86.
9. Lysenko O., Tachinina O. Method of path constructing of information robot on the basis of unmanned aerial vehicle. *Proceedings of the National Aviation University*. Kyiv : NAU, 2017. № 4 (73). P. 60–68.
10. Lysenko O., Tachinina O., Alekseeva I.V. Algorithm of Optimal Control of UAV Group. *Electronics and control systems*. № 2(56). Kyiv : NAU, 2018. P. 114–119.



11. Лисенко О.І., Тачиніна О.М., Алексєєва І.В. Математичні методи моделювання та оптимізації. Частина 1. Математичне програмування та дослідження операцій : підручник. Київ : НАУ, 2017. 212 с.
12. Ларіонов Ю.І., Левикін В.М., Хажмурадов М.А. Дослідження операцій в інформаційних системах. Харків : Компанія СМІТ, 2005. 364 с.
13. Дьяконов В.П., Круглов В.В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем : Специальный справочник. Санкт-Петербург : Питер, 2002. 448 с.

**Lysenko O.I., Tachinina O.M., Novikov V.I., Guida O.G., Furtat O.V., Yusyiv T.V.**  
**THE WAY OF ADJUSTING THE DIGITAL SYSTEM AND ENSURING**  
**THE POSITION OF THE MOBILE SENSOR**

*The article is devoted to the method of adjusting the channel parameters of the digital automatic control system of the position of the sensory axis of the mobile sensor, which are used as a mobile platform on which the probing device of precision targeted action is placed. The main idea of the method is to use the Ziegler-Nichols method to obtain initial conditions that provide a rapid approach to the optimum point with the subsequent application of numerical methods. The proposed method is easy to use and allows for a short time to perform parametric tuning of a single channel of the digital system of precision and quasi-invariant automatic stabilization of the axis of sensitivity of the mobile sensor. The article emphasizes that in general the method of setting the digital controller consists of two types of methods: virtual and real setting. The virtual tuning method uses a computer mathematical channel model of a digital sensor system to automatically control the axis of sensitivity of a mobile sensor. The real tuning method uses a real digital system to automatically control the position of the sensory axis of the mobile sensor. The article describes in detail the method of virtual parametric tuning of a single channel of the digital system of precision automatic stabilization of the sensory axis of the mobile sensor. Computer simulation has shown that the application of the virtual tuning method at least several times reduces the root mean square error of the sensory axis stabilization of the mobile sensor compared to the result of using the Ziegler-Nichols method (method) for tuning only. In this example, the performance indicator (criterion) by which the quality of the setting was evaluated has improved almost sevenfold.*

**Key words:** numerical methods, optimization, digital proportional-integral-differential regulator, mathematical modelling.

## ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 004.6

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/10>

*Анищенко О.С.*

Національний авіаційний університет

### СИНТЕЗ ШВИДКОДЮЧОГО АЛГОРИТМУ ФРАКТАЛЬНОГО СТИСНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

*У статті розкрито синтез швидкодіючого алгоритму фрактального стиснення зображень. Наголошено, що фрактальне стиснення можна розділити на такі два етапи: розбиття зображення на безліч рангових і доменних блоків (які можуть перекривати один одного) та застосування перетворень для кожної пари «доменний-ранговий блок» (геометричне, яке відображає доменний блок у рангу, та афінне, що змінює значення яскравості доменного блоку до максимальної відповідності значенням яскравості рангового блоку). Підкреслено, що від схеми розбиття, використаної на першому етапі, залежить якість стиснення. Чим більше доменних блоків, тим більшим є шанс знайти найбільш подібний ранговий блок. Визначено математичний складник алгоритму, описано принципи встановлення метрики відстані. Схематично представлено здійснення взаємодії доменів і діапазонів на прикладі реального зображення. Обґрунтовано, що крім безпосереднього перетворення значень пікселів, доменний блок також може бути підданий загальному масштабуванню (зменшенню розмірів до розмірів рангового блоку, наприклад, інтерполяцією або простим проріджуванням), повороту та іншим афінним перетворенням. Зазначено, що класифікація доменних і рангових блоків призначена для зменшення перебору блоків, і, як наслідок, прискорення алгоритму стиснення зображень. Кожен доменний блок класифікується до початку кодування. Під час підбору потенційний ранговий блок також класифікується і порівнюється тільки з доменами відповідного класу (або декількох близьких класів). Наголошено, що математично блок пікселів становить єдине ціле, а саме вектор позиції в абстрактному просторі позицій, де кожна окрема точка представляє інший блок. Коли до цього простору застосовується метрика відстані, взаємне розташування двох векторів визначає їхню близькість. Швидкодіючий алгоритм фрактального стиснення зображення використовує  $r$ -дерево, втілення якого запропоновано на зображенні підданому стисненню.*

**Ключові слова:** швидкодіючий алгоритм, синтез, фрактал, стиснення, зображення, оптимізація, компресія, архівація.

**Постановка проблеми.** Незважаючи на незлічену кількість альтернатив, найпопулярнішими методами стиснення зображення є методи на основі блоків, де зображення перед обробкою розбивається на сітку із блоків, що не перекриваються. Хоча кожен блок кодується окремо, пікселі всередині блоку обробляються разом. Отже, перевагою є подібність (за кольором та інтенсивністю) між сусідніми пікселями. Існують такі дві основні категорії методів на основі блоків: перша перетворює доменні кодери (такі, як JPEG, яка спочатку переводить пікселі у блоку в альтернативну форму, у котрій нерелевантну інформацію можна легко відкинути, наприклад, за допомогою дискретної косинусної трансформації); друга – кодери просторових доменів (такі, як векторне кванту-

вання), що аналізують пікселі зразу в пошуках ефективного представлення. Обидві категорії інтенсивно досліджувались у 1980-х роках і, як наслідок, нині знаходяться у різних комерційних додатках. Незважаючи на цей успіх, методи трансформації стиснення зображення домену і просторового домену розвиваються в нових напрямках. Зокрема, значну увагу привернули дві нові математичні сутності: вейвлети та фрактали [1, 2]. Хвилі нагадують віконні синусоїдали (в одній загальній формі), а фрактали можна використовувати способом, подібним до векторного квантування. На додаток до низьких бітрейтів [3] дві властивості стиснених фракталами зображень роблять їх використання у відео-додатках актуальним. По-перше, це швидка декомпресія навіть

на низькошвидкісних ПК. По-друге – це можливість розгорнути вікно відео або збільшити його частину без непривабливих артефактів «сходів». На жаль, навіть за допомогою спеціальної апаратної допомоги етап стиснення може бути надто повільним. Кілька існуючих алгоритмів є продуктивними в режимі реального часу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Початок розробки алгоритму фрактального стиснення зображення покладено можливістю застосування теорії систем ітераційних функцій у сфері стиснення зображень, дослідженої Майклом Барнслі та Аланом Слоуном [4]. Наступними кроками було вдосконалення та розвиток сфер застосування цього напрямку. Зокрема, Р. А. Зубко [5] провів огляд і стислий аналіз методів оптимізації фрактального кодування зображень. Автор запропонував варіанти суттєвого покращення часової ефективності стиснення фрактальним алгоритмом, навіть характеристики найперспективніших варіантів для практичного використання. Аналіз методів стиснення зображень на основі дискретно-косинусного перетворення запропонували Л. А. Клименко та А. Ю. Гордієнко [6]. У статті проводиться аналіз методів стиснення динамічних зображень, які набули найбільшого практичного застосування, – JPEG, MPEG, ДКП; розглядається дискретно-косинусне перетворення як найефективніший метод стиснення надмірної інформації.

Фрактальні методи стиснення зображень описали А. І. Вахіль та І. М. Кузьменко [7]. Ю.А. Щербакова та М.В. Скіцка [8] розкрили ефективність стиснення зображень залежно від попередньої обробки. У [9] авторами доведено, що здійснення фрактального стискання дозволяє застосовувати фрактальну компресію та декомпресію до графічних зображень, що розширює межі застосування фрактальної графіки не тільки до графічних об'єктів, але і до геометрії живої та неживої природи. Із зарубіжних авторів варто відзначити таких дослідників, як Galabov Miroslav [10], Menassel Rafik [11, 12], Menassel Rafik & Nini Brahim & Tahar Mekhaznia [13, 14], Khedgaonkar, Roshni [15], Menassel Rafik & Gaba Idriss & Titi Khalil [16], Garg Preedhi & Gupta Richa & Tyagi Rajesh [17], Agrawal Anshu & Chauhan Pushpraj [18], Amin Sobia & Gupta Richa & Mehrotra Deepti [19], Diep Do & Novinsky Nikolay [20] та інших. Проте, враховуючи описані наукові здобутки за цією темою, питання синтезу швидкодіючого алгоритму фрактального стиснення зображень залишається відкритим і потребує детального опрацювання.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розкриття синтезу швидкодіючого алгоритму фрактального стиснення зображень.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Досліджуючи процес стиснення фрактального зображення, варто наголосити на фракталах, що лежать в основі цього процесу. Першочерговим фактором є приналежність фракталів. Вони належать не до комплексної площини (множини Мандельброта, множини Джулії), а до систем із ітераційними функціями ( $W$  – це сукупність афінних перетворень) із додатковою властивістю бути контрактними.

$$W = \bigcup_{i=1}^n w_i, w_i : R^3 \rightarrow R^3 \quad (1)$$

де  $w_i$  – афінні перетворення.

Під час перетворення  $w_i$  будь-які дві точки площини зображення наближаються одна до одної як просторово, так і у відтінках сірого або у кольорі.

$$d_{скв.ном}(w_i(u), w_i(v)) < s_{i,v} d_{скв.ном}(u, v), 0 \leq s_{i,v} < 1 \quad (2)$$

$$d_{евк.від}(w_i(u), w_i(v)) < s_{i,v} d_{евк.від}(u, v), 0 \leq s_{i,v} < 1 \quad (3)$$

де  $u, v$  – будь-які дві точки зображення.

Метрика відстані  $d$  змінюється залежно від теорії чи практики використання. Для перших метрикою вибору є відстань Гауссдорфа (на практиці  $d_{евк.від}$  – це евклідова відстань, а  $d_{скв.ном}$  – середньоквадратична помилка). Оскільки теоретик прагне спростити математичні докази, практик прагне досягти обчислювальної ефективності. Незалежно від цього, якщо сукупність афінних перетворень загалом є скорочувальною, то, застосовуючи до будь-якого вхідного зображення  $\mu$ , система ітераційних функцій має таку властивість:

$$\mu_\infty = \lim_{n \rightarrow \infty} (W^n(\mu)) \text{ є унікальним атрактором, і} \quad (4)$$

$$\mu_\infty = W^n(\mu) \text{ – це зображення з нерухомою точкою} \quad (5)$$

Тобто початок стиснення зображення варто орієнтувати на неодноразові скорочувальні перетворення  $W$  після певної точки, причому будь-який процес стабілізується до унікального зображення атрактора  $\mu_\infty$  незалежно від  $\infty$ . Оскільки ми отримаємо подібне зображення, засноване на нескінченно малих об'єктах, це зображення вважатиметься фрактальним. Здатність системи ітераційних функцій створювати велику кількість фрактальних зображень, таких як Трикутник Серпінського, описано в [21]. Більш складним є зворотне перетворення (відновлення): з огляду на довільне цифрове зображення потрібно спробувати знайти систему ітераційних функцій, яка, оцінюючись ітерацією, дає інше схоже зображення за зовнішнім виглядом до оригіналу. Іншими словами, варто знайти такий набір перетворень  $\{w_i\}$ , що

$$d_{скв.ном}(\mu_{поч}, \mu_\infty) \quad (6)$$

Ця проблема відома як «обернена задача», яка у загальному вигляді залишається невирішеною. Проте у 1992 році Арно Жаккін представив обмежену версію оберненої задачі, на якій базується все сучасне програмне забезпечення для стиснення фрактальних зображень.

У найпростішій формі зображення, що підлягає стисненню, розбивають на два масштаби, один із них удвічі більший за інший (наприклад, на блоки розміром 8x8 та 4x4). Перший масштаб зображення виконується доменними блоками, менший масштаб – діапазонами. Блоки діапазонів не перекриваються, кожен із них містить піксель зображення. Блоки домену можуть перекриватись і кожен не повинен містити піксель, як показано на рис. 1.

Ліворуч зображено блоки домену, які відображаються на блоках діапазону, зображеного праворуч. У наведеному прикладі на рис. 1 міститься 25 перетворень, пронумерованих у порядку сканування.

Метою процесу стиснення є пошук афінного відображення  $w_i$  форми

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = w_i \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & s_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_i \\ f_i \\ o_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

для кожного блоку діапазону, оскільки під час застосування до якогось (поки що не визначеного) блоку домену значення  $d_{скв.лом}$  є мінімальним. У рівнянні (7) точка  $(x, y)$  є пікселем домену зі значенням градацій сірого  $z$ , а  $(x', y')$  – пікселем діапазону з новим значенням  $z'$ . Коефіцієнти  $e_i$  і  $f_i$  переводять доменний блок у положення блоку

діапазонів, оскільки його розмір зменшується удвічі. Коефіцієнт  $s_i$  масштабує значення яскравості (подібно до контрастності на телевізорі), тоді як коефіцієнт  $o_i$  введено для зміщення яскравості (подібно до регулятора яскравості). Отриманий фрактальний код є послідовністю кортежів  $(e_i, f_i, o_i, s_i)$ , по одному для кожного блоку діапазону. Із цими обмеженнями таку схему можна охарактеризувати як половину геометричної яскравості першого порядку, блоку локального домену, методу блокування розділеного діапазону. Зауважимо, що  $s_{i,g}$  (3) зафіксовано на 1/2, тому для зручності " $v$ " у  $s_{i,v}$  з (2) опускається.

Суть процесу стиснення полягає у сполученні кожного блоку діапазону із блоком домену таким чином, щоб різниця між ними під час афінного перетворення, визначеного рівнянням (7), була мінімальною.

Навіть якщо обмежуватися квадратними блоками, обчислення є величезними. Зображення 512x512 містить загалом 255 025 різних блоків домену 8x8, зокрема вісім ізометричних симетрій (чотири обертання, чотири відбиття) збільшують цю загальну суму до 2040200. Існує  $(512/4) 2 = 16,384$  блоків діапазону, що робить загалом 33 426 636 800 можливих пар для тестування. Задля зменшення навантаження можна спробувати здійснити легкий пошук, наприклад, шляхом обмеження не перекривання блоків домену; у цьому випадку є всього 536 870 912 варіантів. Фактично пул доменів скоротився у 64 рази. Пошук все ще триває  $O(n^2)$ , але принаймні обчислення скоротилось із кількох днів до кількох годин. Недоліком є

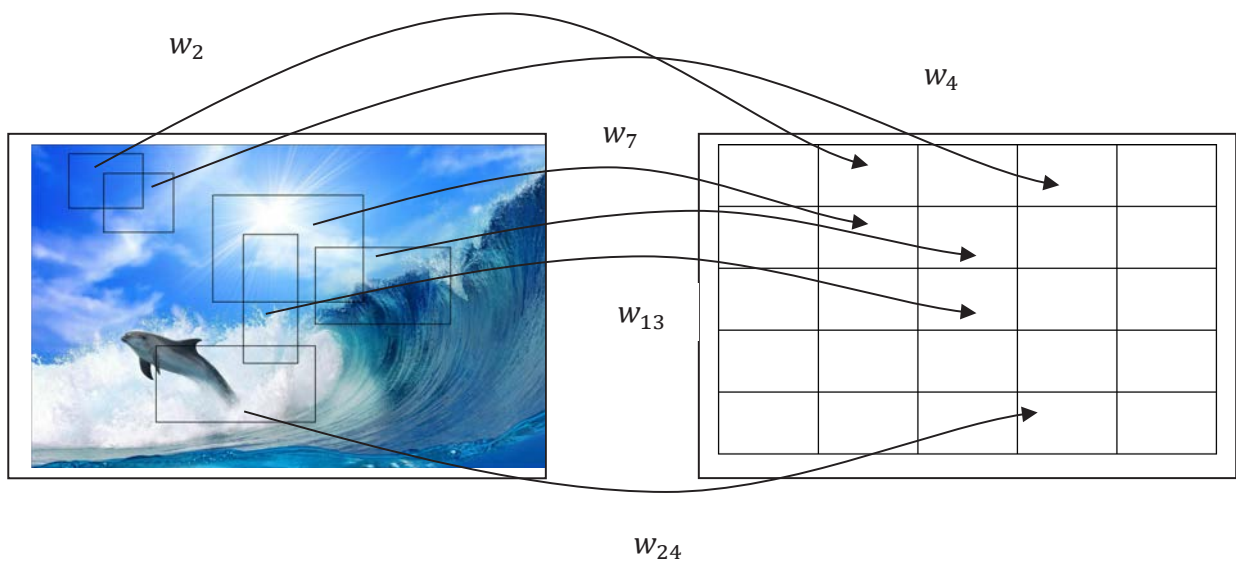


Рис. 1. Схема здійснення взаємодії доменів і діапазонів

те, що страждає якість зображення, оскільки найкращі пари можуть пропускатися.

Очевидним способом досягнення подальшого збільшення швидкості є обмеження пошуку невеликою областю відносно поточного блоку діапазонів. Якщо, скажімо, розглядаються лише 64 найближчі доменні блоки, тоді кількість можливостей зменшується до 1048 576. У крайньому випадку від пошуку можна взагалі відмовитися, варто просто з'єднати блоки діапазону із найближчим доменним блоком, навіть не враховуючи вісім симетрій. Такий підхід передбачає нижню межу обчислень. Часова складність становить  $O(n)$  із малим постійним коефіцієнтом. Але знову ж таки якість страждає, цього разу різко, оскільки вона спирається на зображення, що мають основу подібної форми.

Більш складні алгоритми використовують категоризацію. Кожен блок пулу домену класифікується як гладкий, текстурований або такий, що містить край. Кожен блок діапазонів також класифікується. Тоді під час пошуку відповідної пари шукають лише відповідну категорію. Виведення формули обчислювальної складності є складним, оскільки розподіл блоків домену на різні категорії залежить від вмісту зображення. Тим не менш такий підхід може скоротити час пошуку із кількох годин до декількох хвилин. Це сучасний рівень техніки фрактального кодування зображень.

Математично блок пікселів складає єдине ціле, зокрема вектор позиції в абстрактному просторі позицій, де кожна окрема точка представляє інший блок. Коли до цього простору застосовується метрика відстані, взаємне розташування двох векторів визначає їхню близькість. Для практичного здійснення потрібна багатовимірна структура даних, здатна зберігати та індексувати вектори позицій.

Нині наявні багато можливих способів перетворення блоку пікселів у вектор позиції: можна обчислити коефіцієнти дискретного косинусного перетворення, або коефіцієнти Карунена-Лоєва, або коефіцієнти текстури, або розширення Тейлора, або моменти інтенсивності, або інший набір функцій. Швидкодійний алгоритм фрактального стиснення зображень використовує найпростіший підхід: він зразу використовує значення пікселів. Отже, блок діапазону  $4 \times 4$  стає 16-розмірним вектором положення. Однак слід враховувати такі два ускладнення:

1) блоки домену  $8 \times 8$  мають бути зменшені (шляхом усереднення комірок  $2 \times 2$  пікселів) для порівняння блоків діапазонів;

2) оскільки фрактальні коди складаються з афінних перетворень, шукаємо доменний блок, який найбільше відповідає цьому блоку діапазонів за афінного перетворення. Отже, пікселі у блоці слід спочатку нормалізувати до фіксованого середнього значення і дисперсії. Тобто, враховуючи 16 розмірний кортеж значень інтенсивності:

$\bar{z} = (z_1, z_2, z_3, \dots, z_{16})$  взято з піксельного блоку

$$\begin{bmatrix} z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \\ z_5 & z_6 & z_7 & z_8 \\ z_9 & z_{10} & z_{11} & z_{12} \\ z_{13} & z_{14} & z_{15} & z_{16} \end{bmatrix}_{i,j} \quad (8)$$

вони перетворюються так, що

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z'_i = c_1$$

$$var = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z'_i - \bar{z})^2 = c_2 \quad (9)$$

де  $n = 16$  і  $z'_i$  – нормовані значення пікселів;  $c_1$ , і  $c_2$  – константи.

Важливість цього кроку можна побачити, переглянувши рівняння (7). Оскільки афінне перетворення змінює середнє значення (через зміщення  $o_j$ ) і дисперсію піксельного блоку (через шкалу  $s_i$ ), дійсне порівняння вимагає нормалізації усього блоку після того, як вектори поблизу у просторі позицій представляють піксельні блоки, подібні відповідно до рівняння (3) до деякого афінного перетворення.

Далі алгоритм вимагає двох процедур: першу – для вставлення векторів положення, відповідних блокам домену, другу – для вилучення елемента, найближчого до цього блоку діапазону.

Швидкодійний алгоритм фрактального стиснення зображення використовує  $r$ -дерево.  $R$ -дерево (і його близький родич –  $r^*$ -дерево) – це структура даних, здатна ефективно індексувати багатовимірний простір.  $R$ -дерево не дуже відоме, але його можна вважати продовженням більш знайомого  $B$ -дерева (рис. 2).

Повні описи наведені у [2, 6]. На рис. 3 показано, що алгоритм працює у двох вимірах: « $g$ » у  $r$ -дереві означає «прямокутник».

Верхній рівень  $R1$  містить три прямокутники другого рівня, кожен із яких може містити до п'яти точок даних,  $x$  позначає місце пошуку. У прикладі, наведеному на рис. 3, показано одинадцять векторів положення, позначених від  $a$  до  $k$ , які є доменними блоками. Дерево  $r$  індексує ці вектори як вкладену множину прямокутників.  $X$  позначає розташування певного блоку діапазонів у цьому просторі позицій. За знаходження найближчого доменного блоку алгоритм пошуку звужується від

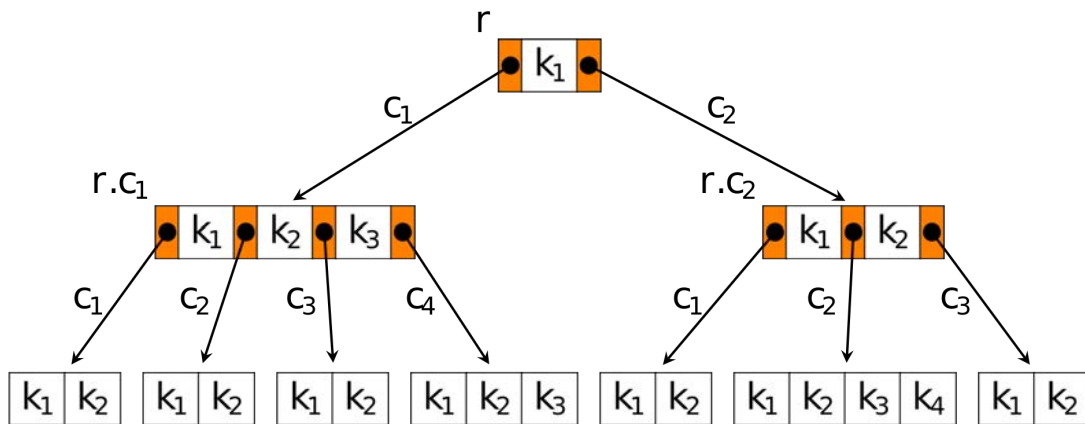


Рис. 2. Б-дерево

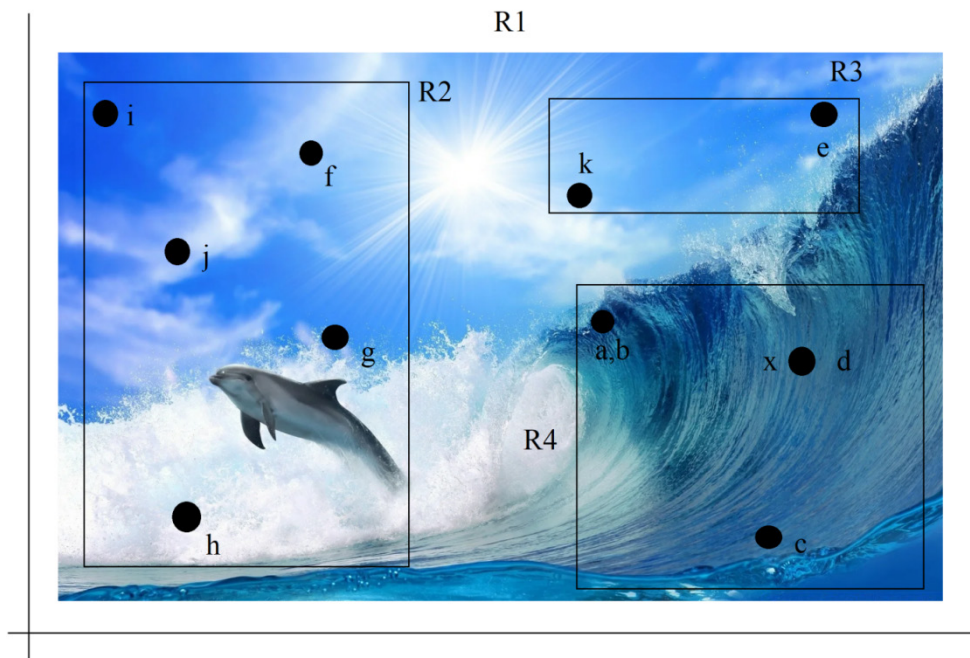


Рис. 3. Втілення алгоритму у двох вимірах

R1 до R4, перевіряє кожен елемент у R4 і повертає  $d$  як найближчу відповідність. На відміну від інших алгоритмів, які досліджують лише блоки домену, фізично близькі до певного блоку діапазонів, швидкодіючий алгоритм фрактального стиснення зображення досліджує структурно близькі блоки. Використовувана метрика відстані – це вибір реалізації. Використання багатовимірного індексу на просторі позицій дає дві переваги. Перша – це швидкість. Ураховуючи вкладений розподіл векторів позицій для визначення найближчого збігу, потрібно перевірити лише кілька елементів. Середній час пошуку становить приблизно  $\propto n \log_m(n)$ , де  $n$  – кількість вставлених

блоків домену, а  $m$  обмежує кількість елементів, що містяться в одному прямокутнику. Коли  $m=1$ , або коли  $m$  дуже велике, пошук зводиться до лінійного часу. Отже, слід бути обережним у виборі коефіцієнта розгалуження  $r$ -дерева. З експериментів значення 16 було задовільним для цієї програми. Наявність єдиного простору пошуку – друга перевага. Помилкова класифікація усувається, оскільки між категоріями немає жорстких кордонів, що призводить до меншої кількості бідних пар, хоча приріст швидкості обов'язково враховується з погляду на якість зображення.

**Висновки і перспективи подальших досліджень.** У роботі розкрито синтез швидкодіючого

алгоритму фрактального стиснення зображень. Стиснення фрактального зображення є спадком векторного квантування. Алгоритм пропонує конкурентний підхід до кодування нерухомих зображень, особливо за високих коефіцієнтів стиснення. Упровадження швидкодіючого алгоритму фрактального стиснення зображень дозво-

ляє встановити необхідну симетрію, що є можливим під час застосування на базі відео потоку реального часу. Перспективи подальших досліджень ґрунтуються на вдосконаленні розглянутого швидкодіючого алгоритму фрактального стиснення зображень за рахунок розширення спектру дії і зниження часу реалізації.

#### Список літератури:

1. Подчашинський Ю. О., Хаустович О. В. Дослідження методів фрактального стиснення відеозображень з вимірювальною інформацією, що передаються комп'ютерними мережами. *Вісник ЖДТУ. Серія «Технічні науки»*. 2018. № 1 (81). С.149–154. [https://doi.org/10.26642/tn-2018-1\(81\)-149-154](https://doi.org/10.26642/tn-2018-1(81)-149-154).
2. Подчашинський Ю. О., Чепюк Л. О. Порівняння фрактального і вейвлетного підходів до стиснення зображень. Тези доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційно-комп'ютерні технології – 2020 (ІКТ-2020)», (м. Житомир, 09 - 11 квітня 2020 р.). Житомир: Житомирська політехніка, 2020. С. 129-130.
3. Лукьянчиков С. Дослідження сучасних методів стиснення звукової інформації з втратами та без втрат. *Геометричне моделювання та інформаційні технології*. 2017. № 2. С. 62-67.
4. Зубко А.М. Інформаційно-комунікаційні технології як чинник розвитку професіоналізму педагогів у системі післядипломної освіти. *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2020. Т. 77, № 3. С. 262-281.
5. Зубко Р. А. Дослідження можливості покращення часової ефективності фрактального стиснення зображення. *Вісник Університету «Україна»*. 2019. № 1 (22). С. 256-266.
6. Клименко Л. А., Гордієнко А. Ю. Аналіз методів стиснення зображень на основі дискретно-косинусного перетворення. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2019. № 5. С. 24-31.
7. Вахіль А. І., Кузьменко І. М. Фрактальні методи стиснення зображень описали. URL: [http://tef.kpi.ua/files/pdf/vahil\\_kuzmenko\\_1302541569.pdf](http://tef.kpi.ua/files/pdf/vahil_kuzmenko_1302541569.pdf) (дата звернення: 25.08.2021).
8. Щербакова Ю.А., Скіцка М.В. Ефективність стиснення зображень в залежності від попередньої обробки. *Сучасні напрямки розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління: тези доповідей одинадцятої міжнародної науково-технічної конференції (8 – 9 квітня 2021 р.)*. 2021. Т. 2. С. 30.
9. Залевська О., Яблонський П., Сидоренко І., Феноген О. Реалізація алгоритму фрактального стиснення графічного зображення / *Сучасні проблеми моделювання*. 2021. С. 48-55.
10. Galabov M. *Fractal Image Compression*. 2003. doi: 10.1145/973620.973673.
11. Menassel R. *Optimization of Fractal Image Compression*. 2020. doi: 10.5772/intechopen.93051.
12. Menassel R. *Conception de métaheuristique d'optimisation pour la compression d'images*. 2018. URL: [https://www.researchgate.net/publication/337210089\\_Conception\\_de\\_métaheuristique\\_d'optimisation\\_pour\\_la\\_compression\\_d'images](https://www.researchgate.net/publication/337210089_Conception_de_métaheuristique_d'optimisation_pour_la_compression_d'images) (Last accessed: 17.03.2021).
13. Menassel R., Nini B., Tahar M. An improved fractal image compression using wolf pack algorithm. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*. 2017. Vol. 30. P. 1-11. doi: 10.1080/0952813X.2017.1409281.
14. Menassel R., Nini B., Mekhaznia T. *WolfPack algorithm for a fractal image compression*. 2016. P. 116-120. doi: 10.1145/3038884.3038903.
15. Khedgaonkar R. S., Kamble S. D. Application of Quadtree Partitioning in Fractal Image Compression using Error Based Approach. *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*. 2012. Vol. 2(1). P. 050-054. doi: 10.9790/3021-0215054.
16. Menassel R., Gaba I., Titi K. Introducing BAT inspired algorithm to improve fractal image compression. *International Journal of Computers and Applications*. 2020. Vol. 42(7). P. 697-704. doi: 10.1080/1206212X.2019.1638631.
17. Garg P., Gupta R., Tyagi R. K. Adaptive fractal image compression based on adaptive thresholding in DCT domain. In *Information Systems Design and Intelligent Applications* Springer, New Delhi. 2016. P. 31-40. doi: 10.1007/978-81-322-2755-7\_4.
18. Agrawal A., Chauhan P. Design Image Compression for Fractal Image using Block Code Algorithm. *International Journal of Computer Sciences and Engineering*. 2018. Vol. 6. P. 451-455. doi: 10.26438/ijcse/v6i6.451455.
19. Amin S., Gupta R., Mehrotra D. Analytical Review on Image Compression Using Fractal Image Coding. In *Soft Computing: Theories and Applications*. 2018. P. 309-321. Springer, Singapore. doi: 10.1007/978-981-10-5699-4\_30.
20. Novinsky N. Research of a New Algorithm for Acceleration of Fractal Images Compression. In *2019 International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT) (IEEE)*. 2019. P. 1-3. doi: 10.1109/EnT47717.2019.9030573.

21. Щекань Н. П. Геометричні та алгебраїчні фрактальні методи в інформаційних технологіях обробки і аналізу потоків даних. *Моделювання та інформаційні системи в економіці* : зб. наук. пр. Київ : КНЕУ, 2018. Вип. 95. С. 205–219.

**Anyshchenko O.S. SYNTHESIS OF HIGH-SPEED FRACTAL IMAGE COMPRESSION ALGORITHM**

*The article reveals the synthesis of a high-speed fractal image compression algorithm. It is emphasized that fractal compression can be divided into two stages: splitting the image into many rank blocks and into many domain blocks (which can overlap each other); application of transformations for each domain-rank block: geometric, which reflects the domain block in the rank, and affine, which changes the brightness value of the domain block to the maximum correspondence to the brightness values of the rank block. It is emphasized that the quality of compression depends on the partitioning scheme used in the first stage. The more domain blocks, the better the chance of finding the most similar ranking block. The mathematical component of the algorithm is determined, the principles of establishing distance metrics are described. The implementation of the interaction of domains and ranges is schematically presented on the example of a real image. It is substantiated that in addition to direct conversion of pixel values, the domain block can also be subjected to general scaling (reduction in size to the size of the rank block, for example, interpolation or simple thinning), rotation and other affine transformation. It is noted that the classification of domain and rank blocks is designed to reduce the number of blocks, and, as a consequence, to speed up the image compression algorithm. Each domain block is classified before encoding. During the selection, the potential ranking block is also classified and compared only with the domains of the corresponding class (or several related classes). It is emphasized that mathematically a block of pixels forms a single whole, namely, a position vector in an abstract position space, where each individual point represents a different block. When a distance metric is applied to this space, the relative position of the two vectors determines their proximity. The high-speed fractal image compression algorithm uses an  $r$ -tree, the implementation of which is proposed in the image subjected to compression.*

**Key words:** *high-speed algorithm, synthesis, fractal, compression, image, optimization, compression, archiving.*



**Батюк С.Г.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Лобзов Н.С.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ФУНКЦІОНАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО БАРАБАНОВОГО КОТЛА

Функціональне моделювання системи автоматичного регулювання – моделювання статичних і динамічних функцій системи автоматичного регулювання функціональними блок-схемами в системі комп'ютерної математики Matlab (пакет Simulink). Розроблені й протестовані функціональні моделі автоматизованого технологічного комплексу енергетичного барабанового котла. Змодельована система автоматичного регулювання теплового навантаження барабанового котла. Змодельована система автоматичного регулювання рівня в барабані котла з урахуванням ефекту «набрякання рівня». Змодельована комплексна робота системи автоматичного регулювання навантаження та системи автоматичного регулювання рівня в їх взаємодії за збуренням зі сторони регулюючого клапану турбіни в складі енергоблоку. Розроблені й протестовані функціональні моделі систем автоматичного регулювання барабанового котла можуть бути використані як в навчальному процесі, так і під час проектування та експлуатації для налагодження систем автоматичного регулювання котла.

Унікальність барабанового котла як технологічного об'єкта управління (наявність системи автоматичного регулювання рівня з триімпульсним регулятором для парировання ефекту «набрякання рівня») робить моделювання автоматизованого технологічного комплексу енергетичного барабанового котла актуальною задачею.

Ефективність функціонального моделювання технологічних об'єктів управління функціональними блок-схемами дозволяє рекомендувати такі функціональні моделі як для імітаційного моделювання систем автоматичного регулювання безпосередньо в програмованих логічних контролерах, так і для імітаційного моделювання автоматизованих технологічних комплексів (кібер-фізичних систем) програмним комплексом «система комп'ютерної математики (моделювання технологічних об'єктів управління) – симулятор програмованого логічного контролера (реалізація контролерної функціональності автоматизованих систем управління) – промислова система людино-машинного інтерфейсу (реалізація супервізорної функціональності автоматизованих систем управління)».

**Ключові слова:** функціональне моделювання, математичне моделювання, система комп'ютерної математики, Matlab Simulink, технологічний об'єкт управління, тепла електростанція, енергоблок, барабановий котел, автоматизований технологічний комплекс, система автоматичного регулювання, САР теплового навантаження, САР рівня, набрякання рівня.

**Постановка проблеми.** Функціональне моделювання динамічної системи – моделювання статичних і динамічних функцій системи. Функціональне моделювання системи автоматичного регулювання (далі – САР) – моделювання статичних і динамічних функцій САР функціональними блок-схемами в середовищі комп'ютерної математики (далі – СКМ). Найчастіше використовується пакет Simulink СКМ Matlab, в якому блок-схеми розроблюються потужною та ефективною графічною мовою CFC (Continuous Functional Chart – неперервна функціональна діаграма).

Автоматизований технологічний комплекс (далі – АТК) – це технологічний об'єкт управління (далі – ТОУ), оснащений автоматизованою системою управління технологічними процесами (далі – АСУТП). ТОУ є сукупністю окремих об'єктів управління (далі – ОУ) – каналів передачі дії «регулюючий орган – регульований режимний параметр». АТК є сукупністю САР. Кожна САР – це ОУ, який оснащений автоматичною системою регулювання (далі – АСР). АСР у лінійній САР переважно реалізуються ПІД-регуляторами (практично завжди ПІ-регуляторами, тому що

Д-частина тільки «підкреслює» стохастичні перешкоди й не покращує якість регулювання).

Функціональне моделювання АТК – функціональне моделювання всіх САР, які входять до складу АТК, в їх взаємодії за типовими збуреннями: збуреннями зі сторони регулюючого органу; збуреннями за навантаженням; збуреннями зміною завдань (уставок) регульованих режимних параметрів САР.

Функціональне моделювання АТК – перший крок до імітаційного моделювання динамічних систем із використанням промислового програмного забезпечення [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Моделі САР в АТК повинні бути виключно лінійними, що забезпечує реалізацію принципу суперпозиції, який гарантує відтворення результатів моделювання як за самого моделювання, так і в промислових умовах функціонування (тобто незалежності реакції замкненої САР на збурення від амплітуди збурення). Використання нелінійних елементів категорично забороняється. Вимушені виключення: моделювання нелінійності регулюючого органу (якщо використаний регулюючий орган нелінійний) із метою визначення лінійної ділянки витратної характеристики регулюючого органу; реалізація релейного двопозиційного регулювання (яке вводить САР в режим автоколиваний, які є сталим режимом роботи нелінійної САР). Головна відмінність функціонального моделювання АТК від функціонального моделювання автономних САР – саме моделювання динамічної взаємодії всіх САР у складі АТК за типовими збуреннями (які самі також моделюються). У моделі АТК моделюються типові збурення та досліджується функціонування комплексу САР у складі АТК у взаємодії їх реакцій на змодельовані збурення.

**Постановка завдання.** Модель АТК барабанового котла розроблюється:

1) з навчальною метою для використання в лабораторних роботах з автоматизації;

2) з метою використання під час проектування та експлуатації для налагодження САР котла. Енергетичний барабановий котел – типовий об'єкт промислової автоматизації (в енергетиці).

Водночас потужний паровий барабановий котел має специфічний унікальний ефект «набрякання рівня», необхідність урахування якого приводить до використання унікальної одноконтурної САР рівня з триімпульсним регулятором. Саме вказане поєднання типовості й унікальності барабанового котла як ТОО робить моделювання АТК енергетичного барабанового котла актуальною

(цікавою та корисною) задачею як для начального процесу з автоматизації, так і для налагодження АТК у процесі проектування та експлуатації.

САР барабанового котла – невід'ємна САР у складі АСУТП енергоблоків теплових електростанцій. Модель АТК барабанового котла проектується в середовищі Matlab Simulink. ОУ являє собою чотири аперіодичні ланки першого порядку, з'єднані послідовно. Під час моделювання слід передбачити контроль основних параметрів барабанового котла, найвагомим з яких є рівень у барабані. У моделі АТК можна виділити дві основні САР:

1) каскадна САР теплового навантаження котла;

2) одноконтурна САР рівня в барабані котла з триімпульсним регулятором.

На рис. 1 наведена структурна схема системи автоматичного управління (далі – САУ) енергоблоком.

САУ енергоблоком містить САР електричної потужності електрогенератора, САР теплового навантаження котла й САР живлення водою котла. Усі САР є САР матеріального балансу.

САР електричної потужності електрогенератора – САР матеріального балансу виробленої енергоблоком і потрібної користувачам електроенергії. САР теплового навантаження – САР матеріального балансу підведеного до топки котла й потрібного тепла (підведеної та потрібної витрати палива) для випаровування води в барабані котла. САР живлення водою котла – САР матеріального балансу підведеної до барабану котла і виробленої пари для подавання в паровий колектор турбіни.

Абревіатури рис. 1: ТА – турбоагрегат; РК – регулюючі клапани турбіни; ВТ – відбір тиску; ММ – манометр; ДМ – дифманометр; ДФ – діафрагма; РО – регулюючий орган; ВТМ – трифазний ватметр; КНД – конденсатор турбіни; ЕГ – електрогенератор; ВЦО – відцентровий вимірювач частоти обертів вала турбіни; РТБ – регулятор частоти обертів вала турбіни (поставляється комплектно з ВЦО як обладнання ТА); ПВРУ – перемикач вибору режиму роботи котла; РБР – регулятор базового режиму роботи котла (стабілізація витрати перегрітої пари); РТ – регулятор тиску пари; РП – регулятор витрати палива; РЧС – регулятор частоти системний ( $f^* = 50$  Гц); ГДЦ – головний диспетчерський центр енергосистеми; РПБ – регулятор електричної потужності енергоблоку; КБ – командний блок для формування заданих потужностей.

Примітка. САУ енергоблоку містить також САР економічності згоряння палива. САР підтримує співвідношення паливо / повітря на рівні, що

забезпечує повне згоряння палива в топці котла й виділення в топці всього тепла відповідно до теплотворної здатності палива. У статті ця САР не розглядається.

Усі САР використовують режимний параметр як індикатор матеріального балансу. САР електричної потужності енергоблоку є каскадною САР частоти змінного струму в енергосистемі (індикатор балансу / небалансу – частота струму). САР теплового навантаження є каскадною САР тиску в паровому колекторі (індикатор балансу / небалансу – тиск в паровому колекторі). САР живлення котла водою є трімппульсною САР рівня в барабані котла (індикатор балансу / небалансу – рівень води в барабані котла).

Частота змінного струму 50 Гц в енергосистемі є сталою, якщо енергосистема виробляє стільки струму, тобто потужності (за заданої ерс 220 / 380 В), скільки потрібно користувачам. Під час, наприклад, підключення додаткових користувачів, тобто за збільшення навантаження енергосистеми струм в енергосистемі збільшується, але не достатньо, тобто його не вистачає всім користувачам; напруга ж зменшується. Водночас указане збільшення струму відповідно до закону електромагнітної індукції призводить до падіння частоти обертання ротору електрогенератора, тобто до падіння частоти струму в енергосистемі. Ротор турбіни, з'єднаний із ротором електрогенератора, також обертається повільніше. У результаті відцентровий регулятор РТБ частоти обертів вала турбіни привідкриває клапан РК паропроводу на турбіну, тим самим збільшуючи витрату пари на турбіну, і ротор турбіни й електрогенератора обертається швидше, відновлюючи частоту струму в енергосистемі. РТБ є П-регулятором, тому завжди є статична похибка стабілізації частоти обертів. Задана частота обертів коригується каскадною САР частоти змінного струму (РЧС у ГДЦ і станційний РПБ). У результаті енергосистема виробляє більше струму й саме стільки, скільки потрібно всім споживачам. Перемикач ПВРУ слугує для вибору регулюючого (основний) і базового (резервний) режимів роботи котла.

Таким чином, турбіна споживає більше пари. Відповідно, в котел

треба подати більше води (відновити матеріальний баланс), а для того, щоб більша кількість води випарувалась, у топку потрібно подати більше палива.

У разі збільшення витрати пари на турбіну в барабані зменшується рівень води (порушений матеріальний баланс). САР рівня збільшує подавання живильної води в барабан, відновлюючи матеріальний баланс.

У разі збільшення витрати пари на турбіну в паропроводі зменшується тиск (порушений матеріальний баланс). Каскадна САР тиску збільшує витрату палива в топці котла (САР співвідношення паливо / повітря пропорційно збільшить витрату повітря в топці), відповідно, в топці виділиться більше тепла для нагрівання більшої кількості води, поданої САР рівня, і більшого пароутворення. З більшої кількості води внаслідок більшої кількості підведеного тепла виробляється більше пари. Матеріальний баланс вода – тепло – пара відновлюється, відповідно, тиск пари в паропроводі стабілізується на заданому значенні.

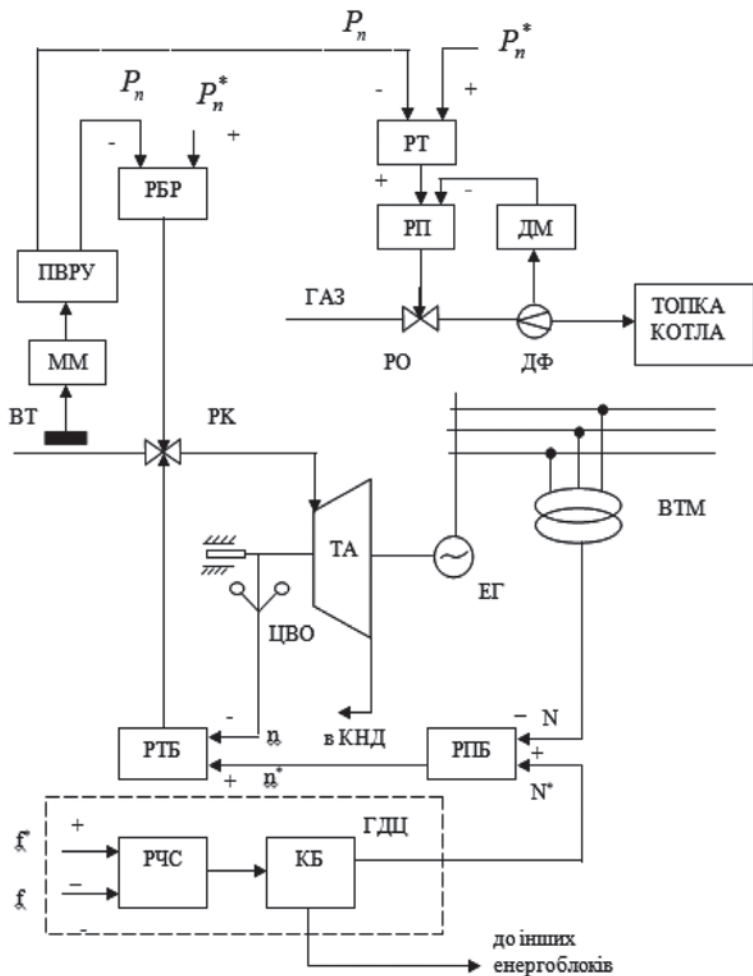


Рис. 1. Схема структурна САУ енергоблоком

Аналогічно працює САУ енергоблоком при відключенні користувачів, тобто при зменшенні навантаження енергосистеми.

На рис. 2 наведена схема структурна триімпульсної САУ рівня в барабані парового котла.

Абревіатури рис. 2:  $H^*$ ,  $H$  – заданий рівень (уставка рівня) і поточний рівень; РРВ – регулятор рівня; ВР – відбір рівня; РМ – рівнемір; ДФ – діафрагма; ДМ – дифманометр; Джв – витрата живильної води; Дпп – витрата перегрітої пари; РО – регулюючий орган.

Рівень пароводяної суміші в барабані вимірюється рівнеміром. Через те, що пароводяна суміш уже є неньютоновою рідиною (змінює об'єм від тиску), відбувається так зване «набрякання рівня»: за зменшення тиску в барабані пароводяна суміш збільшується в об'ємі, що витратомір сприймає як збільшення рівня, хоча насправді рівень води зменшується (зменшення тиску в барабані означає, що на турбіну витрачається більше пари, тобто більше води випаровується, відповідно, води в барабані менше та її рівень падає). У разі збільшення тиску в барабані відбувається протилежне хибне спрацювання – рівнемір дає зменшення рівня, хоча насправді рівень води збільшується.

Хибне протилежне спрацювання рівнеміра перетворює зворотний зв'язок за рівнем у САУ рівня з від'ємного на додатний, у результаті чого перехідний процес розходиться та відбувається аварія – упуск

рівня (барабан без води) або переживлення рівня (мікрокраплі води попадають на лопатки турбіни, руйнуючи їх). Для запобігання цьому катастрофічному явищу на регулятор рівня РРВ подаються два додаткові імпульси (перший імпульс – поточний рівень; уставка імпульсом не вважається): вимірні витрата живильної води в барабан (котел) і витрата пари з котла (на турбіну), причому з протилежними знаками. У результаті додатний імпульс витрати пари в перший момент забезпечує спрацювання РРВ у правильному напрямі, а далі (коли РРВ змінює витрату води в правильному напрямі) врівноважується від'ємним імпульсом витрати живильної води (спочатку завжди  $Дпп > Джв$  або  $Дпп < Джв$ , а потім завжди  $Джв = Дпп$ ).

Наприкінці перехідного процесу завжди відбувається нульова статична похибка, тому що із часом завжди  $Джв = Дпп$ , у результаті в кінці перехідного процесу –  $H = H^*$ .

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

На рис. 3 наведена модель АТК барабанового котла (параметри приближені до реальних), верхня САУ – каскадна САУ теплового навантаження котла, нижня САУ – одноконтурна САУ рівня в барабані котла.

На рис. 4 наведена модель каскадної САУ теплового навантаження котла. Для каскадної САУ випереджаючий та інерційний об'єкти змодельовані послідовним з'єднанням двох аперіодичних ланок

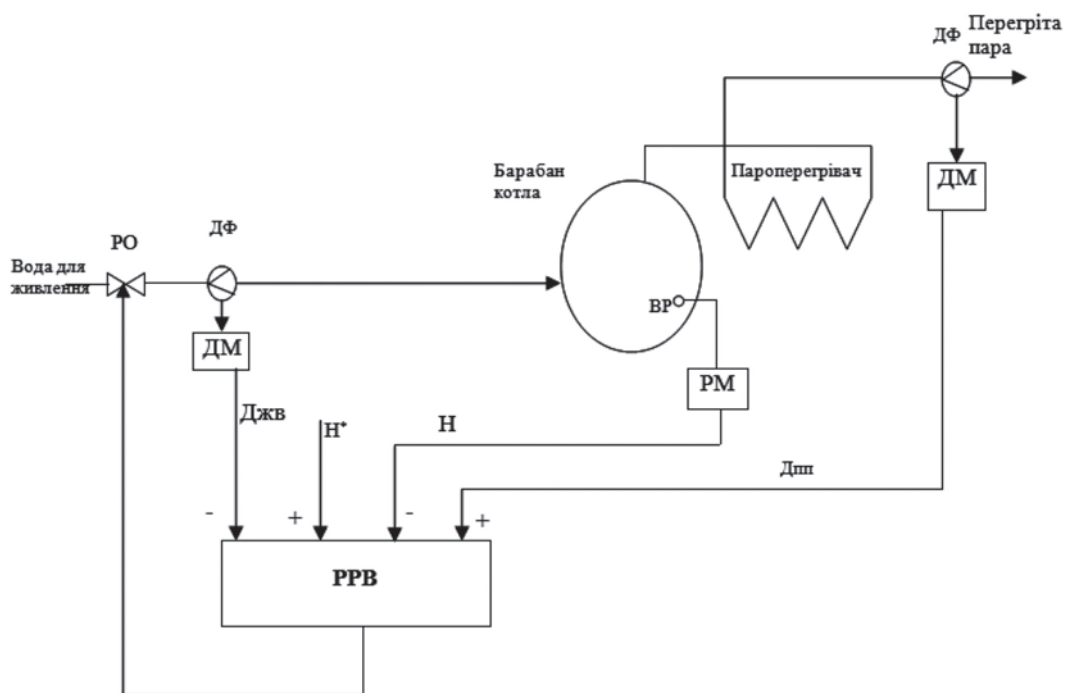


Рис. 2. Схема структурна триімпульсної САУ рівня в барабані парового котла

кожний. Основне збурення – збурення за навантаженням – збурення зміною витрати пари на турбіну (переміщення регулюючого клапану турбіни).

На рис. 5 наведена модель одноконтурної САР рівня в барабані котла. Одноконтурна САР рівня в барабані є найважливішою САР в моделі АТК барабанового котла. Основне збурення – збурення за навантаженням – збурення зміною витрати пари на турбіну.

Відхилення рівня за допустимі межі призводить до аварійних режимів роботи котла: за занадто низького рівня порушується режим циркуляції води у випарній системі й можливий перепал деяких підйомних труб, а за «переживлення» котлів (надмірного підвищення рівня) можливий закид води в пароперегрівач, що може вивести його з ладу. Тому до точності підтримки рівня висуваються жорсткі вимоги.

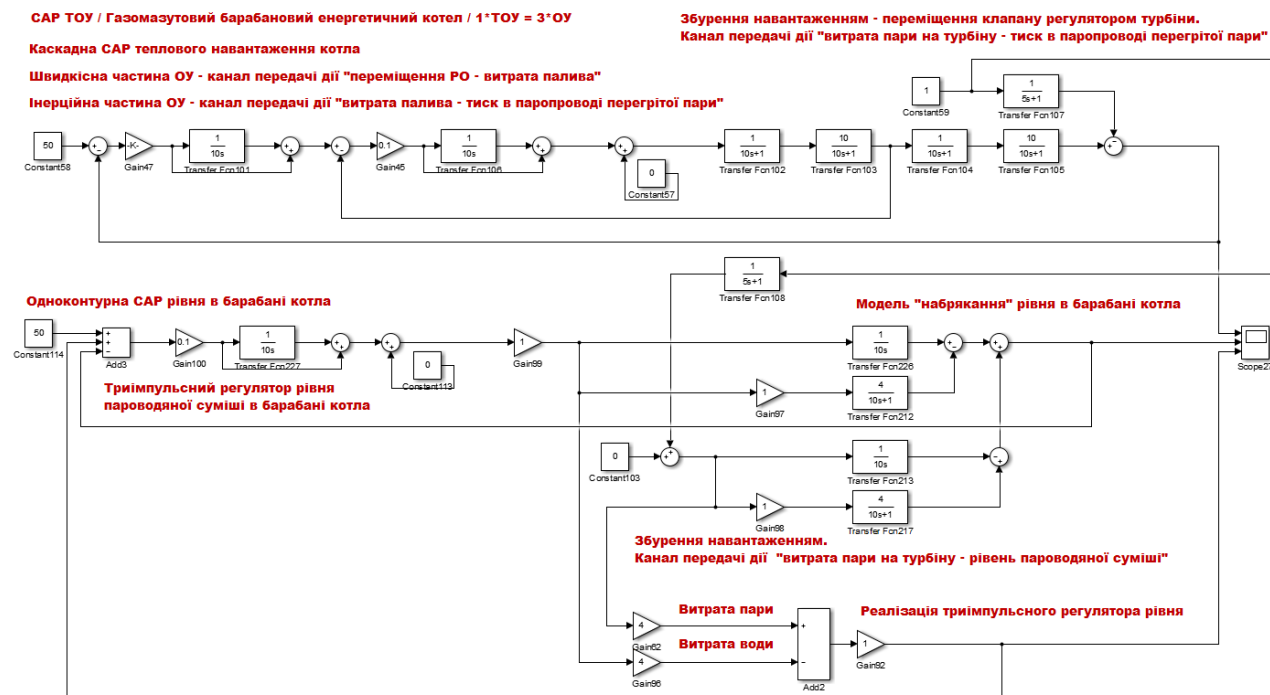


Рис. 3. Модель АТК барабанового котла в Matlab Simulink

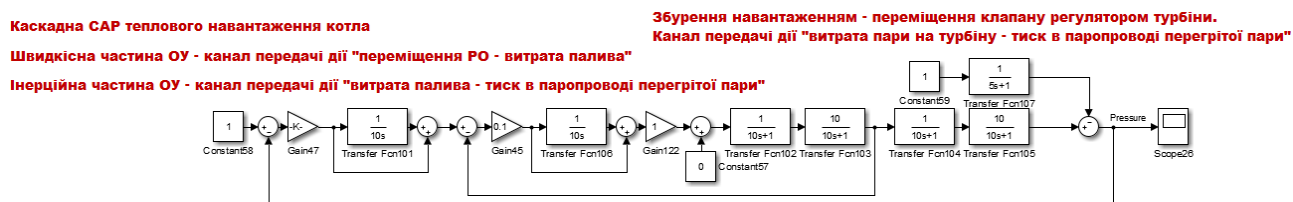


Рис. 4. Модель каскадної САР теплового навантаження барабанового котла в Matlab Simulink

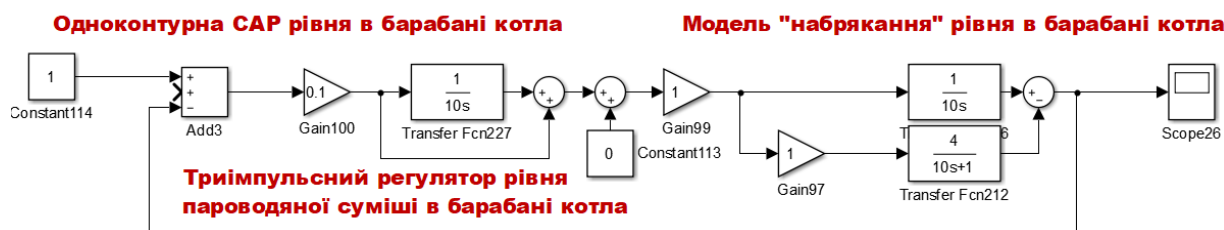


Рис. 5. Модель САР рівня в барабані котла в Matlab Simulink

На рис. 6 наведена перехідна характеристика моделі ОУ теплового навантаження за одиничним ступеневим збуренням завданням.

На рис. 7 наведено перехідну характеристику моделі каскадної САР теплового навантаження.

У барабані котла над «дзеркалом випаровування» знаходиться пароводяна суміш. Кількість бульбашок пари залежить від тиску в барабані (і розподілу його у випарній системі).

У разі збільшення витрати пари тиск у випарній системі зменшується, вода стає перегрітою щодо нового тиску, надлишок теплоти витрачається на її випаровування, що приводить до появи додаткових бульбашок пари під «дзеркалом випаровування». Обсяг бульбашок збільшується, що призводить до підвищення видимого рівня води в барабані (явище «набрякання»). У разі зменшення витрати пари це проявляється у зворотну сторону

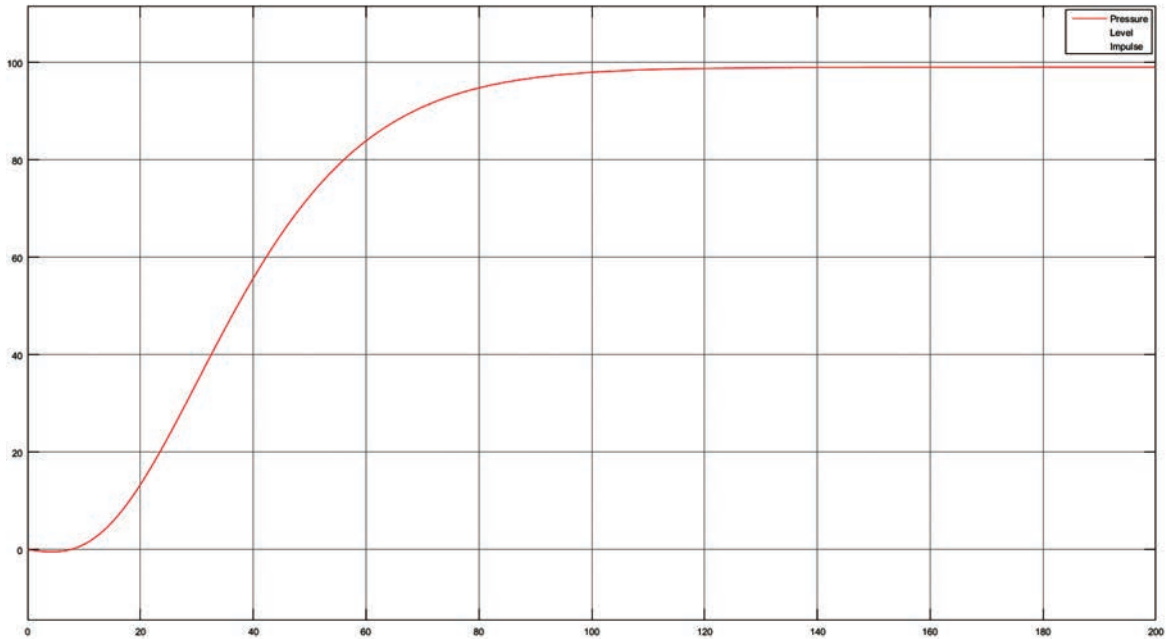


Рис. 6. Перехідна характеристика моделі ОУ теплового навантаження

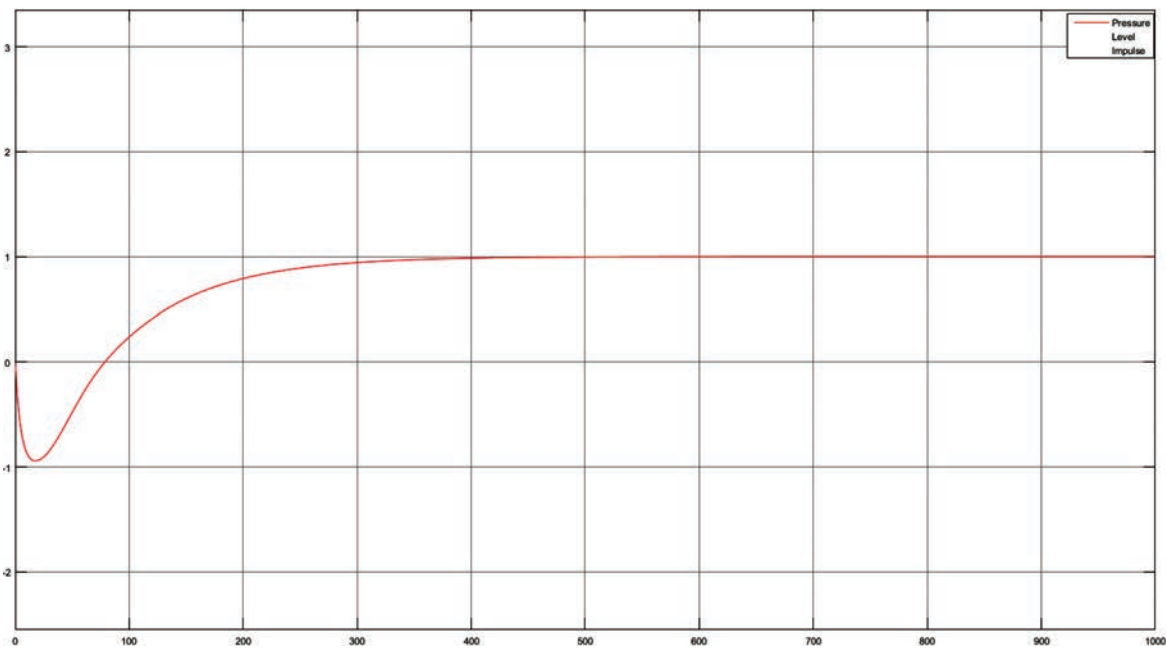


Рис. 7. Перехідна характеристика моделі каскадної САР теплового навантаження

(зменшення рівня). Модель набрякання рівня в барабані наведена на рис. 8. Набрякання рівня змодельовано зустрічним включенням аперіодичної ланки першого порядку й інтегруючої ланки (а не послідовним включенням ланки транспортного запізнення та інтегруючої ланки).

Через явище набрякання одноімпulseний (імпulse за вимірним значенням рівня) регулятор не може стабілізувати рівень води в барабані, і перехідний процес розходиться. Перехідна характеристика наведена на рис. 9.

Для запобігання розходження процесу до регулятора додають ще два імпulse, і система стає

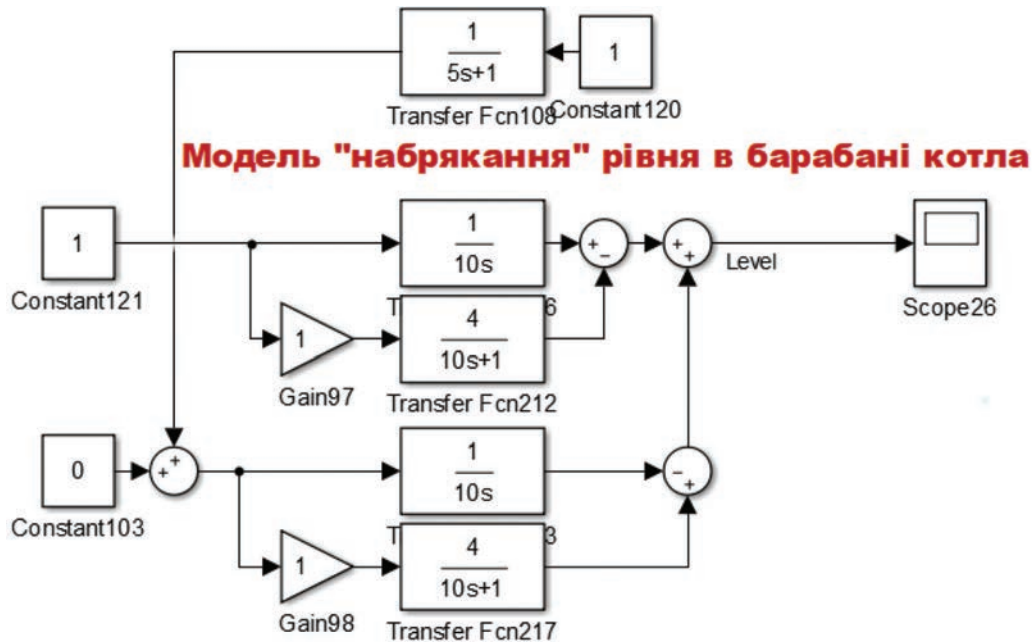


Рис. 8. Модель набрякання рівня в Matlab Simulink

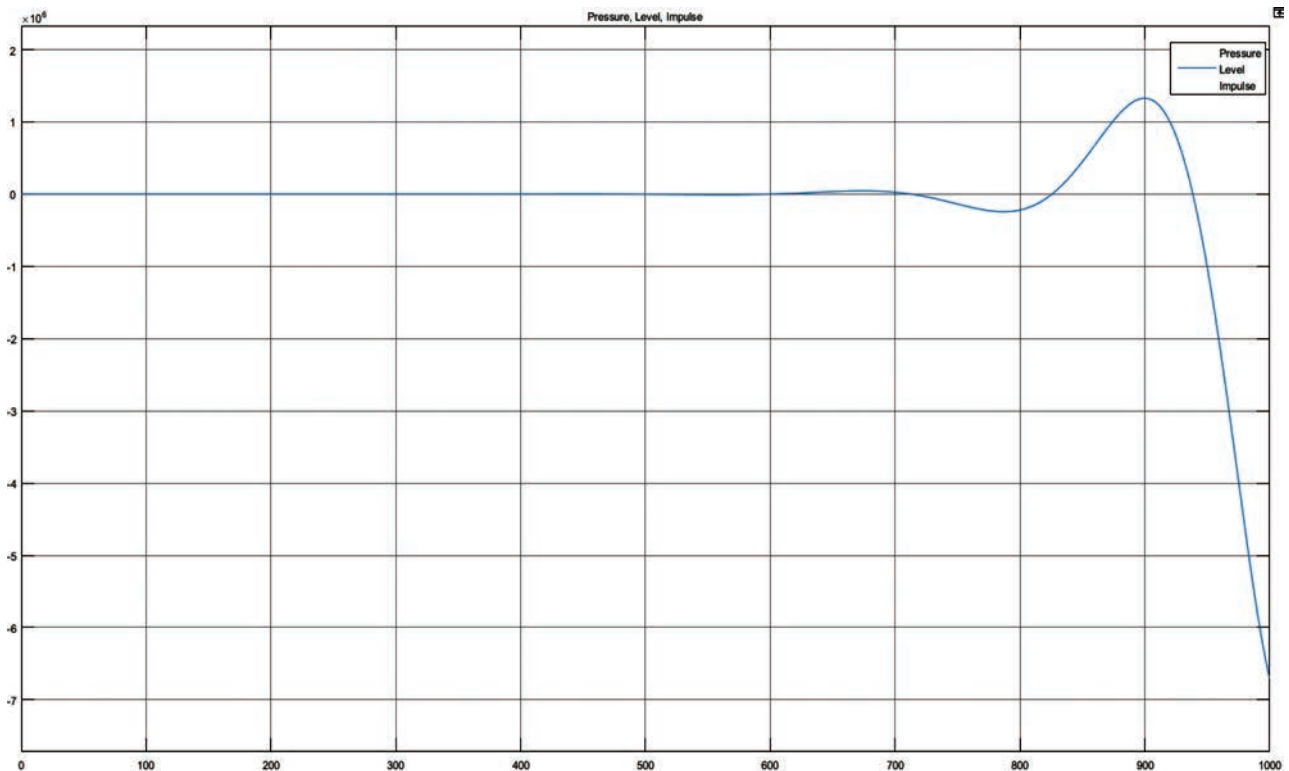


Рис. 9. Графік перехідного процесу одноконтурної САР рівня в барабані котла в Matlab Simulink

триімпульсною. Триімпульсна САР рівня в барабані котла: регулятор отримує імпульс із витрати пари від котла за рівнем води в барабані й за надходженням води в котел, після чого виробляється регулюючий вплив, який надходить на регулюючий орган на живильній воді до котла.

На регулятор подаються вимірювальні сигнали за рівнем у барабані котла, витратою живильної води на котел і витратою пари від котла. Сигнали за витратою живильної води й витратою пари повинні компенсувати один одного, тому включені з різними знаками. У разі збільшення витрати пари регулятор виробляє сигнал на збільшення витрати живильної води й навпаки. Сигнал за рівнем у барабані котла коригуючий. Він повинен компенсувати різницю між витратою пари й живильної води.

Реалізацію триімпульсного регулятора наведено на рис. 10. Перехідний процес регулювання рівня в барабані з триімпульсним регулятором наведений на рис. 11.

**Висновки.**

1. Функціональне моделювання АТК дозволяє сформувати динамічну взаємодію всіх САР у складі АТК за типовими збуреннями (які самі також моделюються). У моделі АТК моделюються типові збурення та досліджується функціонування комплексу САР у складі АТК у взаємодії їх реакцій на змодельовані збурення. Саме можливість такого моделювання взаємодії комплексу САР у складі АТК є перевагою над функціональним моделюванням автономних САР.

2. Ефективним інструментарієм функціонального моделювання АТК є CFC-діаграма (функціональні блок-схеми) у пакеті графічного моделювання Simulink у СКМ Matlab.

3. Функціональна модель АТК барабанового котла в СКМ Matlab Simulink рекомендується для використання як із навчальною метою в лабораторних роботах з автоматизації, так і на стадіях проектування та експлуатації для налагодження САР котла. Змодельовані найважливіші

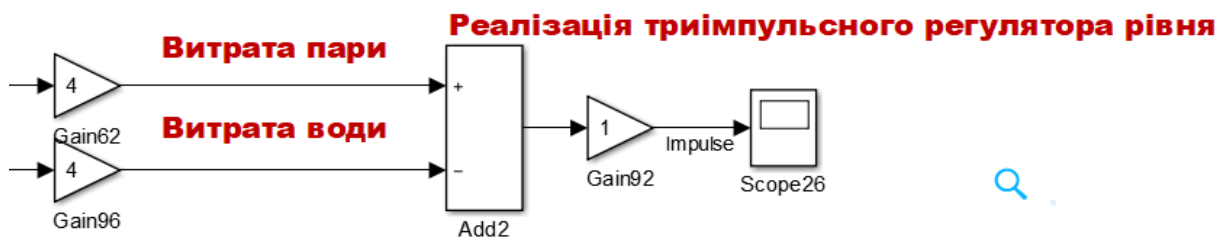


Рис. 10. Реалізація триімпульсного регулятора в Matlab Simulink

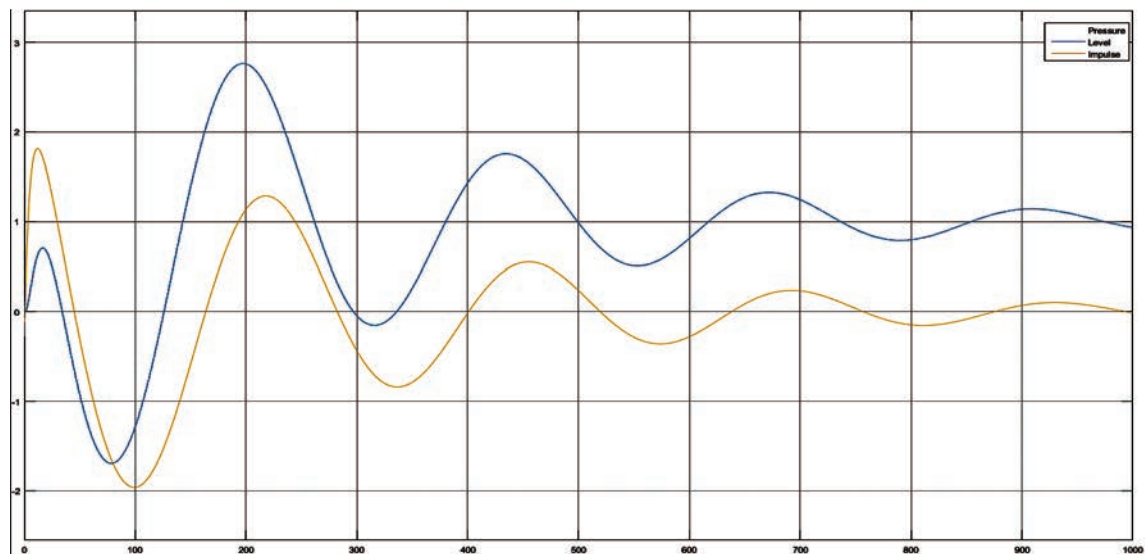


Рис. 11. Перехідний процес рівня в барабані з триімпульсним регулятором



САР – каскадна САР теплового навантаження котла й одноконтурна САР рівня в барабані котла, які є невід’ємними частинами САУ енергоблоком.

4. Енергетичний барабановий котел, з одного боку, є типовим об’єктом промислової автоматизації (в енергетиці), з іншого боку, барабановий котел має специфічний унікальний ефект «набрякання рівня», необхідність урахування якого призводить до використання унікальної одноконтурної САР рівня з триімпульсним регулятором. Саме вказане поєднання типовості й унікальності барабанового котла як ТОУ робить моделювання АТК енергетичного барабанового котла актуальною (цікавою та корисною) задачею як для навчального процесу з

автоматизації, так і для налагодження АТК у процесі проектування та експлуатації.

5. Ефективність функціонального моделювання ТОУ СFC-діаграмами дозволяє рекомендувати такі функціональні моделі ТОУ як для імітаційного моделювання САР безпосередньо в програмованих логічних контролерах (ПЛК) мовою FBD/CFC, так і для імітаційного моделювання АТК програмним комплексом «СКМ Matlab Simulink (моделювання ТОУ) – софтПЛК (реалізація контролерної функціональності, наприклад, у CoDeSys) – промислова SCADA-система (реалізація супервізорної функціональності, наприклад, в Indusoft WebStudio)» [2].

### Список літератури:

1. Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2005. 400 с.
2. Рыбалев А.Н. Имитационное моделирование АСУТП. Благовещенск : Амурский гос. ун-т, 2019. 408 с.

### **Batiuk S.G., Lobzov N.S. FUNCTIONAL MODELING OF AUTOMATED TECHNOLOGICAL COMPLEX OF HEAT POWER DRUM BOILER**

*Functional modeling of control system – modeling of static and dynamic functions of control system by functional block diagrams in the Matlab computer mathematics system (Simulink package). Functional models of the automated technological complex of the heat power drum boiler are developed and tested. The automatic control system of heat load of the drum boiler is modeled. The automatic control system of the level in the drum of the boiler is modeled taking into account the effect of “swelling of the level”. The complex work of automatic heat load control system and automatic level control system in their interaction on the disturbance from the control valve of the turbine as a part of the power unit is modeled. Developed and tested functional models of automatic control systems of drum boiler can be used both in the educational process and during design end exploitation for the adjustment of automatic control systems of the boiler.*

*The uniqueness of the drum boiler as a technological control object (the presence of an automatic level control system with a three-pulse regulator to counteract the effect of “swelling of the level”) makes the modeling of the automated technological complex of the energy drum boiler an urgent task.*

*The efficiency of functional modeling of technological control objects by functional block diagrams allows to recommend such functional models both for imitation modeling of automatic control systems directly in programmable logic controllers and for imitation modeling of automated technological complexes (cyber-physical systems) by software package “computer mathematics system (modeling of technological control objects) – simulator of programmable logic controller (implementation of controller functionality of automated control systems) – industrial system of human-machine interface (implementation of supervisory functionality of automated control systems)”.*

**Key words:** *functional modeling, mathematical modeling, computer mathematics system, Matlab Simulink, technological control object, heat power station, heat power unit, drum boiler, automated technological complex, automatic control system, automatic heat load control system, automatic level control system, swelling of the level.*

**Батюк С.Г.**

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

**Лобзов Н.С.**

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

## СТРУКТУРНЕ (ІМІТАЦІЙНЕ) МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО БАРАБАННОГО КОТЛА

*Структурне (імітаційне) моделювання автоматизованого технологічного комплексу – це моделювання взаємодії контрольної і супервізорної функціональності автоматизованої системи управління технологічними процесами і програмно змодельованого (зімітованого) технологічного об'єкту управління. Розроблено і тестовано структурну (імітаційну) модель автоматизованого технологічного комплексу енергетичного барабанного котла. Контрольна функціональність автоматизованої системи управління здійснюється (моделюється) софтверним програмованим логічним контролером CoDeSys. Супервізорна функціональність автоматизованої системи управління здійснюється системою людинно-машинного інтерфейсу WebStudio. Технологічний об'єкт управління моделюється функціональними блок-схемами у системі комп'ютерної математики Matlab (пакет Simulink). Імітовано комплексну роботу системи автоматичного регулювання навантаження і системи автоматичного регулювання рівня (з урахуванням ефекту «набрякання рівня») у їх взаємодії за збуренням зі сторони регулюючого клапану турбіни у складі енергоблоку. Розроблена і протестована структурна (імітаційна) модель автоматизованого технологічного комплексу енергетичного барабанного котла може бути використана як у початковому процесі, так і під час проектування та експлуатації для налагодження систем автоматичного регулювання котла.*

*Імітаційне моделювання є ефективною операційною технологією, близькою за своєю ідеологією до цифрового твінгу динамічних систем. Розроблена імітаційна модель автоматизованого технологічного комплексу барабанного котла на програмно-технічній платформі «Simulink (модель технологічного об'єкту управління) – CoDeSys (модель контролерної функціональності автоматизованої системи управління) – WebStudio (модель супервізорної функціональності автоматизованої системи управління)» рекомендується для використання як із навчальною метою під час лабораторних робіт із автоматизації, так і на стадіях проектування та експлуатації для налагодження систем автоматичного регулювання барабанного котла.*

**Ключові слова:** *структурне моделювання, імітаційне моделювання, симуляція, математичне моделювання, система комп'ютерної математики, Matlab Simulink, технологічний об'єкт управління, теплова електростанція, енергоблок, барабанний котел, автоматизований технологічний комплекс, система автоматичного регулювання, САР теплового навантаження, САР рівня, набрякання рівня.*

**Постановка проблеми.** Структурне моделювання динамічної системи – це моделювання статичної і динамічної взаємодії структурно виокремлених компонентів системи. Автоматизований технологічний комплекс (АТК) – це технологічний об'єкт управління (ТОУ), оснащений автоматизованою системою управління технологічними процесами (АСУ ТП). Структурне моделювання автоматизованого технологічного комплексу (АТК) – це моделювання взаємодії програмно змодельованого технологічного об'єкту управління (ТОУ) і програмно-технічного комп-

лексу (ПТК) автоматизованої системи управління технологічними процесами (АСУ ТП), якою оснащений ТОУ. Оскільки використовується не сам ТОУ і не його фізична модель, а саме програмна модель (імітація, симуляція) ТОУ, таке структурне моделювання називається імітаційним моделюванням (симуляцією) АТК, а структурна модель АТК – імітаційною моделлю АТК (обидві аббревіатури ІМ АТК у контексті) [1]. Контролерна функціональність АСУ/ПТК в ІМ АТК здійснюється софтверним програмованим логічним контролером (софтПЛК). Супервізорна функціональність

АСУ/ПТК в ІМ АТК здійснюється промисловою SCADA-системою. ТОУ в ІМ АТК моделюється функціональними блок-схемами у системі комп'ютерної математики (СКМ).

Задачами структурного моделювання АТК є такі: 1) тестування алгоритмів контролерної і супервізорної автоматизації у взаємодії із змодельованим ТОУ у СКМ; 2) тестування обміну даними між ПЛК і SCADA-системою у реальних умовах; 3) модифікація алгоритмів контролерної і супервізорної автоматизації для тиражування АСУ ТП на новому одноступеневому ТОУ.

**Аналіз проблеми.** ІМ АТК є різновидом сучасного цифрового твінінгу і цифрових двійників. Отже, програмно-технічна платформа сучасної ІМ АТК така [2]: контролерна функціональність АСУ/ПТК в ІМ АТК здійснюється (моделюється) софтПЛК CoDeSys, супервізорна функціональність АСУ/ПТК – SCADA-системою (використовується система людинно-машинного інтерфейсу Indusoft WebStudio). ТОУ моделюється функціональними блок-схемами у системі комп'ютерної математики Matlab (пакет Simulink). Функціональні блок-схеми працюють за графічною мовою CFC (Continuous Functional Chart – неперервна функціональна діаграма), тобто функціональна блок-схема є CFC-діаграмою.

**Постановка завдання.** ІМ АТК енергетичного барабанного котла розроблюється: 1) із навчальною метою для використання у лабораторних роботах із автоматизації; 2) із метою використання під час проектування та експлуатації для налагодження

САР котла; 3) із метою використання під час проектування та експлуатації для налагодження взаємодії ПЛК і SCADA-системи. Енергетичний барабанний котел – типовий об'єкт промислової автоматизації (в енергетиці), що робить ІМ АТК енергетичного барабанного котла актуальним (цікавим і корисним) завданням як для навчального процесу з автоматизації, так і для налагодження АТК під час проектування та експлуатації.

Система автоматичного регулювання (САР) барабанного котла є невід'ємною САР у складі АСУ ТП енергоблоків теплових електростанцій, в якій можна виділити дві такі основні САР: 1) каскадна САР теплового навантаження котла; 2) одноконтурна САР рівня в барабані котла з триімпульсним регулятором.

Ключовою технічною задачею ІМ АТК є здійснення обміну даними між софтПЛК CoDeSys і функціональною моделлю АТК барабанного котла у СКМ Matlab Simulink. Обмін даними здійснюється за OPC-протоколом шиною Ethernet. Модель ТОУ у СКМ Matlab Simulink є OPC-клієнтом. СофтПЛК CoDeSys є OPC-сервером. Розроблені вікна WebStudio мають втілити типову HMI-Standard і MES-Lite функціональність сучасних SCADA-систем із урахуванням вимог до навчання студентів і використання у лабораторних роботах.

**Результати моделювання.** На рис. 1 наведена модель ТОУ барабанного котла; верхній контур – це контур регулювання (САР) теплового навантаження котла, а нижній – контур регулювання (САР) рівня в барабані.

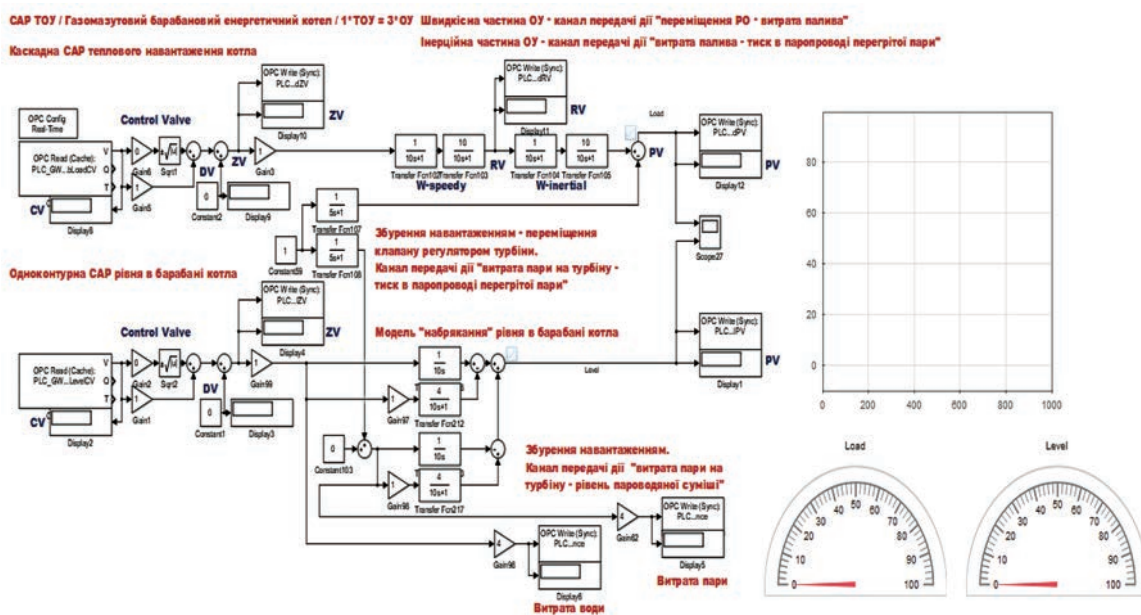


Рис. 1. Модель ТОУ барабанного котла у MatLabSimulink

ТОУ містить чотири взаємопов'язані об'єкти управління (ОУ): 1) канал передачі дії «переміщення РО на витраті палива – тиск у паропроводі на турбіну» (виділені відповідно швидкісний та інерційний ОУ: канал передачі дії «переміщення РО на витраті палива – витрата палива» і канал передачі дії «витрата палива – тиск пари»); 2) канал передачі дії «витрата пари на турбіну – тиск пари у трубопроводі турбіни»; 3) канал передачі дії «витрата пари на турбіну – рівень пароводяної суміші у барабані котла»; 4) канал передачі дії «витрата живильної води – рівень пароводяної суміші у барабані котла». Параметри ОУ вибрані зручними для моделювання, але співвідношення між часовими параметрами різних ОУ відповідає дійсному. Ефект набрякання рівня пароводяної суміші змодельований зустрічним паралельним включенням інтегруючої ланки і аперіодичної ланки першого порядку. Основним збуренням є збурення переміщенням регулюючого клапану (РК) турбіни регулятором кількості обертів турбіни: канал передачі дії «переміщення РК турбіни – витрата пари на турбіну». Змодельована взаємодія всіх указаних ОУ (каналів передачі дії) в ТОУ енергетичного барабанного котла.

Блок OPC Config використовується для конфігурації підключення до OPC серверу. За допомогою блоків OPC Read із серверу зчитуються результати, які передає контролер із регуляторів. Блоки OPC Write дозволяють передати значення контрольованих параметрів назад до контролера та у HMI-SCADA систему WebStudio, в якій реалізована супервізорна функціональність для відображення поточних значень параметрів САР теплового навантаження барабанного котла і САР

рівня у барабані котла. Для наочності в усіх важливих місцях були розташовані блоки Display, які відображають значення параметрів у цих точках.

Контролерна функціональність автоматичної системи регулювання (АСР) здійснена у середовищі CodeSys у вигляді універсальної каскадної АСР, яка може перемикатись у режими одноконтурного або каскадного регулювання.

СFC-діаграма АСР теплового навантаження представлена на рис. 2. Корируючий регулятор PID\_1 тиску пари у паропроводі змінює завдання стабілізуючому регулятору PID\_2 витрати палива у топку котла. Фільтри низької частоти (аперіодичні ланки першого порядку) UDO\_Std\_1, 2, 3 призначені відповідно для первинної фільтрації сигналів виміряних параметрів на корируючий регулятор, стабілізуючий регулятор і у SCADA-систему. Інші функціональні блоки слугують для перемикавання САР теплового навантаження в режими одноконтурного або каскадного регулювання.

СFC-діаграма АСР рівня в барабані котла представлена на рис. 3. АСР працює в одноконтурному режимі – задіяний тільки основний (корируючий) регулятор PID\_1 рівня. Фільтри низької частоти (аперіодичні ланки першого порядку) UDO\_Std\_1, 3 призначені відповідно для первинної фільтрації сигналів виміряних параметрів на основний (корируючий) регулятор і в SCADA-систему. На трьох блоках SUB здійснена триімпульсність регулятору рівня: на регулятор рівня подаються два додаткові імпульси (перший імпульс – поточний рівень; уставка імпульсом не вважається); виміряно витрату живильної води в барабан (котел) і витрату пари із котла (на турбіну), причому із протилежними знаками. Унаслідок цього

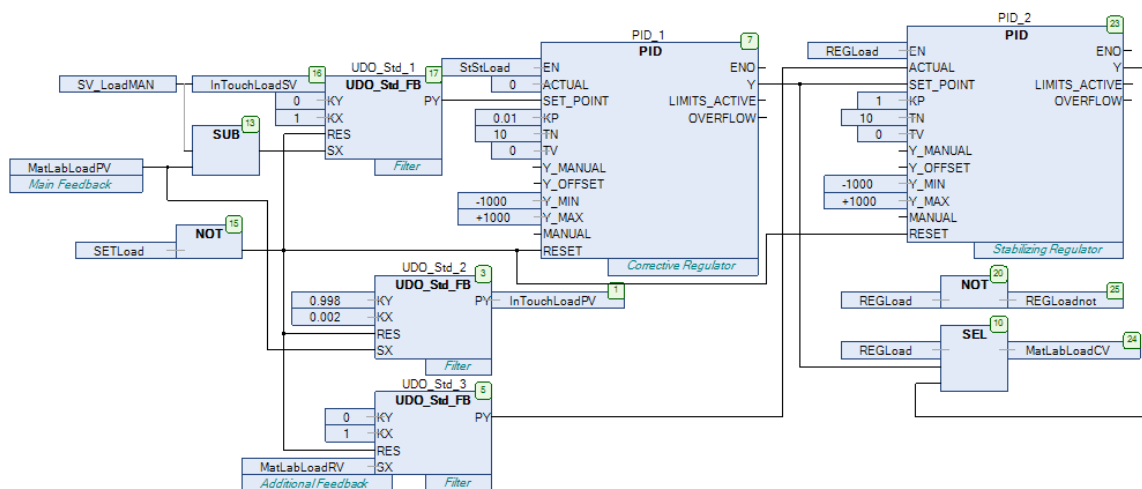


Рис. 2. Здійснення каскадної АСР для САР теплового навантаження барабанного котла у середовищі CodeSys

додатній імпульс витрати пари у перший момент забезпечує спрацювання регулятора рівня у правильному напрямку, а далі (коли регулятор рівня змінює витрату води вже у правильному напрямку) врівноважується від'ємним імпульсом витрати живильної води (спочатку завжди витрата пари є більшою за витрату живильної води, а потім ці витрати завжди однакові). Інші функціональні блоки слугують для перемикання САР теплового навантаження у режимі одноконтурного або каскадного регулювання.

Користувач взаємодіє із програмно-технічним симулятором АСК за допомогою спеціальних вікон, розроблених у HMI/SCADA Indusoft WebStudio, кожне з яких має свою функціональність:

- «Menus» – стартове вікно, з якого можна виконати перехід на інші вікна після авторизації користувача;
- «Mimics» – мнемосхема барабанного котла;
- «Alarms» – алармування і логування історичних тривог;
- «Trends» – тренди технологічних параметрів для спостереження за процесом;
- «Models Heat Load» – мнемосхема моделі САР теплового навантаження барабанного котла;
- «Models Level» – мнемосхема моделі САР рівня в барабані котла;
- «Recipes» – формування і виконання рецептів;
- «Schedules» – розклад завантаження рецептів, створення історичних звітів;
- «Reports» – формування нових і редагування поточних звітів, здійснення історичних звітів.

Розроблені вікна дозволяють користувачу спостерігати за процесами, регулювати і контролювати роботу імітаційної моделі барабанного котла; слід-

кувати за поточними параметрами; переглядати всі зареєстровані системою тривоги та відображати тренди; створювати свої рецепти роботи системи і надалі використовувати їх для роботи системи; створювати, формувати та редагувати звіти.

Розроблена в імітаційній моделі АСК барабанного котла HMI-Standard і MES-Lite функціональність SCADA є типовою для сучасних АСУТП і демонструє всі можливості роботи оператора-технолога із сучасними ТОВ. Взаємодія оператора-технолога із вікнами відбувається за допомогою різноманітних елементів візуалізації.

Нижче наведена характеристика функціональності вікон SCADA WebStudio.

- «Menus» – стартове вікно-меню, яке дозволяє переходити на інші вікна. Для переходу до іншого вікна потрібно обрати бажане вікно і натиснути на нього. Вікно «Menus» завжди відкрите і не перекривається іншими вікнами, що дозволяє зручно перемикатися між ними.
- «Mimics» (рис. 4) – це вікно із спрощеною мнемосхемою газомазутового барабанного котла, в якому користувач може переглядати основні показання датчиків, а також побачити поточні положення регулюючих органів.
- «Alarms» (рис. 5) – це вікно для відображення аварій (алармів, тривог) поточних та історичних, наявних у системі, із журналом подій, у якому відображені події (дії оператора), що відбувалися під час роботи системи. На вікні розміщена група слайдерів, текстових полей, клавіш і віджетів для імітації алармів аналогових і дискретних сигналів (із метою перевірки роботоздатності послідовності «модель ТОВ в СКМ Matlab Simulink – софтПЛК CoDeSys – SCADA WebStudio»).

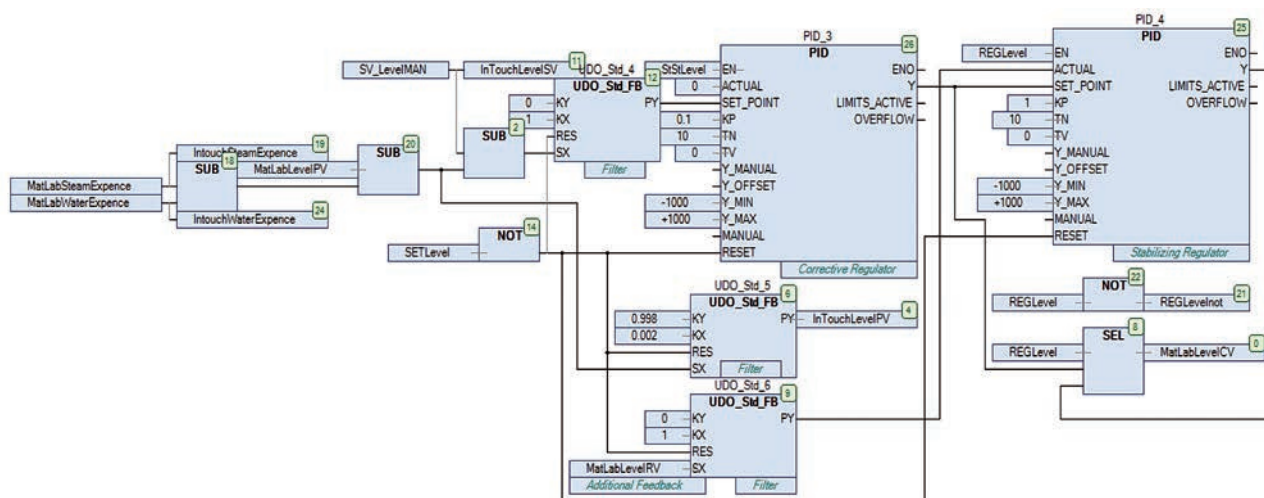


Рис. 3. Здійснення АСК для САР рівня у барабані котла у середовищі CodeSys

• «Trends» (рис. 6) – це вікно трендів реального часу та історичних, на якому користувач може переглянути зміну технологічних параметрів із часом. Функціональність тренду дозволяє досліджувати потрібний проміжок часу більш детально. На вікні розміщена група слайдерів, текстових полів, клавіш і віджетів для імітації зміни аналогових і дискретних сигналів (із метою перевірки працездатності послідовності «модель TOU у СКМ Matlab Simulink – софтПЛК CoDeSys – SCADA WebStudio»).

• «Models Heat Load» (рис. 7) – це вікно, на якому відображена структурна схема моделі САР теплового навантаження барабанного котла. У вікні також відображається типова структурна схема каскадної САР. У цьому вікні користувач може задавати бажане значення (уставку) для регульованого параметру, змінювати тип АСР (одноконтурний чи каскадний режим САР), вмикати або вимикати регулятор і відслідкувати на тренді зміну технологічних параметрів у часі. Користувач перевіряє

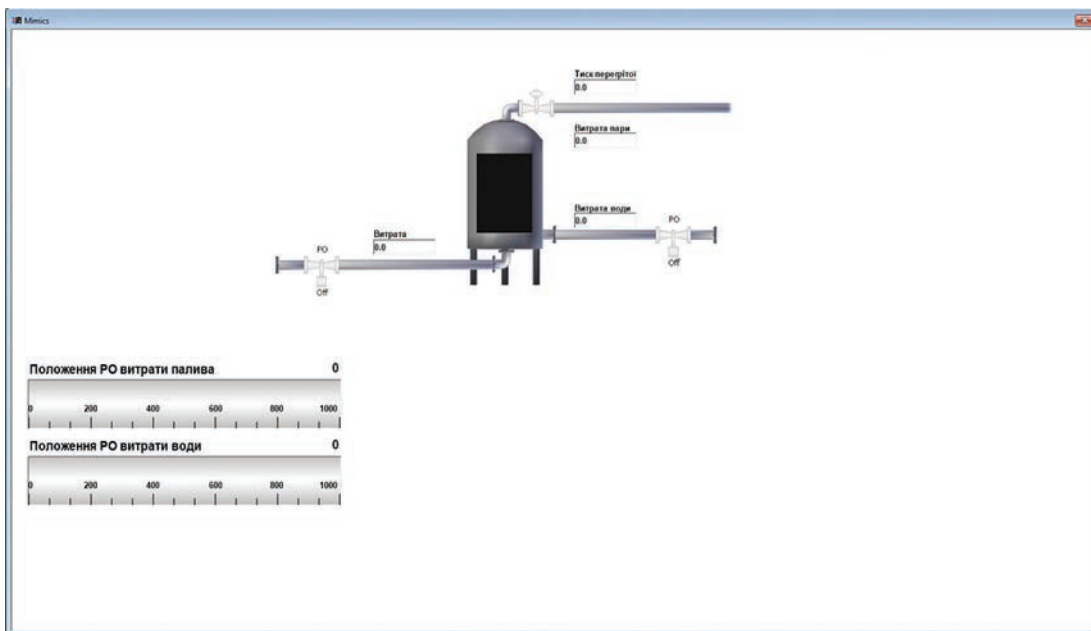


Рис. 4. Вікно Mimics

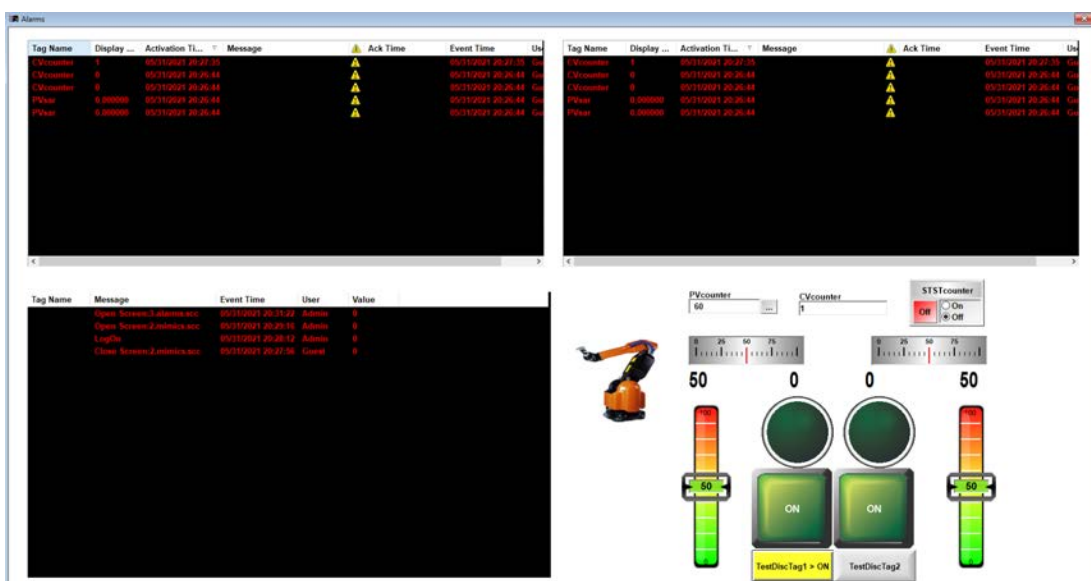


Рис. 5. Вікно «Alarms»

працездатність САР теплового навантаження барабанного котла.

- «Models Level» (рис. 8) – це вікно, на якому відображена структурна схема моделі САР-рівня у барабані котла. У вікні також відображається типова структурна схема одноконтурної САР. У цьому вікні користувач може задавати бажане

значення (уставку) для регульованого параметру, вмикати або вимикати регулятор та відслідкувати на тренді зміну технологічних параметрів у часі. Користувач перевіряє працездатність САР-рівня у барабані котла.

- «Recipes» (рис. 9) – це вікно для створення рецептів. Із позицій управління рецепт –

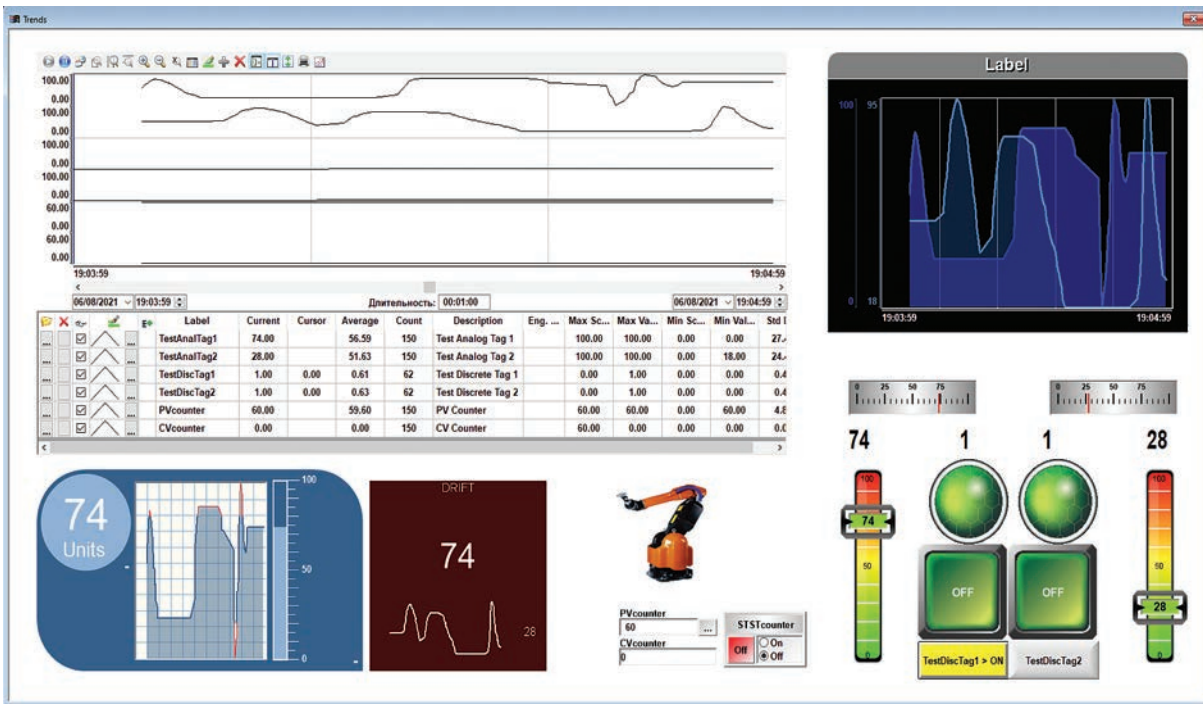


Рис. 6. Вікно «Trends»

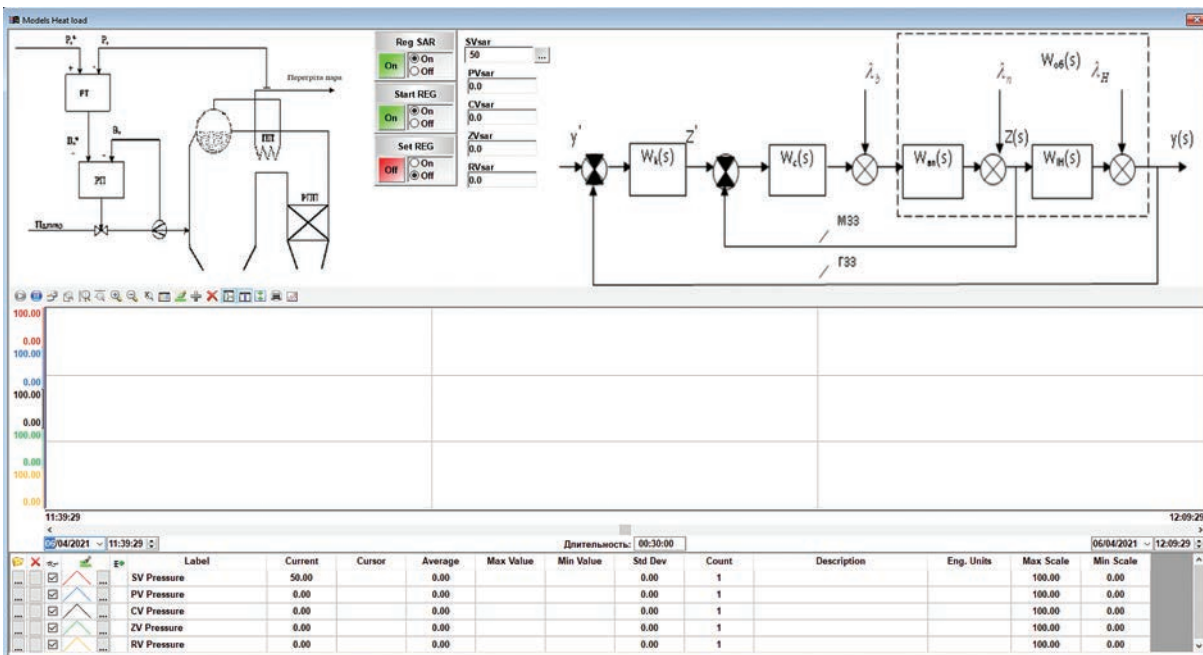


Рис. 7. Вікно «Models Heat Load»

це формула автоматичного управління ОУ, тобто комплекс уставок (заданих значень) режимних параметрів САР, на яких САР стабілізують режимні параметри. Із позицій SCADA рецепт – це зовнішній файл, в якому зберігається формула управління ОУ, тобто комплекс уставок (заданих значень) режимних параметрів САР. Користувач у вікні формує рецепт і виконує його. Формування рецепту – це введення уставок і запис їх у заданий текстовий файл. Виконання рецепту – це зчитування його файлу, парсинг файлу і запис уставок у внутрішні параметри SCADA-системи. Формування і виконання рецептів здійснюється скриптами SCADA-системи. Зконфігурований обмін даними SCADA-системи із софтПЛК забезпечує передачу у софтПЛК зчитаних SCADA-системою із файлів-рецептів уставок режимних параметрів САР.

• «Schedules» (рис. 10) – це вікно для втілення розкладів автоматичного завантаження рецептів і дописування поточних звітів. Розклад – це виконання заданої послідовності дій за календарним часом, періодично або за заданою подією. У вікні елементами управління ініціюються розклад завантаження рецепту із заданою періодичністю і розклад дописування поточного звіту із заданою періодичністю. Розклади здійснюються скриптами SCADA-системи. У вікні у текстові поля виведені значення трьох розрахованих найважливіших ключових показників ефективності (КПЕ; KPI – Key Performance Indicator): OEEsar (Overall Equipment Effectiveness – загальна ефективність обладнання); OTDsar (On Time Delivery – своєчасне постачання / виконання); RMYsar (Raw Material Yield – питома витрата матеріалу).

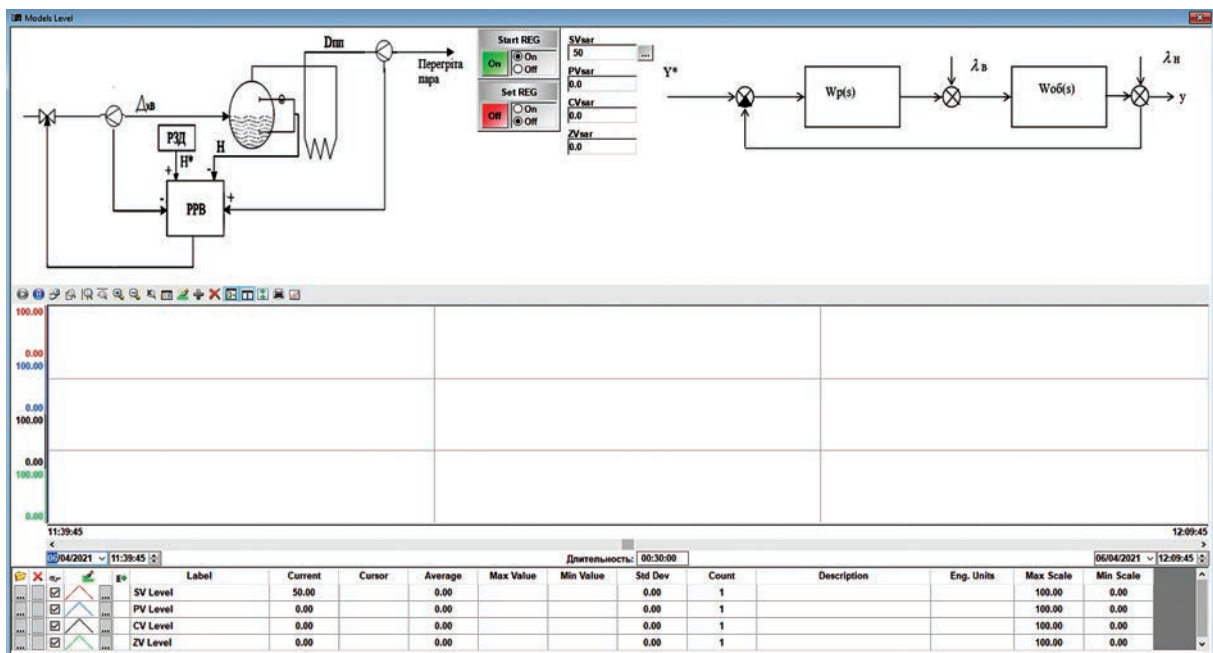


Рис. 8. Вікно «Models Level»

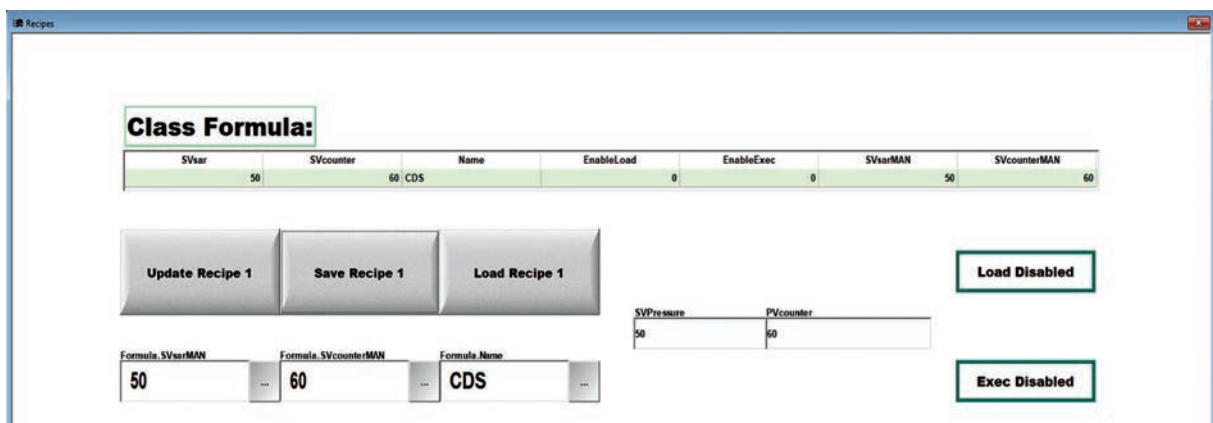


Рис. 9. Вікно «Recipes»



Указані КПЕ розраховуються скриптами SCADA-системи. (Примітка: порядок формування і розрахунку указаних КПЕ у статті не розглядається).

- «Reports» (рис. 11) – це вікно для формування нових звітів або редагування вже існуючих. Поточні звіти створюються у форматі RTF і переглядаються застосунком Microsoft Word. Клавішою Append або/і із заданою в вікні «Schedules» періодичністю у звіт дописуються поточні значення параметрів. Відповідними текстовими полями задається діапазон дати і часу формування історичного звіту, а відповідними клавішами ініціюється формування історичного звіту. Сформований історичний звіт може бути

переглянутий у таблиці на вікні або застосунком Microsoft Excel.

**Висновки і рекомендації.** 1. Структурне (імітаційне) моделювання АТК – це моделювання взаємодії програмно змодельованого ТОВ (тобто імітаційної моделі ТОВ) і ПТК АСУТП, якою оснащений ТОВ. Імітаційне моделювання є ефективною операційною технологією, близькою за своєю ідеологією до цифрового твінінгу динамічних систем. 2. Розроблена імітаційна модель АТК барабанного котла на програмно-технічній платформі «СКМ Matlab Simulink (модель ТОВ) – софтПЛК CoDeSys (контролерна функціональність АСУТП) – SCADA-система WedStudio

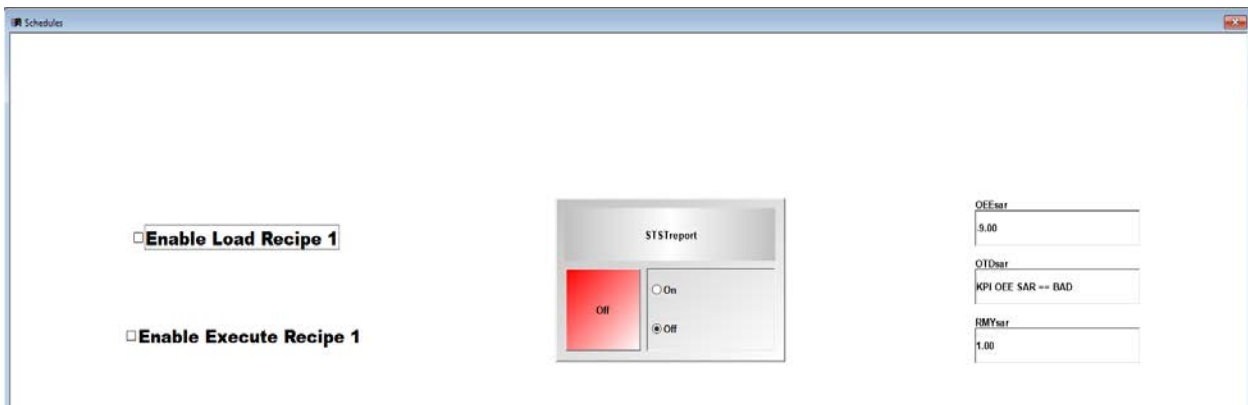


Рис. 10. Вікно «Schedules»

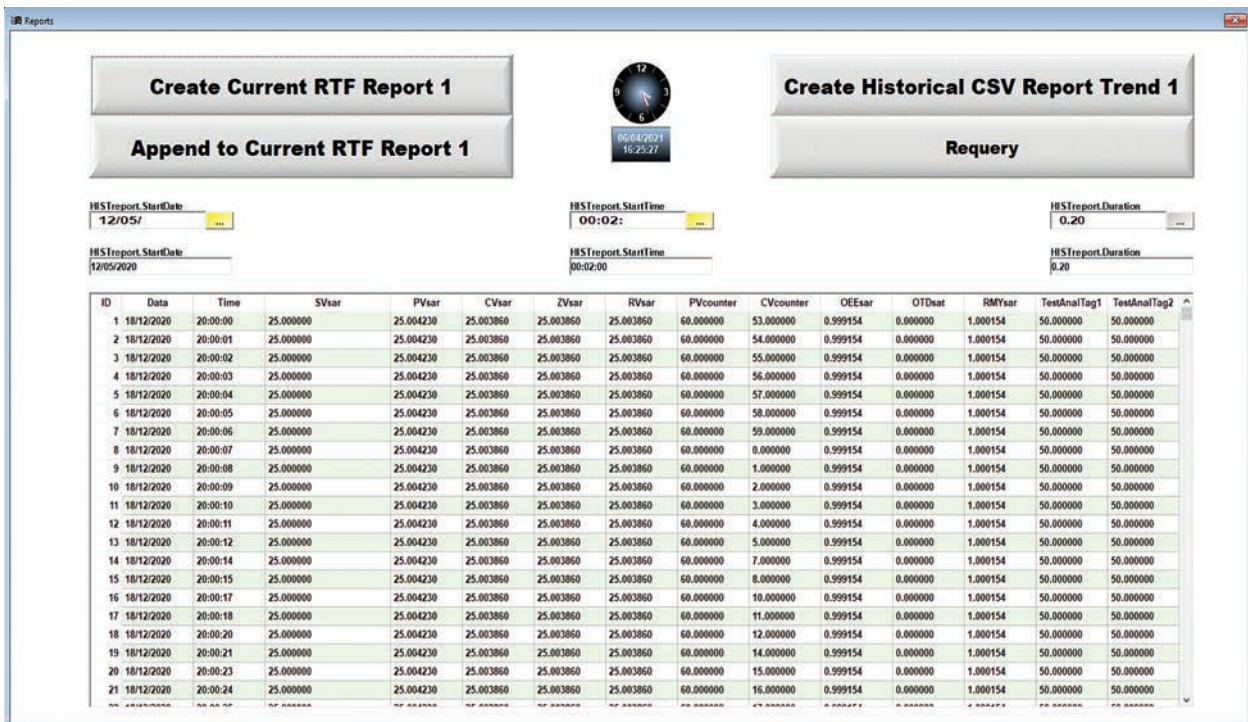


Рис. 11. Вікно «Reports»

(супервізорна функціональність АСУТП)» рекомендується для використання як із навчальною метою у лабораторних роботах із автоматизації, так і на стадіях проектування та експлуатації для налагодження АСУ котла. 3. У СКМ Matlab Simulink змодельована функціональна взаємодія всіх ОУ (каналів передачі дії) в ТОУ барабанного котла (зокрема з урахуванням ефекту «набрякання рівня») за основним збуренням зі сторони регулюючого клапану турбіни. 4. Змодельовані найважливіші АСУ контролерної функціональності

(на прикладі софтПЛК CoDeSys) АСУТП барабанного котла – каскадна АСУ теплового навантаження котла і одноконтурна АСУ рівня в барабані котла, які є невід’ємними частинами системи автоматичного управління енергоблоком. 5. Реалізовані типова НМІ-Standard і MES-Lite супервізорна функціональність (у SCADA-системі WebStudio), зокрема розрахунок ключових показників ефективності, що дозволяє оператору-технологу ефективно імітувати роботу і взаємодію (операційний інтерфейс) із реальним фізичним ТОУ.

#### Список літератури:

1. Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 400 с.
2. Рыбалев А.Н. Имитационное моделирование АСУ ТП. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2019. 408 с.

#### **Batiuk S.G., Lobzov N.S. STRUCTURAL MODELING OF AUTOMATED TECHNOLOGICAL COMPLEX OF HEAT POWER DRUM BOILER**

*Structural modeling (simulation) of automated technological complex is modeling of the interaction of the controller and supervisory functionality of the automated process control system and software-modeled (simulated) technological control object. Structural model (simulation) of the automated technological complex of the heat power drum boiler are developed and tested. The controller functionality of the automated control system is implemented (modeled) by the software programmable logic controller CoDeSys. Supervisory functionality of the automated control system is implemented by the human-machine interface system WebStudio. The technological control object is modeled by functional block diagrams in the Matlab computer mathematics system (Simulink package). The complex work of automatic heat load control system and automatic level control system (taking into account the effect of "swelling of the level") in their interaction on the disturbance from the control valve of the turbine as a part of the power unit is simulated. Developed and tested structural model (simulation) of the automated technological complex of the heat power drum boiler can be used both in the educational process and during design end exploitation for the adjustment of automatic control systems of the boiler.*

*Simulation is an effective operating technology that is ideologically close to digital twinning of dynamic systems. Developed imitation model of automated technological complex of drum boiler on the software and hardware platform "Simulink (model of technological control object) – CoDeSys (model of control functionality of the automated control system) – WebStudio (model of supervisory functionality of the automated control system)" is recommended for use both for educational purposes in laboratory works on automation and for adjusting automatic control system of drum boiler at stages of designing and operation.*

**Key words:** *structural modeling, imitation modeling, simulation, mathematical modeling, computer mathematics system, Matlab Simulink, technological control object, heat power station, heat power unit, drum boiler, automated technological complex, automatic control system, automatic heat load control system, automatic level control system, swelling of the level.*

**Захарчин Н.Г.**

Національний лісотехнічний університет України

**Захарчин Н.Р.**

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## РІСТ СТРУКТУРОВАНИХ ТА НЕСТРУКТУРОВАНИХ ДАНИХ ТА УПРАВЛІННЯ НИМИ: ЗАГАЛЬНІ АСПЕКТИ

*Зважаючи на інтенсивний розвиток людства в інформаційну еру, стає зрозуміло, що перед великими компаніями, установами й підприємствами постає питання важливості ефективного оперування великими даними (Big Data), до яких вони мають доступ. Попри те, що правильне використання таких даних є надзвичайно важливим завданням, воно також є одним із найважчих у контексті роботи з великими даними у зв'язку з динамікою та постійною мінливістю даних, їх неоднозначністю та різноманітністю. У статті розглядаються основні проблеми, що виникають під час роботи зі структурованими й неструктурованими даними на тлі їх стрімкого глобального зростання. Наведено й детально проаналізовано статистику збільшення обсягів і масштабності даних у світі за минулі роки, а також передбачення та прогнози, побудовані на її основі, щодо майбутніх тенденцій росту інформації. Грунтуючись на раніше проведених дослідженнях, зроблено висновки про неминуче стрімке зростання кількостей даних і в наступні роки. У статті докладно розглянуто поняття структурованих і неструктурованих даних, їх характеристики, переваги й недоліки обох видів, їх практичне застосування. Представлено найбільш вживані методи й інструменти для роботи з великими даними, акцентовано на основних випадках їх використання. Важливим моментом дослідження, який вартий уваги в ракурсі практичного застосування, є різниця у відповідності того чи іншого інструменту до опрацювання різних видів даних. Так, зазвичай засоби, котрі призначені для структурованих даних, не можуть застосовуватися під час роботи з неструктурованими. Кількість неструктурованих даних, якими Інтернет-користувачі оперують у сучасному світі, значно перевищує кількість структурованих, окрім того, більше користі суспільству, підприємництву й бізнесу потенційно здатні принести саме неструктуровані дані завдяки своїй багатоформатності. Саме через це в статті наголошено на тому, що великі дані, більшою мірою неструктуровані, потребують пошуку й знаходження нових результативних підходів, які б дозволяли суб'єктам підприємництва отримувати більше користі з тієї ж кількості інформації.*

**Ключові слова:** великі дані, бази даних, зростання даних, підприємство, Інтернет речей.

**Постановка проблеми.** XXI століття – час постійних змін, інновацій і розвитку. «Майбутнє близько» – такі слова найкраще характеризують буремну добу сьогодення. Технології розвиваються не по роках, а по місяцях, щодня відбувається новий прорив у галузях науки й техніки. Тому абсолютно логічним наслідком таких факторів є величезна кількість інформації, яка зберігається, обробляється, переглядається та редагується людством щодня. Інформація існує в різноманітних формах і проявах – інтернет-сайти, книги, статті, фільми, сторінки в соцмережах тощо. Однак найбільшою проблемою є те, що можливості людини щодо сприйняття та обробки інформації були й залишаються досить вузькими, оскільки обсяги даних у світі ростуть, але людство не встигає досягти відповідного рівня прогресу, щоб це усвідомити й опрацювати. Це своєю

чергою ставить завдання теоретичної систематизації обробки поточної інформації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання функціонування та використання структурованих і неструктурованих даних досліджує А.С. Еберенду (Madonna University, Nigeria) у своїй праці “Unstructured Data: an overview of the data of Big Data” [1]. У роботі, зокрема, зазначається, що сучасні інституції намагаються скористатись можливостями використання неструктурованих даних, аналізуючи й досліджуючи їх. Авторка констатує, що збір та аналіз неструктурованих даних дає підприємствам актуальну інформацію про свою діяльність, допомагає бути інноваційними, конкурентоспроможними, підвищувати продуктивність.

В українській науці окремі елементи аналізу структурованих даних містяться в роботі

А.Ю. Яцишина [2]. Він розглядає питання проектування гібридних сховищ даних з урахуванням структурованості даних, одночасно вводячи поняття мультибазових сховищ даних як розширення гібридних сховищ даних. Водночас слід зазначити, що досліджень, які розкривають проблеми росту даних, не достатньо.

**Постановка завдання.** Метою роботи є проведення аналізу й оцінки стану розвитку структурованих і неструктурованих даних і наявних на ринку інструментів управління ними.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження: розглянути рівень зростання великих даних у світі й навести прогнози щодо цього рівня в майбутньому, викласти основні характеристики й проаналізувати переваги й недоліки структурованих і неструктурованих даних, порівняти зручність роботи з ними й наявність процесуальних інструментів.

Практична значущість результатів дослідження полягає в можливостях для великих компаній систематизації обробки поточної інформації з різних джерел, що постійно доповнюються та змінюються, за допомогою описаних у статті інструментів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

**Ріст даних у світі.** Британський математик та аналітик Клайв Гамбі у 2006 році зазначав: «Дані – це нова нафта». Водночас всесвітня датасфера (*англ.* datasphere) – загальний обсяг даних, створених, фіксованих і відтворених у світі – дорівнював приблизно 160 ексабайт. Отже, дані, зростаючи експоненційно, стали на рівні з нафтою одним із найцінніших світових ресурсів [3].

На початку минулого десятиліття міжнародна компанія-постачальник маркетингових досліджень IDC (International Data Corporation) оцінила обсяг нових даних, згенерованих у 2010-му році, у 1.2 зетабайт (1,2 трильйона гігабайт), причому у 2009-му році ця цифра становила 0.8 зетабайт.

Передбачалося, що у 2020-му році обсяг новостворених даних зросте до 35 зетабайт. А прогноз на 2025-й рік становить аж 175 зетабайт [4]. 49% цього обсягу становитимуть дані в хмарі, і 90 зетабайт із всього обсягу становитимуть дані, генеровані пристроями Інтернету речей [5].

Зростання даних у світі показано на рис. 1.

Погляньмо ближче на статистику щодо росту даних. 2020-й рік завдяки пандемії COVID-19 зробив значний внесок у цифровізацію світу, роблячи технології невід’ємною частиною щоденного життя. Поглянувши на дані, маємо можливість глибше усвідомити швидкість, з якою розвивається суспільство. Так, дослідження “Data never sleeps 8.0” сервісу Domo надає статистику щодо даних, які генеруються у світі за хвилину [5]. Його результати показали, що кожної хвилини протягом 2020-го року користувачі Facebook обмінювались 150 000-ма повідомленнями, клієнти Amazon замовляли 6 659 посилок, а загальна сума, витрачена на покупки в інтернеті за ту ж хвилину, становить 1 млн доларів [5]. 5 мільярдів людей кожного дня мають справу з даними. До 2025-го року ця кількість збільшиться до 6 мільярдів і становитиме 75% від усього населення планети. Немало таких взаємодій відбувається завдяки пристроям Інтернету речей [5].

За прогнозами, подальший ріст даних буде спричиненим саме завдяки вбудованим пристроям (embedded devices). Людство все більше й більше залежить від розумних девайсів: смартквартири, розумні годинники, фітнес-браслети, камери спостереження, банківські картки тощо. Незважаючи на те, що кожна окрема операція, виконана будь-яким вбудованим пристроєм, несе дуже мало інформації, цих операцій – безліч, а отже, інформація генерується швидко й у всій можливій різноманітності. Прогнози повідомляють, що до 2025-го року дані, генеровані вбудованими пристроями, становитимуть 20% від усіх даних [8].

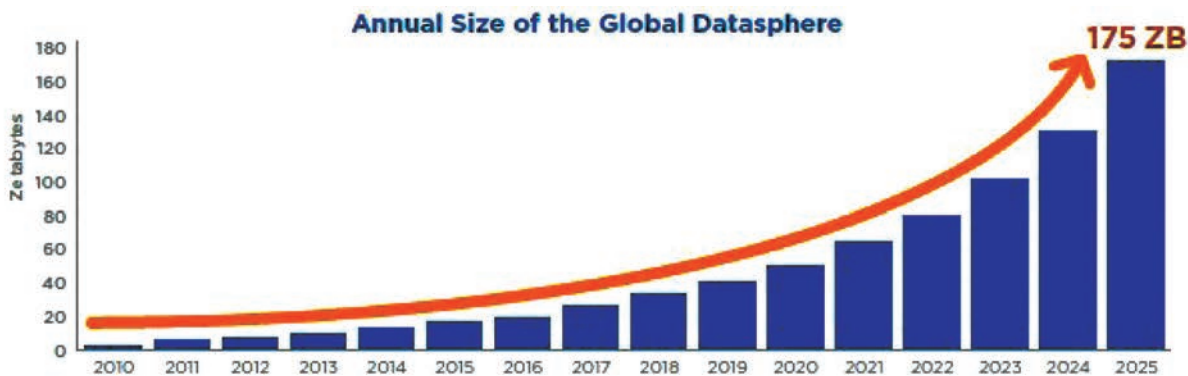


Рис. 1. Зростання даних у світі згідно з дослідженням IDC DataAge 2025 [6]

Поняття, які використовуються для класифікації великих даних – це структуровані й неструктуровані дані.

Структуровані дані – це дані, які відповідають раніше створеним моделям і завдяки цьому легко піддаються аналізу. Їх можна представити в табличному форматі з відношеннями між різними рядками й колонками. До прикладу, файли Excel або дані, які можна внести в бази даних SQL. Отже, структуровані дані залежать від існування певної моделі, за допомогою якої їх можна зберегти й обробити [9].

Основними перевагами структурованих даних є:

1. Легкі під час використання алгоритмами машинного навчання. Організованість структурованих даних дозволяє легко керувати ними й добувати їх.

2. Легкі під час використання бізнес-користувачами (клієнтами). Пересічний користувач має можливість працювати зі структурованими даними з розумінням теми, до якої вони належать: немає потреби глибоко розуміти типи даних чи їх взаємозв'язок.

3. Доступ до більшої кількості інструментів. Історично склалося, що структуровані дані використовувались набагато довше, ніж неструктуровані, адже це був єдиний можливий варіант. Отже, існує більше інструментів для роботи зі структурованими даними, випробуваними часом.

Недоліки структурованих даних зосереджені переважно на тому, що їм бракує гнучкості [10]. Так, зазвичай, структуровані дані – це стисла інформація, організована в суворий спосіб; їх можна уявити у вигляді таблиці, де кожна клітинка містить певне значення. Дані з такою заздалегідь визначеною структурою найчастіше можуть використовуватись лише в один спосіб.

Неструктуровані дані – це інформація, яка не має наперед визначеної моделі або ж не організована в наперед визначений спосіб. Кажучи простішими словами, це абсолютна більшість інформації, з якою людям трапляється працювати [9]. Типові приклади неструктурованих даних:

- текстові файли (файли Word, електронні листи, презентації тощо);
- дані із соціальних мереж;
- вебсайти;
- мобільні дані (текстові повідомлення, локації);
- медіа (цифрові фотографії, аудіо- й відеофайли).

Плюси неструктурованих даних:

1. Довільний первинний формат. Оскільки неструктуровані дані зберігаються у своєму влас-

ному форматі, вони спеціально не визначаються, доки не виникне потреба. Це приводить до більшої кількості варіантів їх використання (можна оперувати даними в будь-який спосіб і з будь-якою метою). Також завдяки цьому аналітики можуть обробляти лише необхідні частини всієї інформації.

2. Швидкість накопичення. Немає потреби заздалегідь визначати дані, а отже, збирати їх можна швидко й легко.

3. Зберігання в хмарних озерах даних (Cloud data lakes). Хмарні озера даних дозволяють масово зберігати неструктуровані дані, а також визначають ціни за зберігання як «плата лише в разі безпосереднього використання», що допомагає скоротити витрати [10].

Найбільшим недоліком неструктурованих даних є те, що для їх аналізу потрібна попередня підготовка в цій галузі. Так, звичайний користувач не може працювати з неструктурованими даними в їх первинному вигляді через їх невизначену природу. Використання неструктурованих даних вимагає розуміння теми, а також того, як дані пов'язані, і того, як використати ці зв'язки на благо компанії [10]. Крім необхідності попередньої підготовки, неструктуровані дані вимагають ще й наявності спеціальних інструментів для роботи з ними.

Окрім очевидної різниці в зберіганні структурованих і неструктурованих даних (у реляційній базі даних і поза нею відповідно), основною відмінністю між ними є міра складності аналізу цих видів даних. Як вже було зазначено, аналіз структурованих даних є процесом, який легко зреалізувати, для цього існують дієві інструменти.

А як щодо неструктурованих даних? Так, за потреби користувачі можуть проводити в певному сенсі автоматизований аналіз цих даних, наприклад, виконувати пошук вмісту в текстових файлах. Проте цього занадто мало для того, щоб переважити відсутність впорядкованої внутрішньої моделі даних. На жаль, компанії отримують не так багато користі від потенційно важливої інформації, наприклад, даних із соцмереж, блогів, взаємодії з клієнтами. Незважаючи на те, що засоби для аналітики неструктурованих даних уже присутні на ринку, жоден із них не є явним лідером, здатним спричинити прорив у роботі з ними. Прикладами вже наявних інструментів є MongoDB – документо-орієнтована система керування базами даних, оптимізована для зберігання документів, і Apache Giraph, що обробляє великі дані за допомогою графів.

Крім того, кількість неструктурованих даних у світі становить 80% і значно переважає кількість структурованих [9]. Це і є найбільшою проблемою неструктурованих даних – вони є важливим матеріалом для компаній, щоб будувати на їх базі нові оптимальні рішення для бізнесу. А отже, без відповідних інструментів для роботи з неструктурованими даними підприємства позбавлені величезних можливостей.

Великі дані залучають ціле різноманіття інструментів, технік і фреймворків для роботи. Для інструментів зберігання та обробки даних вимагаються такі характеристики, як масштабованість і наявність швидкісного доступу до величезних обсягів інформації. Розглянемо основні засоби, в яких наявні названі характеристики.

Першим інструментом для зберігання великих даних є реляційні бази даних, точніше, системи керування базами даних (англ. DBMS, Database Management System). Усі вони базуються на використанні мови SQL. Значна частина реляційних баз даних, призначених для великих даних, називається аналітичними базами даних масової паралельної обробки. Вони здатні швидко обробляти масивні обсяги даних (переважно структурованих) із мінімальними вимогами щодо моделювання, крім того, можуть масштабуватися до розміру багатьох терабайтів і петабайтів даних [11]. Реляційні бази даних використовуються для зберігання та обробки лише структурованих даних, тобто їх застосування доволі обмежене. Прикладами таких інструментів є системи MySQL, Microsoft SQL Server та інші.

Іншим підходом до зберігання великих даних є використання розподілених файлових систем – систем, що зберігають дані на великій кількості серверів. Вони є одним з інструментів для роботи з неструктурованими даними. Розподілені файлові системи дозволяють програмам отримувати доступ до відокремлених, ізольованих файлів так само, як це робиться з локальними, надаючи таким чином програмістам можливість працювати з файлами з будь-якого комп'ютера чи мережі. Найпопулярнішим серед розподілених файлових

систем є Hadoop. Кластери Hadoop здатні масштабуватися до великих розмірів – петабайт і навіть ексабайт даних, тому компанії можуть не обмежуватися опрацюванням лише вибіркового набору даних [11]. Також перевагою розподілених файлових систем є здатність забезпечувати прозорість і видимість даних навіть за несправності сервера чи диску.

Третім типом інструментів для роботи з даними є бази даних NoSQL – тип баз даних, розроблений інтернет-компаніями на початках 2000-х років. Цей тип не протилежний до реляційних баз на основі SQL, а радше доповнює їх, уможливаючи співіснування. Типовими характеристиками баз даних NoSQL є спрощення моделей даних і відсутність стандартної мови запитів [11]. На відміну від реляційних баз даних бази даних NoSQL надають широкий спектр моделей, за допомогою яких можна зберігати дані, – немає визначеної структури, яка вимагається. Крім того, ці бази значно швидші й гнучкіші у використанні, що робить їх конкурентною опцією для роботи з неструктурованими даними [12].

Існує ще кілька можливостей для зберігання та обробки великих даних. Використання тої чи іншої залежить від програми, обсягу даних, які використовуватиме програма, складності алгоритмів майнінгу тощо.

**Висновки.** Незважаючи на наявність досить ефективних засобів для роботи з неструктурованими даними на ринку, їх недостатньо для рівнозначного зіставлення зі швидкістю прогресу людства в генеруванні даних. Саме тому для компаній, підприємств та урядів надзвичайно важливим завданням є пошук ефективних знарядь для зберігання та опрацювання великих даних, особливо неструктурованих, добуваючи з них максимальну користь для себе, наприклад, вподобання користувачів, статистику замовлень, відгуки із соцмереж тощо. Крім того, проблемою великих даних є їх стрімкий ріст. Загалом результати дослідження показують, що існує потреба в пошуку нових інструментів для ефективної роботи з неструктурованими даними.

#### Список літератури:

1. Eberendu A.C. Unstructured Data: an overview of the data of Big Data. *International Journal of Computer Trends and Technology*. 2016. No. 38 (1). P. 46–50.
2. Яцишин А.Ю. Проектування гібридних сховищ даних з врахуванням структурованості даних. *Управління розвитком складних систем*. 2012. Вип. 9. С. 59–65.
3. Greaton T. What's causing the exponential growth of data? 2019. URL: [https://insights.nikkoam.com/articles/2019/12/whats\\_causing\\_the\\_exponential](https://insights.nikkoam.com/articles/2019/12/whats_causing_the_exponential).
4. Press G. 6 Predictions About Data In 2020 And The Coming Decade. 2020. URL: <https://www.forbes.com/sites/gilpress/2020/01/06/6-predictions-about-data-in-2020-and-the-coming-decade/?sh=3e23597a4fc3>.

5. Data Age 2025. The digitization of the world. URL: <https://www.seagate.com/gb/en/our-story/data-age-2025/>.
6. Reinsel D., Gantz J., Rydning J. The Digitization of the World From Edge to Core. 2018. URL: <https://www.seagate.com/files/www-content/our-story/trends/files/idc-seagate-dataage-whitepaper.pdf>.
7. Data Never Sleeps 8.0. URL: <https://www.domo.com/learn/data-never-sleeps-8>.
8. Enormous Growth in Data is Coming — How to Prepare for It, and Prosper From It. URL: <https://blog.seagate.com/business/enormous-growth-in-data-is-coming-how-to-prepare-for-it-and-prosper-from-it/>.
9. Data types: Structured vs. Unstructured Data. URL: <https://www.bigdataframework.org/data-types-structured-vs-unstructured-data/>.
10. Structured vs. Unstructured Data: A Complete Guide. URL: <https://www.talend.com/resources/structured-vs-unstructured-data/>.
11. Pokorny J. How to Store and Process Big Data: Are Today's Databases Sufficient? *13th IFIP International Conference on Computer Information Systems and Industrial Management (CISIM)*, Ho Chi Minh City, Vietnam, 5–7 November, 2014. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014. P. 5–10. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-45237-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-662-45237-0_2).
12. Nayak A., Poriya A., Poojary D. Type of NoSQL Databases and its Comparison with Relational Databases. *International Journal of Applied Information Systems (IJ AIS)*. 2013. Vol. 5. No. 4. P. 16–19.

### **Zakharchyn N.H., Zakharchyn N.R. GROWTH AND MANAGEMENT OF STRUCTURED AND UNSTRUCTURED DATA: GENERAL ASPECTS**

*In the context of the rapid growth of humanity in the era of information, big companies, institutions, and enterprises are facing the issue of the importance of the efficient handling of big data that is at their disposal. Proper use of this data is crucial as well as a complicated task due to the constant dynamics and variability of data, and its uncertainties. This article discusses the main problems that occur while working with structured and unstructured data within the context of its rapid global growth. The article provides and analyzes statistics of data volume growth in recent years, and some predictions and forecasts based on them, regarding information growth in the next years. Taking into account the research that was previously held, it is concluded that it is inevitable for data to continue to grow rapidly in the next years. Moreover, the article examines the terms of structured and unstructured data, their characteristics, advantages, and disadvantages of both types, and their practical use. This study also introduces some common methods and tools to work with big data, and pays attention to the main instances of their use. The significant moment of the study that is worth mentioning from the perspective of practical use is a difference in whether or not one or another tool is pertinent in the context of working with these types of big data. Tools designed for structured data usually cannot be applied to unstructured data. The volume of unstructured data which exists in the modern world highly exceeds the volume of structured data. Apart from that, unstructured data is capable of bringing great benefits to society, entrepreneurship, and businesses owing to its multiformity. Consequently, the article emphasizes that big data, especially unstructured data, requires seeking and finding new effective approaches that would enable the individuals of entrepreneurship to benefit more from the same amount of information.*

**Key words:** big data, databases, data growth, entrepreneur, Internet of Things.

**Зелінський Ю.П.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

**Кравченко С.М.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

## РОЗПІЗНАВАННЯ ЕМОЦІЙНИХ ВИРАЗІВ ОБЛИЧЧЯ ЛЮДИНИ ЗА ДОПОМОГОЮ ЗГОРТКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

*Об'єктом дослідження є моделі й архітектури згорткових нейронних мереж для вирішення задачі розпізнавання емоційних виразів людського обличчя. Оскільки за останні роки все більше зростає інтерес до розв'язання різноманітних проблем у сфері машинного й глибокого навчання, то виключенням не стала необхідність розпізнавати експресивні ознаки на людському обличчі з якомога кращою точністю. Величезна кількість рішень і досягнень зайвий раз доводить, наскільки актуальними є вивчення подібних задач і побудова власних дієвих методів, які своєю чергою надихатимуть інших більш поглиблено занурюватись у саму сутність наукової області й розширювати горизонти для подальших досліджень. У статті наведено підхід, який дозволить для побудованої структури CNN отримати якісніші результати класифікації за відносно короткі періоди. Для розпізнавання міміки було запропоновано просте рішення з використанням комбінації згорткової нейронної мережі й попередньої обробки зображень. Альтернативним варіантом розв'язання такої проблеми виступає створення власної бази даних, яка буде містити колекції зображень інших наборів даних. Базові емоції за такої умови розділені на такі шість класів: злість, сум, радість, страх, здивування, роздратування. Значна увага дослідження приділена вибору навчальних даних для тренування нейронної мережі, а також методам попередньої обробки й збільшенню даних для підвищення показників працездатності класифікації. Також була детально описана й проілюстрована структура розробленої моделі CNN. Експериментальні результати представили хороші показники класифікації в порівнянні із сучасними експериментами з кросвалідації та перехресними базами даних. Проти інших традиційних моделей підтверджено, що запропонована структура CNN перевершує показники класифікації з меншим часом виконання.*

**Ключові слова:** комп'ютерне бачення, машинне й глибоке навчання, класифікація, згорткові нейронні мережі, розпізнавання емоцій, метод попередньої обробки даних, метод збільшення даних.

**Постановка проблеми.** Натепер системи комп'ютерного зору й ідентифікації об'єктів на зображеннях відіграють важливу роль у сучасному світі. Повноцінне спілкування між людьми неможливе без прояву й аналізу емоцій, тому в сучасних людино-машинних системах все частіше загострюється потреба в застосуванні методів для розпізнавання емоцій.

Завдання розпізнавання емоційних виразів обличчя людини може використовуватись у різних сферах людської діяльності. Наприклад, у сфері робототехніки працюють над створенням інтелектуальних роботів, що можуть визначати емоційний стан людини й зважено на це реагувати. Усе це робиться для того, щоб забезпечити більш дружню та комфортну атмосферу під час спілкування між роботом і людиною. У маркетинговій сфері відповідні системи можуть бути використані з метою оперативного відстеження та реагування на різні проблеми в торгових центрах, супермаркетах і других місцях продажів товарів

і послуг. Ефективність вирішення ряду значених маркетингових завдань може бути значно підвищена шляхом автоматичного розпізнавання емоцій клієнтів.

Розпізнавання емоцій застосовується також у цілому ряді інших галузей, таких як телекомунікації, системи відеоспостереження, медицина, засоби масової інформації, соціальна сфера, індустрія комп'ютерних ігор, автоматизоване навчання та багато інших.

Хоча галузь розпізнавання емоцій є досить перспективною, вона натепер не дуже розвинута [1]. Головною причиною цього є відсутність єдиних стандартів для розробки алгоритмів, а також відсутність єдиних баз даних, сформованих для навчання алгоритмів розпізнавання емоцій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Починаючи з 50-х років минулого століття, перших днів зародження області штучного інтелекту, дослідники намагалися створити систему, яка зможе розуміти візуальні дані.



Через десятиліття галузь стала більш відомою як комп'ютерне бачення (computer vision). У 2012 році комп'ютерне бачення зробило стрімкий ривок вперед, коли група дослідників з університету Торонто розробила модель штучного інтелекту, яка перевершила найкращі алгоритми розпізнавання зображень.

Система штучного інтелекту AlexNet [2] (названа на честь дослідника Алекса Крижевського) виграла конкурс із комп'ютерного зору 2012 року, продемонструвавши вражаючу точність у 85%. Основу системи AlexNet склав особливий тип нейронної мережі – згорткові нейронні мережі, які здатні на високому рівні імітувати людський зір.

**Постановка завдання.** Важливим завданням виступає проведення збору навчальних даних для тренування згорткової нейронної мережі, використовуючи колекцію зображень людей із різних наборів даних. Для підвищення характеристик класифікації застосувати методи для попередньої обробки даних і техніку збільшення даних. Метою роботи є представлення структури розробленої згорткової нейронної мережі й одержання високих результатів експериментальних досліджень із перехресними базами даних.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Існує багато різних видів нейронних мереж, які можна використовувати в проектах машинного навчання: рекурентні нейронні мережі, нейронні мережі з прямим зв'язком, модульні нейронні мережі й інші. Згорткова нейронна мережа – це ще один вид широко розповсюджених нейронних мереж. Вона містить згорткові шари, які мають функцію активації, повнозв'язкові й агрегувальні шари, рецептивні поля та ваги. Використовуючи ці складові частини, мережа виконує операцію на основі цих функцій.

Для того, щоб розпізнавати міміку на основі CNN, потрібно мати хорошу навчальну базу даних. У статті було зібрано відомості про десять різних баз даних із метою сформувати добре класифіковану базу даних високої якості для кожного виразу обличчя. Для зручності буде класифікуватися шість типів емоційних виразів – злість, сум, радість, здивування, страх, роздратування. Для цього слід розробити архітектуру CNN із навчальними параметрами, які будуть характерні високими показниками класифікації.

Колекція бази даних.

Для розпізнавання міміки з високою точністю потрібна база даних, що містить велику кількість зображень обличчя. База даних, використана в змаганні «Визначення мімічних виразів обличчя», що відбулася в Kaggle у 2013 році (FER 2013), складається із 40 000 зображень обличчя із сімома класами виразів обличчя [3]. Однак роздільна здатність цих зображень низька (48 x 48 пікселів), і подекуди зустрічаються неправильно позначені зображення. Якщо структура CNN розроблена для вхідного зображення з низькою роздільною здатністю, то потрібно змінити розмір вхідного зображення з високою роздільною здатністю відповідно до структури. Під час цього процесу продуктивність класифікації знижується, оскільки співвідношення зображення змінюється та виникає розмиття. Також неправильне маркування погіршує показники класифікації.

На рис. 1 показані деякі фотографії з бази даних FER2013, які були неправильно позначені для різних виразів обличчя. Для подолання цих проблем ми використаємо такі десять високоякісних баз даних, опублікованих університетами й науково-дослідними інститутами по всьому світу.

Характеристики наборів даних для розпізнавання емоцій:

1. Амстердамський набір динамічних виразів обличчя (ADFES). Цей набір оснований на 648 знятих емоційних виразів. Він демонструє дев'ять емоцій: шість основних емоцій (гнів, огиду, страх,

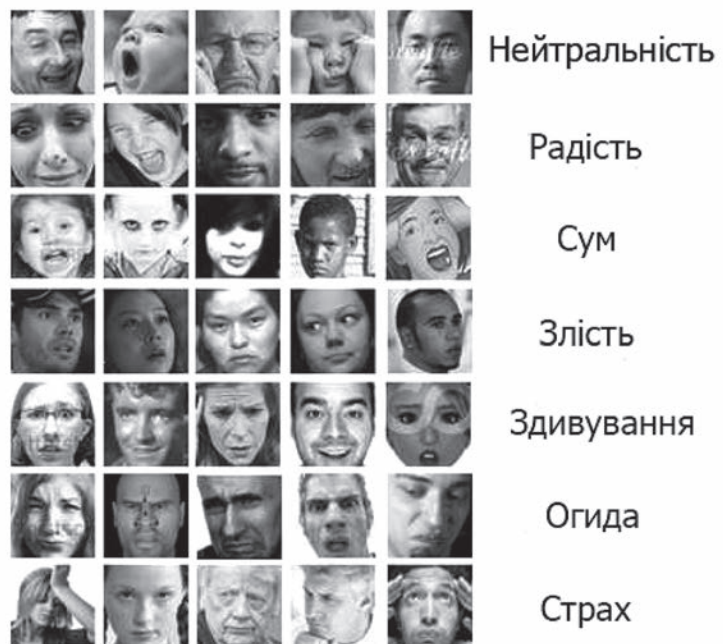


Рис. 1. Приклади зображень, які були неправильно класифіковані для облич у базі даних FER 2013

радість, сум і здивування), а також зневагу, гордість і збентеження. Вирази зображуються на 22 моделях (10 жіночих і 12 чоловічих).

2. Чиказька база даних облич (CFD). Вона містить нейтральні зображення обличчя для 597 людей у віці від 17 до 65 років. Вона складається з різних рас і містить зображення 158 осіб із такими класами: радість, злість і страх.

3. База даних Cohn-Kanade з AU-кодованою мімікою. Вона містить 593 відеопослідовностей для 123 осіб віком від 18 до 30 років. Серед них 309 послідовностей демонструють емоційні вирази: радість, сум, гнів, здивування, страх, огиду й роздратування.

4. EU-Emotion Stimulus Set. Набір складається з таких виразів, як нейтральність, радість, сум, злість, здивування та презирство для 19 акторів у віці від 10 до 70 років. Актори працювали в драматичних школах і театрах діючих агентств Великобританії.

5. База даних ESRC тривимірних облич. Вона містить зображення, зроблені під різними кутами й освітленням за допомогою чотирьох камер для 45 чоловіків і 54 жінок. База складається з класичних емоційних виразів: радість, сум, злість, здивування та роздратування.

6. База даних життєвого шляху. Вона містить дані 575 особистостей віком від 18 до 93 років. База даних була розроблена, щоб бути більш репрезентативною для вікових груп протягом усього життя з особливим акцентом на підборі людей похилого віку.

7. Каролінська база даних емоційних облич (KDEF). Вона містить 4 900 зображень, зроблених під п'ятьма кутами:  $-90^\circ$ ,  $-40^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  та  $90^\circ$  для 35 жінок і 35 чоловіків у віці від 20 до 30 років. База даних складається із семи виразів: нейтральність, радість, сум, злість, здивування, страх і роздратування.

8. Radboud Faces Database (RaFD). Це набір фотографій із 67 моделей (включаючи чоловіків і жінок

кавказького походження, кавказьких дітей, як хлопчиків, так і дівчаток, марокканських і голландських чоловіків), що демонструють 8 емоційних виразів. RaFD – це високоякісна база даних облич, яка містить зображення восьми емоційних виразів: гніву, огиди, страху, радості, суму, здивування, зневаги й нейтральності. Кожну емоцію показували в трьох різних напрямках погляду, і всі знімки були зроблені одночасно з п'яти ракурсів камери.

9. База даних вебпошуку. База даних, отримана на основі зображень знайдених у вебпошуку.

10. Варшавський набір емоційних виразів обличчя (WSEFEP). Набір містить 210 високоякісних знімків 30 осіб. Вони демонструють шість основних емоцій і нейтральний вираз обличчя.

Методи попередньої обробки даних і збільшення даних.

Оскільки розпізнавання виразів обличчя людини вимагає лише інформації про область обличчя, необхідна попередня обробка, щоб виявити й вирізати лише область обличчя навчального зображення. У статті використано метод, заснований на характеристиках Хаара, для виявлення та вирізання області обличчя [4]. На рис. 2 показаний результат виявлення та вирізання області обличчя з вихідного зображення та перетворення його на зображення сірого кольору.

Якщо кількість навчальних зображень недостатня в порівнянні з параметрам и навчання CNN, може виникнути проблема з надмірною підгонкою, а продуктивність класифікації знизиться. Для розв'язання такої проблеми використовується техніка збільшення даних, яка додає кількість навчальних зображень.

Архітектура CNN проілюстрована на рис. 3. Мережа складається з восьми шарів. Перші п'ять шарів є згортковими (C1-5), а наступні три – повнозв'язковими (FC6-8). Вихідний сигнал останнього повнозв'язкового шару надходить на шести напрямлену функцію активації softmax, яка здійснює розподіл по шести мітках класу. Шари Maxpooling слідує за першим, другим і п'ятим згортковим шаром. Не лінійність функції ReLU (Rectified Linear Unit) застосовується до виводу кожного згорткового й повнозв'язкового шару.

Перший згортковий шар фільтрує вхідне зображення розміром  $227 \times 227$  із 96 ядрами розмірністю  $11 \times 11$  із кроком 4 пікселі. Другий згортковий шар бере як вихідні дані перший згортковий шар і фільтрує його зі 128 ядрами розмірністю



Рис. 2. Результат перетворення вирізаної області зображення в сіре зображення

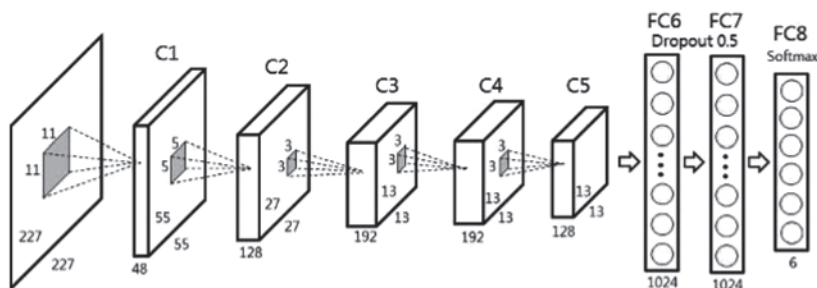


Рис. 3. Запропонована архітектура CNN

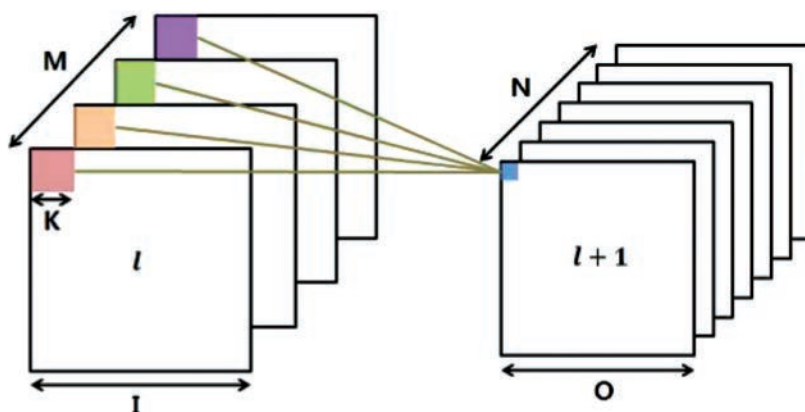


Рис. 4. Обчислювальний зв'язок між послідовними згортковими шарами

$5 \times 5 \times 48$ . Третій, четвертий і п'ятий згорткові шари з'єднані між собою без втручання шарів об'єднання або нормалізації. Третій згортковий шар має 192 ядра розмірністю  $3 \times 3 \times 128$ , підключених до виходів другого згорткового шару. Четвертий згортковий шар має 192 ядра розмірністю  $3 \times 3 \times 192$ , а п'ятий згортковий шар має 128 ядер розміром  $3 \times 3 \times 192$ . Повністю з'єднані шари мають по 1 024 нейрони. Для запобігання надмірного перенавчання даних до перших двох повнозв'язкових шарів застосовується метод dropout.

Запропонована структура аналогічна AlexNet [2]. У розпізнаванні виразів обличчя кількість каналів у згортковому шарі й кількість вузлів у повнозв'язковому шарі зменшуються для того, щоб вибрати оптимальну структуру з вищою продуктивністю класифікації, меншим часом виконання та меншими параметрами навчання.

Як бачимо на рис. 4, коли кількість каналів послідовних згорткових шарів зменшується, то кількість обчислень квадратично зменшується. Таким чином, кількість каналів кожного згорткового шару зменшується вдвічі, що значно зменшує обсяг обчислень. На відміну від AlexNet, який для класифікації містить 1 000 класів, вищезгадана

структура має класифікувати лише шість виразів. Таким чином, кількість вузлів у повнозв'язковому шарі зменшується більш ніж в чотири рази.

**Експерименти й результати дослідження.** Реалізація кроків попередньої обробки була здійснена за допомогою бібліотеки OpenCV і мови програмування Python. Попередньо оброблені навчальні зображення сірого кольору повертаються під кутами  $-15^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $-5^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  і  $15^\circ$  і перевертаються горизонтально. У результаті будуть отримані чотирнадцять зображень. Далі порівнюється точність розпізнавання виразів обличчя з і без збільшення даних.

Таблиця 1

Порівняння точності методів збільшення даних

Попередня обробка	Точність (%)
Без збільшення даних	89,05
Зі збільшенням даних	93,93

У табл. 1 показано вплив методів збільшення на точність розпізнавання в оптимальній структурі (48, 128, 192, 192, 128, 1024, 1024, 6). Як показано в табл. 1, за застосування техніки збільшення даних точність розпізнавання значно зростає.

Далі оцінюється точність нової архітектури глибокої нейронної мережі у двох різних експериментах, таких як перехресна валідація та перехресна база даних. В експерименті з перехресною валідацією було використано техніку перехресної перевірки з  $K$ -кратною формою, де  $K = 10$ . База даних була розділена на 10 груп без накладання предметів між групами. Ця методологія забезпечує генералізацію класифікаторів.

Таблиця 2

**Середня точність (%) у разі перехресної валідації**

База даних для оцінювання	Точність структури	Сучасний рівень
ADFES	100,00	96,30
CFD	97,64	-
CK+	96,83	96,76
EU-Emotion Stimulus Set	79,17	-
ESRC	84,76	-
FACE DATABASE	91,29	89,81
KDEF	91,79	89,00
RafD	99,25	93,96
Web Search	81,97	-
WSEFEP	96,11	-

У табл. 2 наведено середню точність класифікації зображень за шістьма виразами. Середню матрицю неточностей в експериментах із перехресної валідації можна побачити в табл. 3. У табл. 2 результати експерименту з перехресної перевірки кращі в порівнянні з поточним сучасним рівнем техніки. У вже опублікованих статтях немає результатів із використанням CFD, EU-Emotion Stimulus Set, бази даних ESRC і WSEFEP. Web Search також не є порівняльною базою даних, оскільки кожне зображення виразу обличчя видобувається та отримується окремо. У результаті суворого експерименту перехресної валідації можна побачити, що запропонована структура має чудові загальні показники класифікації з боку предмета в

Таблиця 3

**Середня матриця неточностей за перехресної валідації (%)**

	NE	HA	SA	AN	SU	DI
NE	97,15	0,65	1,36	0,58	0,19	0,06
HA	2,30	96,19	0,16	0,40	0,48	0,48
SA	5,18	0,43	87,19	4,60	1,15	1,44
AN	1,86	0,74	6,20	86,37	0,12	4,71
SU	1,93	0,64	0,26	0,13	96,79	0,26
DI	0,74	1,78	3,56	3,12	0,59	90,21

одному середовищі. Табл. 3 показує високу точність – щонайменше 86,37% – для шести виразів, які мають бути класифіковані в матриці неточностей для експерименту перехресної валідації.

В експерименті між базами даних одна база даних використовується для оцінки, а решта баз даних використовується для навчання мережі. Перехресні бази даних є складним завданням, оскільки кожна база даних має різне освітлення, положення людини, кут нахилу камери й емоційний вираз. У табл. 4 наведено середню точність між базами даних під час класифікації шести виразів.

Результатом є точність класифікації з використанням методу опорних векторів з ядром функції радіальної бази (SVM + RBF) [5]. Однак найкращі результати були отримані шляхом зміни бази навчання та параметрів класифікатора. Завдяки експериментам із перехресною валідацією та перехресними базами даних можна стверджувати, що запропонована структура CNN підходить для генералізації розпізнавання виразів обличчя.

Для порівняння з іншими моделями CNN експеримент перехресної перевірки був проведений для AlexNet, VGGNet (11 шарів), OverFeat (швидка модель) і CNN. Відбувається вимір часу навчання та тестування, коли пакет проходить через кожну модель. Табл. 5 показує, що запропонована структура витрачає набагато менше часу як на навчання, так і на тестування.

Ми навчали кожну модель CNN із нуля, використовуючи той самий протокол, який використовується для навчання нашої власної мережі. У табл. 6 наведено класифікаційну точність кожної моделі. Можна підтвердити, що класифікація запропонованої моделі найкраща.

Таблиця 4

**Середня точність (%) у перехресній базі даних**

База даних для оцінювання	Точність запропонованої структури	Сучасний стан
ADFES	99,24	-
CFD	92,16	-
CK+	92,61	64,20
EU-Emotion Stimulus Set	73,96	-
ESRC	72,11	-
FACE DATABASE	78,32	79,27
KDEF	78,81	-
RafD	94,94	-
Web Search	82,79	-
WSEFEP	95,56	-

**Висновки.** Описана модель згорткової нейронної мережі CNN найкраще підходить для розпізнавання виразів обличчя для шести емоцій. Структура запропонованого алгоритму має хорошу генералізацію та ефективність класифікації. Методика збільшення даних застосовується для розв'язання проблеми надмірності, яка погіршувала показники класифікації. Створена модель CNN має оптимальну структуру для скорочення часу виконання та підвищення ефективності класифікації та визначалася шляхом коригування кількості карт характеристик у згортковому шарі й кількості вузлів у повнозв'язковому. Проведені експерименти підтвердили ефективність методів попередньої обробки й збільшення даних.

Таблиця 5

**Час тренування та тестування для кожної моделі**

Модель	Час тренування (пакетів за секунду)	Час тестування (пакетів за секунду)
AlexNet	0,325	0,068
OverFeat	0,593	0,125
VGGNet	2,128	0,569
Запропонована модель	0,131	0,027

Таблиця 6

**Точність для кожної моделі**

Модель	Точність
AlexNet	93,55
OverFeat	93,55
VGGNet	91,60
Запропонована модель	93,95

**Список літератури:**

1. Bartlett M.S., Littlewort G., Frank M., Lainscsek C., Fasel S., Movellan J. Recognizing facial expression: machine learning and application to spontaneous behavior. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*, 20–25 June 2005. San Diego, 2005. P. 568–573.
2. Krizhevsky A., Sutskever S., Hinton G.E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in neural information processing systems*. 2012. P. 1–9.
3. Змагання в Kaggle для розпізнавання емоційних виразів обличчя людини. URL: <https://www.kaggle.com/shawon10/facial-expression-detection-cnn> (дата звернення: 28.08.2021).
4. Viola P., Jones M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2001, CVPR 2001. Proceedings of the 2001, IEEE Computer Society Conference on. Vol. 1. IEEE, 2001.
5. Bekios-Calfa J., Buenaposada J.M., Baumela L. Revisiting linear discriminant techniques in gender recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2011. Vol. 33. No. 4. P. 858–864.

**Zelinsky Yu.P., Kravchenko S.N. RECOGNITION OF EMOTIONAL EXPRESSIONS OF HUMAN FACE USING CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK**

*The object of research is the models and architectures of convolutional neural networks to solve the problem of recognizing the emotional expressions of the human face. As interest in solving various problems in the field of machine and deep learning has been growing in recent years, it is no exception that it is not necessary to recognize expressive features on the human face with the best possible accuracy. The huge number of solutions and achievements proves once again how relevant it is to study such problems and build their own effective methods, which in turn will inspire others to delve deeper into the essence of the scientific field and expand horizons for further research. The article presents an approach that will allow for the constructed structure of CNN to obtain better classification results in relatively short periods of time. A simple solution using a combination of convolutional neural network and image pre-processing was proposed to recognize facial expressions. An alternative solution to this problem is to create your own database, which will include collections of images from other datasets. Basic emotions are divided into the following six classes: anger, sadness, joy, fear, surprise, irritation. Much attention is paid to the choice of training data for neural network training, as well as methods of pre-processing and data augmentation to improve the performance of the classification. The structure of the developed CNN model was also described in detail and illustrated. The experimental results showed good classification performance compared to modern cross-validation experiments and cross-databases. Compared to other traditional models, it is confirmed that the proposed structure of CNN exceeds the classification indicators with less execution time.*

**Key words:** computer vision, machine and deep learning, classification, convolutional neural networks, emotion recognition, data preprocessing method, data augmentation method.

**Кваша Ю.В.**

Державний університет «Одеська політехніка»

## ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ЕНЕРГОБЛОКУ АТОМНОЇ СТАНЦІЇ ВВЕР-1000 В РЕЖИМІ «Н»

*Атомна енергетика забезпечує близько 55% потреби українців в електроенергії. Восени й узимку цей показник може дорівнювати 70% від загального рівня потужності. Собівартість електроенергії, виробленої на атомних енергоблоках, найнижча для споживача.*

*Запорізька, Рівненська, Хмельницька й Південноукраїнська атомні електростанції мають у своєму складі енергоблоки типу ВВЕР-1000. Цього року розпочато роботи з добудови третього й четвертого енергоблоків Хмельницької атомної електростанції. Таким чином, після їх завершення в енергокомплексі України будуть функціонувати 15 енергоблоків типу ВВЕР-1000. Тому актуальна потреба у вивченні принципів роботи енергоблоків такого типу й створення нових алгоритмів управління. Щоб розробити якісно нові програми регулювання, необхідно чітко розуміти базові режими функціонування.*

*Завдяки системам управління та захисту технологія виробництва атомної електроенергії є екологічною. За умови дотримання інструкцій з експлуатації обладнання та вимог охорони праці робота на атомній електростанції не завдає шкоди здоров'ю службовців. Запорукою безпечної та надійної роботи атомної електростанції є використання автоматизованих систем управління технологічними процесами. Автоматизована система регулювання енергоблоку атомної електростанції в режимі «Н» є частиною ієрархічної децентралізованої автоматизованої системи управління технологічним процесом атомної електростанції.*

*Об'єктом дослідження в роботі є енергоблок атомної електростанції типу ВВЕР-1000, який працює в режимі «Н». У статті проаналізований алгоритм функціонування енергоблоку в такому режимі. Були розглянуті базові програми регулювання, а також останні публікації щодо роботи атомних енергоблоків такого типу.*

*Проведено дослідження роботи в режимі «Н» автоматичного регулятора потужності енергоблоку й регулятора турбіни. Шляхом моделювання роботи енергоблоку в програмному середовищі Matlab Simulink отримані криві розгону об'єкту управління за каналами «Переміщення ОР СУЗ  $\Delta h$  – Електрична потужність  $N$ » і «Переміщення ОР СУЗ  $\Delta h$  – Тиск у паропроводі  $\Delta P$ ».*

*У результаті дослідження побудовані графіки перехідних процесів за каналами «Переміщення ОР СУЗ  $\Delta h$  – Електрична потужність  $N$ » і «Переміщення ОР СУЗ  $\Delta h$  – Тиск у паропроводі  $\Delta P$ » і визначені їх характеристики.*

**Ключові слова:** *автоматизована система управління технологічними процесами, автоматичний регулятор потужності, регулятор турбіни, атомна електростанція, енергоблок ВВЕР-1000, режим «Н».*

**Постановка проблеми.** Нині в Україні функціонує 15 енергоблоків у складі чотирьох атомних електростанцій (далі – АЕС), серед яких найпотужніша в Європі Запорізька АЕС, загальною потужністю 6000 МВт.

Собівартість електроенергії, виробленої на атомних електростанціях, нижче собівартості електроенергії, виробленої за допомогою альтернативних джерел. Виходячи з цього, Міжнародне агентство з атомної енергії вважає атомну енергетику перспективною галуззю економіки та особливу увагу приділяє удосконаленню експлуатаційних характеристик і підвищенню безпеки АЕС.

Базове навантаження у електромережі України має забезпечуватися за допомогою атомних електростанцій з декількох причин:

– за умови чіткого дотримання інструкцій з експлуатації атомних електростанцій даний вид виробництва електроенергії є найбільш екологічним;

– використання нових технологій дає змогу забезпечити низьку вартість електроенергії для споживача, достатній ресурс палива та безпеку технології виробництва;

– наявна потреба нових джерел енергії. [1, с. 19–29].

Однією з головних складових у процесі організації надійної та безпечної роботи АЕС є автоматизовані системи управління та захисту технологічних об'єктів.

Впровадження системи автоматичного регулювання енергоблоку атомної електростанції у режимі «Н» дозволить:

- мінімізувати ймовірність ерозійного пошкодження обладнання парового тракту енергоблоку;
- підвищити надійність систем технологічного блокування та захисту реакторної установки;
- скоротити кількість відмов у роботі обладнання АЕС;
- звести до мінімуму кількість відмов обладнання з вини персоналу.

Перелічені фактори сприяють підвищенню безпеки АЕС та зменшенню собівартості кінцевого продукту. Щоб створити компромісні програми регулювання роботи атомного енергоблоку, необхідно розуміти принцип його роботи та дослідити особливості функціонування у базових режимах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Регулювання потужності енергоблоку типу ВВЕР-1000 відбувається за допомогою автоматичного регулятора потужності та регулятора турбіни. Сумісна роботи цих пристроїв забезпечує роботу енергоустановки у таких режимах:

- режим «Т» – режим підтримки теплотехнічного параметру (тиск водяної пари у головному паровому колекторі) шляхом впливу на органи регулювання системи управління захистом реактора;
- режим «Н» – режим підтримки нейтронної потужності на заданому рівні з зоною нечутливості  $\pm 1,5\%$  за  $100\%$  поточного навантаження реакторної установки;
- режим «С» – режим обмеження тиску в головному паровому колекторі;
- режим «К» – режим підтримки теплотехнічного параметру за компромісною програмою шляхом впливу на роботу реактора переміщенням органів регулювання системи управління захистом.

У статті [2] запропоновано нову компромісно-комбіновану програму регулювання енергоблоку АЕС з реактором ВВЕР-1000 зі змінним навантаженням.

У статті [3] досліджено основні програми регулювання енергоблоків з реактором типу ВВЕР-1000. Було розроблено нову математичну модель реактора енергоблоку для перевірки якості регулювання за компромісно-комбінованою програмою регулювання, запропонованою у статті [2].

У статті [4] синтезована автоматизована система регулювання концентрації борної кислоти у теплоносії першого контуру енергоблоку з реактором типу ВВЕР-1000 з урахування нелінійних особливостей об'єкту управління.

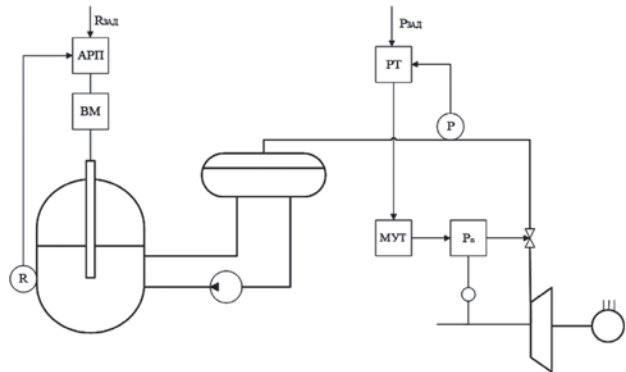
У статті [5] реалізована каскадна автоматизована система регулювання енергоблоку атомної станції з реактором типу ВВЕР-1000. Запропонована схема регулювання з урахування неліній-

них властивостей реакторної установки та каналу управління під час борного регулювання.

**Постановка завдання.** Метою статті є дослідження автоматизованої системи регулювання енергоблоку АЕС з реактором ВВЕР-1000 у режимі роботи «Н» за каналами управління «Переміщення ОР СУЗ  $\Delta h$  – Електрична потужність  $N$ » та «Переміщення ОР СУЗ  $\Delta h$  – Тиск у паропроводі  $\Delta P$ ».

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Робота енергоблоку у режимі «Н» передбачає підтримання нейтронної потужності реактора у заданому діапазоні. Цей діапазон складає  $(3 \div 20)\%$  від  $N_{ном}$  з урахуванням зони нечутливості  $\pm 1,5\%$ . Величиною заданого рівня потужності вважається рівень потужності реактора у моменті увімкнення автоматичного регулятора потужності у режим «Н».

Принципова схема регулювання енергоблоку атомної електростанції в режимі «Н» показана на рис.1. Умовні позначення, які використовуються на рисунку: АРП – автоматичний регулятор потужності, ВМ – виконавчий механізм, РТ – регулятор турбіни, МУТ – механізм управління турбіною,  $P_n$  – регулятор частоти обертання турбіни.



**Рис. 1. Принципова схема регулювання енергоблоку атомної електростанції в режимі «Н»**

Головною задачею автоматичного регулятора потужності є стабілізація нейтронної потужності реактора шляхом формування управляючого сигналу для регулюючих стрижнів. Регулятор турбіни контролює тиск пари, яка надходить у турбіну. Він надсилає сигнал до механізму управління турбіною регулятора частоти обертання турбіни. Це базовий режим роботи енергоблоку. Потужність енергоблоку під час роботи у режимі «Н» підтримується на заданому рівні з допустимим відхиленням  $\pm 2\%$ . Якщо тиск пари у головному паровому колекторі перевищує задану величину, автоматичний регулятор потужності переходить з режиму «Н» у режим «Т».

У базовому режимі роботи заданий рівень потужності енергоблоку  $N_{\text{зад}}$  встановлюється оператором. Регулятор турбіни приймає це значення як уставку. Він чинить вплив на механізм управління турбіною. За допомогою механізму управління турбіною та регулюючого клапану перед нею змінюється витрата пари, яка надходить у турбіну.

Автоматичний регулятор потужності відслідковує та у разі необхідності вирівнює величини потужності реактора та турбогенератора. Сигнал тиску пари перед турбіною надходить у регулятор. Відбувається його порівняння з заданою величиною тиску пари  $P_{\text{зад}}$ . Якщо вони не співпадають, автоматичний регулятор потужності надсилає сигнал виконавчому механізму регулюючих стрижнів реактора. За їх допомогою змінюється потужність реакторної установки до величини, рівній потужності турбогенератора.

Щоб змінити потужність енергоблоку, необхідно встановити нове значення  $N_{\text{зад}}$ . Слід враховувати, що потужність енергоблоку типу ВВЕР-1000 змінюється зі швидкістю 10 МВт/хв.

Збурення у реакторі за нейтронним потоком сприймаються іонізаційними камерами. Сигнал від камер надходить до автоматичного регулятора потужності через диференціатор. Це дозволяє відслідковувати швидкість зміни величини нейтронного потоку.

Якщо енергоблок працює у статичному режимі, сигнал, який формує диференціатор, рівний нулю. Автоматичний регулятор потужності підтримує задане значення тиску пари з точністю  $\pm 0,05$  МПа.

Для отримання кривих розгону за каналами «Переміщення ОР СУЗ  $\Delta h$  – Електрична потужність  $N$ » та «Переміщення ОР СУЗ  $\Delta h$  – Тиск у паропроводі  $\Delta P$ » використана математична модель, описана у статті [3].

Крива розгону енергоблоку АЕС при нанесенні збурення +1% за каналом «Переміщення ОР СУЗ  $\Delta h$  – Електрична потужність  $N$ » показана на рис. 2. Проаналізувавши отриманий графік, можна стверджувати, що за каналом «Переміщення ОР СУЗ  $\Delta h$  – Електрична потужність  $N$ » енергоблок АЕС має властивості інерційної ланки I-го порядку.

Крива розгону енергоблоку АЕС при нанесенні збурення +1% за каналом «Переміщення ОР СУЗ  $\Delta h$  – Тиск у паропроводі  $\Delta P$ » показана на рис. 3. Проаналізувавши отриманий графік, можна стверджувати, що за каналом «Переміщення ОР СУЗ  $\Delta h$  – Тиск у паропроводі  $\Delta P$ » енергоблок АЕС має властивості інерційної ланки I-го порядку.

**Результати досліджень.** Для дослідження роботи автоматизованої системи управління енергоблоком АЕС із реактором ВВЕР-1000 у програмному середовищі Matlab Simulink було використано модель, зображену на рис. 4.

Було задано збурення +1% за каналом «Переміщення ОР СУЗ  $\Delta h$  – Електрична потужність  $N$ ». Перехідний процес показано на рис. 5. Характеристики перехідного процесу наведені у табл. 1.

Було задано збурення +1% за каналом за каналом «Переміщення ОР СУЗ  $\Delta h$  – Тиск у паропроводі  $\Delta P$ ». Перехідний процес показано на рис. 6. Характеристики перехідного процесу наведені у табл. 2.

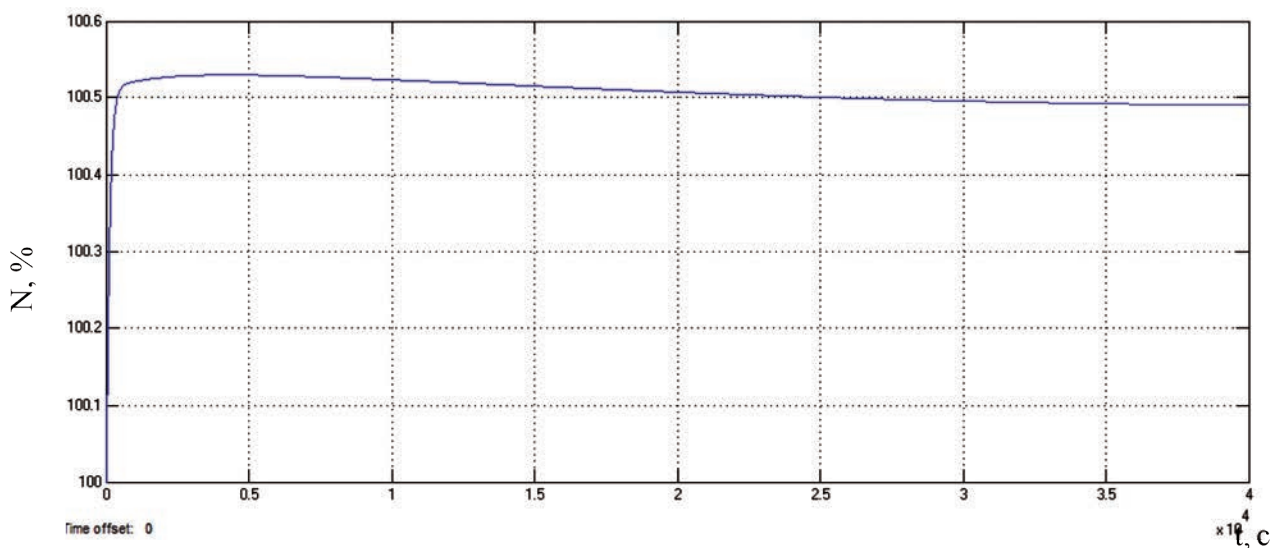


Рис. 2. Крива розгону енергоблоку АЕС при нанесенні збурення +1% за каналом «Переміщення ОР СУЗ  $\Delta h$  – Електрична потужність  $N$ »



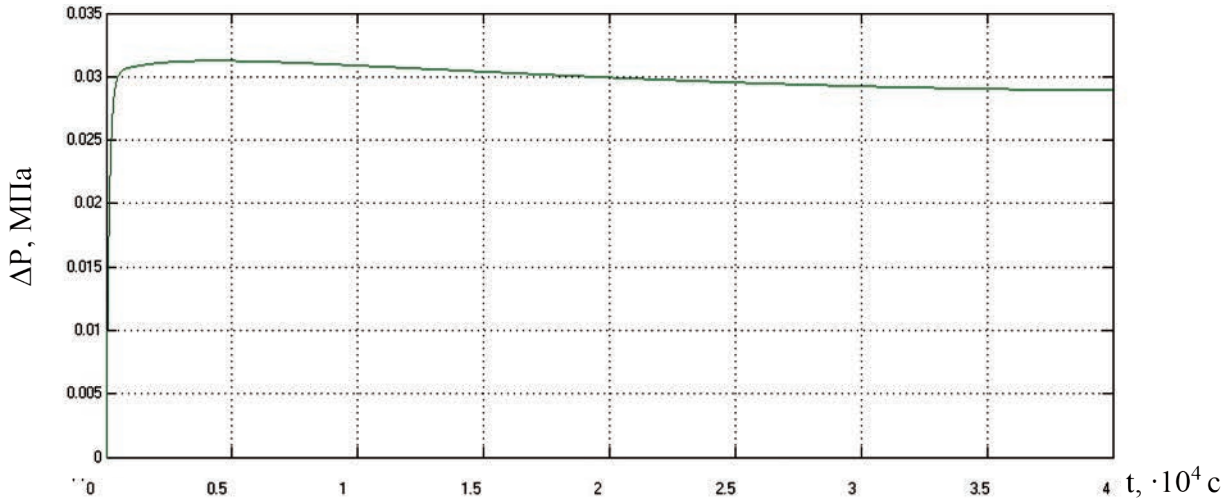


Рис. 3. Крива розгону енергоблоку АЕС при нанесенні збурення +1% за каналом «Переміщення ОР СУЗ  $\Delta h$  – Тиск у паропроводі  $\Delta P$ »

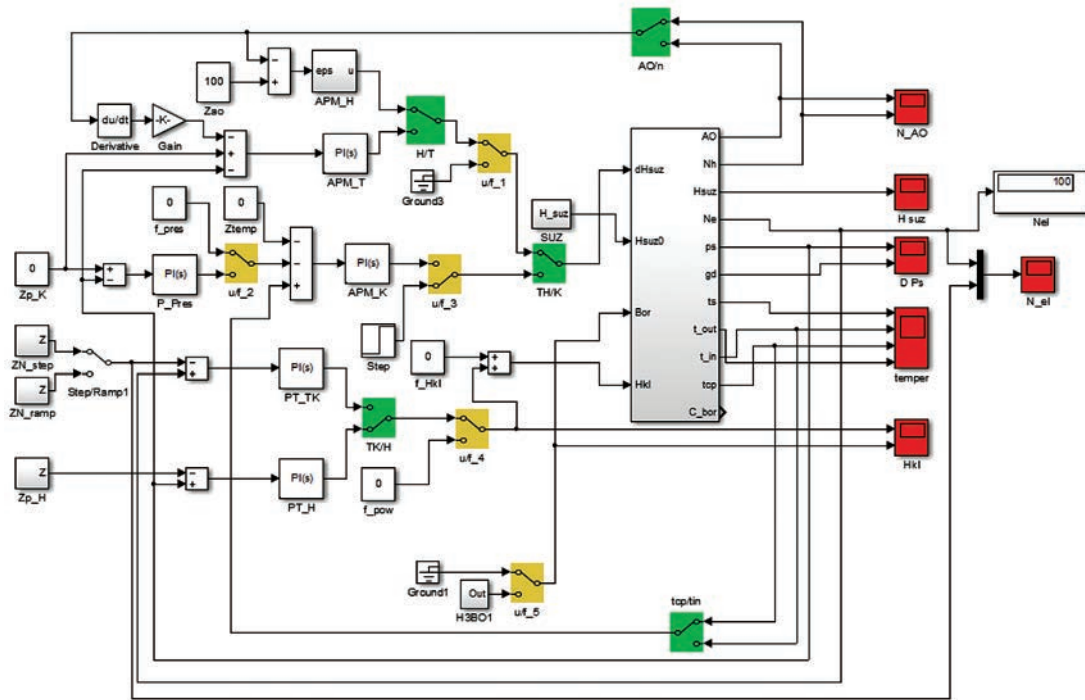


Рис. 4. Модель автоматизованої системи регулювання енергоблоку АЕС у режимі «Н» у програмному середовищі Matlab Simulink

Таблиця 1

Характеристики перехідного процесу при нанесенні збурення +1% за каналом «Переміщення ОР СУЗ  $\Delta h$  – Електрична потужність  $N$ »

Найменування характеристики	Характеристика
Величина максимального відхилення, %	0,003
Час регулювання $T$ , с	$2,7 \cdot 10^4$

Таблиця 2

Характеристики перехідного процесу при нанесенні збурення +1% за каналом «Переміщення ОР СУЗ  $\Delta h$  – Тиск у паропроводі  $\Delta P$ »

Найменування характеристики	Характеристика
Величина максимального відхилення, %	$5 \cdot 10^{-6}$
Час регулювання $T$ , с	$0,7 \cdot 10^4$

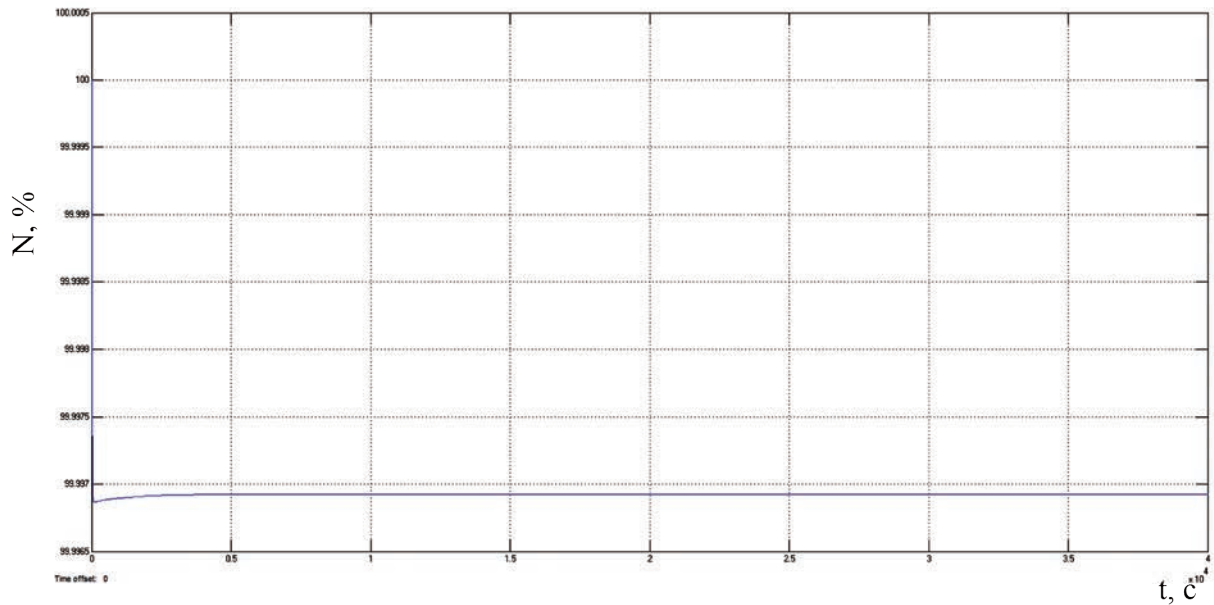


Рис. 5. Перехідний процес при нанесенні збурення +1% за каналом «Переміщення ОР СУЗ  $\Delta h$  – Електрична потужність  $N$ »

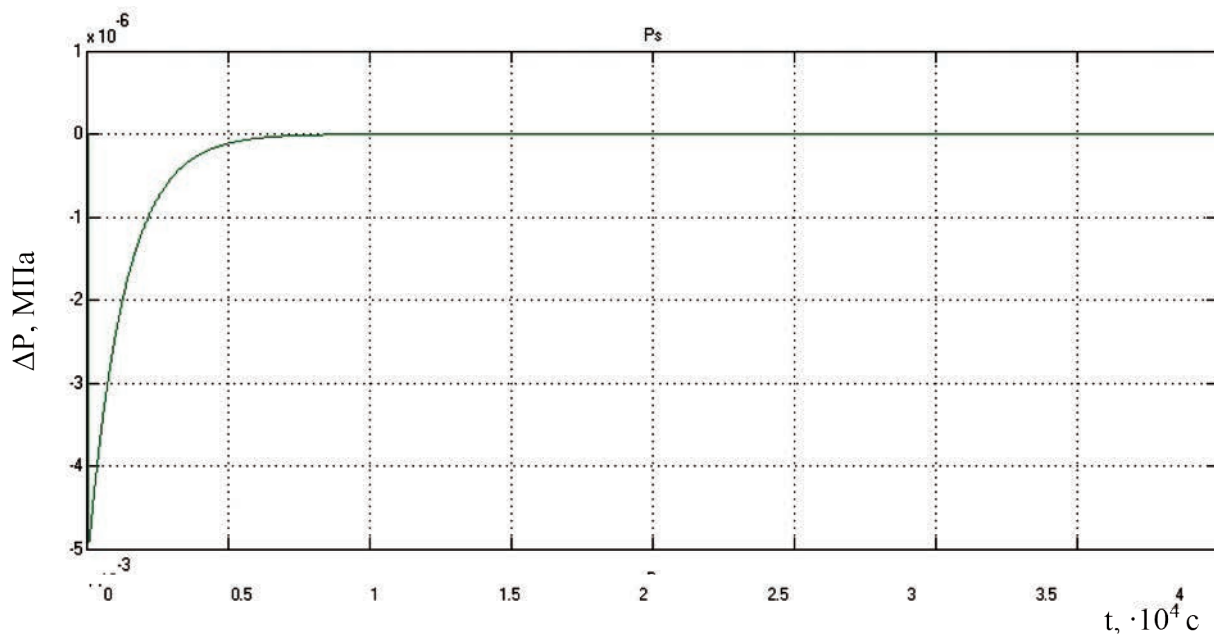


Рис. 6. Перехідний процес при нанесенні збурення +1% за каналом «Переміщення ОР СУЗ  $\Delta h$  – Тиск у паропроводі  $\Delta P$ »

**Висновки.** У результаті моделювання роботи енергоблоку в програмному середовищі Matlab Simulink визначено:

- за каналом «Переміщення ОР СУЗ  $\Delta h$  – Електрична потужність  $N$ » енергоблок АЕС типу ВВЕР-1000 має властивості інерційної ланки I-го порядку;
- за каналом «Переміщення ОР СУЗ  $\Delta h$  – Тиск у паропроводі  $\Delta P$ » енергоблок АЕС типу

ВВЕР-1000 має властивості інерційної ланки I-го порядку.

Отримані графіки перехідного процесу при нанесенні збурення +1% за каналами «Переміщення ОР СУЗ  $\Delta h$  – Електрична потужність  $N$ » та «Переміщення ОР СУЗ  $\Delta h$  – Тиск у паропроводі  $\Delta P$ », розраховані характеристики перехідних процесів. Визначено, що робота автоматизованої системи регулювання забезпечує перехідний процес задовільної якості.

Список літератури:

1. Андрущечко С.А., Афров А.М., Васильев Б.Ю., Генералов В.Н., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М., Украинцев В.Ф. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. Москва : Логос, 2010. 604 с.
2. Баскаков В.Е., Максимов М.В., Маслов О.В. Алгоритм эксплуатации энергоблока с ВВЭР в поддержании суточного баланса мощности энергосистемы. *Труды Одесского политехнического университета*. 2007. Вып. 2 (28). С. 56–59.
3. Максимов М.В., Беглов К.В., Цисельская Т.А. Модель реактора ВВЭР-1000 как объекта управления мощностью. URL: <https://www.sworld.com.ua/simpoz1/89.htm> (дата звернення: 25.07.2021).
4. Волошкіна О.О., Беглов К.В., Плахотнюк О.А. Дослідження регулятора концентрації рідкого поглинача енергоблоку АЕС. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2015. Т. 7. № 4. С. 18–34.
5. Давидченко Д.В., Беглов К.В., Чмелев Е.И. Исследование каскадной автоматизированной системы регулирования энергоблока атомной электростанции. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2018. Т. 29 (68). № 1. Ч. 1. С. 137–143.
6. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС. Одесса : Астропринт, 2001. 305 с.
7. Ключев А.С., Лебедев А.Т., Семенов Н.П., Товарнов А.Г. Настройка автоматических систем и устройств управления технологическими процессами : Справочное пособие. Москва : Энергия, 1977. 400 с.
8. Ключев А.С. Проектирование систем автоматизации технологических процессов / А.С. Ключев, Б.В. Глазов, А.Х. Дубровский. Москва : Энергоатомиздат, 1990. 464 с.

**Kvasha Yu.V. RESEARCH OF THE AUTOMATED SYSTEM OF REGULATION OF THE POWER PLANT WITH THE WWER-1000 NUCLEAR UNIT IN THE “N” MODE**

*Nuclear energy provides about 55% of Ukrainians' electricity needs. In autumn and winter, this figure can be equal to 70% of the total power level. The cost of electricity generated by nuclear power units is the lowest for the consumer.*

*Zaporizhzhia, Rivne, Khmelnytska and South-Ukraine NPPs have WWER-1000 type power units. This year, work has begun on the completion of the third and fourth power units of the Khmelnytsky NPP. Thus, after their completion, 15 WWER-1000 power units will operate in the power complex of Ukraine. Therefore, there is an urgent need to study the principles of operation of power units of this type and create new control algorithms. In order to develop qualitatively new control programs, it is necessary to clearly understand the basic modes of operation.*

*Thanks to control and protection systems, the technology of nuclear electricity production is environmentally friendly. Subject to the instructions for operation of the equipment and the requirements of labor protection, work at a nuclear power plant does not harm the health of employees. The key to safe and reliable operation of a nuclear power plant is the use of automated process control systems. The automated control system of the NPP power unit in the “H” mode is a part of the hierarchical decentralized NPP of the nuclear power plant.*

*The object of research in this work is the power unit of the WWER-1000 nuclear power plant, which operates in the “H” mode. The algorithm of operation of the power unit in this mode is analyzed in the article. The basic control programs, as well as the latest publications on the operation of nuclear power units of this type were studied.*

*A study of the operation in the “H” mode of the automatic power regulator of the unit and the turbine regulator. By simulating the operation of the power unit in the software environment Matlab Simulink, the acceleration curves of the control object were obtained on the channels “Displacement of CR group  $\Delta h$  – Electric power N” and “Displacement of CR group  $\Delta h$  – Pressure in the steam pipeline  $\Delta P$ ”.*

*As a result of the study, graphs of transients were constructed on the channels “Displacement of CR group  $\Delta h$  – Electric power N” and “Displacement of CR group  $\Delta h$  – Pressure in the steam pipeline  $\Delta P$ ” and determined their characteristics.*

**Key words:** *automated process control system, automatic power regulator, turbine regulator, nuclear power plant, WWER-1000 power unit, “H” mode.*

**Козак Є.Б.**

GAN Inc.

## АНАЛІЗ ДАНИХ І МАШИННЕ НАВЧАННЯ У ХМАРНИХ І ТУМАННИХ ПЛАТФОРМАХ ЯК ОСНОВА ЕФЕКТИВНОЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ

*У статті досліджено аналіз даних і машинне навчання в хмарних і туманних платформах як основа ефективної передачі даних. Визначено напрями формування масивів даних, які є найактуальнішими в умовах сьогодення. Наголошено, що сучасні парадигми обчислень і зберігання містять хмарні, туманні й крайові обчислення, здійснено опис принципових особливостей кожного з видів. Підкреслено, що обчислення туману є середнім рішенням між обчислювальними парадигмами хмари й крайовими обчисленнями, за якого обробку й аналіз даних не потрібно розташовувати на краю мережі або навіть у централізованому сховищі. Усталений підхід, заснований на технологіях хмарних обчислень, не може забезпечити необхідну якість обслуговування в таких умовах, зокрема в питаннях зменшення часу затримки під час передачі великих масивів даних. Технологія туманних обчислень нині розглядається як багатообіцяюче рішення для обробки великого обсягу критично важливих і чутливих до часу даних. У статті розглянута технологія хмарних обчислень, а також аналізуються передумови до еволюційного розвитку такого підходу й появи концепції туманних обчислень як перспективного напрямку ефективної передачі даних. У рамках огляду ключових особливостей туманних обчислень проведений розбір критичних випадків з об'єднанням понять туманних і крайових обчислень. Наведено огляд технологій організації туманних обчислень – віртуалізації, контейнеризації та оркестрації, а також систематичний аналіз найпопулярніших платформ, що забезпечують підтримку туманних обчислень. Запропоновано узагальнену системну модель для спільної обробки хмарних платформ у різномірних мережах і схематично представлено злиття архітектури IoT та аналізу даних. Визначено поняття прогностичних моделей і розкрито їх види, наголошено, що сучасні методи прогнозуючого моделювання містять статистичні моделі на основі регресії, моделі дерева рішень й моделі, ґрунтовані на нейронній мережі або глибокій нейронній мережі.*

**Ключові слова:** машинне навчання, штучний інтелект, туман, хмара, обчислення, передача даних, платформа, аналіз даних.

**Постановка проблеми.** В умовах життя сучасного цифрового суспільства, існує великий ряд практичних завдань, в яких потрібно контролювати стан деякої безлічі датчиків або простих виконавчих пристроїв, розміщених на відносно невеликих відстанях і до яких важко або небажано підводити дротяні лінії. Однією з систем взаємозв'язку датчиків та виконавчих пристроїв є Інтернет речей (далі – IoT). Парадигма Інтернету речей є одночасно революційною, а також механізмом автоматизованого та зручного способу життя сучасних людей. Еволюцію IoT можна пояснити злиттям досягнень, що відбулися за останнє десятиліття в галузі обчислювальної техніки, зв'язку та дизайну додатків. Загальнозживані пристрої IoT для полегшення повсякденної діяльності включають смартфони, домашні помічники, такі як Google Play, розумні транспортні засоби, системи автоматизації будівель, що включають розумні ліфти та системи контролю температури, та безпілотні літальні апарати, такі як безпілотні літальні апарати для моніторингу навколишнього

середовища й відпочинку. Широкомасштабне розповсюдження пристроїв IoT поширюється за межі цих пристроїв у центрах зберігання даних, таких як серверні хмарні служби, які географічно розподілені. Як результат, великі обсяги даних генеруються пристроями IoT та їх підтримуючими платформами для передачі та подальшого зберігання та обробки в центральних хмарних центрах зберігання даних. Пристрої IoT генерують постійний потік необроблених даних, які неможливо розпізнати для значущих знань, якщо дані не обробляються за допомогою таких методів, як виявлення знань та штучний інтелект. Неоднорідність даних, що генеруються залежить від домену програми. Пристрої, які передають дані, розроблені за допомогою спеціальних протоколів, що враховують обмеженість ресурсів цих пристроїв, щоб зберегти споживання енергії, пов'язане з роботою пристрою. Пристрої реалізують великий обсяг даних, які обробляються локально, обмеженим чином і передаються в централізований обчислювальний вузол або хмарне сховище, де

їх можна обробити або проаналізувати для отримання знань. Машинне навчання визначається як сімейство методів аналізу даних, в яких процес побудови моделі на основі навчальних даних автоматизований, тобто практично не вимагає втручання людини. Отже, процес класифікації даних за різними класами повністю автоматизований. Роль аналітики для обробки даних не можна не враховувати, і машинне навчання дуже сильно сприяє швидкій обробці великих обсягів даних, що надходять з пристроїв, для створення моделей, що цікавлять аналітиків даних.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Хмарні та туманні обчислення є фундаментальною основою досліджень багатьох сучасних вчених. Д.Р. Колісник, К.С. Місевич і С.В. Коваленко [1] розглянули питання щодо системної архітектури IoT-Fog-Cloud, розглянули взаємодію між трьома рівнями IoT, Fog і Cloud для ефективного впровадження програм для аналізу великих даних і кібербезпеки.

О.О. Петренко [2] розкрив стратегії розвитку сервіс-орієнтованих систем у хмарному середовищі. Автором проведено аналіз сучасного стану сервісних технологій, базованих на композиції веб-сервісів з уніфікованими протоколами зв'язку (перше покоління SOA) і на поєднанні мікросервісів з контейнерами (друге покоління MSA) та вперше показано, як їх властивості підлягають конвергенції, оскільки кожен з них має свої переваги і недоліки.

Моделі і методи прогнозування навантаження в умовах хмарних обчислень з використанням математичного апарату нейронних мереж навів В. Давідов [3]. На основі проведеного аналізу результатів дослідження доведено доцільність вдосконалення аналітичних методів прогнозування навантаження. Удосконалено метод прогнозування навантаження обчислювальних ресурсів в системах хмарних обчислень, що дозволяє отримати більш точні результати оцінки і забезпечити переважань в системах хмарних обчислень. Б.І. Тимченко, П.О. Марченко й Д.В. Сподарець [4] дослідили принципи сегментації патернів організації хмар на супутникових зображеннях з використанням глибоких нейронних мереж.

Фактори продуктивності застосування моделей штучного інтелекту у хмарі з використанням GPU запропонували В.Г. Тульчинський, С.І. Лавренюк і В.Ю. Роганов [5]. Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи: Alshammari, Hamoud and Abd ElGhany, Sameh and Shehab, Abdulaziz [6], J. Xie, F.R. Yu, T. Huang, R. Xie, J. Liu, C. Wang and Y. Liu [7], Yousefpour, Ashkan and Ishigaki, Genya and Gour, Riti

and Jue, Jason [8], Higinio Mora, María Teresa Signes-Pont, David Gil, Magnus Johnsson [9], M. Al-Khafajiy, L. Webster, T. Baker, and A. Waraich [10], Taneja, Mohit and Davy, Alan [11], M.A. Khan, M. Karim and Y. Kim [12], Revar, Dharmendrasinh and Talatiya, Tejalba and Hakani, Raj and Nayak, Hemal and Student, P and Prof, Asst [13], S. Din and A. Paul [14] та інші. Проте, враховуючи описані наукові набутки, за темою, питання аналізу даних і машинне навчання у хмарних і туманних платформах, як основа ефективної передачі даних залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

**Постановка завдання.** Здійснити дослідження принципів ефективної передачі даних, з виділенням процесу аналізу даних і механізмів застосування машинного навчання у хмарних і туманних платформах.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Сучасні парадигми обчислень та зберігання включають: хмарні, туманні та крайові обчислення. Завдяки інтеграції цих парадигм з пристроями з'являється надійний механізм збору, зберігання, обробки та аналітики даних. Така структура має можливість надавати в реальному часі уявлення про моделі даних, а також полегшує застосування методів машинного навчання для реалізації інтелектуальної аналітики даних.

Хмарна парадигма – це централізована модель зберігання даних, яка надає різні послуги, такі як Програмне забезпечення як послуга (SaaS), Платформа як послуга (PaaS) та Інфраструктура як послуга (IaaS), щоб забезпечити обробку та аналіз даних, централізовано [15]. Крайові обчислення, з іншого боку, дозволяють обробляти та аналізувати дані ближче до мережі, на локалізованих обчислювальних вузлах, таких як базові станції. Як результат, вдається уникнути витрат, пов'язаних з передачею даних до централізованих вузлів. Обчислення туману є середнім рішенням між обчислювальними парадигмами хмари та крайових обчислень, при якому обробку та аналіз даних не потрібно розташовувати на краю мережі або навіть у централізованому сховищі. Швидше, парадигма туману висуває концепцію віртуальної платформи, яка не знаходиться виключно на межі мережі, для обробки та аналізу даних.

У парадигмі хмарних обчислень, віддалено розташовані обчислювальні засоби (сервери) використовуються за допомогою Інтернету для зберігання, збору, управління та обробки даних. В останні десятиліття, особливо нещодавно, хмарним обчисленням приділяли велику увагу завдяки новій інфраструктурі та архітектурі обробки, які вони надають

для підтримки різних служб. Хмара надає різноманітні послуги, що надаються через Інтернет.

В рамках парадигми IoT потрібно зберігати та аналізувати величезний обсяг сформованих даних. Архітектура хмари може відрізнятися залежно від сценарію використання, наприклад, публічна, приватна, гібридна архітектура.

Крайові обчислення стосуються аналітичних можливостей поблизу краю мережі пристроїв. Важливість крайових обчислень можна краще зрозуміти, усвідомивши виклики та обмеження хмарних обчислень. Хмарні обчислення є централізованим способом обробки даних і можуть збільшити накладні витрати на обробку масивних даних. Надсилання необроблених потоків даних до хмари збільшить вартість і вимагатиме високої пропускної здатності та потужності зв'язку. Натомість, обчислення краю забезпечує обчислення в межах «локальної» мережі джерела даних. Таким чином, це вирішує проблему пропускної здатності надсилання великих обсягів даних на центральний сервер. Більше того, обчислення краю зменшує ймовірність виникнення однієї точки відмови і підвищує аналітичну ефективність. Порівняно з величезними та централізованими серверами, які можна знайти у хмарних обчисленнях, у фронтових обчислень є менші сервери, які розподіляються. У роботі [16] було підкреслено, що хмарні обчислення придатні для стійкого до затримок та складного аналізу даних, тоді як обчислення краю призначені для операцій у режимі реального часу з низькою затримкою. Крім того, хмарні обчислення вимагають досить складних розгортань порівняно з обчисленнями краю.

На рисунку 1 показано архітектуру спільної моделі хмарних платформ для мереж IoT. На

рисунку кінцеві пристрої та хмара базової мережі з'єднані через шлюз IoT, де виконується обробка фронту. Як правило, розгортання крайових обчислень вимагає мінімального планування і в більшості випадків може носити спеціальний характер. Як результат, передбачається, що близько 45% даних IoT найближчим часом використовуватимуть крайові архітектури.

Концептуально туманні обчислення лежать десь посередині між хмарними та крайовими обчисленнями, і вони виконують роль моста між хмарними та крайовими ресурсами. Вперше ідея обчислень туману була запропонована Cisco [17] для вирішення проблем, пов'язаних із додатками, чутливими до затримок.

Згідно із [17], на відміну від обчислень краю, де обчислення відбуваються на межі мережі, обчислення туманом забезпечують мережеві послуги між хмарою та кінцевими пристроями, а також забезпечують обчислення та засоби зберігання через віртуальну платформу. Туманні вузли мають чутливі до часу можливості аналізу даних і добре підходять для додатків або служб із часом відгуку від мілісекунд до хвилин. Однак можливості зберігання даних вузлів туману дуже обмежені. З іншого боку, хмарні технології можуть зберігати дані протягом місяців і навіть років.

Рисунок 2 показує різні компоненти IoT та взаємозв'язок аналітики з цими компонентами. Через підвищені обчислювальні ресурси та можливості обробки більшість аналітичних підходів придатні на хмарному сервері установки IoT. З іншого боку онлайн-алгоритми краще підходять для крайових обчислень.

Системи IoT можуть збирати дані від кількох до тисяч розумних пристроїв і передавати їх у хмарне

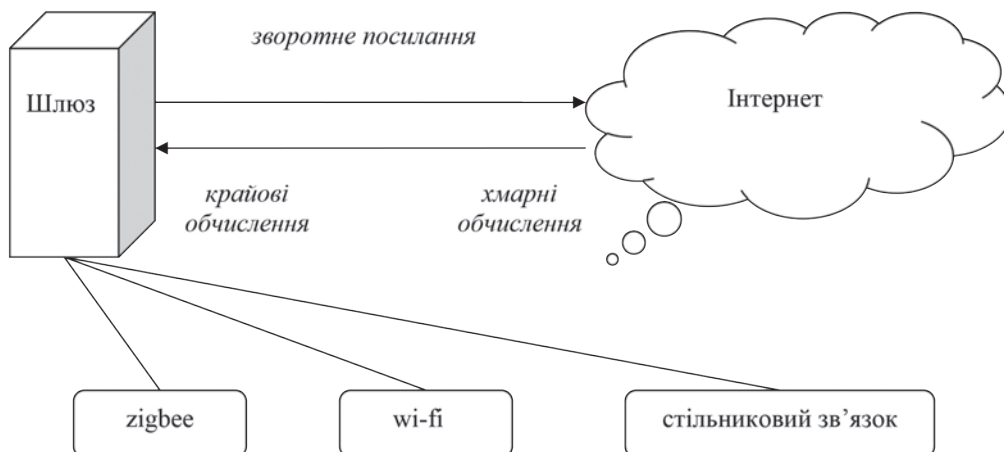


Рис. 1. Узагальнена системна модель для спільної обробки хмарних платформ у різних мережах

середовище. На основі історичних даних завжди можна отримати детальну інформацію про минулі події, використовуючи передові методи машинного навчання. Ці групи алгоритмів, заснованих на машинному навчанні, які обробляють та узагальнюють вихідні дані та надають практичну інформацію, в основному складають область дослідження, яка називається описовою аналітикою. Агрегація даних, узагальнення даних, математичні логічні операції, видобуток даних (наприклад, алгоритми кластеризації) тощо – ось деякі приклади описової аналітики. Для описової аналітики потрібні великі обсяги даних. Останні технологічні досягнення продемонстрували, що хмарне сховище здатне зберігати величезні обсяги даних IoT, а хмарні сервери можуть обробляти складні завдання за допомогою високопродуктивних комп'ютерів та за допомогою хмарної аналітики IoT.

Прогностична аналітика покладається на історичні дані та використовує передові статистичні методи або методи машинного навчання для моделювання поведінки або шаблону, щоб можна було передбачити ймовірність можливих майбутніх тенденцій або закономірностей у даних. Підводячи підсумок, передбачається, що станеться в майбутньому, вивчаючи історичні закономірності та кореляцію існуючих даних. Прогностична аналітика широко застосовується для різних застосувань, включаючи прогнозне обслуговування, прогнозування ціни, тенденцію попиту та пропозиції або прогнозування ймовірності будь-якого результату. За даними SAS, яка є однією з провідних компаній з аналітики, існує два типи прогнозних моделей: класифікаційні моделі, що проводять аналіз прогнозування за членством у класі; моделі на основі регресії, які передбачають кількість про історичні спостереження та ймовірність. Сучасні методи прогнозування моделювання включають статистичні моделі на основі регресії, дерева рішень та моделі на основі нейронної мережі або глибокої нейронної мережі. Деякі інші широко використовувані алгоритми базуються на байєсівському аналізі, посиленні градієнта, аналізі на основі ансамблевої моделі тощо. Ці методи прогнозної аналітики залежать від даних для прийняття рішень. Парадигма IoT може полегшити процес збору

даних із розумних пристроїв IoT і може забезпечити аналітичну основу, використовуючи хмару або край мережі. Аналітика, що проводиться, пропонує підказки щодо реагування на будь-які майбутні події на основі аналізу даних. Цей клас аналізу не тільки передбачає майбутні області, але також містить рекомендації щодо прийняття результатів. Це більше схоже на методику майбутнього аналізу сценаріїв, яка використовує переваги як описової, так і прогнозної аналітики. Хоча прогнозована аналітика передбачає, що і коли відбуватиметься подія на основі майбутніх прогнозів, аналітична аналітика розширює можливості, надаючи уявлення про майбутні прогнози за допомогою аналізу впливу. Рецептивна аналітика широко використовується для оптимізації результатів бізнесу. Рецептивна аналітика підходить для установки, де рішення на основі бізнес-аналітики приймаються за допомогою можливостей хмарних / крайових обчислень, аналізу великих даних та машинного навчання. Послуги на платформі IoT-хмари можуть допомогти прийняти оптимальні рішення за допомогою розгортання інструментів бізнес-аналітики та аналітики.

Під час фактичної реалізації результат, отриманий в результаті прогностичної аналітики, повинен коригуватися за допомогою даних у реальному часі. Для цього використовується адаптивна аналітика для коригування або оптимізації результатів процесу на основі недавньої історії даних та перегляду їх співвідношень. Цей тип аналізу допомагає поліпшити продуктивність моделі й зменшити кількість помилок. Перевага адаптивної аналітики полягає в тому, що вона може коригувати результат рішення при отриманні нового

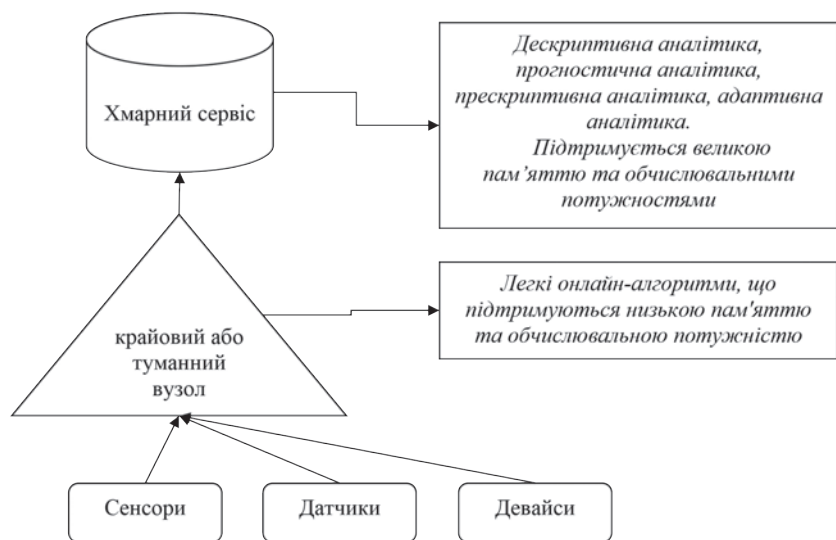


Рис. 2. Злиття архітектури IoT та аналізу даних

набору вхідних даних. Особливо в середовищі IoT адаптивна аналітика добре підходить для обробки поточкових даних у режимі реального часу. Оцінка в реальному часі потоків даних, що розвиваються, таких як ті, що знаходяться у програмному забезпеченні, також може бути предметом адаптивної аналітики для проведення аналізу даних.

Зближення машинного навчання та IoT відкриває шлях для перспективного прогресу в ефективності, точності, продуктивності та загальній економії коштів для обмежених ресурсів пристроїв IoT. Коли алгоритми машинного навчання та IoT працюють разом, є можливість досягти покращеної продуктивності для взаємозв'язку та обчислень, кращої керованості та кращого прийняття рішень. Завдяки вдосконаленому моніторингу від тисяч до мільярдів сенсорних пристроїв та вдосконаленим комунікаційним можливостям, IoT має величезний потенціал для поліпшення якості людського життя та потенційних додатків для промислового зростання. Потенціал IoT значно покращився завдяки зближенню машинного навчання та штучного інтелекту. Передові методи машинного інтелекту дозволили видобувати величезний обсяг сенсорних даних IoT, щоб мати кращі уявлення про низку реальних проблем, а також здатність приймати критичні оперативні рішення. Отже, для вирішення реальних складних проблем та успішного задоволення обчислювальних та комунікаційних вимог IoT та машинне навчання повинні доповнювати одне одного. В останні роки аналіз даних IoT набув значного значення та уваги з наступних причин: Великий обсяг даних, що генеруються з розподілених пристроях IoT: За даними звіту про мобільність компанії Ericsson, прогноз показує, що до 2022 року у всьому світі буде 18 мільярдів підключених IoT-пристроїв<sup>1</sup>. Ця кількість з часом буде збільшуватися завдяки широкому впровадженню пристроїв IoT у широкому діапазоні критичних програм. Інтелектуальна аналітика даних відіграватиме важливу роль для виявлення та прогнозування майбутніх станів будь-якого процесу чи системи шляхом ефективного та розумного видобутку цієї величезної кількості даних. Висока мінливість типів даних від неоднорідних джерел даних: Завдяки широкому спектру застосувань та вимог існує велика різноманітність пристроїв IoT, що включають мобільні телефони, ПК / ноутбуки, планшети до пристроїв IoT короткого діапазону та широкого простору. Через неоднорідність даних функції, формати й атрибути даних відрізняються. Крім

того, на основі різних доменів додатків IoT джерела даних також різняться. Наприклад, пристрої IoT, що використовуються для медичних програм, будуть відрізнятися від IoT розумного будинку. Більше того, якість, обробка та зберігання даних також стали складним завданням через їх неоднорідність. Невизначеність у потоках даних IoT: невизначеність дуже поширена при практичному аналізі даних. Вона може виникнути в потоці даних IoT через відмову будь-якого пристрою IoT або каналу зв'язку під час передачі даних. Грубі помилки та відсутні дані є всюди в потоках даних IoT, що вимагає розширеної аналітики для попередньої обробки даних. Навіть кіберпроникнення може бути вагомою причиною невизначеності даних. Для підвищення точності під час прийняття рішень важливо забезпечити належну оцінку, розповсюдження та подання невизначеностей та розробити моделі та рішення, які можуть мати справу з цими факторами. Балансування масштабованості й ефективності: більшість аналітичних даних IoT виконуються у хмарі. Передача даних з пристрою IoT в хмару є дорогою (з точки зору затримки), що може бути складним для критично важливих для часу програм, особливо коли кількість пристроїв IoT велика. Наприклад, у підключеному транспортному середовищі може знадобитися великий пул автомобілів для прийняття рішень у режимі реального часу або майже в режимі реального часу. Тут важливо збалансувати швидкість і точність аналізу, коли кількість транспортних засобів збільшується. Пристрої IoT повинні обробляти дані для отримання знань. Як дані стають значущими для свого споживача, ілюструє архітектура, показана на рисунку 3. У цій архітектурі споживачем може бути машина або людина. Коли споживачі очікують отримати значущу інформацію, блок обробки даних складається з алгоритмів штучного інтелекту, таких як механізми машинного навчання. Передбачувальне та адаптивне навчання в Інтернеті речей можна найкраще описати через те, як програми обробляють дані для створення знань. Вищевказана архітектура використовується для організації оцінки того, як сучасні дослідження впроваджують штучний інтелект в парадигмі IoT. У зв'язку від машини до машини протокол рівня додатків потрібен для передачі даних у форматі, який може бути інкапсульований протоколами нижчого рівня. Як вже згадувалося раніше, широко використовуваними протоколами рівня IoT є протокол обмежених додатків, передача телеметрії в чергу масових повідомлень), розширений протокол

<sup>1</sup> <https://www.ericsson.com/en/mobility-report>.



черги повідомлень і протокол передачі HTTP. Всі ці протоколи дозволяють абстрагуватися від нижніх шарів.

Обмежені пристрої мають обмежені обчислювальні, комунікаційні й сховищні ресурси. Оскільки різні пристрої IoT мають різні вимоги до ресурсів, протоколи відрізняються своїми можливостями для задоволення цих вимог. З одного боку, протоколи додатків розглядають, як обмежені пристрої, які можуть надсилати дані. З іншого боку, аналіз машинного навчання вимагає великих обчислювальних ресурсів і великої кількості даних для обробки зібраних даних, щоб перетворити їх на значущі знання. Тому додатки IoT змінюють архітектуру створення знань, щоб перетворити дані на знання на основі структури та пропускну здатності мережі, доступної для передачі даних. Рисунок 4 ілюструє три моделі того, як можна застосувати архітектуру відкриття знань.

У межах першої моделі розумні пристрої мають достатньо обчислювальних ресурсів, щоб перетворити дані на знання локально або на межі. Це підходить для програм, чутливих до затримок. Тому адаптивне навчання обробляється на краю, або на машині обробки даних, або на пристрої IoT. У другій моделі обмежені пристрої можуть надсилати / приймати дані в дуплексному зв'язку. Віддалена система, напр. хмара, обробляє дані та повертає знання на пристрій. Цю модель можна побачити в багатьох додатках для смартфонів. Адаптивне навчання може оброблятися або на процесорі даних у хмарі, або на пристрої IoT. Третя модель – це коли обмежений пристрій надсилає дані у віддалену систему в симплексному режимі. Це має місце в процесі видобутку даних, коли дані використовуються або спільно використовуються з різними програмами. Кожен віддалений додаток може мати свій власний метод перетворення даних у знання. Адаптивне навчання відбувається в хмарі, оскільки зворотні зв'язки не можуть бути відправлені

назад на пристрій IoT. Іншими словами, пристрій IoT не може адаптивно навчатися.

**Висновки.** У роботі досліджено принципи ефективного передачі даних, з виділенням процесу аналізу даних і механізмів застосування машинного навчання у хмарних і туманних платформах.

З появою хмарних обчислень в інформатиці обробка стала простішою, а управління ресурсами ще кращим. Потім, з новою епохою обчислювальних програм із централізованим підходом хмарних обчислень, виникла потреба у подальшому скороченні часу відгуку у додатках, чутливих до затримок. Таким чином, у дію увійшли програми для обчислення туману. Зараз, за допомогою цієї нової технології, є ще певні труднощі щодо подальшої точної настройки

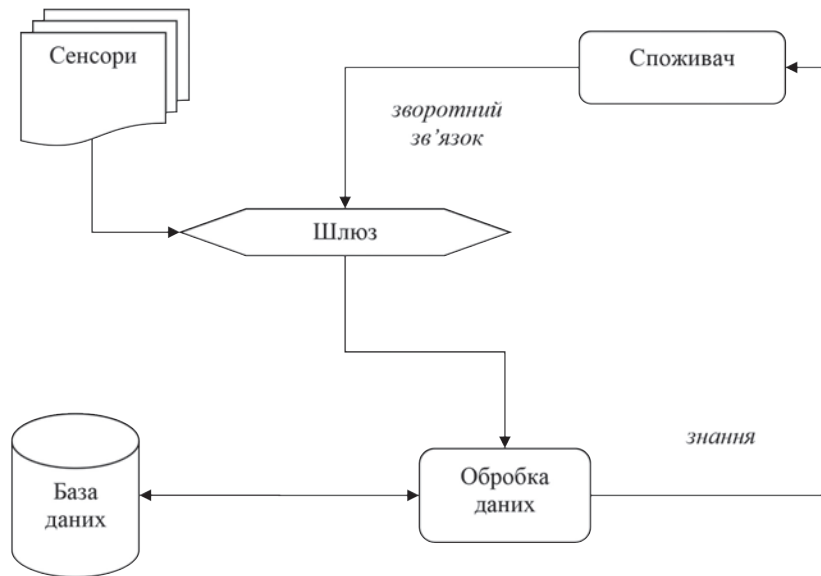


Рис. 3. Схема отримання знань

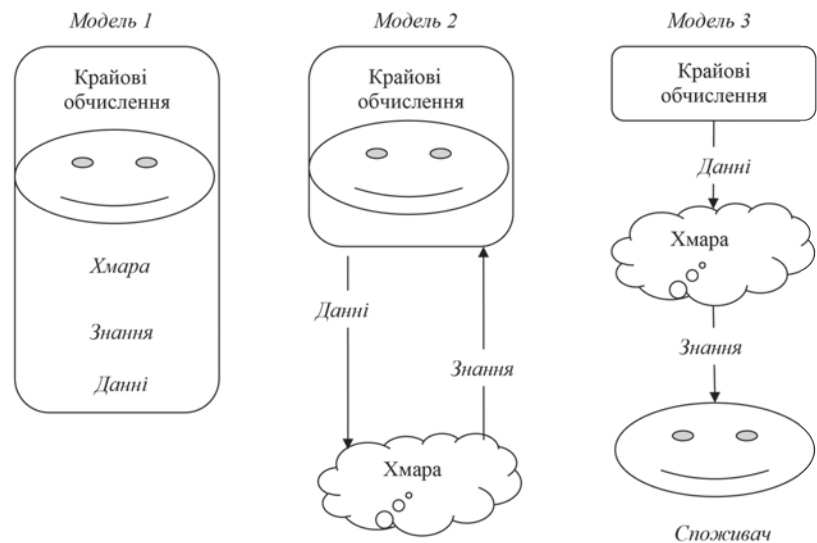


Рис. 4. Моделі отримання знань

системи, завдяки якій мережеві витрати будуть мінімізовані, а ефективність ще більше збільшена. Перспективи подальших досліджень ґрунтуються на розробці алгоритму інформаційного розміщення

платформи аналітики даних у архітектурі обчислень туману, яка адаптивно розгортає аналітичну платформу для роботи або в хмарі, або в тумані, тим самим зменшуючи мережеві витрати та час відгуку.

#### Список літератури:

1. Колісник Д.Р., Місевич К.С., Коваленко С.В. Системна архітектура IoT-Fog-Cloud для систем аналізу великих даних і кібербезпеки: огляд туманних обчислень, впровадження аудиту інтернету речей. *Сучасний захист інформації*. 2020. № 3. С. 34–38.
2. Петренко О.О. Стратегії розвитку сервіс-орієнтованих систем у хмарному середовищі : дис. ... канд. техн. наук. : 05.13.12. Київ, 2018. 239 с.
3. Davydov V., Hrebenuik D. Development the resources load variation forecasting method within cloud computing systems (Розробка методу прогнозування зміни навантаження ресурсів в системах хмарних обчислень). *Сучасні інформаційні системи*. 2020. Т. 4. № 4. Р. 128–135.
4. Tymchenko V.I., Marchenko P.O., Spodarets D.V. Segmentation of Cloud Organization Patterns from Satellite Images Using Deep Neural Networks (Сегментація патернів організації хмар на супутникових зображеннях з використанням глибоких нейронних мереж). *Вісник сучасних інформаційних технологій*. 2020. Т. 3. № 1. Р. 352–361.
5. Фактори продуктивності застосування моделей штучного інтелекту у хмарі з використанням GPU / В.Г. Тульчинський, С.І. Лавренюк, В.Ю. Роганов та ін. *Кібернетика та комп'ютерні технології*. 2020. Вип. 1. С. 74–82.
6. Alshammari, Hamoud, Sameh Abd El-Ghany, Abdulaziz Shehab. Big IoT healthcare data analytics framework based on fog and cloud computing. *Journal of Information Processing Systems*. 2020. No. 16.6. P. 1238–1249.
7. A survey of machine learning techniques applied to software defined networking (SDN): research issues and challenges / Xie, Junfeng, et al. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2018. Vol. 21. No. 1. P. 393–430.
8. Yousefpour, Ashkan and Ishigaki, Genya and Gour, Riti and Jue, Jason. On Reducing IoT Service Delay via Fog Offloading. *IEEE Internet of Things Journal*. 2018. P. 1–1. DOI: 10.1109/JIOT.2017.2788802.
9. Mora H., Signes-Pont M.T., Gil D., Johnsson M. Collaborative working architecture for IoT-based applications. *Sensors*. 2018. Vol. 18 (6). P. 1676.
10. Al-Khafajiy M., Webster L., Baker T., Waraich A. Towards fog driven IoT healthcare: challenges and framework of fog computing in healthcare. *Proceedings of the 2nd international conference on future networks and distributed systems*. 2018. P. 1–7.
11. Taneja M., Davy A. Resource aware placement of data analytics platform in fog computing. *Procedia Computer Science*. 2016. Vol. 97. P. 153–156. DOI: 10.1016/j.procs.2016.08.295.
12. Khan M.A., Karim M., Kim Y. A two-stage big data analytics framework with real world applications using spark machine learning and long Short-term memory network. *Symmetry*. 2018. Vol. 10. No. 10. P. 485.
13. Fog Node Possible Architectures and Propose the Changes in Mechanism to Architecture to Make Contiki OS Real Time / D.J. Revar, et. al. *International Journal of Scientific Research and Engineering Development*. 2020. Volume 3. Issue 3. P. 900–905..
14. Din S., Paul A. Smart health monitoring and management system: toward autonomous wearable sensing for internet of things using big data analytics. *Future Generation Computer Systems*. 2019. Vol. 91. P. 611–619.
15. Смірнова Т.В., Поліщук Л.І. Дослідження хмарних технологій як сервісів для системи інженерних розрахунків. *Кібербезпека та інформаційні технології* : монографія / М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. Харків : ДІСА ПЛЮС, 2020. С. 106–121.
16. Усік П.С. Методи підвищення ефективності розподіленої обробки даних в комп'ютерних системах операторів стільникового зв'язку. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. 2021. URL: <https://er.chdtu.edu.ua/handle/ChSTU/2280> (дата звернення: 24.07.2021)
17. Janakiram MSV. Is Fog Computing The Next Big Thing In Internet of Things? URL: <https://www.forbes.com/sites/janakirammsv/2016/04/18/is-fog-computing-the-next-big-thing-in-internet-of-things/> (Last accessed: 17.03.2017).

#### **Kozak Ye.B. DATA ANALYSIS AND MACHINE LEARNING IN CLOUD AND FOG PLATFORMS AS A BASIS FOR EFFICIENT DATA TRANSFER**

*The article investigates data analysis and machine learning in cloud and fog platforms as a basis for efficient data transmission. The directions of formation of data sets, which are the most relevant in today's*

conditions, are determined. It is emphasized that modern paradigms of calculations and storage include: cloud, fog and boundary calculations, a description of the fundamental features of each species. It is emphasized that fog computing is a middle ground between cloud computing and edge computing paradigms, where data processing and analysis do not need to be located at the edge of the network or even in centralized storage. An established approach based on cloud computing technologies cannot provide the required quality of service in such conditions, in particular, in terms of reducing the delay time when transmitting large data sets. Foggy computing technology is now seen as a promising solution for processing large amounts of critical and time-sensitive data. This article considers the technology of cloud computing, as well as analyzes the prerequisites for the evolutionary development of this approach and the emergence of the concept of nebulous computing as a promising area of efficient data transmission. As part of the review of key features of nebulous computing, an analysis of critical cases with a combination of the concepts of nebulous and boundary computing. An overview of fog computing technologies is provided: virtualization, containerization and orchestration, as well as a systematic analysis of the most popular platforms that provide fog computing support. A generalized system model for joint processing of cloud platforms in heterogeneous networks is proposed and a fusion of IoT architecture and data analysis is schematically presented. The concept of predictive models is defined and their types are revealed, it is emphasized that modern methods of predictive modeling include statistical models based on regression, decision tree and models based on neural network or deep neural network.

**Key words:** machine learning, artificial intelligence, fog, cloud, computation, data transfer, platform, data analysis.

**Мелешико М.А.**

Національний авіаційний університет

**Дмитренко Т.В.**

Національний авіаційний університет

## АЛГОРИТМ РЕАЛІЗАЦІЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ З АДАПТИВНИМ КОДУВАННЯМ МІЖ ГРУПОЮ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ В ЄДИНОМУ ПРОСТОРИ

*У статті досліджено алгоритм реалізації передачі даних з адаптивним кодуванням між групою безпілотних літальних апаратів в єдиному просторі. Наведено поняття «радіомережа з випадковими мобільними абонентами», яке реалізує повністю децентралізоване управління за відсутності базових станцій або опорних вузлів, що покладено на мережу взаємодії безпілотних літальних апаратів. Сформувано механізм передачі даних між низкою агентів із детальним описом процесу передачі й принципу формування зв'язку. Схематично представлено структурну схему передавача й приймача з установленим взаємозв'язку між блоками схеми й описом процесу надходження, формування та передачі інформації найближчому агенту. Запропоновано алгоритм складання списку агентів, які знаходяться в групі рою. Наголошено, що групу безпілотних повітряних систем можна розглядати як сукупність інтелектуальних агентів. Розкрито роюву поведінку безпілотних літальних апаратів і принципи об'єднання. Підкреслено, що роювим агентам не вистачає постійності об'єктів, вони часто використовують чітко закодований перелік політик дій і / або мають обмежені прямі повідомлення між членами рою, команда інтелектуальних агентів має набір агентів, здатних взаємодіяти. Ці агенти часто мають спільні операційні плани й детальний обмін моделями середовища. Установлено, що запропонований алгоритм передачі даних містить евристичний підхід і методи машинного навчання, що забезпечує стабільний, але гнучкий рій безпілотних літальних апаратів, який може більш чітко адаптувати свою поведінку для вирішення задач передачі даних в єдиному просторі. Наголошено, що конструктивно система передачі даних між групою безпілотних літальних апаратів може бути представлена блоками, де кожен блок містить основну інформацію про інших членів рою та інші пристрої, які використовуються для розв'язання проблеми передачі даних. Запропоновано опис кожного блоку й реалізації взаємозв'язку між блоками в умовах алгоритму. Визначено етапи роботи роювих алгоритмів та окреслено перспективи подальших досліджень.*

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат, канал передачі даних, рій, агент, мережа, простір.

**Постановка проблеми.** В умовах сучасності актуальності набувають мережі MANET<sup>1</sup> (Mobile Ad hoc NETWORKS). Це мережі – радіомережі з випадковими мобільними абонентами, які реалізують повністю децентралізоване управління при відсутності базових станцій або опорних вузлів, топологія, яких швидко змінюється з випадковим з'єднанням вузлів. Методи реалізації таких мереж за участю безпілотних автономних літальних апаратів включають: розподілену оптимізацію (для підвищення живучості мережі); ланцюг ретрансляції безпілотних літальних апаратів (далі – БПЛА); і передачу даних, коли зв'язок неможливо підтримувати. Кожен із цих методів добре вирішує проблему мережевої взаємодії у своєму конкретному контексті, але погано працює в альтер-

нативних середовищах; наприклад розподілений метод оптимізації для підвищення живучості не застосовується до відключеної мережі, де необхідний перенос даних.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розподіл наукових здобутків у сфері управління рухом безпілотних літальних апаратів та формування надійних каналів передачі даних є вражаючим. На протязі багатьох років науковці з різних країн досліджували дану тему. Так варто відзначити, що сучасні підходи до організації надійного завадостійкого та захищеного каналу супутникового зв'язку з безпілотними літальними апаратами дослідили В.В. Соболев, М.М. Геращенко, С.В. Рудніченко, С.І. Трофименко й В.М. Ільєнко [1]. Авторами надані рекомендації щодо основних вимог до організації супутникового дуплексного зв'язку поза межами прямої

<sup>1</sup> <https://uk.wikipedia.org/wiki/MANET>

радіовидимості з безпілотними літальними апаратами на базі геостационарних (середньовисотних) космічних апаратів зв'язку з високою пропускну здатністю в Ка діапазоні частот.

І.М. Журавська [2] розкрила теоретичні основи, методи та засоби створення та функціонування швидкодинамічних гетерогенних комп'ютерних мереж критичного застосування. Окрему увагу, авторка приділила питанню формуванню каналів передачі даних.

Методи й інформаційну технологію автоматизованого планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів для підвищення ефективності пошуку об'єктів висвітлив А.О. Бережний [3].

Стосовно формування маршруту групи БПЛА та їх взаємозв'язку між собою варто відзначити роботу О.М. Гусак [4]. Автором розроблено метод автоматизованого пошуку осередків лісових пожеж у фоновому режимі й сповіщення Державної служби з надзвичайних ситуацій із використанням паралельних обчислень розрахований на використання пристроїв керування не менше як із чотирьохядерними процесорами у фоновому режимі, що забезпечує розподіл та оптимізацію використання ресурсів БПЛА й пристрою керування.

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: Min-Hyuck Lee, Seokwon Yeom [5], Mustapha Bekhti, Marwen Abdennebi, Nadjib Achir, Khaled Boussetta [6], Takahiro Miki, M. Popovic, A. Gowel, G. Hitz, R. Siegwart [7], W.P. Coutinho, J. Fliege, M. Battarra [8], Durbana Habib, Habibullah Jamal, Shoab A. Khan [9], Musab Coukuna, Sencer Ünala [10], Il-Kyu Ha, You-Ze Cho [11] та інші.

Проте, враховуючи описані наукові набутки, за темою, питання формування алгоритму реалізації передачі даних з адаптивним кодуванням між групою БПЛА в єдиному просторі залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

**Постановка завдання.** У роботі необхідно розробити алгоритм реалізації передачі даних з адаптивним кодуванням між групою БПЛА в єдиному просторі.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** На сьогодні найпопулярнішими методами передачі даних БПЛА між географічно розподіленими вузлами мережі є ретрансляція та передача. Передаючи дані, агент поміщає себе між двома вузлами, зменшуючи тим самим вдвічі відстань передачі, яку кожен пакет повинен пройти за одиницю часу. Кількість одиниць може рівномірно збільшитися на цій відстані, створюючи багатокроковий ланцюг передачі. Однак метод

ретрансляції обмежений діапазоном кількості використовуваних одиниць. Кожна одиниця в ланцюзі повинна мати приймача і відправника-сусіда, таким чином, максимальний діапазон системи ретрансляції становить

$$R \cdot (k + 1),$$

де  $R$  – стабільний діапазон зв'язку, а  $k$  – кількість одиниць.

«Паромний» метод передачі даних передбачає, що кожен агент переміщується таким чином, щоб знаходитись в діапазоні передавального пристрою, де він збирає кількість пакетів, рівну розміру його буфера. Потім пристрій фізично рухається до приймача, і після встановлення лінії зв'язку передає вміст буфера.

За методом передачі «конвеєрна стрічка» кожен агент здійснює проходження всього шляху, тоді як за методом «коліска Ньютона» кожна одиниця переправляється від найближчого сусіда-відправника до найближчого приймаючого сусіда. Цей підметод передачі даних можна розглядати як гібридизацію методів ретрансляції та передачі, хоча це лише одне можливе злиття методів. Як правило, спосіб має набагато більший час затримки та енергоспоживання, та може охоплювати значно більші відстані.

У роботі [1] запропоновано адаптивний агент, який здійснює реалізацію обох методів по черзі в залежності від відстані передачі. Однак дослідження лише пропонує обмін між двома агентами (передавач та приймач), а не використання особливостей обох. Крім того, рішення повинно бути відкалібровано вручну для того, щоб змінювати методи.

На рисунку 1 показана структурна схема передавальної частини системи зв'язку. Дані від джерела інформації надходять на модулятор, за допомогою якого також здійснюється управління розподілом енергетичної ефективності між каналами. Дані високошвидкісного джерела інформації надходять на другий модулятор. Комплексні сигнали з виходів модуляторів підсумовуються і нормуються для подальшої цифрової обробки сигналу. Обмеження спектру сигналу здійснюється за допомогою формуючих фільтрів, після чого сигнал переноситься квадратурним перетворювачем частоти з нульовою проміжною частотою на несучу частоту.

Структурна схема приймальної частини показана на рисунку 2. Вхідний сигнал переноситься на нульову проміжну частоту за допомогою квадратурного перетворювача частоти, потім здійснюється узгоджена фільтрація. З метою спрощення структурної схеми елементи синхронізації

приймальної частини системи зв'язку, а також блок рішення фазової неоднозначності не показані на рисунку.

Після фільтрації складові комплексного сигналу надходять на демодулятор, реалізований у вигляді двох компараторів і таблиці відповідностей (істинності). З виходу демодулятора дані надходять одержувачу низько швидкісної інформації та на вхід регенератора. Регенерація необхідна для здійснення демодуляції сигналу високошвидкісного каналу зв'язку.

Групу безпілотних повітряних систем можна розглядати як сукупність інтелектуальних агентів. Література охоплює численні напрацювання щодо здійснення агентської координації. У рамках статті зупинимося на роїнні й об'єднанні.

Ройовим агентам не вистачає постійності об'єктів, вони часто використовують, чітко закодований перелік політик дій та / або мають обмежені прямі повідомлення між членами рою. Крім того, дії, що виконуються агентами, різнонаправлені та не вирішують поставленої мети. У групі

БПЛА діють відносини стимул-дія, які часто встановлюються людьми для того, щоб організувати поведінку великих роїв (поведінка, що виникає).

Команда інтелектуальних агентів має набір агентів, здатних взаємодіяти. Ці агенти часто мають спільні операційні плани та детальний обмін моделями середовища. Деякі сприяють досягненню консенсусу або розподілених методологій на основі оптимізації. Такі підходи вимагають часу для прийняття рішення, високої пропускної здатності мережі та складних бортових обчислень; ці методи також можуть бути вразливими до введення зловмисних даних, що може заплутати або зупинити групу БПЛА. Крім того, деякі підходи вимагають рандеву агентів, що створює ланцюгову реакцію на збій, оскільки один із членів, який зазнає невдачі, призведе до зупинки членів рандеву в стані очікування.

У роботі запропоновано алгоритм реалізації передачі даних між групою БПЛА в якому враховано обидва підходи, а саме, складне вирішення проблем командної роботи, а також стійкість, гнучкість та децентралізація. Використовуючи рої

БПЛА із запропонованим алгоритмом, онлайн-планування не потрібно, і рої не впливають на вищезазначені проблеми.

Машинне навчання – загальноприйнятий підхід, що застосовується до вирішення складних проблем [12]. Політика дій засновується на рівняннях Маркова, зокрема, пошук дерева Монте-Карло та часовому навчанні. У цих дослідженнях політика пов'язує окремих стан із дією, водночас стан повністю визначає всі змінні агента на етапі часу. У цьому дослідженні агенти проводять збір політик, кожна з яких пов'язує стан і дію, яку потрібно виконати. Тобто політика  $p = \{c, a\}$ , де  $c$  визначає лише деякі змінні стану повного агента, а  $a$  є основною дією з усіх дій. Політика нараховується як винагорода за дію, створюється за допомогою евристичної генерації. У цьому підході відомі евристичні методи, розбиваються на компоненти. Система створює власну евристику шляхом випадкового повторного складання цих компонентів у набір політик. Недоліки даного підходу полягають в обчислювальній складності, проте сформована евристика може бути спеціалізованою для проблемної області.



Рис. 1. Структурна схема передавача

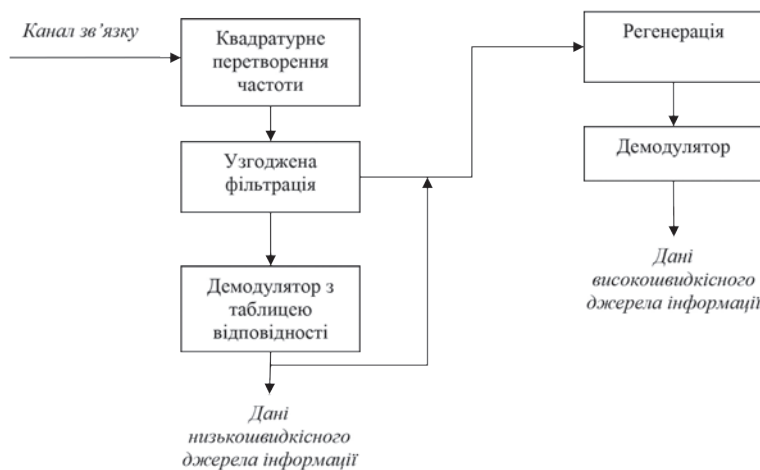


Рис. 2. Структурна схема приймача

Крім того, важливим фактором є деталізація евристичного розкладання; велика деталізація обмежить гнучкість системи, тоді як мала деталізація може надмірно розширити простір пошуку.

Поєднання евристичного підходу та машинного навчання забезпечує стабільний, але гнучкий рій БПЛА, який може більш чітко адаптувати свою поведінку для вирішення задач передачі даних в єдиному просторі.

Конструктивно система передачі даних між групою БПЛА може бути представлена блоками, де кожен блок містить основну інформацію про інших членів рою та інших пристроях, що використовуються для вирішення проблеми передачі даних; на кожному часовому кроці рій спілкується зі своїми сусідами (інші ройові вузли в діапазоні) та / або рухається навколо навколишнього середовища.

На відміну від групи розумних агентів, ройові агенти мають обмежені чутливі можливості та спільну інформацію.

Кожен агент знає про своє «сусідство», тобто про всіх агентів, що перебувають у діапазоні зв'язку  $R$  на поточному етапі часу. Кожен сусід сповіщає: відносне місце розташування, включаючи відстань та кут нахилу, а також про наявність пакету даних для передачі. Агент також веде облік усіх відомих агентів. Цей запис складається з ідентифікатора агента, його останнього відомого місцезнаходження та часу цього спостереження, що є цілим числом, яке збільшується з кожним кроком часу. Маючи ці знання, агент може планувати рух щодо інших, що перебувають за межами їхнього спілкування.

На кожному кроці часу всі сусіди додаються або оновлюються до списку, де додаються нещодавно знайдені агенти, а вже відомі агенти оновлюються з їх поточним місцезнаходженням. Також протягом часового кроку агент запитує відомі дані агента у своїх сусідів. Отримавши ці дані, агент оновлює свої записи, щоб відображати найсвіжішу інформацію (консолідує записи від сусідів та себе, використовуючи запис із найменшим часом оновлення). Цей процес дозволяє встановлювати місце розташування члена спільного рою у режимі «багато стрибків», рівноправно. Це дозволяє рою приймати більш обґрунтовані рішення; у разі відсутності цієї інформації приймаються локальні рішення.

Крім того, якщо відомий запис агента стверджує, що агент повинен знаходитися в діапазоні зв'язку, але цей агент не знайдений під час оновлення району/області пошуку, передбачається,

що він перемістився з часу створення відомого запису про місцезнаходження. Таким чином, запис видаляється, оскільки підтверджується, що він не є актуальним.

Нарешті, кожному агенту буде надано координати місця розташування.

Використовуючи вищезазначені знання, агент буде виконувати дії стосовно інших членів рою та / або не ройових пристроїв (баз). Для вибору цілей фокусуються такі фільтри та селектори: тип агента, напрямок та положення. Ці обмеження дозволяють діям бути більш конкретними у його застосуванні, і, отже, рій виконує більш складні маневри. Фільтр типу агента обмежує взаємодію лише: членів рою, лише бази або бази та членів рою. Напрямний фільтр обмежений лише членами рою / базами в напрямку розташування приймачів, подалі від місця приймачів (щодо положення агента планування) або будь-якого напрямку. Нарешті, позиція визначає одиницю або групу членів рою / баз, які будуть використані для дії. Ця вимога знаходить; найближчий до агента, другий найближчий до агента, найдалший від агента, член рою / база, найближча до пристрою приймання, всі члени рою / бази в діапазоні зв'язку або всі члени рою / бази у списку відомих агентів.

Рух агентів обмежується залученням і відштовхуванням цільових одиниць в навколишнє середовище. За допомогою цільового рою, вектори сили малюються та підсумовуються, щоб сформувати єдиний план руху наступним чином:

$$V_a = p_{ціль} - p_{агент}$$

$$V_r = \frac{1}{p_{ціль} - p_{агент}}$$

$$V_{рух} = \frac{\sum_{i=1} V_{a,i} + \sum_{i=1} V_{r,i}}{|\sum_{i=1} V_{a,i} + \sum_{i=1} V_{r,i}|},$$

де  $V_a$ ,  $V_r$  – вектори сили тяжіння та відштовхування, а  $p_{ціль}$ ,  $p_{агент}$  – розташування відповідних одиниць.

Навчання відбувається, як показано:

$$Q(c, a) = Q_t(c, a)(\alpha - 1) + \alpha(p + \gamma \cdot \max(Q(c_{t+1}, a))),$$

де  $Q(c, a)$  – показник якості для політики  $\{c, a\}$ ,  $\gamma$  – майбутній коефіцієнт політики,  $\alpha$  – швидкість навчання,  $\rho$  – винагорода за дію та  $\max(Q(c_{t+1}, a))$  – прогнозований максимальний показник якості наступної політики. На кожному кроці часу здійснюється вибір політики з умовою  $c$ , що відповідає дійсності та найбільшим значенням  $Q$ . Крім того, адаптація QS-навчання використовується для прискорення навчання.

QS-навчання використовується для спільного використання значень  $Q$  зі схожими станами.

Після встановленого часу або коли мета досягнута, навчальний процес закінчується і впроваджується вищий рівень. На цьому етапі кожен агент оцінюється за його внеском у досягнення цілей. Будь-яка одиниця, яка зробила внесок нижче середнього, коригує свою політику. Ця вимога не дозволяє вищому рівню регулювати відносно функціональних агентів.

Щоб налаштувати політики в агенті, політика з найнижчим рейтингом випадково змінює свій стан або дію на нове випадкове значення.

Після внесення цих змін усі агенти скидають показники рейтингу і  $Q$ , та операція перезапускається, а агенти перебувають у вихідних положеннях.

Навчання  $Q$  – це короткочасний, онлайн-процес навчання, який використовується для контролю на місцях.

Загальна схема роботи ройових алгоритмів заснована на виконанні наступних етапів: в області пошуку створюється певна кількість початкових наближень до шуканого рішення задачі – ініціалізується популяція агентів; за допомогою набору міграційних операторів (специфічної тактики для кожного з ройових алгоритмів) агенти переміщуються в області пошуку таким чином, щоб в кінцевому рахунку наблизитися до шуканого екстремуму цільової функції; виконується перевірка умови закінчення ітерацій. Якщо ця умова виконана, то обчислення завершуються. При цьому в якості наближеного рішення приймається най-

краще з знайдених положень агентів. Якщо умова не виконана – виконується повернення до етапу 2.

Колонія являє собою систему з дуже простими правилами автономної поведінки особин. Однак, незважаючи на примітивність поведінки кожного окремого агента, поведінка всієї колонії виявляється досить розумною. Таким чином, основою поведінки колонії служить низькорівнева взаємодія, завдяки чому колонія в цілому являє собою розумну багатоагентну систему.

**Висновки й перспективи подальших досліджень.** У роботі досліджено алгоритм реалізації передачі даних з адаптивним кодуванням між групою БПЛА в єдиному просторі. Система роїння є гнучкою та надійною, змінюючи поведінку, яка найкраще відповідає умовам навколишнього середовища, і добре працює навіть при випадковому видаленні членів рою. Представлений метод еволюції замінює або, принаймні, зменшує процес ручного евристичного розвитку, необхідний для створення роївої поведінки, що виникає. Таким чином, такий підхід дозволить середовищу або рою змінюватися між операціями, при цьому не переробляючи набори політик, щоб підтримувати ефективний рій для наступної операції.

Підводячи підсумок, можна відзначити, що використання систем передачі даних з адаптивним кодуванням між групою БПЛА в єдиному просторі, перш за все працює на основі малорозмірних моделей, здатних приймати рішення самостійно без втручання людини, та є перспективним напрямком подальших досліджень.

#### Список літератури:

1. Соболев В.В., Герашенко М.М., Рудніченко С.В., Трофименко С.І., Ільєнко В.М. Сучасні підходи до організації надійного завадостійкого та захищеного каналу супутникового зв'язку з безпілотними літальними апаратами. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. 2021. Вип. 1 (7). С. 78–87.
2. Журавська І.М. Теоретичні основи, методи та засоби створення та функціонування швидкодинамічних гетерогенних комп'ютерних мереж критичного застосування : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.05 ; Чорномор. нац. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв, 2019. 44 с.
3. Бережний А.О. Методи та інформаційна технологія автоматизованого планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів для підвищення ефективності пошуку об'єктів / Черкаський державний технологічний університет. Черкаси, 2020. 192 с. <https://er.chdtu.edu.ua/handle/ChSTU/1144> (дата звернення: 28.07.2021).
4. Гусак О.М. Інформаційна технологія раннього виявлення лісових пожеж. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2017. № 15. С. 33–38.
5. Lee M.H., Yeom S. Detection and tracking of multiple moving vehicles with a UAV. *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*. 2018. Vol. 18 (3). P. 182–189.
6. Bekhti M., Abdennebi M., Achir N., Boussetta K. Path planning of unmanned aerial vehicles with terrestrial wireless network tracking. *2016 Wireless Days (WD)*, Toulouse, 23–25 March, 2016. IEEE. P. 1–6.
7. Miki T., Popović M., Gawel A., Hitz G., Siegwart R. Multi-agent Time-based Decision-making for the Search and Action Problem. *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE. 2018. P. 2365–2372.



8. Coutinho W. P., Fliege J., Battarra M. The Unmanned Aerial Vehicle Routing and Trajectory Optimisation Problem. *Computers and Industrial Engineering*. 2018. Vol. 120. P. 116–128. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.04.037>.
9. Habib D., Jamal H., Khan S.A. Employing multiple unmanned aerial vehicles for co-operative path planning. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2013. Vol. 10 (5). P. 235.
10. Musab Coúkuna, Sencer Ünal. Implementation of Tracking of a Moving Object Based on Camshift Approach with a UAV. *Procedia Technology*. 2016. Vol. 22. P. 556–561.
11. Ha I.K., Cho Y.Z. A probabilistic target search algorithm based on hierarchical collaboration for improving rapidity of drones. *Sensors*. 2018. Vol. 18 (8). P. 2535. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6111375/> (Date of access: 21.07.2021).
12. Старобор І.О. Використання машинного навчання в розробці ігрових механік. URL: <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:QQATvaSnSjMJ:https://phm.cuspu.edu.ua/ojs/index.php/SNYS/article/download/1764/pdf+%&cd=3&hl=uk&ct=clnk&gl=ro> (дата звернення: 28.07.2021).

### **Meleshko M.A., Dmytrenko T.V. ALGORITHM FOR IMPLEMENTING DATA TRANSMISSION WITH ADAPTIVE CODING BETWEEN A GROUP OF UAVS IN A SINGLE SPACE**

*The algorithm of data transmission implementation with adaptive coding between a group of unmanned aerial vehicles in a single space is investigated in the article. The concept of a radio network with random mobile subscribers, which implements fully decentralized control in the absence of base stations or support nodes, which is entrusted to the network of interaction of unmanned aerial vehicles, is presented. The mechanism of data transfer between a number of agents with the detailed description of process of transfer and the principle of formation of communication is formed. The block diagram of the transmitter and receiver is schematically presented with the establishment of the relationship between the blocks of the circuit and a description of the receipt process. formation and transmission of information to the nearest agent. An algorithm for compiling a list of agents in a swarm group is proposed. It is emphasized that the group of unmanned aerial systems can be considered as a set of intelligent agents. The swarm behavior of unmanned aerial vehicles and the principles of unification are revealed. It is emphasized that swarm agents lack the permanence of objects, they often use a clearly coded list of action policies and / or have limited direct messages between swarm members, a team of intelligent agents has a set of agents capable of interacting. These agents often have joint operational plans and a detailed exchange of environmental models. It is established that the proposed data transfer algorithm includes a heuristic approach and machine learning methods that provide a stable but flexible swarm of UAVs that can more clearly adapt their behavior to solve data transmission problems in a single space. It is emphasized that structurally the data transmission system between a group of UAVs can be represented by blocks, where each block contains basic information about other members of the swarm and other devices used to solve the problem of data transmission. The description of each block and the description of realization of interrelation between blocks in the conditions of algorithm are offered. The stages of swarm algorithms are determined and the prospects of further research are outlined.*

**Key words:** *unmanned aerial vehicle, data transmission channel, swarm, agent, network, space.*

**Муравйов О.В.**

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

**Нижник Ю.М.**

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

**Петрик В.Ф.**

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

**Протасов А.Г.**

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

**Сєрий К.М.**

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

## СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

*Технології 3D-друку з кожним днем набувають ширшого використання та навіть впроваджуються у виробництво продукції. Кілька десятиліть тому адитивні технології застосовувалися виключно для прототипування, а нині використовуються під час виробництва високоточних надсучасних приладів і систем. Різноманітність методів тривимірного друку, широка номенклатура використовуваних матеріалів і вражаючі можливості такої техніки дозволили залучити 3D-друк у багатьох сферах життєдіяльності людини. Однак на шляху масового впровадження 3D-принтерів у серійне виробництво все ще залишається чимало проблем і питань, які необхідно виявити для пошуку ефективного їх розв'язання. Метою роботи є дослідження та аналіз існуючих адитивних технологій, визначення їх можливостей, шляхів подальшого розвитку й перспектив застосування.*

*Стаття містить порівняльний аналіз існуючих технологій 3D-друку із зазначенням областей застосування, основних можливостей і короткого опису принципів роботи. Виявлено найбільш перспективні в найближчому майбутньому області застосування адитивних технологій та основні тенденції їх удосконалення. У роботі обґрунтовані переваги впровадження тривимірного друку в серійне виробництво продукції. Розглянуто новітню технологію виправлення дефектів під час тривимірного друку Renelore, що знайшла застосування під час використання 3D-принтера, заснованого на лазерному синтезі порошкового шару.*

*Розвиток адитивних технологій вже нині дає змогу створювати деталі й конструкції надзвичайно складної форми з високою точністю, водночас собівартість певних моделей 3D-принтерів створює передумови для поширення такої техніки серед усіх бажаних. Натепер 3D-друк уже знайшов застосування в медицині, освіті, харчовій і навіть військовій промисловості. Основними напрямками вдосконалення методів і технологій тривимірного друку є підвищення точності й швидкості виготовлення деталей, розширення номенклатури застосовуваних і використовуваних одночасно матеріалів, усунення дефектів друкованої продукції. Концентрація наукових зусиль у таких напрямках дозволить незабаром впровадити адитивні технології в серійне виробництво, що відкриє перед людством нові перспективи.*

**Ключові слова:** 3D-принтер, тривимірний друк, адитивні технології, можливості технологій 3D-друку, система Renelore.

**Постановка проблеми.** Людині, яка ніколи не зустрічалася з 3D-друком, може здатися, що 3D-принтер – це сучасна технологія, проте інженери та

вчені працювали з цим дивовижним обладнанням ще з 1983 року. Це був час, коли американський інженер на ім'я Чарльз Халл винайшов перший 3D-принтер.

Спочатку у 90-х роках методи 3D-друку вважалися придатними лише для виготовлення функціональних чи естетичних прототипів, проте технологія тривимірного друку розширила горизонти для медицини, промислового прототипування, освіти. Станом на 2021 рік точність відтворення та номенклатура використовуваних матеріалів збільшилися настільки, що деякі процеси 3D-друку вважають придатними для промислового виробництва.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Натепер адитивні технології охоплюють різноманітні процеси, які загалом засновані на пошаровій побудові тривимірних об'єктів з віртуальної моделі. Віртуальна модель – це 3D-модель для друку, яка може бути створена за допомогою комп'ютерного середовища CAD (computer aided design), за допомогою 3D-сканера або звичайного цифрового фотоапарата та фотограмметрії. 3D-друковані моделі, створені за допомогою програми CAD, призводять до зменшення похибок і можуть бути виправлені перед друком, що дозволяє перевірити параметри моделі та дизайн об'єкта ще до початку його відтворення [1, chapter 18].

Типи технологій 3D-друку, що застосовуються сьогодні, можна об'єднати за наступними процесами, що лежать в основі принципу роботи цієї техніки [2; 3, с. 773–785; 4].

1. Екструзія матеріалу (Material Extrusion Fused deposition Modeling (FDM)).

2. Полімеризація (Vat Polymerization: SLA (Stereolithography) and DLP (Digital Light Processing)).

3. Синтез порошкового шару (полімери) (Powder Bed Fusion (polymers): Selective Laser Sintering (SLS)).

4. Синтез порошкового шару (метали) (Powder Bed Fusion (metal): Direct Metal Laser Sintering (DMLS); Selective Laser Melting (SLM); Electron Beam Melting (EBM)).

5. Струменеве нанесення в'язучого агента (Binder Jetting: Sand and Metal Binder Jetting (BJ)).

6. Струменеве нанесення матеріалу (Material Jetting: Material Jetting (MJ), Drop on Demand (DOD)) [5, p. 130–139].

Основні відмінності між цими процесами полягають у способі нанесення шарів для створення деталей та використовуваних матеріалах. Кожен метод має свої переваги та недоліки. До основних характеристик 3D-принтера на сьогоднішній день, як правило, відносять: швидкість друку, точність позиціонування, витрати, номенклатуру використовуваних матеріалів, а також кольорові можливості друку деталей.

**Постановка завдання.** Метою статті є аналіз сучасних адитивних технологій, визначення їх можливостей, сфер застосування, а також доцільності впровадження у серійне виробництво, виявлення основних проблем розвитку та шляхів їх подолання.

### **Виклад основного матеріалу.**

#### **1. Аналіз сучасних адитивних технологій**

Розглянемо коротко принципи роботи 3D-принтерів, побудованих за вказаними вище технологіями друку, та порівняємо їх можливості (табл. 1).

**1.1. Екструзія матеріалу.** Процес 3D-друку, при якому нитка твердого термопластичного матеріалу розігрівається і переходить у рідкий стан. Принтер розподіляє матеріал по заданим координатам, де нитка охолоджується і твердне. Після того, як шар буде завершений, принтер переходить до побудови наступного шару. Цей процес друку перерізів повторюється, будуючи шар за шаром, до повного формування об'єкта. Пристрої, що використовують екструзію матеріалів, найпоширеніші та найдешевші серед усіх технологій 3D-друку. Сьогодні така технологія знайшла застосування при прототипуванні, виготовленні шаблонів для лиття та корпусних елементів конструкцій.

**1.2. Полімеризація.** Як конструкційний матеріал цієї технології використовують фотополімерну смолу, яку вибірково затверджують джерелом світла. Дві найпоширеніші форми полімеризації – це SLA (стереолітографія) та DLP (Digital Light Processing). Принципова відмінність цих типів технологій 3D-друку – тип джерела світла, яке вони використовують для затвердіння матеріалу. Принтери SLA використовують точковий лазер, на відміну від воксельного підходу, що застосовується принтером DLP, де затвердіння фотополімеру відбувається під впливом ультрафіолетового випромінювання. Полімеризація в якості технології 3D-друку широко застосовується для виготовлення ювелірних виробів.

**1.3. Синтез порошкового шару (полімери).** Процес 3D-друку, де джерело теплової енергії вибірково розплавляє шар термопластичного порошку для формування твердотілого об'єкта. Технологія знайшла застосування при виготовленні функціональних елементів і деталей складної форми, які передбачають низький рівень експлуатації.

**1.4. Синтез порошкового шару (метали).** Процес 3D-друку, який формує об'єкти, використовуючи теплове джерело для індукування синтезу частинок металевого порошку. В якості

матеріалів при цьому виступають порошкові алюміній, нержавіюча сталь, титан. Деталі, сформовані за цією технологією, широко застосовуються сьогодні в медицині (хірургії та стоматології) для протезування.

**1.5. Струменеве нанесення в'язучого агента.** Процес 3D-друку, де рідкий агент вибірково зв'яже ділянки порошкового шару. Ця технологія 3D-друку вимагає наявності початкового шару порошку на платформі. Binder Jetting переміщує друкуючу голівку над поверхнею металевого порошку, осаджуючи краплі рідкого агента, що мають діаметр зазвичай 80 мкм. Ці краплі зв'язують частинки порошку разом, щоб утворити шар деталі. Після цього надрукований шар опускається, а на нього наноситься новий шар порошку. Цей процес повторюється до повного формування об'єкта. Потім предмет залишають у порошку для затвердіння, а залишки видаляють за допомогою стисненого повітря [6, с. 26–30].

**1.6. Струменеве нанесення матеріалу.** Такий 3D-принтер працює аналогічно звичайному струменевому принтеру. Ключова відмінність полягає в тому, що друкуюча голівка випускає сотні крихітних крапель фотополімерної смоли, а потім їх затверджує за допомогою ультрафіолетового світла. Після того, як один шар нанесений і затверджений, платформа збірки опускається вниз на товщину одного шару і процес повторюється для створення 3D-об'єкта. Технологія знайшла застосування при виготовленні інжекторних форм з невеликим пробігом, створенні прототипів виробів та медичних

моделей з можливістю отримання різнокольорових об'єктів [7, р. 167–184; 8, с. 20–21].

**2. Виправлення дефектів в технологіях адитивного виробництва**

За останні роки активного розвитку 3D-друку технологія лазерного синтезу порошкового шару (Laser Powder Bed Fusion (LPBF)) отримала багато досягнень, однак адитивне виробництво металевих деталей, особливо за наявності складної геометрії та нових матеріалів, все ще передбачає деякі технологічні обмеження, які необхідно подолати. Однією з головних проблем для досліджень та розробок у цьому секторі є необхідність покращення стабільності, повторюваності та спроможності друкарських систем.

Професори Б'янка Марія Колосімо та Марко Грассо з кафедри машинобудування у Politecnico di Milano нещодавно презентували переконливу нову технологію, що здатна не лише виявити невідповідності в процесі LPBF, але й виправити їх під час друку, що робить її одним із найперспективніших та найсучасніших нововведень лазерного синтезу порошкового шару сьогодні. Пристрій, відкрита архітектура, високочутливий прототип LPBF з вбудованою системою видалення, називається Penelope [9]. Система названа на честь дружини Одисея з грецької міфології, яка стала символом вірності: щоб уникнути зазіхань женихів, вона пообіцяла, що обере одного з них для одруження, коли закінчить плести похоронну плащаницю. Однак щовечора вона розплутувала фрагмент так, як система Penelope «скасовує» надрукований шар.

Таблиця 1

**Порівняльний аналіз можливостей технологій 3D-друку**

Назва технології	Переваги	Недоліки	Точність розмірів, мкм
Екструзія матеріалу	Найнижча вартість Багатоматеріальний друк Складна геометрія виробів Простота використання	Ламкість Не можна використовувати в якості механічних деталей	50
Полімеризація	Гладка поверхня об'єкту Складна форма деталей Висока точність	Ламкість Невеликий вибір матеріалів	15-30
Синтез порошкового шару (полімери)	Хороші механічні властивості Функціональні деталі	Потребує більше часу Висока вартість	30
Синтез порошкового шару (метали)	Міцність Функціональні деталі Висока точність	Невеликі розміри виробу Найдорожча з усіх технологій друку	10
Струменеве нанесення в'язучого агента	Низька вартість Великі обсяги нарощування Функціональні металеві деталі	Гірші механічні властивості, ніж в технології синтезу порошкового шару (метали)	20
Струменеве нанесення матеріалу	Найкраща обробка поверхні Різнокольоровий та багатоматеріальний друк Швидкість	Ламкість Не можна використовувати в якості механічних деталей	10

Технологію моніторингу 3D-друку можна розбити на три структурні сегменти: контроль якості, термографія та виправлення дефектів. У сукупності ці три елементи складають вирішення проблеми виробництва бездоганних деталей, що використовують технологію LPBF. Команда продемонструвала, що один з найбільш вражаючих досягнень на даний момент – це те, що виправлення дефектів зовсім не змінює остаточну якість деталі.

### 3. Етапи роботи системи Penelope

Розглянемо окремо кожен етап роботи технології моніторингу системи видалення дефектів 3D-друку Penelope.

**3.1. Контроль якості друку.** Система контролю, запропонована італійською дослідницькою командою, є першим кроком в технології Penelope, що складається з пристрою візуалізації високої роздільної здатності із зображеннями до/після експозиції та розміром пікселя 20 мкм, а також відрегульованою системою освітлення, що встановлено над вбудованою камерою принтера.

Система контролю друку реалізує виявлення геометричних спотворень шляхом зйомки пластових зображень з високою роздільною здатністю при різних умовах освітлення. Це дає змогу визначити контури об'єктів за допомогою сегментації зображень. Система візуалізації постійно фіксує геометричні розміри певної частини, тобто вона може виявити навіть миттєві невідповідності в шарах деталі. Також Penelope здатна оцінити зміни в системі самого принтера та його параметрів друку при кожній наступній побудові.

**3.2. Термографія.** Іншим важливим елементом у запатентованому процесі моніторингу є термографія, яка спирається на швидкісну систему контролю теплових полів для зображення та моніторингу швидкоплинних температурних процесів, включаючи бризки та шлейф. Розглянута система являє собою інфрачервону (далі – ІЧ) камеру із спектральним діапазоном чутливості 3–5 мкм (MWIR) та 1 000 кадрів на секунду, що дає можливість реєструвати температури до 1 500°C.

Завдання термографічної системи – фіксована оцінка мікроструктури деталі на основі відеозображення. Це досягається пошаровим аналізом, моделюванням просторових і часових температурних градієнтів в межах сканованої області та оцінкою мікроструктурних показників побудови зерна.

**3.3. Виправлення дефектів.** Мабуть, найважливішою части-

ною технології моніторингу Penelope є функція виправлення дефектів, яка поєднує моніторинг та гібридні можливості виготовлення, що дає змогу системі ефективно шліфувати поверхню деталі, стираючи останні надруковані шари. Ця нова методика може дати можливість LPBF ідентифікувати дефекти під час виникнення, видалити несправні шари, а потім скоригувати параметри процесу та відновити завдання друку.

Система, призначена для видалення несправного шару, складається з поверхневого шліфувального круга, що встановлюється у візок, розташований на лінійній осі, паралельній осі Y. Робочий інструмент – абразивне колесо із середнім розміром зерна 120 мкм, максимальною швидкістю 4 000 об/хв, максимальною подачею 30 мм/с та глибиною різання 10–20 мкм.

Отже, дослідники врахували чимало нюансів техніко-економічного обґрунтування процесу видалення дефектного шару, включаючи можливість відновлення незабрудненого та рівномірного порошкового шару після того, як шліфувальний круг видалить верхні шари деталі, та вплив видалення шару на механічні властивості відредатованої деталі. При випробуваннях прототип системи Penelope підтвердив очікування розробників. Подальші тести віддрукованих зразків показали відсутність статистичної різниці щільності суцільної деталі та деталі з видаленим шаром, так само не виявлено аномальної концентрації пор. Результати такого аналізу наведені на рис. 1.

На думку розробників, у подальшому необхідно провести роботу з покращення оцінки внутрішньої мікроструктури друкованих об'єктів. Серед наступних етапів дослідження – вдосконалення калібрування ІЧ камери, що є важким або навіть неможливим внаслідок особливостей коефіцієнту випромінювання матеріалу та зміни його фази в

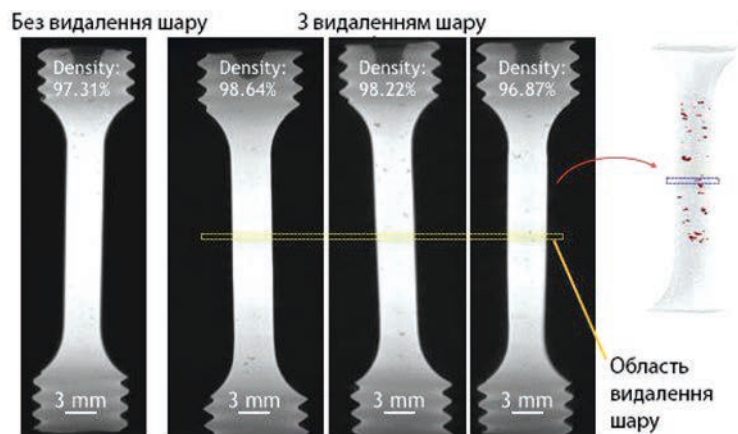


Рис. 1. Тестування результатів роботи системи Penelope

процесі LPBF; подальше підтвердження методології шляхом проведення аналізу впливу на різні мікроструктурні властивості; моніторинг профілів теплового охолодження для стабілізації процесу. Після вирішення цих питань дослідники мають намір запровадити Penelope 2.0 – повністю інтегрований контролер для автономного виявлення та виправлення дефектів тривимірного друку.

**Висновки.** Найбільш поширена на сьогодні технологія 3D-друку (46% станом на 2020 рік) – екструзія матеріалу, завдяки своїй низькій вартості та простоті у використанні. Однією з ключових переваг 3D-друку є можливість створення об'єктів надзвичайно складної форми.

На відміну від традиційного виготовлення виробів, коли шматочки матеріалу вирізаються з більших блоків, 3D-принтер створює продукти пошарово і друкує лише відповідні деталі, витрачаючи набагато менше матеріалу, а, отже, і менше енергії на виробництво. Виконуючи лише основні конструктивні потреби продукції, виробництво добавок (друкованих елементів конструкцій) може внести великий внесок у полегшення ваги,

зменшення споживання енергії та викидів парникових газів транспортних засобів.

3D-принтер, що дозволяє використовувати одночасно декілька матеріалів, є основним елементом розвитку майбутніх технологій тривимірного друку. Багато експертів пророкують створення фабрик нового формату, які не будуть спеціалізуватися на декількох видах однотипної продукції, а зможуть виробляти буквально все, що завгодно, завдяки універсальності технології 3D-друку та можливостям масштабувати принтер навіть до розмірів цілого будинку. Однак існує декілька джерел помилок і різних типів дефектів – внутрішня пористість, залишкові напруження, геометричні деформації, мікроструктурні розриви тощо, які можуть виникати в процесі друку, що негативно впливає не лише на кінцеву якість та продуктивність продукції, але також і на час виробництва та витрати. Розробка першої системи адитивного друку, такої як Penelope, що здатна автономно виявляти дефекти за допомогою моніторингової технології, а потім видаляти несправний шар, може призвести до повної індустріалізації 3D-друку.

#### Список літератури:

1. Redwood Ben, Schoffer Filemon, Garret Brian. The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications. *3D Hubs*. 2017. 304 p.
2. Types of 3D Printing Technology. URL: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology> (дата звернення: 13.09.2021).
3. Murphy S., Atala A. 3D bioprinting of tissues and organs. *Nature Biotechnology*. 2014. Volume 32. P. 773–785.
4. Different Types of 3D Printers. URL: <https://3dinsider.com/3d-printer-types> (дата звернення: 13.09.2021).
5. Xu T. Complex heterogeneous tissue constructs containing multiple cell types prepared by inkjet printing technology. *Biomaterials*. 2013. Volume 34. P. 130–139.
6. Лысыч М.Н., Шабанов М.Л., Качурин А.А. Обзор современных технологий 3D печати. *Современные наукоемкие технологии*. 2015. № 6. С. 26–30.
7. Aranda Sean. 3D Printing Failures: 2020 Edition: How to Diagnose and Repair ALL Desktop 3D Printing Issues. 2019. 293 p.
8. Демецкая А.В. Медицина будущего: биопринтинг. *Фармацевт Практик*. 2018. № 1. С. 20–21.
9. PENELOPE: Politecnico di Milano researchers file patent for self-repairing LPBF system. URL: <https://www.3dprintingmedia.network/penelope-politecnico-di-milano-researchers-file-patent-for-self-repairing-lpbf-system> (дата звернення: 13.09.2021).

#### **Muraviov O.V., Nyzhnyk Yu.M., Petryk V.F., Protasov A.G., Syeryy K.M. CURRENT STATE AND DEVELOPMENT PROSPECTS OF ADDITIVE TECHNOLOGIES**

*Technologies of 3D printing are becoming more widely used every day. Nowadays they are introduced even into manufacturing processes. A few decades ago additive technologies were used only for prototyping but today they are using in the manufacture of high-precision ultramodern devices and systems. The variety of three-dimensional printing methods, wide range of using materials and the impressive capabilities of such technique allow using 3D printing in many areas of human life. However, there are still a lot of problems and unresolved questions that need to be identified in order to find an effective their solving. The purpose of this work is investigation and analyzing of existing additive technologies, determination of their capabilities, ways of further development and application prospects.*

*The article contains comparative analysis of existing 3D printing technologies with indication of application areas, main features and brief description of the work principles. The most promising in the near*

*future application areas of additive technologies and the main trends for their improvement are identified. The paper substantiates the introducing advantages of three-dimensional printing into mass manufacturing. Modern technology for defect correction during 3D printing, named Penelope, is considered, which has found application at using 3D printers based on laser synthesis of powder layer.*

*Development of additive technologies today make it possible to create parts and structures of extremely complex shape with high accuracy, while the cost of certain models of 3D printers creates the prerequisites for the distribution of such technology among everyone who wants. Today 3D printing has already found application in medicine, education, food and even military industry. The main development directions of methods and technologies of three-dimensional printing are improving the accuracy and speed of parts manufacturing, expansion of used materials range and elimination of defects in printed component. The concentration of scientific efforts in these areas will soon allow introduce the additive technologies in mass manufacturing, which will open up new perspectives for humanity.*

**Key words:** *3D printer, three-dimensional printing, additive technologies, capabilities of 3D printing technologies, system Penelope.*

**Несук О.О.**

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

**Потапова К.Р.**

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

**Тарасенко-Клятченко О.В.**

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

## ПРО ОСОБЛИВОСТІ ЗОБРАЖЕННЯ ГРАФІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ З УРАХУВАННЯМ АПАРАТНО ПРИСКОРЕНОГО ПІДХОДУ

У статті наведено результати досліджень щодо вивчення процесу рендерингу зображень, а саме швидкості їх відтворення. Нині комп'ютерна графіка є основною технологією цифрової фотографії, кіно, відеоігор, додатків для мобільних телефонів і багатьох спеціалізованих програм. Розроблено велику кількість спеціалізованого обладнання та програмного забезпечення, причому дисплеї більшості пристроїв керуються апаратним забезпеченням комп'ютерної графіки. Це величезна область інформатики.

Натепер існує стандартизований алгоритм рендерингу, за яким на зображенні представляються об'єкти в просторі. Створене зображення виводиться на екран пристрою, візуалізуючи графічну інформацію. Об'єкти вимальовуються на графічному представленні в порядку, що залежить від відстані об'єкта до спостерігача, починаючи з найдалшого. Кожен наступний об'єкт накладається залежно від своєї позиції в просторі. Ці об'єкти перекривають собою інші або взагалі можуть бути поза полем зору, витрачаючи графічний ресурс перезаписом бітової інформації пікселів у стеку. Є різні методи, які дозволяють уникнути частини операцій графічного процесора, що виконуються «впусту». Такими методами є, наприклад, алгоритми *frustum culling* та *occlusion*. Однак навіть за використання таких підходів ми все одно витрачаємо частку графічного ресурсу (операцій графічного процесора).

Для забезпечення високої продуктивності й розв'язання проблеми втрати графічного ресурсу був спроектований зворотний алгоритм представлення зображень. Відповідно до такого підходу об'єкти в комп'ютерному просторі відтворюються в порядку, починаючи з найближчого об'єкта й закінчуючи найдалшим. Водночас кожен наступний об'єкт відрізається за контуром уже представленної частини повного зображення. Таким чином мінімізується втрата графічного ресурсу шляхом перезапису пікселів у стеку. Так, кожен піксель зображення записується лише один раз, економлячи графічний ресурс.

**Ключові слова:** *растрова графіка, рендеринг, frustum culling, occlusion, зворотний алгоритм, overdraw.*

**Постановка задачі.** Під час створення зображення виникає проблема ефективного використання графічного ресурсу, тобто перезапису частини бітових даних пікселів у стеку, що є марним використанням графічних потужностей. Для вирішення цієї задачі було розроблено зворотний алгоритм виведення зображення. Таким чином, стандартні алгоритми рендерингу вже не у повній мірі відповідають сучасним вимогам з огляду на велику кількість і складність операцій із графічними об'єктами.

Є проблема марної витрати графічного ресурсу внаслідок появи множини пікселів, які вповільнюють частоту зміни кадрів. У цій роботі розгля-

дається зворотний алгоритм рендерингу, завдяки якому мінімізується кількість операцій із графічними об'єктами без втрати візуальної складової «картинки».

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасних системах найпоширенішим механізмом відтворення зображення є *draw call*. Це програмний виклик, який містить усю інформацію про візуалізацію об'єкта, яку потрібно відтворити, та передає її до графічного процесора.

Для повної візуалізації кожного об'єкта виконується декілька викликів, що може призвести до проблеми *overdraw* – надлишкового нашарування зображень одне на одне. Цей надлишок



з'являється після відтворення одного об'єкта, який частково чи повністю перекривається іншим, що показує втрату графічного ресурсу.

Є декілька методів для підвищення ефективності виводу зображень, наприклад, *frustum culling* та *occlusion culling*, які відсікають об'єкти, що знаходяться поза зором, але ці алгоритми не вирішують повністю проблему *overdraw*.

**Постановка завдання.** З огляду на результати вивчення літературних джерел за проблемою, цілями статті є аналіз стандартного алгоритму рендерингу зображень та відомих методів підвищення його ефективності, розробка зворотного алгоритму візуалізації об'єктів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для візуалізації зображення використовується віртуальна камера. Налаштування віртуальної камери, яке зазвичай виконується за допомогою спеціальних функцій, визначає поле, об'єкти всередині якого будуть представлятися на екрані.

Поле зору *frustum* – це простір, який містить усе, що потенційно видно на екрані. Цей простір визначається відповідно до налаштувань віртуальної камери, і при використанні перспективної проекції приймає форму усіченої піраміди.

Вершина цієї піраміди - це положення камери, а основа піраміди - віддалена площина. Піраміда усічена на ближній до спостерігача площині.

Всі об'єкти, які потенційно можна буде побачити в результаті рендерингу, знаходяться всередині, принаймні частково, усіченої піраміди, тому немає необхідності відтворювати те, що знаходиться поза нею, оскільки це не буде видно (рис. 1).

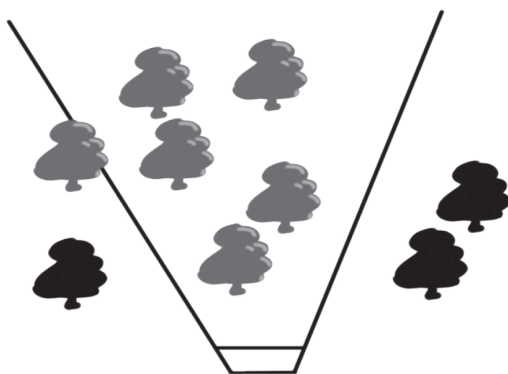


Рис. 1. Модель відтворення об'єктів, що знаходяться в полі зору віртуальної камери

На рис. 1 показано поле зору віртуальної камери, на екрані буде відтворено усі світлі дерева, у той час, як всі темні дерева не буде видно за результатом рендерингу.

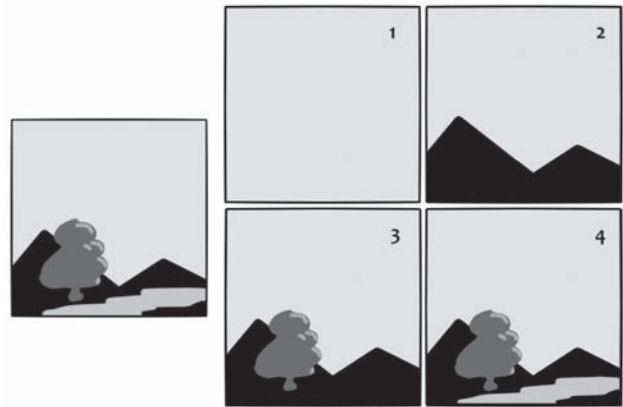


Рис. 2. Стандартний алгоритм рендерингу об'єктів

За стандартного алгоритму (рис. 2), об'єкти представляються на екрані у порядку від найдалшого до найближчого. Це призводить до перекривання деяких частин об'єктів один одним, що уповільнює процес рендерингу. Деякі алгоритми, наприклад, *frustum culling* та *occlusion*, підвищують швидкість рендерингу кадру, ігноруючи об'єкти, які не буде видно на зображенні.

Метою методу покращення ефективності рендерингу *frustum culling* є ідентифікування об'єктів, що знаходяться всередині поля зору (повністю або частково), та вилучення тих, що не знаходяться всередині. До графічного процесора надсилається візуальна інформація лише тих об'єктів, що розташовані у полі зору, навіть якщо спостерігач бачить їх лише частково. Врешті-решт, все, що вимагається від графічного процесора, - це представити на екрані всі об'єкти, які потенційно може бачити спостерігач, заощаджуючи на обробці всіх тих об'єктів, які є невидимими. Крім того, цей метод покращує швидкість виведення нових кадрів та саму продуктивність програми, оскільки лише ті об'єкти, які є частиною видимого 3D-простору, зберігаються у графічній пам'яті, і це легше за представлення усього 3D-простору.

Цей метод має сенс, якщо частина об'єктів тривимірного світу, яка знаходиться у полі зору, значно менша, ніж сам 3D-простір. Тобто, коли увесь простір знаходиться у полі зору, особливого сенсу використовувати метод *frustum culling* немає, оскільки жоден об'єкт не можна ігнорувати.

Також цей метод представляє всі об'єкти, навіть ті, які видно лише частково, повністю витрачаючи на це графічний ресурс.

Також існує метод *occlusion culling*, ефективніший за *frustum culling*. *Occlusion culling* створює ієрархію об'єктів, які потенційно буде видно на картинці. Таким чином, у програмному полі

будуть показані лише ті об'єкти, які точно видно на екрані. Це зменшує кількість викликів *drawcall* та підвищує швидкодію роботи програми.

У цей час *зворотний алгоритм* передбачає обрізання частини об'єктів, які перекриваються вже виведеним зображенням (рис. 3). Об'єкти виводяться у порядку, вказаному на рис. 3.

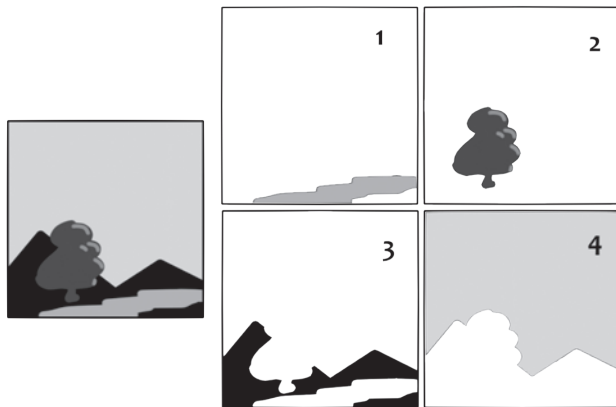


Рис. 3. Зворотній алгоритм рендерингу об'єктів

Під час нашаровування цих зображень можна отримати повне зображення, яке не відрізняється від такого, що було створене за стандартним алгоритмом. Використовуючи зворотний алгоритм, можна уникнути перезапису окремих частин зображення.

Частина пікселів  $X_{i+1}$ , які виводяться для кожного наступного об'єкта, дорівнює деякій частині пікселів  $Y_{i+1}$ , яка знаходиться поза множиною вже виведених попередніх об'єктів  $\bigcup_0^i X$ . Тобто за формулою:

$$X_{i+1} = Y_{i+1} \oplus \left( Y_{i+1} \cap \bigcup_0^i X \right), \quad (1)$$

перший об'єкт буде відтворюватися повністю. За відсутності використання альфа каналу, кількість виведених пікселів буде дорівнювати полю програми.

Порівнявши цей алгоритм із стандартним, ми бачимо, що у стандартному алгоритмі сума всіх представлених пікселів дорівнює  $\bigcup_n Y_i$ , тоді як у зворотному ця сума становить  $\bigcup_0 X_i$ , де:

$$X_i \supseteq Y_i. \quad (2)$$

Необхідно зауважити, що під час роботи зворотний алгоритм витрачає більше операцій на запис пікселя у стек через перевірку того, чи не є місце поточного пікселя вже записаним.

Для здійснення моделювання використано мову C++ та бібліотеку *freeglut*. За алгоритмом, представленим на рис.4, виконується виведення зображень на екран у зворотному порядку.

Для ефективної роботи алгоритму усі об'єкти заносяться в буфер у порядку близькості кожного

з них до камери. Після цього виводиться перший об'єкт. Одразу за ним представляється наступний об'єкт, кожен піксель якого перевіряється для недопущення перезапису клітинки пам'яті у стек повного зображення. Алгоритм обходить таким чином кожен піксель зображення об'єкта та записує у стек тільки ті елементи «картинки», які не будуть перезаписувати інформацію у стек.

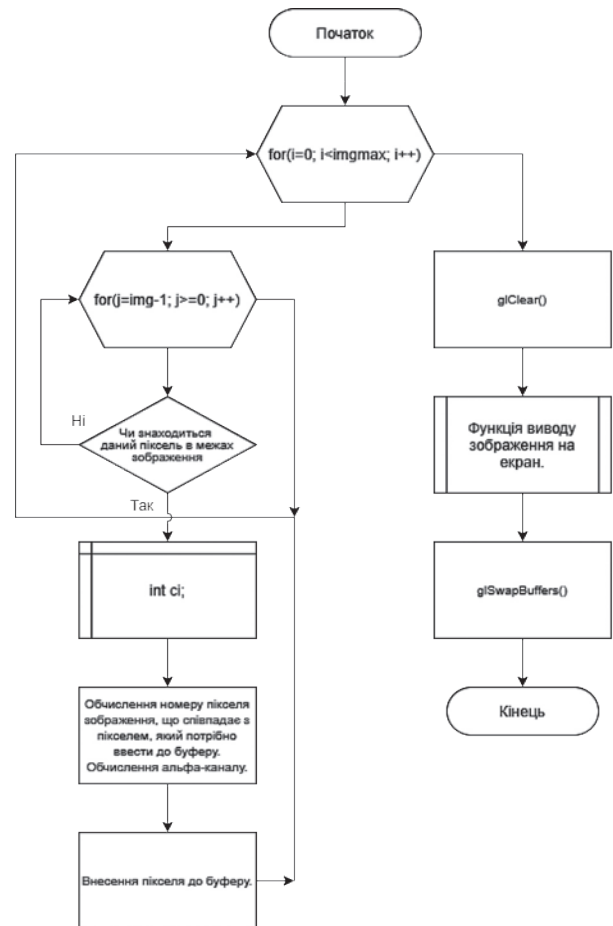


Рис. 4. Алгоритм зворотного рендерингу

Ця функція виконує зворотний алгоритм представлення зображення на екрані. Вона працює із зображеннями у зворотному напрямку, від найближчого до найдальшого та виводить повну картину на екран. Береться найближче зображення, алгоритм проходить по кожному пікселю та виводить його на екран, заносючи в масив значення його альфа-каналу. Якщо це значення не дорівнює нулю, буде обчислено це значення для наступного пікселя у тій самій точці. Після завершення проходу, переходимо до наступного зображення на черзі та повторюємо процес, при цьому оминаючи вже представлені частини зображення. Таким чином, відбувається економія часу на операції потрібні OpenGL на виведення зображення на екран.

```
void display_inverted(){
    unsigned short shift[scrwidth][scrheight]={0};
    int xsh=0;
    int ysh=0;
    glBegin(GL_POINTS);
    for(int i=img; i>=0; i--){
        for(int y=0; y<pic[i].h; y++){
            bool flag=false;
            for(int x=0; x<pic[i].w; x++){
                xsh=pic[i].x+x;
                ysh=pic[i].y+y;
                while(shift[xsh][ysh]>0){
                    x+=shift[xsh][ysh];
                    xsh=pic[i].x+x;
                    if(x>=pic[i].w){
                        flag=true;
                        break;
                    }
                }
            }
            if(flag){
                break;
            }
            draw_alpha(xsh, ysh, i);
            shift[xsh][ysh]=pic[i].w-x;
        }
    }
    glEnd();
}
```

Рис. 5. Фрагмент коду програми

Після закінчення проходу по всьому буферу, повний кадр виводиться на екран. Для підвищення ефективності перевірки, у матрицю цілих ненульових чисел, сторони якої відповідають розмірам програмного простору, заносимо значення зміщення, що дозволить перемістити лічильник поточного пікселя об'єкта на вільне місце у стеку зображення. Це дає змогу пропускати вже оброблені області стеку, які не потребують змін, та пришвидшить візуалізацію кадрів.

Таке перенесення лічильника надає змогу збільшити ефективність роботи алгоритму. У залежності від розмірів та області, яку займає поточний об'єкт в програмному полі, можливо побачити пришвидшення обробки наступних.

При виконанні аналізу роботи алгоритмів, бралася до уваги можливість створення одного й того ж самого зображення із використанням стандартного та зворотного алгоритмів, для створення ідентичного результуючого зображення.

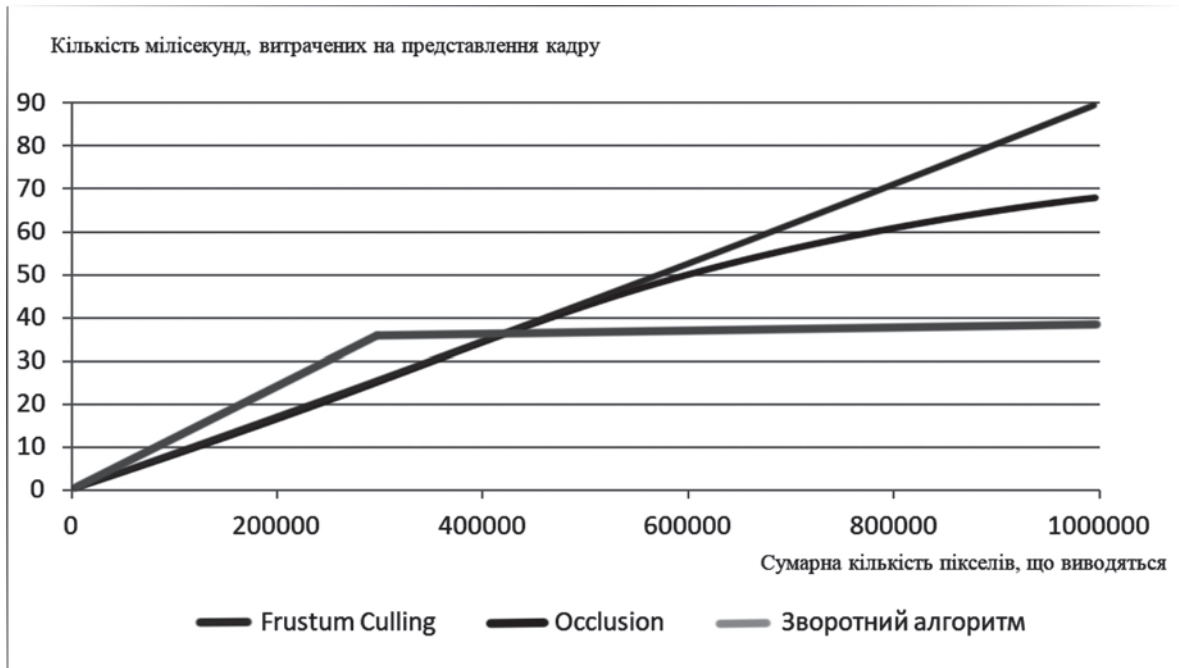


Рис. 6. Порівняльний графік зворотного алгоритму та стандартним алгоритмом з точки зору використання ресурсів за різної кількості виведених пікселів

Суммарна кількість пікселів об'єктів, що виводяться на поле 640 на 480 пікселів	Час виводу одного кадру стандартним алгоритмом, мс	Час виводу одного кадру зворотним алгоритмом, мс
302000	26,667	36,350
604000	52,950	36,517
906000	76,667	36,983

Рис. 7. Порівняльна таблиця ефективності стандартного та зворотного алгоритмів

Отримані результати роботи зворотного алгоритму показали ефективність даного підходу як при малій кількості об'єктів у програмному полі, так і при великій їх кількості. При цьому, зворотний алгоритм має значну перевагу над стандартним з точки зору витраченого часу на проведення операції зміни кадру при умові, що кількість переписаних пікселів стандартним алгоритмом була більша за ~30% від їх сумарної кількості на площині дисплея.

Як видно із таблиці, кількість часу використаного на візуалізацію програмного поля зворотним алгоритмом майже стала із підвищенням кіль-

кості об'єктів та їх складності. Додатковий час відводиться на перевірку полів та перенесення лічильника, що займає набагато менше часу за перезапис візуальної інформації у стеку.

**Висновки.** Підсумовуючи вищенаведене, зворотний алгоритм є значно більш ефективним і швидким за стандартні алгоритми. Завдяки його використанню може підвищуватись швидкість і відбуватись раціональне використання графічного ресурсу системи. З огляду на це, зворотний алгоритм є доцільним для використання щодо програм, які виводять велику кількість об'єктів, що перекривають частини інших.

#### Список літератури:

1. Foley J.D. Computer graphics: Principles and practice. URL: [https://www.amazon.com/Computer-Graphics-Principles-Practice-3rd/dp/0321399528/ref=dp\\_ob\\_title\\_bk](https://www.amazon.com/Computer-Graphics-Principles-Practice-3rd/dp/0321399528/ref=dp_ob_title_bk).
2. Mahrsncer S. Fundamentals of Computer Graphics. URL: <https://www.amazon.com/Fundamentals-Computer-Graphics-Steve-Marschner/dp/1482229390/>.
3. Несук О.О., Потапова К.Р. Зворотній алгоритм виведення зображення *Priority directions of science and technology development* : Abstracts of the 7th International scientific and practical conference. SPC "Sci-conf.com.ua". Kyiv, Ukraine, 2021. P. 360–365. URL: <https://sci-conf.com.ua/vii-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-priority-directions-of-science-and-technology-development-21-23-marta-2021-goda-kyiv-ukraina-arhiv/>.
4. Mathematics for Computer Graphics (Undergraduate Topics in Computer Science). URL: <https://www.amazon.com/Mathematics-Computer-Graphics- Undergraduate-Science/dp/1447173341/>.
5. Lnegyel E. Mathematics for 3D Game Programming and Computer Graphics. Third Edition. URL: <https://www.amazon.com/Mathematics-Programming- Computer-Graphics-Third/dp/1435458869/>.

#### Nesuk O.O., Potapova K.R., Tarasenko-Klyatchenko O.V. ON THE FEATURES OF DISPLAYING GRAPHIC OBJECTS TAKING INTO ACCOUNT A HARDWARE ACCELERATED APPROACH

*This article presents the results of research on the process of rendering images, namely the speed of their reproduction. Today, computer graphics are the main technology in digital photography, film, video games, mobile applications and many specialized programs. A large number of special hardware and software have been developed, and the displays of most devices are controlled by computer graphics hardware. This is a huge area of computer science.*

*There is currently a standardized rendering algorithm that represents objects in space in an image. The created image is displayed on the screen of the device, visualizing graphic information. Objects are drawn on a graphical representation in an order that depends on the distance of the object to the observer, starting from the farthest. Each subsequent object is superimposed depending on its position in space. These objects overlap others, or may be out of sight, wasting the graphics resource by overwriting the bit information of the pixels in the stack. There are various methods that allow you to avoid some of the GPU operations performed "in vain". Such methods are, for example, the algorithms frustum culling and occlusion. However, even with these approaches, we still lose a share of the graphics resource (GPU operations).*

*To ensure high performance and solve the problem of loss of graphics resources, an algorithm for reverse image presentation was designed. With to this approach, objects in computer space are rendered in order, starting from the nearest object and ending with the farthest. In this case, each subsequent object is cut along the contour of the already presented part of the full image. This minimizes graphics resource loss by overwriting the pixels in the stack. Thus, each pixel of the image is recorded only once, saving on the number of performed operations.*

**Key words:** raster graphics, rendering, frustum culling, occlusion, inverse algorithm, overdraw.

**Нікітенко Є.В.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

**Омецинська Н.В.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

**Гуйда О.Г.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

**Лісовець С.М.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

**Скрипка К.І.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

## ЧАТ-БОТ У TELEGRAM ДЛЯ ПОШУКУ МАРШРУТНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ У МІСТІ ЧЕРНІГОВІ

*Чат-бот – це програма, яка, ґрунтуючись на прописаному сценарії, відповідає на запити користувача і дозволяє йому швидко взаємодіяти зі сторонніми сервісами. Завдяки чат-боту можна автоматизувати спілкування з користувачем і значно заощадити ресурси. Чат-боти можуть створюватись у різних месенджерах, у мобільних додатках, на сайтах тощо. Найкращим способом визначити, яка платформа підходить для розроблення боту, є опитування в аудиторії, для якої розробляється бот. Оскільки тисячі людей кожного дня їздять на громадському транспорті у містах, виникає потреба створити простий шлях для пошуку маршрутних транспортних засобів, який можна здійснити через сайт, мобільний додаток або чат-бот. Нині діє низка сервісів, здатних надати потрібну інформацію, але немає жодного чат-боту для вирішення цієї проблеми.*

*Для покриття потреб, зазначених вище, та для зберігання часу людей під час будування потрібних маршрутів було вирішено створити чат-бот, який будуватиме потрібний маршрут із використанням громадського транспорту у місті Чернігів. Площадкою для розроблення чат-боту обрано месенджер Telegram – багатоплатформовий месенджер із можливостями використання VoIP (Voice over IP) для спілкування за допомогою текстових, аудіо- і відео-повідомлень. Окрім того, можна обмінюватися документами, фотографіями, відео, а також відправляти різні стікери та GIF-зображення.*

*Актуальність розроблення зумовлена високим рівнем користування месенджерів серед людей та автоматизації чат-ботів, які дозволяють спрощувати наше щоденне життя, оскільки надають можливість отримати потрібну інформацію в один клік, наприклад, отримувати на свій аккаунт повідомлення про зміну погоди, про пробки на дорогах, про підвищення цін на комунальні послуги. Головною перевагою чат-ботів перед додатками є те, що їх можна розмістити на одній платформі.*

*У роботі поставлено за мету розроблення телеграм-боту, який за заданою локацією шукатиме найближчі зупинки, виводитиме транспорт, який на них зупиняється, будуватиме оптимальні маршрути згідно із запитом користувача.*

**Ключові слова:** чат-бот, телеграм-бот, маршрути, зупинки, громадський транспорт.

**Постановка проблеми.** Сучасні технології не залишаються на місці, розвиваючись кожного дня. В ІТ-галузі з'являються все більше нових ідей для вирішення певних задач, які цього потребують. Це, у свою чергу, впливає на наше повсякденне життя, адже нові технології спрощують його. Нещодавно популярними були мобільні додатки, а нині це місце зайняли чат-боти, здатні вирішувати безліч питань у різних сферах нашого життя.

Більше половини запитів від користувачів вже обробляються різними чат-ботами. Крім того, користувач якнайшвидше хоче отримувати відповіді на свої питання або запити. Задля цього створюються боти, здатні за певним сценарієм задовольнити вимоги клієнтів і дати відповіді на потрібні запитання [1].

Чат-бот – це програма, яка за допомогою чату із кінцевим користувачем обробляє його запити

і дозволяє просто користуватися сторонніми сервісами, якщо це передбачено в коді. Чат-бот спілкується із користувачем через інтерфейс за допомогою прописаних команд, які потім на стороні сервера інтерпретуватимуться певним чином. Отже, йому можна надати всі бажані функції: робити переклад тексту, навчати користувача чомусь, здійснювати тестування, залишати відгуки під постами у соціальних мережах та багато інших.

Кожного дня тисячі людей користуються громадськими транспортними засобами міста і зазвичай виникає потреба дізнатися, як саме ми можемо дістатися до певної адреси від нашої поточної геолокації, на якій зупинці потрібно сідати і виходити, який транспорт підійде нам для того, щоб дістатися до визначеної точки. Більшість маршрутних транспортних засобів обладнана GPS-маячками, використовуючи які можна відслідковувати місцезнаходження транспорту і розрахувати, коли він приїде на потрібну зупинку.

Пошук маршрутних транспортних засобів можна здійснювати через сайт, мобільний додаток або чат-бот. Нині діє низка сервісів, здатних надати потрібну інформацію, але немає жодного чат-боту для вирішення цієї проблеми.

Задля задоволення потреб, зазначених вище, та зберігання часу людей під час планування потрібних маршрутів було вирішено створити чат-бот, який будуватиме потрібний маршрут із використанням громадського транспорту у місті Чернігів. Площадкою для розроблення чат-боту було обрано месенджер Telegram.

#### Формулювання цілей статті.

Актуальність розробки зумовлена високим попитом на месенджери серед людей та автоматизацією чат-ботів. Вони дозволяють спростувати наше щоденне життя, оскільки дозволяють отримати потрібну інформацію в один клік. Наприклад, отримувати на свій акаунт повідомлення про зміну погоди, про пробки на дорогах, про підвищення цін на комунальні послуги. Головна перевага чат-ботів перед додатками – це те, що їх можна розмістити на одній платформі.

Отже, **мета роботи** – розроблення телеграм-боту, який за заданою локацією шукатиме найближчі зупинки, виводитиме на табло номер транспортного засобу, який на них зупиняється, будуватиме оптимальні маршрути згідно із запитом користувача.

Нами поставлені такі завдання: 1) аналіз предметної області; 2) аналіз аналогів застосунків для пошуку маршрутів та діючих чат-ботів; 3) вибір середовища для розробки; 4) розроблення телеграм-бота.

## Виклад основного матеріалу

### 1. Проектування як складова частина розробки

Проектування – це необхідна складова частина розробки будь-якої програмної системи. Цей процес можна поділити на такі етапи, послідовно пов'язані один із одним: збір вимог і формування бачення кінцевого результату, аналіз предметної області, створення прототипу системи.

Збір вимог або аналіз предметної області означає більш глибоке ознайомлення з вимогами, які відносяться до функціонала проекту, опрацювання сценаріїв взаємодії із системою кінцевим юзером і визначення алгоритмів у бізнес-логіці. Чітке уявлення про завдання, глибоко проведений аналіз предметної області, опрацювання сценаріїв взаємодії із системою і проектування бізнес-логіки допоможуть отримати успіх у досягненні потрібної цілі.

Створення прототипу системи має на увазі створення працюючої програми, яка дозволяє переконатись у тому, що ми створюємо правильний функціонал.

Мета розроблення телеграм-боту – спрощення повсякденного життя за допомогою оптимізації пошуку потрібних маршрутів у місті. Слід досягти того, щоб будь-яка людина, якій потрібно дізнатись, як дістатися до певної адреси із використанням маршрутних транспортних засобів, може з легкістю застосувати розроблений чат-бот, отримавши всю потрібну інформацію. В якості девайсу для пошуку маршруту через чат-бот може використовуватися будь-що: телефон, планшет або комп'ютер. Окрім того, після закриття Telegram бот повинен запам'ятовувати останній стан та після запуску месенджера знов надавати доступ безперебійного використання сервісу.

Проект реалізовуватиметься в якості чат-боту на платформі Telegram. Бот повинен спілкуватись із користувачем задля того, щоб останньому було зрозуміло, як ввести адресу, куди йому потрібно дістатись і дізнатись інформацію про побудований маршрут.

### 2. Реєстрація чат-боту в Telegram

Реєстрація починається із введення команди «newbot» у BotFather. У відповідь нам пропонують ввести ім'я нашого боту. Оскільки воно повинно бути унікальним і закінчуватися на «bot», було вирішено обрати назву @MarshrutkaBot. Якщо ж назва підпадає під зазначені вище критерії, то бот видає нам спеціальний токен, який використовується в API для доступу [2].

На рис. 1 наведена інформація про MarshrutkaBot в BotFather:

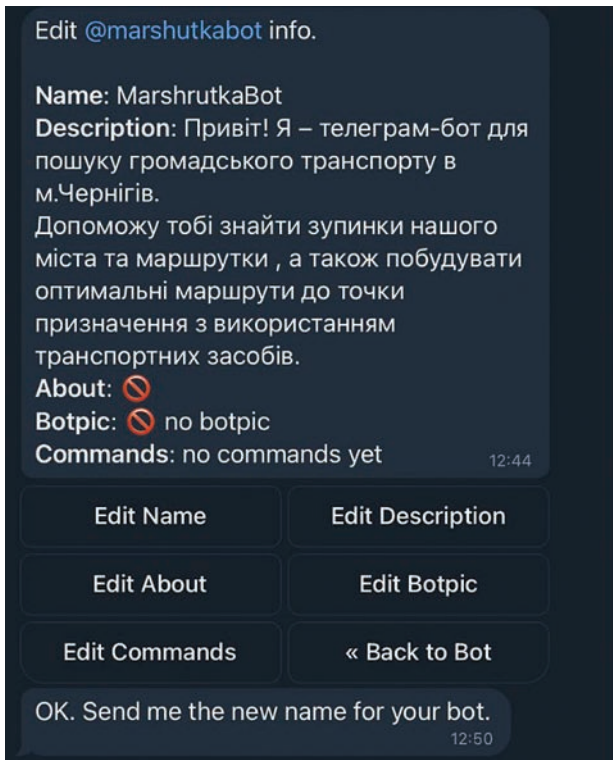


Рис. 1. Реєстрація телеграм-боту для пошуку маршрутних транспортних засобів

### 3. Взаємодія із Telegram за допомогою бібліотеки Aiogram

Спочатку слід імпортувати потрібні модулі бібліотеки Aiogram для створення бота: Bot, Types, Dispatcher, Executor [3].

Окрім того, ми імпортуємо такі класи, за допомогою яких взаємодіятимемо із телеграм-ботом: MemoryStorage, FSMContext, CommandStart, States, StatesGroup, ContentType.

Запуск бота виконується за допомогою модуля Executor і функції start\_polling. Потрібно пам'ятати, що Aiogram – це асинхронна бібліотека, побудована на asyncio, тому потрібно прописувати функції хендлерів із зазначенням async. Виклики Telegram Bot API також є асинхронними, тому слід використовувати ключове слово «await».

Об'єкт типу Message є повідомленням, за допомогою якого можна відправляти фото, аудіо, текстове повідомлення, документ, відео тощо. У нашому телеграм-боті ми відправляли повідомлення користувачу (наприклад, обрати опцію), повідомлення щодо планування маршруту та інші.

Для відправлення текстового повідомлення потрібно викликати message.answer()-функцію.

Під час розроблення бота було використано text-параметр для виведення тексту ботом і reply\_markup=keyboard для появи клавіатури для того,

щоб користувач міг обрати опцію. Keyboard – це об'єкт типу ReplyKeyboardMarkup, який презентує клавіатуру із певними опціями відповідей.

У розробленому телеграм-боті було використано тільки resize\_keyboard, тобто повернутися до опцій можна будь-коли. Об'єкт типу KeyboardButton визначає кнопку клавіатури. Для звичайних текстових кнопок замість нього можна використовувати String-тип.

Для того, щоб бот розумів запит користувача та реагував на них певним чином, розроблено низку хендлерів:

1) хендлер, який задіюватиметься за командою «/start». Після цієї команди він побудує дві кнопки: «побудувати маршрут» та «найближчі зупинки». Без використання цього хендлера неможливо продовжити роботу, адже саме він є вхідним;

2) хендлер, який за обраною користувачем опцією задає стан бота. Якщо користувач обрав «побудувати маршрут», то бот очікує на початкову локацію. На цьому етапі задіюватиметься хендлер, який реєструє початкову локацію і ставить стан бота на очікування кінцевої локації (точки прибуття);

3) хендлер, який реєструє точку прибуття, введеною користувачем. Після того, як він задіюватиметься, бот будуватиме маршрут за введеними точками;

4) хендлер, що відслідковує стан, у який було переведено, якщо користувач обрав «подивитися детальніше маршрут». Бот у цьому хендлері відсилає користувачу більш детальну інформацію;

5) якщо користувач обрав опцію «знайти зупинки поряд», то він повинен відправити локацію. Тут задіюватиметься хендлер, який відслідковує тільки локацію. Оскільки для попередніх хендлерів було задано також стан бота, то у цьому хендлері ми його не очікуємо, адже стан анульований хендлером із пункту 2. Хендлер шукає зупинки поряд і видає їх користувачеві.

### 4. GetStopInfo - метод стороннього сервісу Eway

Для того, щоб знайти, які ж транспортні засоби зупиняються на зупинці, було вирішено використовувати GetStopInfo API - метод стороннього сервісу Eway [4], який дозволяє отримати детальну інформацію про зупинку (табл. 1 і табл. 2).

Таблиця 1

#### Опис параметрів запити методу GetStopInfo

Параметр	Описання
city	ID міста (назва).
ID	ID зупинки (назва).

Таблиця 2

**Опис параметрів відповіді методу GetStopInfo**

Параметр	Описання
stop	Інформація про зупинку: назва зупинки, довгота, широта (її координати)
transports	Перелік маршрутів, які проходять та зупиняються на цій зупинці. Маршрути згруповані за типом транспортного засобу
transport	Інформація про тип транспорту: ID (унікальний ідентифікатор), key (коротка назва транспорту), name (повна назва транспорту)
routes	Інформація про маршрут: ID (унікальний ідентифікатор), назва маршруту, чи є GPS-маячок, напрямок руху, час прибуття першого транспортного засобу (у хвиликах), час прибуття наступного транспорту (у хвиликах)

Отже, ми отримуємо назву зупинки і маршрути, які на ній зупиняються, за параметром transports.

**5. Search - метод стороннього сервісу Eway**

Для того, щоб побудувати оптимальні маршрути, було вирішено використовувати Search API-метод стороннього сервісу Eway [5], який дозволяє побудувати варіанти маршруту з однієї точки в іншу, використовуючи громадський транспорт (табл. 3 і табл. 4).

Таблиця 3

**Опис параметрів запиту Search-методу**

Параметр	Описання
city	ID міста (назва)
start_lat, start_lng	Координати початку маршруту
stop_lat, stop_lng	Координати кінця маршруту
transports	Тип транспорту. За замовчуванням використовуються усі транспортні засоби
type	Тип маршруту. За замовчуванням тип optimal (оптимальний)
direct	Пошук тільки прямих маршрутів без пересадок, якщо задано true. False означає «шукати усі маршрути»
results_count	Кількість повернутих варіантів маршруту - від 1 до 25

Таблиця 4

**Опис параметрів відповіді Search-методу**

Параметр	Описання
ways	Масив варіантів маршруту
way	Початкова та кінцева точки маршруту

stop type="foot_to foot_from"	Маршрут пішки від однієї точки до іншої
routes	Перелік маршрутів громадського транспорту, а також інформація про пересадки
route index='n'	Маршрут громадського транспорту
transfer	Зупинки, на яких здійснюється пересадка, відстань між ними і час руху між зупинками
stop type='in out'	Початкова і кінцеві зупинки

**6. Розміщення телеграм-боту на сервері Amazon**

Amazon – це організація, яка здійснює продаж усіляких товарів і послуг через Інтернет. Amazon надає користувачам їх сервісу послуги як за інфраструктурною моделлю (наприклад, віртуальні сервера), так і за платформною моделлю (наприклад, хмарні бази даних, хмарні засоби розробки).

Amazon EC2 (Elastic Compute Cloud) – це продукт компанії Amazon, який забезпечує безпечну і змінну за розмірами ємність у хмарі [6] та надає можливість отримати доступ до обчислювальних ресурсів у хмарі. Використовуючи веб-інтерфейс Amazon-сервісу, можна створити свій ресурс, на якому розмістити потрібний проект.

Для початку роботи з ботом потрібно надіслати команду “/start”. Результат команди представлено на рис. 2.

Бот запитує, обрати опції «найближчі зупинки» чи «побудувати маршрут». Оберемо спочатку опцію «найближчі зупинки». Результат цієї опції представлений на рис. 3.

Після цього бот очікує на відправлення від користувача точки на карті, де шукати зупинки. Користувач відправляє локацію, а бот відправляє зупинки, які знаходяться поряд. Результат обробки відправленої локації зображено на рис. 4.

Бот виводить інформацію про зупинку (її назву) і транспортні засоби, які на ній зупиняються. Далі, наприклад, користувач бажає побудувати маршрут від точки А до точки Б, тобто від початкового місця відправлення до кінцевої точки. Він обирає опцію «побудувати маршрут», натиснувши на кнопку клавіатури, результат якої зображено на рис. 5.

Бот запитує про локацію, звідки ми будемо відправлятися. Користувач відправляє локацію (рис. 6).

Бот запитує користувача про кінцеву точку, тоді користувач відправляє локацію (рис. 7).





Рис. 2. Результат команди «/start»

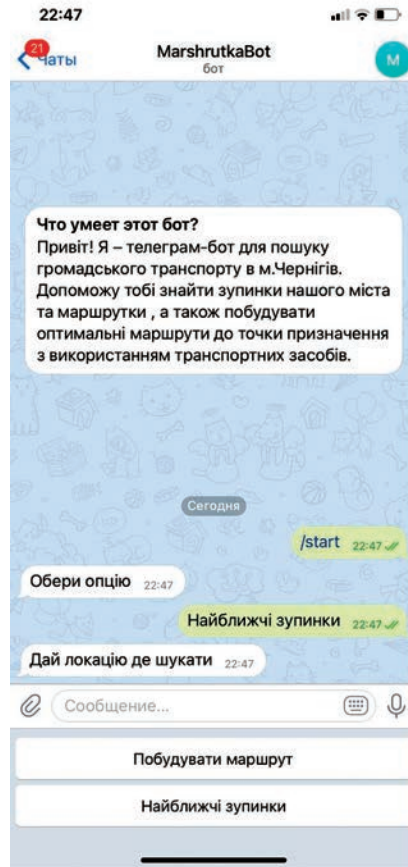


Рис. 3. Результат обрання опції «найближчі зупинки»

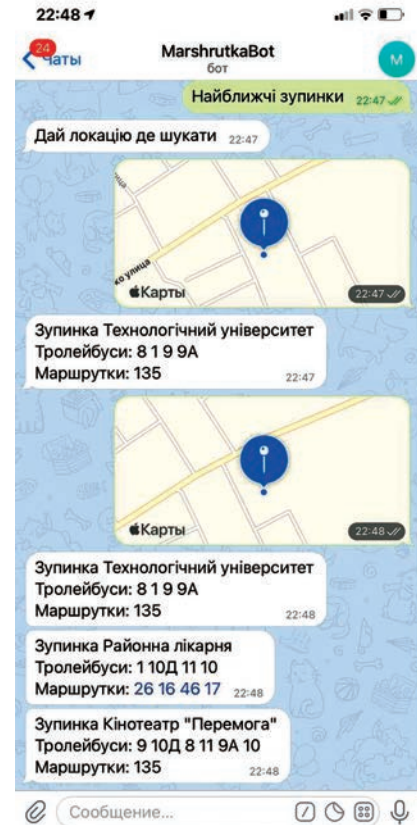


Рис. 4. Результат пошуку найближчих зупинок

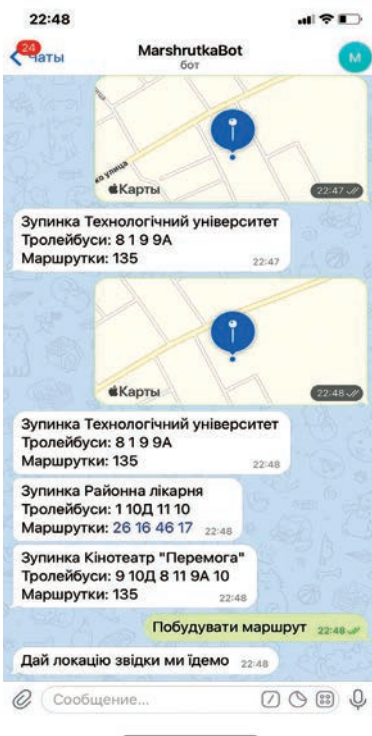


Рис. 5. Запит бота після того, як користувач обрав опцію «побудувати маршрут»

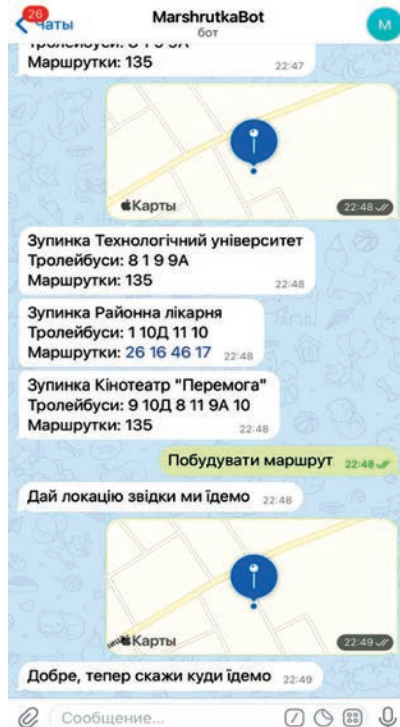


Рис. 6. Запит бота після вказання користувачем точки відправлення

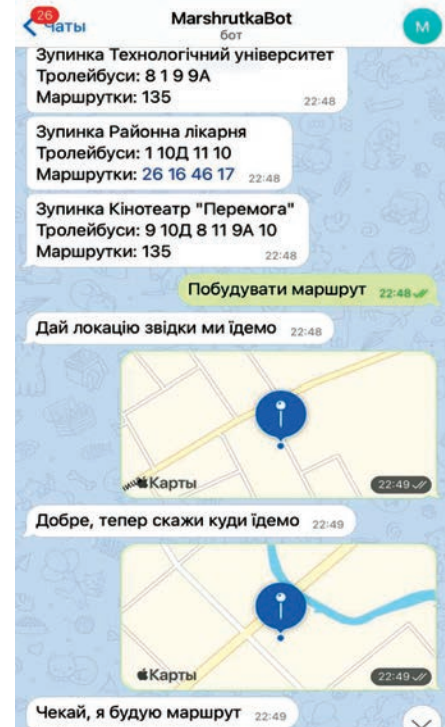


Рис. 7. Відповідь бота після того як користувач указав кінцеву точку

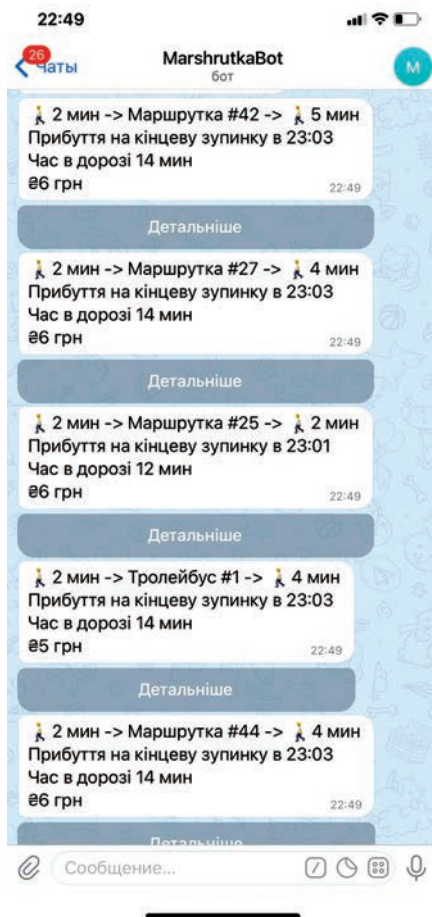


Рис. 8. Результат побудови маршруту

На цьому етапі бот будує маршрут, інформуючи про це користувача. Процес побудови маршруту триває 1-2 секунди. Після цього бот видає перелік маршрутів від точки А до точки Б, використовуючи громадський транспорт (рис. 8).

Ми отримуємо інформацію про маршрут, очікуваний час прибуття на кінцеву зупинку, час у дорозі та вартість проїзду на транспортному засобі (або транспортних засобах).

Окрім того, користувач може дізнатися більш детальну інформацію про маршрут, натиснувши на кнопку «детальніше» (рис. 9).

Бот надає більш детальну інформацію про маршрут, назву зупинок, де потрібно сідати і виходити, як часто ходить потрібний громадський транспортний засіб.

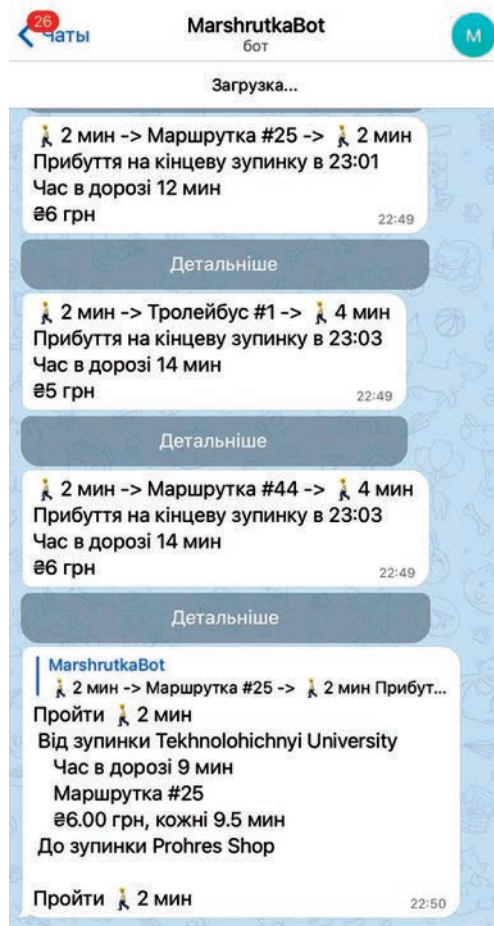


Рис. 9. Результат натискання користувачем кнопки «детальніше»

**Висновки.** Під час виконання роботи проведено аналіз предметної області, актуальності розроблення телеграм-бота, визначено головні вимоги до проекту і його функціоналу.

Нами проведено аналіз технологій, із використанням яких можна розробити телеграм-бот, обрано такі засоби: бібліотека Aiogram, бібліотека requests, Google Maps API, Eway API.

Результатом проведеного дослідження є готовий чат-бот у месенджері Telegram, здатний знайти зупинки поряд і побудувати маршрут від точки відправлення до точки призначення у місті Чернігів. Окрім того, бот надає інформацію про час прибуття на кінцеву точку, час у дорозі та ціну проїзду. Розроблений проект є актуальним для сьогодення, оскільки використання чат-ботів [7] є простим прискоренням роботи бізнесу і спрощенням рутинного життя.

#### Список літератури:

1. Пишем бота для Telegram на языке Python [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://mastergroosha.github.io/telegram-tutorial/docs/lesson\\_13/](https://mastergroosha.github.io/telegram-tutorial/docs/lesson_13/).
2. Telegram Bot API [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://core.telegram.org/bots/api>.
3. Aiogram API [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://docs.aiogram.dev/en/latest/>.
4. Сайт Eway [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.eway.in.ua/ru/cities/chernihiv>.

5. Eway API [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.eway.in.ua/api>.
6. Amazon EC2 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://aws.amazon.com/ru/ec2/>.
7. Боты в Telegram про погоду языков [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://telegram-rus.ru/poleznye-boty-v-telegramme/>

**Nikitenko Ye.V., Ometsynska N.V., Guida O.G., Lisovets S.M., Skrypka K.I. TELEGRAM CHATBOT TO SEARCH FOR ROUTE VEHICLES IN CHERNIHIV**

*A chat bot is a program that, based on a prescribed script, responds to user requests and allows him to quickly interact with third-party services. Thanks to the chat bot, you can automate communication with the user and significantly save resources. Chat bots can be created in various messengers, in mobile applications, on websites, etc. The best way to determine which platform is suitable for developing a bot is to do a survey among the audience for which the bot is being developed. Since thousands of people use public transport in cities every day, it becomes necessary to create an easy way to find route vehicles. This search can be implemented through a website, mobile application, or through a chat bot. Currently, there are a number of services that can provide the information you need, but there is not a single chatbot to solve this problem.*

*To cover the needs of the above and to save the time of people in the construction of the necessary routes, it was decided to create a chat bot that will build the desired route using public transport in Chernihiv. The Telegram messenger was chosen as a platform for developing a chat bot. Telegram is a cross-platform messenger with the ability to use VoIP (Voice over IP), communication via text, audio and video messages. You can also exchange documents, photos, videos, send various stickers, GIFs.*

*The relevance of the development is due to the high use of messengers among people and the automation of chat bots. They allow us to simplify our daily life, as they provide the ability to get the information you need in one click. For example, to receive a message on your account about a change in the weather; traffic jams, or an increase in the prices of utilities. The main advantage of chatbots over apps is that they can be hosted on the same platform.*

*The following goals were set in the work- to develop a telegram bot that, at a given location, will search for the nearest stops, display transport, stop at them, build optimal routes according to the user's request.*

**Key words:** chatbot, telegram-bot, routes, stops, public transport.

***Oleshchenko L.M.***

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

***Medvedev M.G.***

V.I. Vernadsky Taurida National University

***Kobryn D.R.***

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

***Sukalo M.L.***

National University of Food Technologies

## AGENT MODELLING SOFTWARE OF POPULATION BEHAVIOR IN EMERGENCY SITUATIONS

*The ability to predict the movement of people is very valuable in many contexts. Panic situations are likely to have been the biggest influence on the development of solutions to model crowd behavior. The paper considers research on the movement of crowds of people in emergencies and analyzes the existing frameworks and software for agent modeling of the crowd. Based on the research on the behavior of people in the crowd and available approaches to modeling the movement of people and the crowd in an emergency, the software requirements were formulated: the ability to configure each of the agents; the ability to change the geometry of the premises; parameterization of the model; correct operation of algorithms with a large number of agents; taking into account the field of view of agents; realization of observance of personal space of the person; implementation of an algorithm to change the trajectory of motion in a collision; realization of the phenomena of crowd panic; calculation of crowd density; the possibility of random distribution of agents; possibility of manual distribution of agents; import and export the result of the program analysis in JSON format. The general description of architecture and the developed software modules of the created software is presented. The created modules include an environment module, an agent module, an agent generation module, a scene editing module, a database interaction module. Describes the architecture of software developed on the Unity platform and how all components interact with each other. A\* Pathfinding Project technologies were used to develop the software to provide flexible and reliable path finding, the Django framework to create a storage server API, an additional djongo library to integrate with MongoDB database.*

**Key words:** *software, emergency, agent modelling, Python, Django framework, Unity, MongoDB.*

**Introduction. Problem statement.** A crowd is a large group of disorganized people that can be described as a temporary gathering of a large number of people who respond almost equally to a particular stimulus. In people's lives, especially in megacities and big cities, there is always a place of movement in large crowds. It can be either a daily morning queue in the subway or an idol concert attended by tens of thousands of people. Thousands of mass events take place every year around the world, during which many people are injured due to the danger of the crowd. This is caused by a certain emergency that causes panic in the crowd. Sometimes the emergency itself poses a much lesser threat than the unpredictable behavior of the crowd. Such situations are influenced by a number of factors such as the geometry of the premises, the number of exits, as well as the cause of the panic, the reaction of the crowd and the

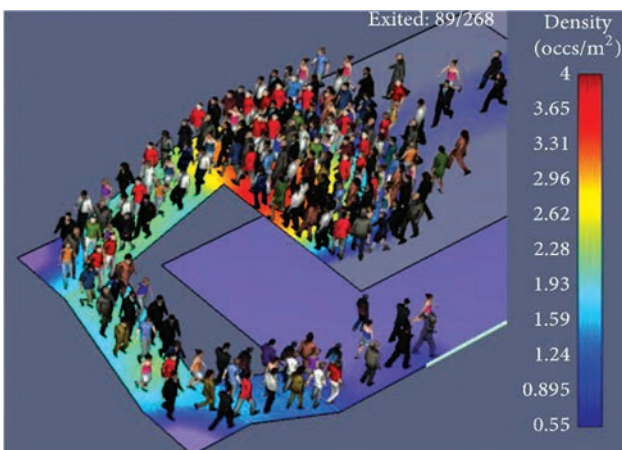
effectiveness of the evacuation. The panic, the crowd in general in certain situations is much more dangerous than the emergency that caused it. Emergencies are difficult to prevent, it is possible to change external factors and try to minimize the consequences of irrational human behavior. Everyone in the crowd has own behavior, which is extremely difficult to convey through a model. The complexity of the behavior of the human masses is associated with the presence of behavioral patterns: clustering, queuing, setting routes that people use almost every day on a subconscious level. In order to experiment with different factors of the system, improve the quality of predicting the consequences of an emergency and identify deficiencies in crowded places, a flexible software tool is needed to model the behavior of the crowd with the ability to simulate different types of agents and their environment.

**Related research.** There is a wide range of programs for simulating the movement of human masses such as: Menge framework, Pedestrian Dynamics, Crowd Dynamics, DI-Guy. After analyzing these products and the projects in which they are used, we can conclude that the creation of systems for predicting the behavior of crowds and individual crowds is of interest to both government agencies and private companies.

**The main goal of the article** is to create software that allows to model and predict the behavior of the crowd in an emergency.

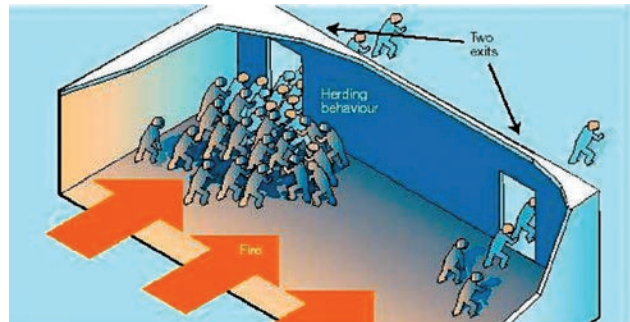
**An overview of existing software products**

In recent years, the simulation of crowds and groups of people has become increasingly important not only in the field of design. The products created on the market vary from systems for modeling the flow of people in emergencies and logistics solutions in the design of architecture. To studying people's behavioral patterns, one of the goals of such research was to develop animated realistic programs for urban design, planning, and the game industry. In a familiar environment, each person shows some common behavioral attributes. People always try to find the shortest way to the goal, if it is possible to avoid a change of direction, they will go through the crowd, showing the basic principle of "least effort" where everyone tries to save time and energy. Most habitual and rational behavioral patterns disappear as soon as people are exposed to an emergency or other stimulus or stimulus. In such emergencies, the crowd shows completely different patterns. People who try to get out of a room as fast as possible, for example, start moving much faster, trying to overtake others, and this is why the characteristic formations around bottlenecks appear. These clusters do not allow people to move freely and, thus, the speed of the flow of people in the crowd becomes much slower.



**Fig. 1. Characteristic arched formations around the entrance to the stairs [1]**

People who entered the building through a certain entrance and do not know its structure, in a panic will try to first reach the same entrance, rather than looking for the nearest emergency exit, which can be closer and safer [1]. In an emergency, people who easily panic show the phenomenon of herd behavior, during which they recklessly try to join the largest group of people.



**Fig. 2. Demonstration of herd behavior [1]**

Such behavioral phenomena in panic usually cause the most injuries and casualties in crowds caused by an emergency. As the nervousness of the crowd increases, each individual pays less attention to other people's comfort zones and tries to achieve his goal, and this sometimes results in violent behavior of the crowd, during which people begin to push, grab others, despite people falling, trampling their. In the process of reviewing the existing available models, it was determined that the situations of modeling emergencies and their consequences are very closely related to the specific state of individual agents. The real crowd is an extremely complex entity in terms of predicting behavior, because every second each person in the crowd makes many decisions, which at the same time are influenced by almost everyone in the crowd, as well as physiological, psychological and social factors of each entity. Mathematical approaches and analytical models are not able to predict the behavior of the crowd with sufficient reliability. If we consider scientific research in the field of pedestrian dynamics, then all the created models are subject to two scales of simulation: microscopic and macroscopic. Microscopic models consider the position of each element of the crowd as a separate discrete part of the simulation. Macroscopic models, on the other hand, perform a simulation as an averaged distributed representation of the entire crowd and consider the crowd in space using variables such as density, flow, and front. Models are usually created on the basis of some phenomenological assumptions, therefore, they are likely to reproduce a fairly similar behavior of crowds with the number of  $N$  elements.

Among all the analyzed approaches to solving the problem of crowd modeling, the following main approaches were identified.

*The approach of cellular automata.* In this approach, the space allocated for behavior modeling is a set of cells that create a lattice with certain rules of transition from state to state. The room is considered as a field of the cellular automaton. Thus, each cell is essentially a finite automaton, the state of which depends on the state of its neighboring cells. For example, a cell with a “busy” state contains a human and the simulation is performed by changing and analyzing the states of a plurality of cells. On the one hand, this method of modeling gives a very fast to calculate  $O(N)$ , but at the same time simplifies and averages the forces of interaction, which affects the realism of the model.

*Approach based on Newtonian mechanics.* In this approach, each effect of the environment on the object is reflected by a certain force that tries to change the position of the simulation element. The motion is thus described by Newton’s second law. The advantage of this approach is that each element can affect all other elements, thus allowing unlimited complication of the interaction process by adding new vector forces. One of the main disadvantages of such models is that the time complexity of such an approach is  $O(N^2)$ , which makes it very inefficient with great detail of the process.

*Approach based on physical processes of liquids and gases.* In such approaches, each element of the crowd is a particle whose state is described by a certain equation of a liquid or gas. Such modeling focuses on the crowd as a whole, not on its components. Models of this type are mainly used in the simulation of dense and large crowds in a short period of time. Thus, the personal qualities of the members of the crowd have almost no effect on the environment, reducing behavioral factors and allow the study of the crowd as a physical process.

*An approach based on multiagent methods.* This approach describes simple rules of motion and interaction of elements that determine the behavior of each of the simulation objects. Each of the simulation objects responds to any situation independently, based on the described rules for decision making. Because almost every type of behavior can be implemented in different agents, increasing realism and giving complete freedom to implement the behavior of the researcher, this method is considered the most natural for simulation.

There are already quite a lot of full-fledged products on the market of crowd modeling tools, which are mainly created for designing urban architecture

with a view to avoiding crowds and modeling crisis situations. They are all commercial products and because of this, access to intellectual property like code and model calculation algorithms is impossible. Despite this, as mentioned at the beginning of the section, the field of crowd prediction in various emergencies is a very popular field of research in the academic field, so we can analyze the developed models of scientific work. In research [2] a model was created to simulate the behavior of the crowd in case of fire and to calculate the optimal evacuation routes of a given room. Submodels were created in the work, which paid attention to the flammability of materials and the spread of fire and smoke throughout the building. In the model [3] the work focused on the concept of perception of the environment by the agent in the scenario of evacuation of the crowd from a certain area. Each agent, through both close verbal communication and remote communication, receives information to supplement the completeness of the map of perception of the area. Each agent subjectively perceives his environment and makes decisions through a progressive decision-making module. This model was also used to emulate the spread of information in crowds during evacuations. The work [4] is interesting in that each of the agents has its own socio-psychological state, which affects how the agent makes decisions and sets priorities. The basic idea of this model is that different people may react differently to the same stimulus depending on their individual characteristics and psychological characteristics.

*The NetLogo software* is written with the aim of having many opportunities for experts, was also considered. NetLogo allows to influence the simulation with various switches, sliders, buttons and other interface elements [5].

The NetLogo environment allows scientists to study emergent phenomena that occur in systems of elements, but are not inherent in individual elements of the system. NetLogo includes models from various fields of modeling, such as economics, physics, chemistry, psychology, biology. In addition to using existing models, NetLogo allows to create and distribute custom models.

*Mesa* is a specialized agent modeling framework for the Python language. Created with the aim of becoming the main tool for researchers who want to create agent models using the Python language. It allows to create agent models using basic built-in components or create and manually customize custom models. Mesa also allows to visualize the simulations and analyzes using a graphical browser interface. The

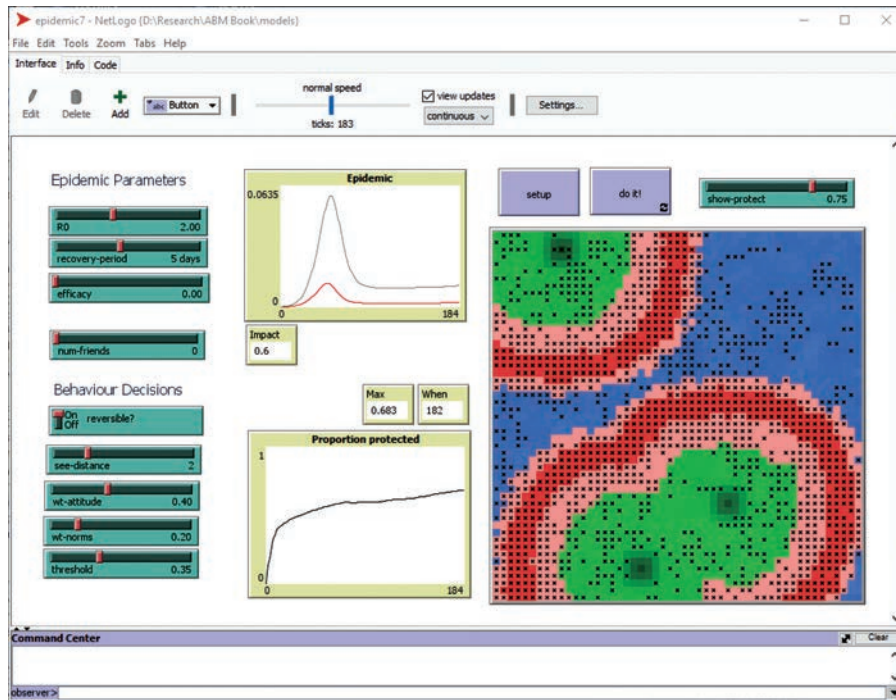


Fig. 3. NetLogo interface [5]

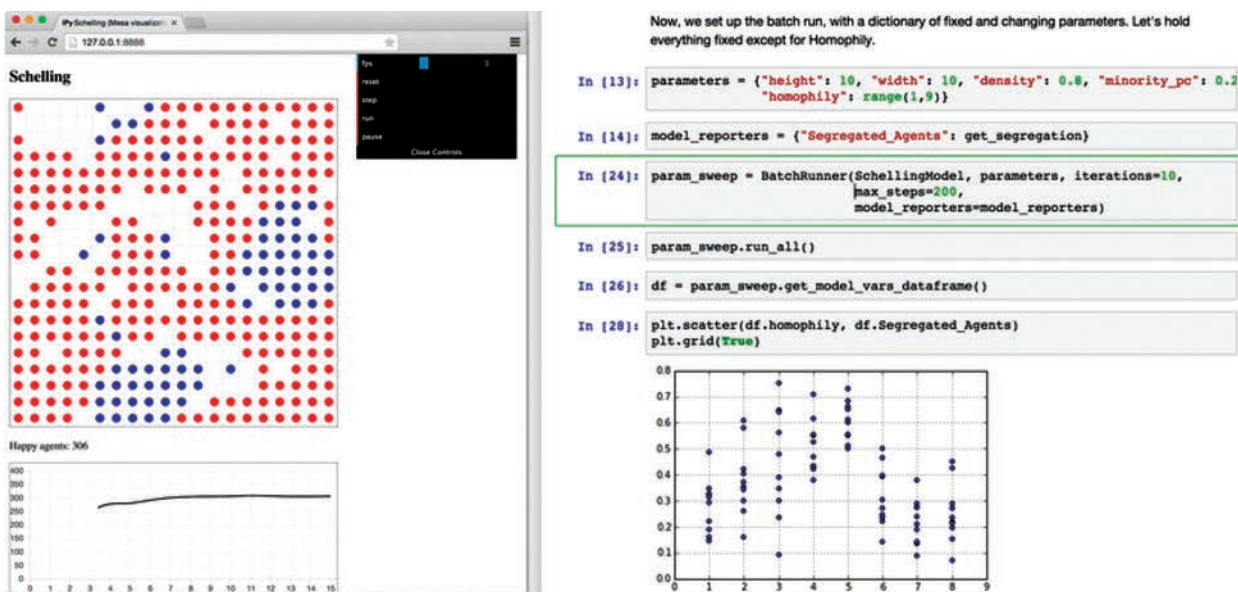


Fig. 4. Example of a model interface created in Mesa [7]

main advantage of Mesa over other agent modeling tools is that Mesa's design is divisible and extensible, thus allowing the creation of a decentralized ecosystem of specialized user-created modules.

To create agents and models, we inherit the agent or model class provided by Mesa. The databases of these classes contain all the basic functions for the interaction of the agent and the model [6].

*A\* Pathfinding Project* is a powerful path search system in Unity. It allows to find the most efficient path

for a moving object in a few lines of code. The system supports grid, navigation and hexagonal graphs. The system can automatically generate navigation graphs, so that the developer does not waste time on manual editing of navigation. A\* Pathfinding Project is a multi-threaded project, so even calling many paths at once will not affect program performance. The processing of the created paths includes smoothing and a funnel algorithm. Already created paths can be easily modified to suit your needs. The system supports

updating of graphs during the program operation, and also has complete and clear documentation [8]. A\* is a mathematical search algorithm in the finding graph the route with the lowest path cost from the initial vertex to the final one, in graphs with positive edge weights. The algorithm is an extension of Dijkstra's algorithm. The difference A\* from Dijkstra's algorithm is the use of a heuristic estimate of the distance from the selected vertex to the initial one. The algorithm tries to minimize  $f(n)$ :

$$f(n) = g(n) + h(n), \quad (1)$$

where  $n$  is the next vertex under consideration,  $g(n)$  is the cost of the path from the initial vertex to the vertex  $n$ , and  $h(n)$  is a heuristic function that approximates the cost of the cheapest path from  $n$  to the target vertex. An example of a heuristic function for finding a path can be the distance from the vertex to the goal, as the physically smallest possible distance between points.

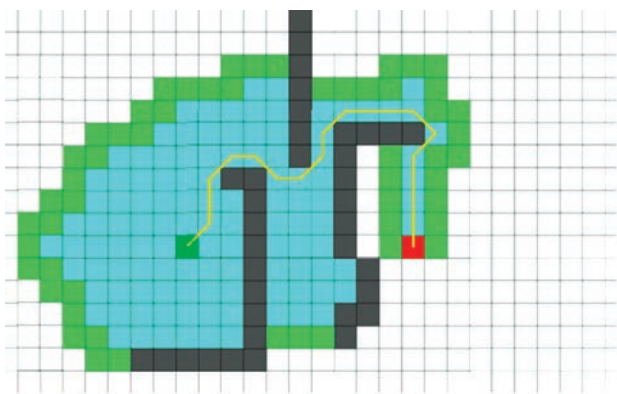


Fig. 5. A\* algorithm operation example [8]

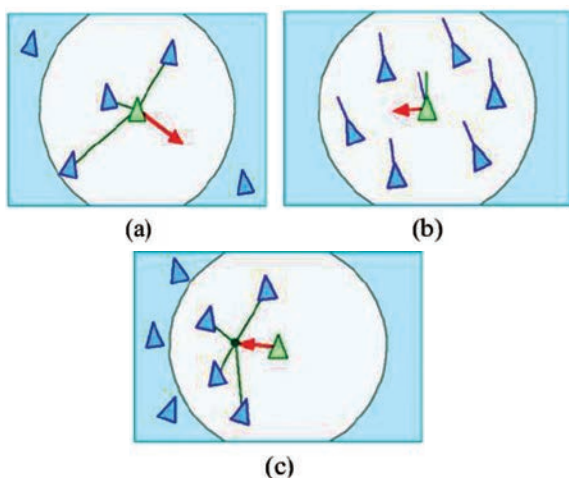


Fig. 6. Using Boids algorithm to describe the agent's behavior in the crowd (a – separation rule, b – alignment rule, c – cohesion rule)

### Architecture and modules of the developed software

Cross-platform tool Unity was chosen because of the number of embedded systems focus not on the implementation of graphical, physical and other components, but on the algorithms and solution models for agents. The Python language and the Django framework are selected for the server part used to store the program data. Python has the advantage of writing and debugging code over other programming languages, and Django allows to write web servers with a ready-made graphical CRUD interface in a short amount of time and programmatically access the database using the built-in ORM. The PyCharm IDE, the most popular Python development tool, was chosen as the server development environment. Each of the software modules performs a specific function that ensures the correct interaction of the system. In general, all programs developed on the Unity platform are subject to a similar architecture. This does not prevent the implementation of software templates and other architectural solutions, in order to increase the efficiency and speed of product writing. Each of the modules can exist independently of each other, but somehow interacts with other modules of the system through calls to event functions. Event functions are a structural feature of programs in Unity.

Scripts in Unity are not subject to the usual type, executed in a loop until they fulfill the set goal. Unity passes control of the script by actually performing the functions of the events described in it. Just a function finished running, control is passed back to Unity, and control is passed to the next function. These functions are called event functions because they are called by the Unity controller in response to events between components. Event functions differ from ordinary ones by predefined names, according to their functionality. The most commonly used event functions Update is performed each time before the program cycle (frame) is updated, and Start, which is called before the first frame and is used to initialize the component. In addition, there are many functions created specifically to respond to certain inter-component events. The following modules can be distinguished in the structure of the developed software: environmental module; agent module; agent generation module; scene editing module; module of interaction with the database. Each of these modules performs a separate function and is connected to the others by objects and events in the program scenes.

The Boids algorithm is used to describe the agent's behavior in the crowd (fig. 6). Separation means a change of direction in order to avoid collisions with close agents. Alignment means changing the direction of movement in accordance with the direction of



movement of neighbors. Cohesion means the desire to change position in the direction of the middle position or center of mass of close agents.

Figures 7, 8 and 9 show the editing of the simulation scene of the developed software, the process of modeling and testing of algorithms.

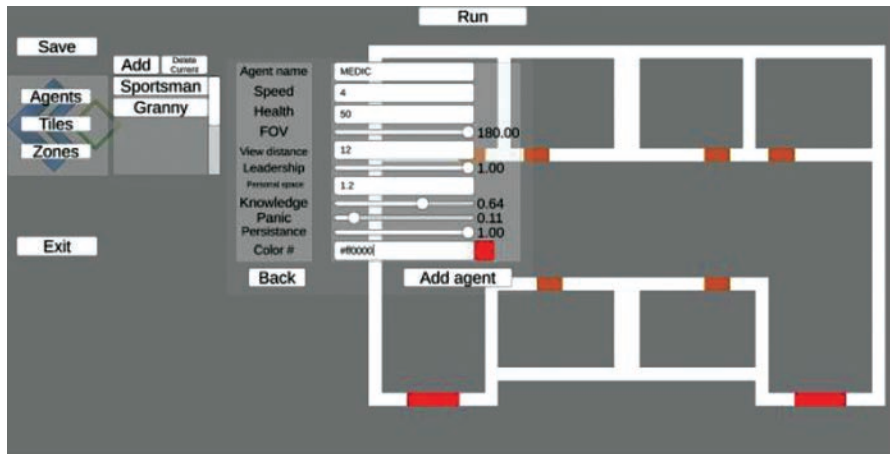


Fig. 7. Editing the simulation scene of the developed software

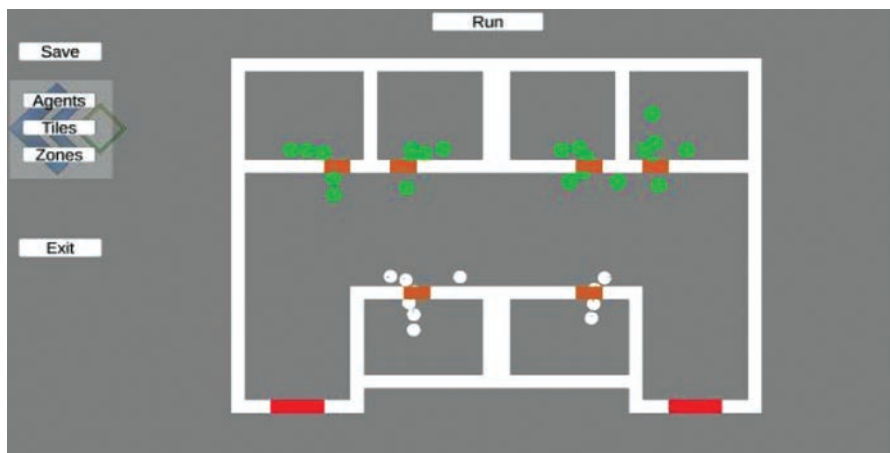


Fig. 8. Modeling process of the developed software

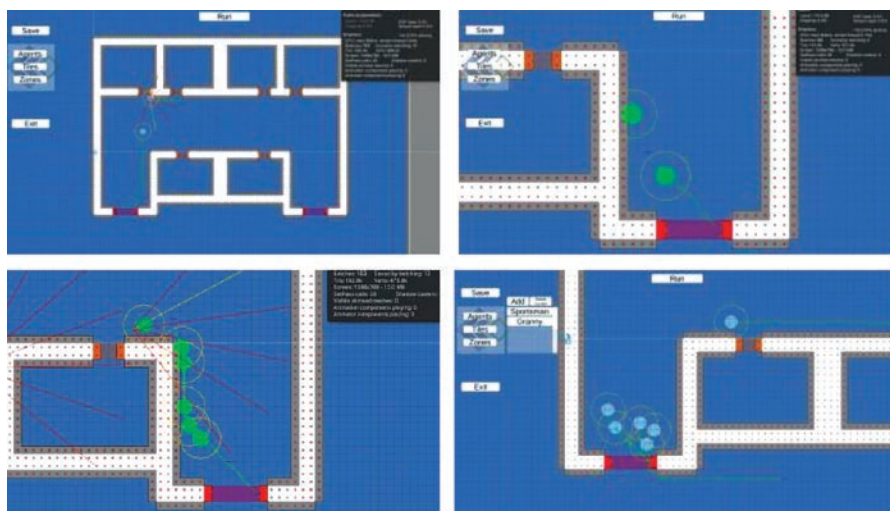


Fig. 9. Testing algorithms

**Conclusions and future work.** In this research existing software solutions for agent modeling and projects are analyzed. Requirements for the developed software are formed and defined. The developed software allows to model the behavior of people during an emergency situation. The developed software was tested and the results according to which

the software meets the requirements were analyzed. Ways to further develop the proposed software are to create a module for viewing simulations, machine analysis of simulations, creating dynamic simulation schedules, introducing new interactive objects of interest to the agent and improving the user interface of the program.

#### References:

1. Crowd Simulation Modeling Applied to Emergency and Evacuation Simulations. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1303/1303.4692.pdf>.
2. Agent-Based Evacuation Model Incorporating Fire Scene and Building Geometry. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6074190>.
3. Agent Perception Modeling for Movement in Crowds. URL: [https://www.researchgate.net/publication/235919357\\_Agent\\_Perception\\_Modeling\\_for\\_Movement\\_in\\_Crowds](https://www.researchgate.net/publication/235919357_Agent_Perception_Modeling_for_Movement_in_Crowds).
4. Crowd simulation influenced by agent's socio-psychological state. URL: <https://arxiv.org/abs/1004.4454>.
5. NetLogo. URL: <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>.
6. Utilizing Python for Agent-Based Modeling: The Mesa Framework. URL: [https://www.researchgate.net/publication/344675633\\_Utilizing\\_Python\\_for\\_Agent-Based\\_Modeling\\_The\\_Mesa\\_Framework](https://www.researchgate.net/publication/344675633_Utilizing_Python_for_Agent-Based_Modeling_The_Mesa_Framework).
7. A Mesa implementation of the Schelling segregation model. URL: [https://www.researchgate.net/figure/A-Mesa-implementation-of-the-Schelling-segregation-model-being-visualized-in-a-browser\\_fig1\\_328774079](https://www.researchgate.net/figure/A-Mesa-implementation-of-the-Schelling-segregation-model-being-visualized-in-a-browser_fig1_328774079).
8. A\* Pathfinding Project. URL: <https://arongranberg.com/astar/front>.

#### **Олещенко Л.М., Медведєв М.Г., Кобрин Д.Р., Сукало М.Л. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ АГЕНТНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ НАСЕЛЕННЯ У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

*Можливість прогнозування поведінки населення в надзвичайних ситуаціях цінна в багатьох контекстах. Ситуації, пов'язані з панікою, використовуються для моделювання поведінки натовпу й розроблення програмних рішень для задач евакуації населення під час виникнення надзвичайної ситуації. У статті розглянуто дослідження моделей руху людей у надзвичайних ситуаціях, проаналізовано існуючі фреймворки й програмні засоби для агентного моделювання поведінки натовпу. На основі проведених досліджень про поведінку людей у натовпі й доступних підходів до моделювання руху людей і натовпу в надзвичайній ситуації сформульовано вимоги до програмного забезпечення: можливість конфігурації кожного з агентів; можливість зміни геометрії приміщень; параметризація моделі; коректна робота алгоритмів за великої кількості агентів; урахування поля зору агентів; реалізація дотримання особистого простору людини; реалізація алгоритму для зміни траєкторії руху в разі зіткнення; реалізація феноменів паніки натовпу; розрахунок густини натовпу; можливість випадкового розподілу агентів; можливість ручного розподілу агентів; імпорт та експорт результату аналізу програми у формат JSON. Представлено загальний опис архітектури й розроблених програмних модулів створеного програмного забезпечення. Створені модулі містять модуль навколишнього середовища, модуль агента, модуль генерації агентів, модуль редагування сцени, модуль взаємодії з базою даних. Описано архітектуру програмного забезпечення, розробленого на платформі Unity, і взаємодію основних компонентів. Для розроблення програмного забезпечення використано технології A\* Pathfinding Project для забезпечення гнучкого й надійного пошуку шляхів, фреймворк Django для створення API серверу збереження даних, бібліотеку djongo для інтеграції з базою даних MongoDB.*

**Ключові слова:** програмне забезпечення, надзвичайна ситуація, агентне моделювання, Python, фреймворк Django, Unity, MongoDB.

**Пасєка Н.М.**

ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника»

**Шекета В.І.**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

**Пасєка М.С.**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

**Кулинич М.М.**

Українська академія друкарства

## РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СТАНДАРТІВ GRPD ДЛЯ ЗАХИСТУ ПЕРСОНАЛЬНИХ ДАНИХ

*У статті розглядається та оцінюється вплив інформаційних технологій регуляторних вимог загальних правил захисту даних на процес розробки програмного забезпечення в Європейській економічній зоні й інших регіонах. Описані основні зміни, які зазнає цей процес, та як підготуватися до цих змін. Особиста інформація користувача поділяється на загальні й спеціальні категорії. Пояснюються методи й причини, які необхідно використовувати для збору даних, обробки й публікації. Визначено, що обробка персональної інформації відповідно до вимог Загального регламенту захисту даних повинна відповідати таким умовам: законність, обмежена мета, точність використання даних, мінімізація обсягів зберігання та кількості й принципи конфіденційності. Крім того, необхідно забезпечити збереження даних, щоб запобігти їх витоку за межі організації, яка їх зберігає. На основі досліджень була розроблена й скоригована модель відповідно до потреб індустрії інформаційних технологій для впровадження загальних положень щодо захисту даних у циклі розробки програмного забезпечення. Отриманий перелік рішень, що дозволить розробку програмного забезпечення відповідно до всіх вимог загальних правил захисту даних, і надано бачення необхідних змін у проєкті на етапах збору вимог і розвитку архітектури системи. Це значно зменшує обсяг коштів, необхідних для редагування на наступному етапі розробки. Були виділені спеціальні засоби, які дозволяють шифруванню даних відповідати рівню, передбаченому національним законодавством Європи, і розроблено перелік додаткових інструментів, що повністю відповідають системним вимогам.*

**Ключові слова:** захист даних, персональні дані, програмне забезпечення, вимоги регуляції, інформаційні технології.

**Постановка проблеми.** Процес захисту персональних даних користувачів у наш час набув як ніколи важливо значення, і кожен спеціаліст у сфері інформаційних технологій (далі – ІТ) уже не може обходитись без відповідних навичок. Недотримання чи порушення захисту особистих даних завжди було причиною неймовірно великої кількості випадків, коли вони потрапляли у відкритий доступ. Цим самим порушували права та свободи людей з якими вони були пов'язані. Через це уже постраждали такі компанії: Adobe, eBay, LinkedIn, H&M, Google, Microsoft та Facebook і понесли за це колосальні матеріальні та, що найбільш відчутно репутаційні збитки. А за деяких випадків, такий як при витоку даних з сайту знайомств, ладні викликати суспільний резонанс. Більше

того, зараз через покращення хмарних обчислень та стрімкий розвиток квантових комп'ютерів, що здатні обходити колись надійні механізми захисту даних, питання про забезпечення конфіденційності інформації користувачів, стоїть як ніколи актуально. З цієї причини було вирішено створити спеціальну регуляцію, яка покликана урівноважити права та свободи людей з потребами організацій у їх персональних даних – GDPR (General Data Protection Regulation). Вона представляє собою відносно нову регуляцію із захисту персональних даних у межах Європейської Економічної Зони (далі – ЄЕЗ), яка була розроблена, як заміна для попередньої «Директиви про захист персональних даних» у державах-членах ЄС та організаціях які надають там свої послуги. У будь-якому

випадку, бізнес тепер здійснюється переважно у електронному режимі з використанням програмних засобів. Цей фактор, як ніщо інше демонструє необхідність даної регуляції і водночас пришвидшує процес її адаптації у цикл розробки програмного забезпечення (далі – ПЗ).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На тему захисту персональних даних існує дуже багато робіт, які розкривають ті чи інші аспекти цього процесу. Однак не для аналізу безпосереднього чи опосередкованого впливу регуляції GDPR на процес розробки ПЗ, порівняння його з аналогічними законами, на кшталт HIPAA чи CCPA та побудови на основі цього рішень для відповідності процесу розробки програмного забезпечення до даної регуляції наразі немає. Однак, на даний момент, не існує настільки потужного та впливового інструменту на процес розробки програмного забезпечення як GDPR, оскільки він тягне за собою гігантські штрафи та поширюється на дію цілої ЄЕС. Користуючись поточними даними, існує збірка інструкцій та прикладів від Європейської ради захисту даних, раніше відомої як WP29, однак вони не мають моделі впливу на розробку.

**Постановка завдання.** Є проведення дослідження та аналізу змін які зазнав процес розробки програмного забезпечення після впровадження регуляції GDPR визначених в яких саме ролях може виступати програмний продукт та яке відношення це буде мати до зміненої відповідальності за обробку персональних даних. На основі цього, було створено модель, що забезпечує полегшене та економічно обґрунтоване впровадження дій регуляції у процес розробки ПЗ.

**Об'єктом дослідження** є вплив який привнесли правила та обмеження регуляції GDPR відносно обробки персональних даних в процесі розробки ПЗ.

**Предметом дослідження** є вплив регуляції захисту персональних даних GDPR на процес розробки програмних рішень в організаціях до яких вона застосована.

**Методи дослідження** Для виокремлення нововведень дії регуляції на процес розробки ПЗ було застосовано ізолююче абстрагування, порівняння існуючих рішень в предметній області регуляції захисту даних, використано системний підхід до побудови моделі впровадження цих змін у процес розробки та проведення експерименту його використання на прикладі створення застосунку між-регіонального рівня для пошуку роботи.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Регуляція щодо захисту персональних даних

включає в себе безліч інформації, щоб врегулювати процеси поводження з конфіденційними даними та забезпечити виконання усіх прав суб'єктів даних. Відповідно, внаслідок введених обмежень процеси поведінки з даними мають змінитись, що потягне за собою зміни у роботі готових програмних рішень цих компаній та, навіть, зміни у самому процесі розробки програмного забезпечення в цілому. У загальних рисах описується процес розробки програмного забезпечення і корективи які дана регуляція внесла у це, включені такі поняття як: складання оцінки впливу на конфіденційність даних (DPIA), внесення у процес розробки заходів планування приведення процесу обробки до GDPR, створення реєстру інцидентів з даними, оповіщення суб'єкта про них чи втрату доступу до даних не пізніше ніж за 72 години. На закінчення тут визначаються процеси погодження користувачів на обробку своїх даних, і які саме зміни вони за собою потягнули у сфері ринку ІТ. Приклад, сповіщення про використання їх у куках, створення нової позиції DPO, зобов'язання відносно застосування шифрування, використання псевдоанонімізації, забезпечення функціоналу поінформованості користувача.

**Головна інформація щодо регуляції GDPR.** Регуляція захисту персональних даних була розроблена як еволюцію Директиви із захисту даних, прийнятої ще у 1995 році та представляє його оновлену та адаптовану до сучасних вимог версію. GDPR – складається з 99 статей, які визначають структуру регламенту та покликані покрити головні процеси управління та взаємодії персональної інформацією людей які перебувають у межах Європейської Економічної Зони, а також процесу передачі персональної інформації про них поза її межі. Важливо зазначити, що регламент вступив у законну силу у 2018 році, однак був прийнятий ще у 2016 році. Це пояснюється перш за все, тим що компаніям та організаціям які працюють з персональними даними людей потрібен був час для переходу та адаптацію до нових вимог [1; 2]. Так, наприклад, один лишень процес, збереження інформації в куках зазнав значних змін та покращень, що вилилось у показі спеціальних сповіщень яких, по правилам, має неможливо бути приховати. Також, це було зробленим для того щоб організації могли ідентифікувати шляхи взаємодії та підготуватись до зміни у роботі їх продуктів. Одним з найважливіших та найбільш незрозумілих понять GDPR, а радше сказати сильно відносних, є термін територіального покриття цієї регуляцією. У більшості простих користувачів або ж

людей які не взаємодіють з GDPR на регулярній основі виникає велика кількість питань та непорозумінь пов'язаних саме з територіальною відповідністю певних організацій до вимог регуляції [3; 4]. Справді, будь-яка організація яка фізично або ж через якесь представництво розташована на території ЄЄЗ підпадає під дію регуляції, однак, якщо вона надає свої послуги натуральним особам, про яких буде написано згодом, які на момент використання їх продукту перебували на цій території – то така організація також повинна підпадати під цю регуляцію. Що це означає на практиці? Насамперед те, що компанії мають не обов'язково фізично розташовуватись в Європейському Союзі, а достатньо просто надавати послуги людям які там знаходяться для того щоб у них застосовувати усі обмеження та вимоги регуляції щодо захисту даних.

**Головні терміни та поняття регуляції.** Для того, щоб добре зрозуміти суть регуляції та її потенційний вплив, необхідно в першу чергу, зрозуміти її ключові поняття та оперування ними. Оскільки, ця регуляція містить безліч юридичних термінів та незрозумілих на перший погляд понять, тут представлені частково пояснені та адаптовані під розуміння ІТ – спеціалізації поняття, а саме: «Персональні дані», «Натуральна особа», «Процес обробки персональних даних», «Обмеження обробки», «Контролер даних», «Обробник персональних даних» [5; 6].

Згідно з регуляцією GDPR, контролер або обробник персональних даних може передати своє представництво іншим юридичним чи фізичним особам, як показано на рис 1.

Це може статися тільки у письмовій формі та за умови створення організації яка буде здійснювати представництво у межах Європейського Союзу чи громадянства фізичної особи-представника у якійсь із цих країн.

Важливим аспектом у регуляції із захисту даних є саме поняття головного закладу організації, який містить:

1. Щодо контролера персональних даних з установами в більш ніж одній державі-члені, місце його центральної адміністрації на території Європейського Союзу, якщо рішення про цілі та способи обробки

персональних даних не приймаються в іншому представництві контролера в цій же зоні а також, та остання установа має повноваження реалізувати такі рішення.

2. Щодо обробки персональних даних з установами в більш ніж одній державі-члені, місце його центральної адміністрації на території Європейського Союзу, або, якщо процесор не має центральної адміністрації в цій же зоні, установи процесора, де основна діяльність з обробки в контекст діяльності установи, що займається обробкою, відбувається в тій мірі, в якій на обробника поширюються конкретні зобов'язання згідно з цим регламентом GDPR.

3. «Підприємство» означає фізичну або юридичну особу, яка здійснює господарську діяльність, незалежно від її юридичної форми, включаючи товариства або асоціації, які регулярно здійснюють господарську діяльність;

4. «Група підприємств» означає контролюючу компанію та її контрольовані підприємства;

5. «Зобов'язуючі корпоративні правила» означають політику захисту персональних даних, якої дотримується контролер або обробник, створений на території держави-члена для передачі або набору передач персональних даних контролеру або обробнику в одній або декількох третіх країнах в межах групи підприємств, що здійснюють спільну господарську діяльність.

Розібравшись із головними поняттями регуляції GDPR, можна рухатись до більш детальних пояснень та глибокого аналізу детальних її аспектів та процесу впливу на розробку програмного забезпечення.

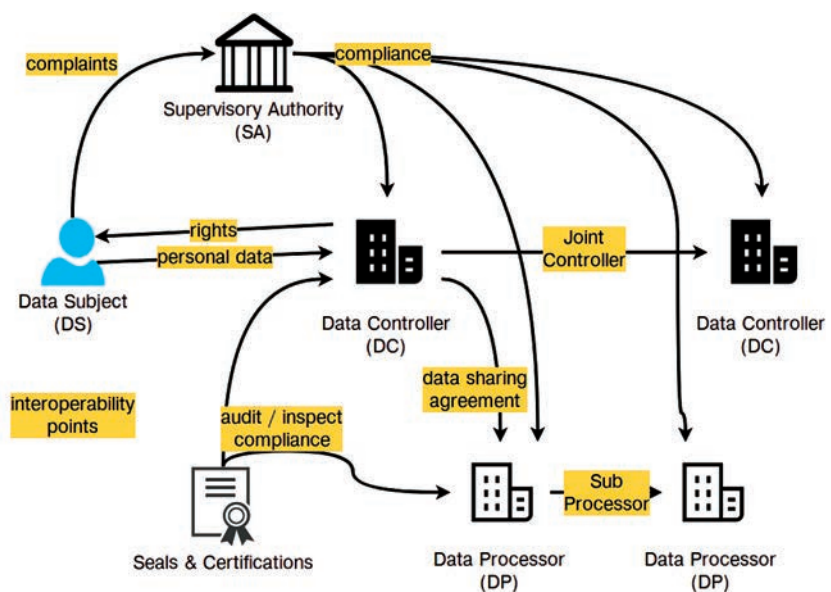


Рис. 1. Зображення позиції контролера даних у процесі їх обробки

### Поділ даних системи на спеціальні категорії.

Відповідно до обмежень по збору звичайних даних, що саме по собі вимагає згоди особи яку ці дані стосуються, GDPR визначає необхідність визначення ще декілька категорій спеціальних категорій даних і пояснює це тим, що для їх обробки та збір необхідно мати особливий дозвіл. Це пояснюється тим, що існують дані для роботи з якими має бути спеціальна вагома причина. До них відносяться: дані про расове чи етнічне походження, політичні погляди, релігійні чи філософські переконання оскільки саме вони найчастіше стають причиною дискримінації та нерівного поводження у суспільстві [7; 8]. Також сюди відноситься, дані про членство в профспілках, дані що стосуються здоров'я, статеве життя людини, обробка генетичних чи біометричних даних з метою однозначної ідентифікації фізичної особи. Розглянувши та знайшовши більш чіткі визначення про те що саме являють собою біометричні, генетичні чи дані про здоров'я суб'єкта, стає зрозуміло що навіть проста обробка даних трекінгової системи для рейтингової системи з імовірністю уже майже 100% процентів підпадає під це визначення. Цим самим приводячи ці категорії даних до особливої уваги з боку розробників програмного забезпечення під час самостійного аналізу чи виконання вимог від замовника. Оскільки, питання про захист даних стає проблемою усієї організації і вимагає зібраної роботи всіх її підрозділів. Важливо також є розуміти обставини коли з ними чітко та однозначно заборонено працювати, а коли існують виключення цьому процесі для кожного з цих типів: генетичні дані; біометричні дані; дані щодо здоров'я [9].

Проте, існують виключення коли ці дані можуть бути оброблені програмним продуктом без дозволу користувача:

- суб'єкт даних надав явну згоду на обробку його персональних даних для однієї або декількох визначених цілей, за винятком випадків, коли законодавство Європейського Союзу або держави-члена передбачає, що заборона не може бути скасована суб'єктом;

- обробка необхідна для виконання зобов'язань угоди та здійснення конкретних прав контролера або суб'єкта даних у сфері зайнятості або для забезпечення соціально визначених цілей, наскільки це дозволено законодавством ЄС чи держави-члена. Або ж колективний договір відповідно до законодавства держави-члена, передбачає належні гарантії;

- обробка необхідна для захисту життєвих інтересів суб'єкта даних або іншої фізичної особи, коли суб'єкт даних не може дати згоду;

- організація займається тим про що йдеться у цих даних, наприклад: це політична партія або застосунок для визначення серцевої активності протягом дня. Однак тут повинні бути представлені певні гарантійні зобов'язання про нерозголошення цієї інформації;

- обробка стосується персональних даних, які суб'єкт даних явно оприлюднює;

- обробка необхідна для встановлення, здійснення або захисту юридичних вимог або коли суди діють у своєму призначенні;

- обробка необхідна з причин суттєвих суспільних інтересів на основі законодавства ЄС або держави-члена, які повинні бути у відповідності до переслідуваної ними мети, поважати суть права на захист даних та передбачати відповідні та конкретні заходи для захисту основних прав та інтересів суб'єкта цих даних;

- обробка необхідна у медичних цілях для оцінки працездатності працівника, медичного діагнозу, надання медичної чи соціальної допомоги, покращення лікування або управління системами охорони здоров'я, також, так можна робити у зв'язку з договірними зобов'язаннями.

За певних умов обробка спеціальних категорій даних може відбуватись іншою особою, але тільки якщо ця особа є професійним працівником чи дані є під відповідальністю його професійної таємниці. Варто зважати, що держави-члени окрім виконання цих зобов'язань мають, вводити накладати додаткові умови. Тому перед розробкою певного функціоналу варто провести аналіз законодавства у країні використання ПЗ та відредагувати його роботу у відповідність з цими змінами.

**Відмінності між даними для ідентифікації та чутливими даними.** Дані для ідентифікації персони та персональна інформація суб'єкту даних мають між собою багато спільного, але не є тим самим. Це важливо розуміти у процесі роботи з ними, оскільки відповідно до NIST, дані для ідентифікації особи – це будь-яка інформацію про натуральну живу особу, яка може бути використана для визначення та відслідковування персони цієї особи. До цих даних відноситься : ім'я, номер платника податків, дата або місце роботи, інформація про дівоче ім'я метрі чи біометричні дані а також, будь-яка інша інформація, за допомогою якої можна визначити конкретну особу. У найбільш повному розумінні, тут може виступати будь-що, наприклад : інформація про стан здоров'я, навчання чи фінансовий стан, до якої входять поведінкові звички користувача, переваги під час покупки товарів, дані про расову чи

етнічну приналежність тощо. Регуляція GDPR привносить зміни та доповнення до поняття персональних даних, включаючи до них IP-адресу, дані куків, ідентифікатори пристроїв, та забороняє відслідковування такої інформації без дозволу їх власника. У той самий час у регуляції майже не міститься переліку засобів, якими органи управління організації повинні користуватись для захисту конфіденційних та персональних даних. Відповідно до стандарту ISO 27001, щоб правильно класифікувати інформацію, як просто чутливі дані чи персональну інформацію, необхідно скласти керівні принципи, що пояснюють, як інформація повинна класифікуватися та маркуватися. Ці вказівки повинні описувати, як з ними слід поводитися залежно від їх класифікації, включаючи обмеження доступу, захисту копій, зберігання, розсекречення та знищення. Для більшої ілюстрації усієї важливості цього процесу, відомо що регуляція, навіть, зобов'язує зберігати друковані копії других, у зачиненій під ключ шафці до якої мають мати доступ лише уповноважений на це персонал. Принцип GDPR щодо обмеження зберігання також вимагає від контролерів або обробників даних встановлення строків обмеження зберігання, а це означає, що конфіденційна особиста інформація не повинна зберігатися довше, ніж це необхідно, і, де це можливо, слід визначати цей період зберігання.

**Обов'язки системи як контролера чи обробника персональних даних.** GDPR приносить нові вимоги які застосовуються напряму до обробника даних, і виділяють його як окремий об'єкт взаємостосунків із зобов'язанням приймати усі заходи щодо її захисту та експорту за межі дії регуляції. Система, яка виступає у ролі обробника даних спільно з їх контролером, мають використовувати усі заходи та міри обережності необхідні для процесу захисту персональних даних відносно до дій GDPR. Обробники також повинні допомагати організаціям, які керують даними з ціллю їх захисту, складання аналізу своїх мір впливу на цілий процес захисту. Наприклад, у випадку виявлення невідповідності процесу система у ролі обробника даних, у відповідності до регуляції GDPR, зобов'язана повідомляти це організацію яка надала їм доступ до даних, відповідно що для цього мають бути присутніми системи аналізу історії змін. Згідно з вимогами дій регуляції, для права обробника на якісь дії з персональними даними необхідно скласти чіткий договір, який буде включати у себе частину яка може містити інструкцію стосовно того як саме ці дані мають

бути використаними чи відмову від залучення у цей процес інших обробників. І тут настають вимоги до програмного продукту в плані обліку та аналізу усіх сторонніх сервісів та служб яким надають доступ до отриманих даних. Наприклад, під час логування чи аналізу цієї інформації у стороннього провайдера цих послуг. На відміну від систем-обробників даних, контролери цих даних несуть відповідальність за увесь процес її обробки. Згідно з принципом відповідальності контролери персональних даних (члени процесу які приймають рішення на передачу персональних даних і її причини) повинні не тільки мати у приведені у відповідність до GDPR процесу але і бути готовими це продемонструвати на практиці. Програмні продукти, які виступають у цій ролі, повинні застосувати відповідні технічні та організаційні рішення для захисту персональних даних, включно з впровадження політики цього процесу. У залежності від того яка природа цих даних, їхній контекст та призначення, включно з усіма ризиками, права та свободи їх суб'єктів повинні бути забезпеченими на будь-якому етапі.

**Вплив головних принципів GDPR на процес обробки даних.** Обробка персональних даних усіма системами загалом, та програмними в особливості, відповідно до регуляції GDPR повинна відбуватись у законній, прозорій, чесній та зрозумілій для користувача формі, яка не порушує права власності суб'єктів даних на їх інформацію. Загалом існує 6 головних принципів у використанні даних: законність; обмеження мети; мінімізація кількості даних; точність їх використання; мінімізація терміну зберігання даних; конфіденційність.

**Зміст позиції Data protection officer для розробки ПЗ.** Як вказано у попередніх розділах, GDPR має досить чітку та охоплюючу структуру, яка покликана захищати та оберігати права людей відносно їх персональних даних. Однак, просто перерахувати спеціальні пункти та обов'язки організацій є недостатньо для забезпечення виконання цих обов'язків. З цієї та інших причин, включаючи також і складність зміни вимог до ПЗ, було визначено та впровадження нового типу позиції, а саме - службовця з питань захисту даних (Data Protection Officer). Регуляція GDPR визначила особливі випадки коли така позиція є обов'язковою для створення у компанії:

- кількість працівників компанії – понад 50;
- основна діяльність контролера або процесора складається з операцій обробки, які в силу своєї природи, обсягу та цілей вимагають регулярного та систематичного моніторингу. Мають

прямий вплив на життя та діяльність суб'єкта даних;

– компанія в ході своєї роботи займається обробкою персональних даних, що стосуються кримінальних правопорушень суб'єкта даних;

– обробка даних здійснюється державним органом чи іншою компанією, крім суду, яка діє у судовій якості.

Службовець із питань захисту даних призначається на підставі професійних якостей і, зокрема, експертних знань із законодавства та практики захисту даних та здатності виконувати в галузі розробки ПЗ.

Контролер або обробник повинен опублікувати контактні дані працівника з питань захисту даних та повідомити їх контролюючому органу.

Ось головні обов'язки службовця з захисту даних та з описом їх впливу на процес розробки ПЗ:

1. Інформувати та консультивати контролера або обробника та працівників, які здійснюють обробку своїх зобов'язань відповідно до регламенту GDPR чи інших положень про захист персональної інформації, впливати на формування вимог до ПЗ.

2. Контролювати дотримання цього регламенту, інших положень ЄС або держав-членів про захист даних та політику контролера або обробника стосовно захисту персональних даних. Сюди входить розподіл відповідальності, підвищення обізнаності та навчання персоналу залученого до цієї обробки. Відносно до ПЗ, сюди входить процес атестації та перевірки готових частин продукту на відповідність до вимог по захисту даних GDPR.

3. Надавати консультації щодо запитів оцінки впливу на захисту даних, контролювати її ефективність, включно з аналізом даних та пропозицією змін до процесу розробки.

4. Співпрацювати з контролюючим органом.

5. Зберігати таємницю або конфіденційність щодо виконання своїх завдань відповідно до законодавства Союзу або держави-члена.

Під час виконання своїх завдань службовець з питань захисту даних повинен враховувати ризик, пов'язаний з операціями обробки, беручи до уваги характер, обсяг, контекст та цілі обробки. Під час оприлюднення результатів своєї роботи він має на пряму звітувати до найвищого рівня керівництва компанії. Службовець з захисту персональних даних займає найнижчу позицію у складовій структурі наглядових позицій відповідно до регуляції. У свою чергу, контролер чи обробник даних відповідають за невтручання у роботу службовця з захисту персональних даних та зобов'язуються виконувати наступні пункти: надавати йому своєчасний та конструктивний доступ до всіх без виключення справ

відносно персональних даних клієнтів організації, у випадку з програмним продуктом – даних користувачів; зобов'язуються надавати будь-яку допомогу у процесі виконання службовцем своїх повноважень, а також надавати безперешкодний доступ до персональних даних суб'єктів даних та можливість виконувати операції над ними;

Контролеру чи обробнику даних зі своєї сторони заборонено давати будь-які вказівки чи розпорядження службовцеві з захисту персональних даних щодо його роботи чи будь-яким чином штрафувати за виконання своїх обов'язків. Часто трапляється що службовець із захисту даних відповідає за декілька завдань одночасно, а тому керівництво обробника чи контролера даних повинно пересвідчитись чи не виникне у нього конфлікту інтересів.

З виходом регуляції постала гостра потреба у відповідності роботи ПЗ на території ЄС до вимог GDPR. Оскільки цей процес був доволі багатофазним та включав залучення спеціалістів із декількох галузей було вирішено де-факто перемістити відповідальність за це на Data Protection Officer.

**Вплив прав суб'єкта даних на процес розробки програмного забезпечення.** Важливою складовою цієї регуляції становить визначення об'єктивних прав суб'єкта щодо своїх даних. Найперше виступає право бути проінформованим у прозорій формі про операції які були проведені над особистими даними суб'єкта. Існують наступні визначені права суб'єкта даних відповідно до GDPR: право бути проінформованим; право доступу до своїх даних; право на зміну своїх даних; право бути забутих; право на припинення обробки; право на портативність персональних даних; право на відношення до процесу автоматизованого прийняття рішень та профілювання.

**Висновки.** У роботі було оцінено інформаційно-технологічний вплив вимог регуляції GDPR процесу розробки програмного забезпечення на території ЄС та поза її межами. Описано основні зміни яких зазнає цей процес та яким чином потрібно бути до них готовим. Розподілено персональні дані користувачів на звичайні та спеціальні категорії. Пояснено спосіб та причини які необхідно мати для їх збирання, обробки та оприлюднення. Як було з'ясовано для обробки персональної інформації відповідно до GDPR необхідно задовільняти наступні умови: законності, обмеженої мети, , точності використання даних, мінімізації терміну їх зберігання та кількості, принципу конфіденційності. Щоб краще зрозуміти інформаційно-технічний вплив регуляції був проведений порівняльний аналіз із подібними регулюючими актами про захист



даних у медичній сфері. Наведено їх особливості згідно географічного розповсюдження, сфери впливу та обмежень по типу даних відносно до GDPR. Результатом цього стало висвітлення, як переваг так і недоліків. Були знайдені певні недоліки у GDPR у зв'язку з неконкретною позицією щодо питань визначення продажу даних але це пояснюється глобальним охопленням позиції охорони персональних даних. На основі отриманих результатів було складено рішення які покликано полегшити інтеграцію вимог GDPR відповідностей у процес розробки ПЗ на усіх його рівнях. Починаючи зі збору вимог, використовуючи DPIA та data mapping документи, пошук специфікацій

щодо доступу до даних у наявних політиках конфіденційності продукту. Представлено також технічні способи досягнення відповідності регуляції, таких як шифрування даних різними алгоритмами, створення псевдоанонімізації та обмеження інформації користувача чи використання надавачів хмарних рішень відповідних до GDPR. Для перевірки та оцінки отриманих методів та алгоритмів у роботі було розроблено тестовий програмний продукт як платформу для пошуку роботи на між-регіональному рівні. Цей приклад повинний був надати послуги максимально наближені до реальних повсякденних застосунків на ринку але водночас розглянутий із позицій відповідності GDPR.

### Список літератури:

1. Regulation (EU) 2016/679 of the European Parliament and of the Council of 27 April 2016 on the protection of natural persons with regard to the processing of personal data and on the free movement of such data and repealing Directive 95/46/EC (General Data Protection Regulation). OJ 2016 L 119/1. 2016.
2. ISO/IEC 27000 family. Information security management systems. April 2018.
3. Cuevas A., Cabañas J.G., Arrate A., Cuevas R. Does facebook use sensitive data for advertising purposes? *Worldwide analysis and gdpr impact*. 2019.
4. Sourya Joyee De, Abdessamad Imine. On consent in online social networks: Privacy impacts and research directions (short paper). International Conference on Risks and Security of Internet and Systems. 2018. P. 128–135
5. Jayashree Mohan, Melissa Wasserman, Vijay Chidambaram. Analyzing gdpr compliance through the lens of privacy policy. *Heterogeneous Data Management Polystores and Analytics for Healthcare*. 2019. Springer. P. 82–95.
6. Dijana Peras, Renata Mekovec, Ruben Picek. Influence of gdpr on social networks used by omnichannel contact center. *2018 41 st International Convention on Information and Communication Technology Electronics and Microelectronics (MIPRO)*. IEEE. 2018. P. 1132–1137.
7. Yunsen Wang, Alexander Kogan. Designing confidentiality-preserving blockchain-based transaction processing systems. *International Journal of Accounting Information Systems*. 2018. Vol. 30. P. 1–18.
8. Christopher Millard. Blockchain and law: Incompatible codes? *Computer Law & Security Review*. 2018. Vol. 34. No. 4. P. 843–846.
9. Dijana Peras, Renata Mekovec, Ruben Picek. Influence of gdpr on social networks used by omnichannel contact center. *2018 41 st International Convention on Information and Communication Technology Electronics and Microelectronics (MIPRO)*. IEEE. 2018. P. 1132–1137.

### **Pasieka N.M., Sheketa V.I., Pasieka M.S., Kulynych M.M. DEVELOPMENT OF SOFTWARE USING GRPD STANDARDS FOR PERSONAL DATA PROTECTION**

*This article examines and evaluates the impact of information technology of regulatory requirements of general data protection rules on the process of software development in the European Economic Area and other regions. Describe the main changes that this process entails and how to prepare for these changes. The user's personal information is divided into general and special categories. Explains the methods and reasons that need to be used for their collection, processing and publication. It is stated that the processing of personal information in accordance with the requirements of the General Data Protection Regulation must comply with the following conditions: legality, restricted purpose, accuracy of data use, minimization of storage volumes and quantity, and confidentiality principles. In addition, it is necessary to ensure the preservation of these data to prevent their flow beyond the organization that stores them. On the basis of research was developed and calibrated model in accordance with the needs of the information technology industry for the implementation of general provisions for the protection of data in the software development cycle. Take a list of solutions, allow the software developer to comply with all the requirements of the general data protection rules, and give an idea of the necessary changes in the project during the stages of collecting the requirements and developing the system's architecture. This significantly reduces the amount of costs needed to edit at the next stage of development. Special tools that allow data encryption to meet the level required by the national legislation of Europe were identified and a list of additional tools that fully meet the system requirements was developed.*

**Key words:** data protection, personal data, software, regulation requirements, information technology.

**Піткевич П.І.**

Білоруський державний університет інформатики та радіоелектроніки

## МЕТОДИКА СТВОРЕННЯ РОЗПОДІЛЕНОГО СХОВИЩА ДАНИХ У БАНКІВСЬКІЙ СФЕРІ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

*У статті розкрито методику створення розподіленого сховища даних в банківській сфері у реальному часі. Визначено роль сховища даних сучасних банківських організаціях, описані ключові завдання, які вирішуються за допомогою розподіленого сховища даних, а також окреслено проблеми проектування систем такого класу. Для вирішення даних проблем запропонована методика створення розподіленого сховища даних в банківській сфері у реальному часі. У даному дослідженні описано структуру розробленої автором універсальної багатокомпонентної моделі розподіленого сховища даних в банківській сфері у реальному часі, а також представлений базовий набір компонент сховища і бізнес-об'єктів. Цей базовий набір може бути використаний як основа або шаблон, який може бути налаштований під потреби конкретної банківської організації. Підкреслено, що ключовими завданнями, які необхідно вирішити в процесі розвитку даного дослідження, є: формалізація обов'язкових і опціональних атрибутів для кожного типу сутності; формалізація типів атрибутів і доменів даних; збагачення базового набору компонент і бізнес-об'єктів; формалізація правил неймінга об'єктів універсальної багатокомпонентної моделі розподіленого сховища даних в банківській сфері у реальному часі; апробація запропонованої методики і універсальної моделі на прикладі вирішення конкретного бізнес-завдання в банківській сфері. Архітектура розгортання розподіленого сховища даних в банківській сфері у реальному часі базується на встановленні зв'язку між чотирма блоками управління. Розподілене сховище даних в банківській сфері у реальному часі складається із двох частин: бази даних інформаційної точки та бази значень. Схематично запропоновано потік даних доступу до даних та потік даних із запитамі даних. Наголошено, що дані розподіляються на різні вузли відповідно до правил розподілу, а правила розподілу включають власні хеш-функції та таблиці відображення фрагментації. Зазначається, що для забезпечення високої доступності вузла управління зазвичай потрібно налаштувати кілька вузлів, бо він в основному зберігає ключові налаштування, такі як правила розповсюдження та невелику детальну інформацію, таку як стан кожного активного та резервного вузла, підходить для реалізації на основі подібних архітектур, забезпечуючи впорядковану та послідовну інформацію.*

**Ключові слова:** база даних, сховище, розподілена система, банківська сфера, реальний час, транзакція, централізоване розгортання, обчислення.

**Постановка проблеми.** Технологія баз даних зародилася в кінці 20 століття. Її теорія та технологічний розвиток надзвичайно швидкі, а її застосування набуває все більшого поширення. Важливою галуззю технології баз даних є база даних реального часу. Така база даних побудована за моделями даних у реальному часі. Технологія бази даних у реальному часі є продуктом поєднання системи реального часу та технології бази даних [1].

Спеціалізація та виробництво баз даних у режимі реального часу у сфері передачі даних, зберігання даних, пошуку даних, доступу до даних, обробки даних та відображення даних забезпечують зручну та стабільну підтримку даних для побудови аналітичних додатків на основі історичних даних великої ємності в реальному часі. Це дозволяє прикладній системі повною мірою використовувати цінні історичні дані реального часу з більш високого та глибокого рівня. Зі стрімким

розвитком мережевих технологій кількість даних, що генеруються системами реального часу, зростає в геометричній прогресії, а бізнес-додатки висувають все більш високі вимоги до управління даними в режимі реального часу та характеру програм у реальному часі. Наявна автономна технологія бази даних у реальному часі має великі обмеження як у теорії, так і в практичному застосуванні, і більше не може повністю задовольняти поточні потреби.

У даний час використання бази даних у реальному часі у банківській сфері ще базується на централізованому розгортанні. Упровадження технологій розподілених обчислень та технологій зберігання даних цілком може вирішити ці вузькі місця, з якими стикаються автономні бази даних реального часу. Однак питання методики створення розподіленого сховища даних у реальному часі для задоволення своєчасності обробки заявки

на транзакцію та вимог до пропускнує спроможності транзакцій є складним моментом.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Принципи задоволення потреб зі збереження та передачі даних у банківській сфері протягом багатьох років вивчало чимало вчених. Автори підходили як до питання трансформації цифрової сфери у банківську, так і до механізмів розгортання хмарних середовищ для забезпечення діяльності банківських установ.

Цифрова трансформація вітчизняного банківського середовища в умовах розвитку фінтех-екосистеми розкрита А.І. Гулей та С.А. Гулей [2]. Прикладні аспекти поширення хмарних сховищ даних описані у [3].

У дисертації [4] проведено аналіз можливості впровадження хмарних технологій для забезпечення діяльності банківських установ та підтримки функціонування бізнес-процесів. Розглянуто проблеми та переваги хмарних технологій на різних рівнях архітектурного ландшафту банку з урахуванням специфіки нормативно-правового регулювання діяльності фінансової установи. Автором реалізовано підвищення ефективності обробки інформації регламенту операційного дня банку шляхом модернізації інформаційної архітектури банку на основі впровадження хмарних технологій.

І.І. Бородій, Я.С. Парамуд та В.В. Сав'як [5] розглянули принципи побудови програмної системи формування агрегованих даних, а також основні принципи побудови програмних систем формування агрегованих даних. Науковцями проведено їхній порівняльний аналіз, запропоновано альтер-

нативний принцип побудови програмної системи. За цим принципом побудови можна усунути проблеми швидкої та надійної обробки даних, масштабування, автоматизації роботи складових частин програмної системи, якості та безпеки даних.

Із зарубіжних авторів варто відзначити таких, як: Apostu A., Rednic E., Puican F. [6], Martins, Pedro & Sá, Filipe & Caldeira, Filipe & Abbasi, Maryam [7], Zissis D., Lekkas D. [8], Barkhordari, Mohammadhossein & Niamanesh, Mahdi [9], Noaman, Amin & Yousef, Amin [10], Ambodo B. S., Suryanto R., Sofyani H. [11], Yang, Weiwen & Qu, Yanzhen [12], Billel, ARRES & Nadia, Kabachi & Boussaid, Omar [13], Krishnaveni S. & Hemalatha, M. [14] та ін.

Проте, враховуючи описані наукові набутки за темою, питання розкриття методики створення розподіленого сховища даних у банківській сфері у реальному часі залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

**Постановка завдання.** Розкрити методику створення розподіленого сховища даних у банківській сфері у реальному часі.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Розподілена архітектура розгортання сховища даних в банківській сфері у реальному часі показана на рисунку 1.

В архітектурі розгортання вузли управління є адміністратором усього розподіленого сховища даних в банківській сфері у реальному часі і в основному зберігають інформацію про метадані системи, включаючи ключову інформацію, таку як режим розповсюдження даних, стан кожного вузла та стан узгодженості активних та резервних вузлів.



Рис. 1. Архітектура розгортання розподіленого сховища даних в банківській сфері у реальному часі

Розподілене сховище даних в банківській сфері у реальному часі складається із двох частин: бази даних інформаційної точки та бази значень, як показано на рисунку 2.

Вузли планування належать до рівня розподіленого доступу. Уніфікований інтерфейс дозволяє програмам отримувати доступ до розподіленого сховища даних в банківській сфері у реальному часі як цілісної логічної сутності. Крім того, вузол планування також належить до розподіленого рівня розташування, який є розподільником та збирачем даних. В основному він відповідає за розподіл даних, збір результатів запитів та планування завдань. Коли розподілений вузол здійснює запити та отримує доступ до даних на декількох вузлах, обробка одночасного доступу дозволяє паралельно обробляти кілька запитів даних на декількох вузлах зберігання, тим самим забезпечуючи ефективний розподілений доступ до даних.

Вузли даних належать до розподіленого рівня зберігання. Кожен вузол даних запускається та керує екземпляром бази даних. Вузол даних відповідає за фактичне зберігання всіх системних даних бази даних, отримує дані від вузла планування, виконує розкладене завдання запити, а результат виконання повертається до прикладної програми через вузол планування. Кількість вузлів даних обмежена лише важкими умовами, такими як пропускна здатність Інтернету та фізичні умови приміщення обладнання. Кожен вузол даних зберігає лише дані, що належать до відповідного розділу, і логічно еквівалентні. Активні та резервні вузли даних реалізують надмірність даних між вузлами.

Інформаційна база точок тегів містить таблицю основної інформації точок обстеження з тегом точки (назва\_точки), що містить основну інформацію про конфігурацію точки тегу, наприклад опис точки тегу, алгоритм стиснення. Користувач може запитувати основну інформацію точки тегу з цієї інформаційної бази даних тегів. База даних цінностей містить кеш цінностей у реальному часі та сховище історичних даних. Кожен запис відображає позначку часу, значення та якість даних реального часу, які генеруються точкою тегу. Користувачі можуть запитувати значення даних у реальному часі з бази даних цінностей. Тому два основні виміри розподіленого сховища даних в банківській сфері у реальному часі – це точки тегів і час даних. Якщо потрібно розподілити всі дані розподіленого сховища даних у реальному часі на декілька вузлів, необхідно почати з цих двох вимірів.

Зберігання метаданих: Таблиця точок тегів зберігається як таблиця метаданих на вузлі планування, і кожен вузол планування містить повну інформацію про точку тегу.

Резервне копіювання декількох вузлів планування. Вузол управління контролює стан вузлів планування та використовує потік синхронізації для виконання відновлення.

Потік даних доступу до даних показаний на рисунку 3. Дані надсилаються з сервера додатків або клієнта на вузол планування. Вузол планування надсилає дані до різних вузлів основних даних відповідно до правил розподілу даних, а вузол основних даних пересилає дані до резервного вузла під час процесу зберігання.

Інформація про тег точки

Тег точки Ім'я 1	Тег точки Опис 1	Тег точки ID 1	Алгоритм стиснення 1	...
Тег точки Ім'я 2	Тег точки Опис 2	Тег точки ID 2	Алгоритм стиснення 2	...
...				
Тег точки Ім'я n	Тег точки Опис n	Тег точки ID n	Алгоритм стиснення n	...

Значення бази даних

Тег точки Ім'я 1	Мітки часу	Значення	Статус	Мітки часу	Значення	Статус	...
Тег точки Ім'я 2	Мітки часу	Значення	Статус	Мітки часу	Значення	Статус	...
...							
Тег точки Ім'я n	Мітки часу	Значення	Статус	Мітки часу	Значення	Статус	...

Рис. 2. Таблиця точок міток і таблиця значень даних

Потік даних виглядає так, як показано на рисунку 4. Запит та умови запити надсилаються від сервера додатків або клієнта до вузла планування. Вузол планування використовує моменти тегів і діапазони часу, які беруть участь в умовах запити. За допомогою правил розповсюдження фільтруються відповідні вузли даних, розділяються та реорганізуються декілька підзапитів для розподілу на декілька вузлів даних, кілька вузлів даних обробляють запити паралельно, завершують результати та повертають результати до вузла планування. Вузол планування чекає всіх виділених підзадач. Після того, як запит поверне результат, він здійснить процес

агрегації та надішле результат на сервер додатків або клієнта.

Це передбачає виділення первинних і вторинних вузлів. Кожен підзапит може бути надісланий лише до вузла даних або резервного вузла, за винятком випадків, коли запит буде продовжувати надсилатися з вузла планування на інший вузол для виконання запити (одночасно повідомляти про стан вузла управлінському вузлу). Вузол планування може вибрати вузол розповсюдження, визначаючи зайнятість активного та резервного вузлів, а вузол даних періодично повідомляє про поточний активний стан та рівень зайнятості вузла управління. Вузол планування також періодично синхронізує

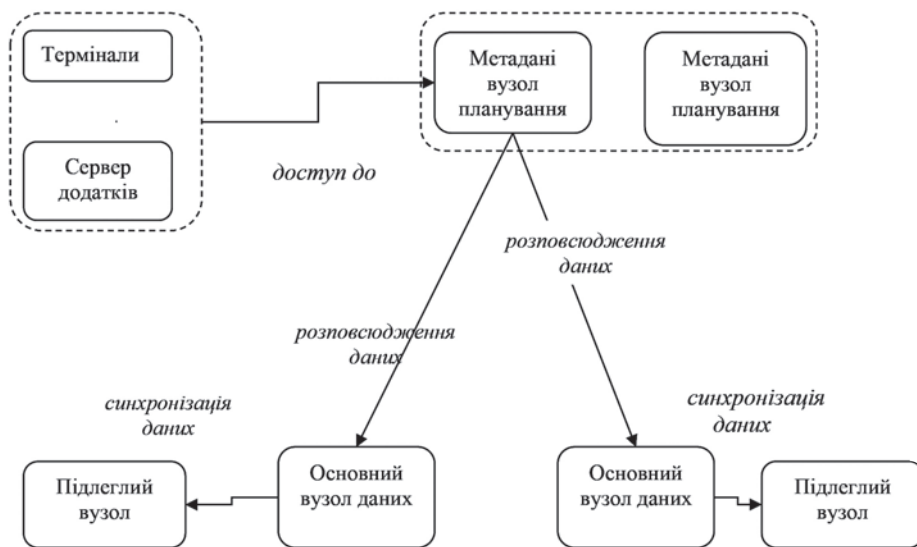


Рис. 3. Потік даних доступу до даних

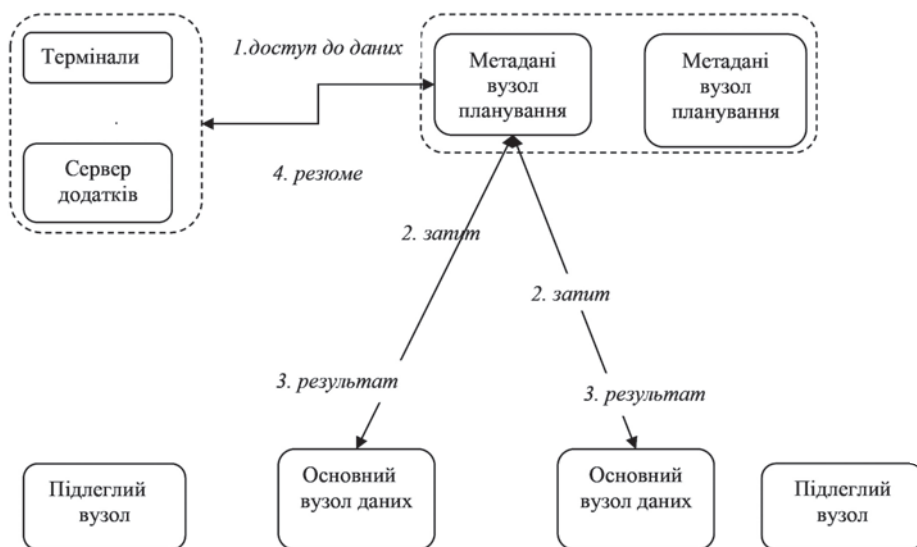


Рис. 4. Потік даних із запитами даних

всі статуси вузла даних з вузла управління. Показник зайнятості можна зручно виміряти на основі середнього завантаження процесора, середнього використання мережі, поточного використання диска та поточного використання пам'яті.

При розробці правил розповсюдження необхідно враховувати актуальність точки тегу даних (якщо є можливість розмістити частину операцій із запитами безпосередньо всередині вузла даних, це, очевидно, важливіше, ніж концентрувати дані обчислення після передачі даних у вузол планування), а також врахувати ефективність паралельної обробки розподіленої архітектури.

Дані розподіляються на різні вузли відповідно до правил розподілу. Правила розподілу включають власні хеш-функції та таблиці відображення фрагментації. Точки міток та дані можуть бути розподілені до хеш-функції та таблиці відображення фрагментації.

Якщо правило розповсюдження не встановлено заздалегідь до запуску всього розподіленого сховища даних в банківській сфері у реальному часі, таблиця відображення фрагментації автоматично формується відповідно до кількості вузлів даних після запуску. Перед доступом до точок тегів і даних параметри, пов'язані з хеш-функцією, ще потрібно встановити через клієнт управління. Правила розповсюдження безпосередньо передаються на вузол управління для зберігання. Вузлу планування потрібно отримати правило розповсюдження від вузла керування перед розповсюдженням точки мітки та даних. Після того, як вузол планування вперше отримує правило розподілу, воно буде збережено в пам'яті. Не потрібно повторно отримувати правило розподілу кожного разу, коли дані розподіляються. Якщо вузол даних змінюється під час розширення або скорочення системи, правило розповсюдження потрібно змінити, вузол планування потрібно перезапустити.

Оскільки загальна кількість даних змінюється, може виникнути необхідність розглянути питання про розширення або скорочення вузлів даних. Зміна вузлів даних повинна враховувати вирівнювання та перерозподіл даних.

Система реального часу використовує таблицю відображення фрагментації та спосіб розподілу хеш-розподілу у два шари. Стратегію перерозподілу можна розробити так, що хеш-функція не змінюється, а лише змінює таблицю відображення фрагментації. Наприклад, нова таблиця відображення автоматично генерується відповідно до нової кількості вузлів, і вузол планування порівнює різницю між старою та новою табли-

цями відображення фрагментації, щоб встановити відповідний шлях руху фрагментів кожного вузла даних і розподіляє його для кожного даного вузла.

Більш ефективний підхід полягає у рівномірному розподілі даних по всій системі баз даних. Для забезпечення високої доступності вузла управління зазвичай потрібно налаштувати кілька вузлів. Він в основному зберігає ключові налаштування, такі як правила розповсюдження та невелику детальну інформацію, таку як стан кожного активного та резервного вузла, підходить для реалізації на основі подібних архітектур, забезпечуючи впорядковану та послідовну інформацію.

Крім того, синхронізувати стан вузла пам'яті з вузлом управління. Вузол планування в основному зберігає інформацію метаданих точок тегів. Додавання, видалення та модифікація точок міток виконується у вигляді транзакцій, і необхідно гарантувати атомність та сильну послідовність однієї операції. Тобто кожен функціонуючий вузол планування повинен забезпечувати успішну синхронізацію з усіма іншими нормальними вузлами планування. В іншому випадку потрібно або встановити відповідний статус для вузла, який не вдається синхронізувати, щоб була можливість відновити синхронізацію пізніше, або виконати операцію скасування на успішно виконаному вузлі. Крім того, наступні операції повинні чекати завершення всіх синхронних операцій попередньої операції. Інформація про метадані вузла планування поділена на блоки, і всі операції мають чітку послідовність, тому нормальний вузол повинен бути абсолютно однаковим для кожного блоку та послідовності блоків. Вузол управління регулярно виявляє ненормальні вузли планування та виконує синхронні операції відновлення.

Дзеркальний механізм копіювання та резервування даних використовується для забезпечення високої доступності кластера. Дизайн повинен відповідати режиму реального часу та відмовостійкості. Однак теорія CAP говорить, що консенсус, доступність та розподіл не можуть задовольнити обидва, а слабка узгодженість має свою сферу застосування, особливо у сценаріях, де потрібні високі вимоги реального часу та низькі вимоги щодо своєчасної узгодженості. Стан основних і дзеркальних вузлів даних контролюється вузлом управління. Вузол планування отримує статус активних та резервних вузлів даних через вузол управління, який може призначати вузли запису та вузли запиту. У той же час стан вузлів даних під час обробки завдань у реальному часі також вчасно надсилається до вузла управління.

Автоматична передача даних від головного вузла до дзеркального вузла не гарантує надійної узгодженості, що лише забезпечує остаточну узгодженість. Вузол планування відправляє завдання запиту відповідно до навантаження.

Щоб не впливати на роботу всієї системи в режимі реального часу, для відновлення винятків використовується режим онлайн-синхронізації. Тобто дані не впливають на нормальне читання та запис під час процесу синхронізації.

Записи модифікації, створені ведучим вузлом у процесі синхронізації даних, записуються у вузлі основних даних у режимі журналу. Після завершення синхронізації журнал та дані оновлення аналізуються. Зміна даних у процесі аналізу все ще додається до кінця журналу, доки не буде завершено весь аналіз журналу. Вузол управління встановлює статус активних та резервних вузлів даних на звичайний.

**Висновки і перспективи подальших досліджень.** У роботі розкрито методику створення розподіленого сховища даних в банківській сфері у реальному часі. Оскільки продуктивність, надійність, масштабованість та інші вимоги до розподіленого сховища даних у реальному часі стають все більш високими у банківській сфері, у цій статті пропонується методика створення розподіленого сховища даних у системах даних реального часу шляхом поєднання розподілених технологій та технологій баз даних реального часу. Одночасно наводиться набір рішень щодо надмірності даних, перерозподілу даних та узгодженості даних.

Перспективи подальших досліджень ґрунтуються на реалізації структурного підходу до створення розподіленого сховища даних в банківській сфері у реальному часі на базі реального підприємства.

#### Список літератури:

1. Проблеми безпеки універсальних платформ управління даними / С.О. Спасітелева, Ю.Д. Жданова, І.В. Чичкань. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2019. 2(6). С. 122–133.
2. Гулей А.І., Гулей С.А. Цифрова трансформація вітчизняного банківського середовища в умовах розвитку фінтех-екосистеми. *Український журнал прикладної економіки*. 2019. Т. 4. № 1. С. 6–15.
3. Іванюк О. Прикладні аспекти поширення хмарних сховищ даних. *Фінансово-кредитна система України в умовах інтеграційних і глобалізаційних процесів: збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та аспірантів (28 квітня 2021 року, м. Черкаси) / ЧННІ Університету банківської справи*. Черкаси, 2021. С. 13–16.
4. Баглай Р.О. Інформаційна архітектура банку на основі хмарних технологій : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.13.06 ; наук. керівник Роскладка А.А. ; Київ. нац. торговельно-еко. ун-т. Харків, 2019. 20 с.
5. Бородій І.І., Парамуд Я.С., Сав'як В.В. Принципи побудови програмної системи формування агрегованих даних. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія: *Комп'ютерні системи та мережі*. Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2018. № 905. С. 25–32.
6. Apostu A., Rednic E., Puican F. Modeling Cloud Architecture in Banking Systems. *Procedia Economics and Finance*. 2012. Vol. 3. P. 543–548. doi: [http://doi.org/10.1016/s2212-5671\(12\)00193-1](http://doi.org/10.1016/s2212-5671(12)00193-1).
7. Martins, Pedro & Sá, Filipe & Caldeira, Filipe & Abbasi, Maryam. Distributed Data Warehouse Resource Monitoring. 2021. 10.1007/978-3-030-68285-9\_24.
8. Zissis D., Lekkas D. Addressing cloud computing security issues. *Future Generation Computer Systems*. 2012. Vol. 28, No. 3. P. 583–592. doi: <http://doi.org/10.1016/j.future.2010.12.006>.
9. Barkhordari, Mohammadhossein & Niamanesh, Mahdi. Hengam a MapReduce-Based Distributed Data Warehouse for Big Data: A MapReduce-Based Distributed Data Warehouse for Big Data. *International Journal of Artificial Life Research*. 2018. No. 8. P. 16–35. doi: 10.4018/IJALR.2018010102.
10. Noaman, Amin & Yousef, Amin. Distributed data warehouse architecture and design [microform]. 2021. URL : [https://www.researchgate.net/publication/36220007\\_Distributed\\_data\\_warehouse\\_architecture\\_and\\_design\\_microform/citation/download](https://www.researchgate.net/publication/36220007_Distributed_data_warehouse_architecture_and_design_microform/citation/download) (Last accessed: 17.03.2021).
11. Ambodo B. S., Suryanto R., Sofyani H. Testing of Technology Acceptance Model on Core Banking System: A Perspective on Mandatory Use. *Jurnal Dinamika Akuntansi*. 2018. Vol. 9, No. 1. P. 11–22. doi: <http://doi.org/10.15294/jda.v9i1.12006>.
12. Yang W., Qu Y. ETL Pipeline Resource Predictions in Distributed Data Warehouses. 2021. URL : [https://www.researchgate.net/publication/228541235\\_ETL\\_Pipeline\\_Resource\\_Predictions\\_in\\_Distributed\\_Data\\_Warehouses/citation/download](https://www.researchgate.net/publication/228541235_ETL_Pipeline_Resource_Predictions_in_Distributed_Data_Warehouses/citation/download) (Last accessed: 17.03.2021).
13. Arrès B., Kabachi N., Boussaid O. A Data Pre-partitioning and Distribution Optimization Approach for Distributed Data Warehouses. 2015. URL : [https://www.researchgate.net/publication/294736835\\_A\\_Data\\_Pre-partitioning\\_and\\_Distribution\\_Optimization\\_Approach\\_for\\_Distributed\\_Data\\_Warehouses/citation/download](https://www.researchgate.net/publication/294736835_A_Data_Pre-partitioning_and_Distribution_Optimization_Approach_for_Distributed_Data_Warehouses/citation/download) (Last accessed: 17.03.2021).
14. Krishnaveni S. & Hemalatha, M. Dependency-Based Query Scheduling in Distributed Data Warehouse Environment. 2013. doi: 10.1007/978-3-319-03844-5\_50.

**Pitkevich P.I. METHODS OF CREATING A DISTRIBUTED DATA STORAGE IN THE BANKING SPHERE IN REAL TIME**

*The article reveals the method of creating a distributed data warehouse in the banking sector in real time. The role of data storage of modern banking organizations is defined, the key tasks which are solved by means of the distributed data storage are described, and also problems of designing of systems of such class are outlined. To solve these problems, a method of creating a distributed data warehouse in the banking sector in real time is proposed. This study describes the structure developed by the author of a universal multicomponent model of distributed data storage in the banking sector in real time, as well as presents a basic set of storage components and business objects. This basic set can be used as a basis or template, which can be customized to the needs of a particular banking organization. It is emphasized that the key tasks that need to be addressed in the development of this study are: formalization of mandatory and optional attributes for each type of entity; formalization of attribute types and data domains; enrichment of the basic set of components and business objects; formalization of the rules of naming objects of the universal multicomponent model of distributed data storage in the banking sector in real time; testing of the proposed methodology and universal model on the example of solving a specific business problem in the banking sector. The real-time deployment architecture of distributed data warehousing in the banking sector is based on establishing a connection between the four control units. Distributed real-time data storage in the banking sector consists of two parts: an information point database and a value database. The data flow of data access and the data flow with data requests are schematically proposed. It is emphasized that the data is distributed to different nodes according to the distribution rules, and the distribution rules include their own hash functions and fragmentation display tables. It is noted that to ensure high availability of the control node, it is usually necessary to configure several nodes, because it mainly stores key settings, such as distribution rules and small details, such as the status of each active and backup node, suitable for implementation based on similar architectures. orderly and consistent information.*

**Key words:** *database, storage, distributed system, banking, real-time, transaction, centralized deployment, computation.*



**Шувалов Д.Р.**

Державний університет «Одеська політехніка»

## АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ПЕЧІ ДЛЯ СПАЛЮВАННЯ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ

У статті досліджуються методи утилізація твердої фази відходів, що дозволить частково чи повністю розв'язати проблему забезпечення вітчизняних харчових підприємств теплом і паром для задоволення виробничих потреб, що особливо важливо в умовах подорожчання природного газу та інших енергоносіїв. У статті представлено розгорнутий програмний комплекс на базі SCADA – системи для лінії автоматизованого управління використання твердопаливних відходів як палива паралельно з газом, що забезпечує температурний контроль в печі і контроль нормативних показників продуктів горіння. Для побудови цього комплексу на першому етапі розроблено структурну схему об'єкту керування, на другому етапі у пакеті Matlab побудовано графіки кривих розгону об'єкта управління за різними каналами («витрата сміття – температура води» і «витрата сміття – концентрація кисню»; «витрата газу – температура води» і «витрата газу – концентрація кисню»; «витрата повітря – температура води» і «витрата повітря – концентрація кисню») під час нанесення одиничних збурень. На третьому етапі для визначення вхідних і вихідних аргументів використано автоматизовану систему управління, що створено на основі мікропроцесорного комплексу SIMATIC S7-400 компанії Siemens. Побудовано структурну схему імітаційного моделювання АСР. Обґрунтовано вибір регулятора і визначено його оптимальні налаштування для перехідного процесу регулювання. Побудовано FBD діаграму з використанням програмного забезпечення SCADA TRACE MODE IDE 6. Після розробки діаграми на основі зроблених нами обчислень було налаштовано програмне забезпечення для лінії автоматизованого управління використання твердопаливних відходів як палива паралельно з газом, що забезпечує температурний контроль в печі і контроль нормативних показників продуктів горіння. У дослідженні науково обґрунтовано формування робочих моделей, вхідних і вихідних даних і створено програму «АРМ оператора», яка реалізує автоматизоване робоче місце оператора технологічного процесу управління нагріву у трубчастій печі з урахуванням неоднорідності палива.

**Ключові слова:** автоматизована система регулювання печі, SCADA-системи, утилізація твердої фази відходів, мікропроцесорний комплекс SIMATIC, управління нагріву у трубчастій печі, неоднорідне паливо.

**Постановка проблеми.** Сьогодні однією з актуальних проблем в Україні є забруднення навколишнього середовища промисловими відходами, серед яких є і відходи харчових виробництв (спиртова барда, пивна дробина, буряковий жом, кавовий і ячмінний шлами тощо). У більшості випадків ці відходи виливають на спеціалізовані земельні ділянки, що призводить до погіршення екологічної ситуації у відповідному регіоні, тому завдання пошуку більш безпечних для довкілля способів утилізації таких відходів залишається досить актуальним. На думку спеціалістів, раціональним є поділ відходів на тверду та рідку фази, після чого першу можна використовувати як добавку до сільськогосподарських кормів або в якості палива, тоді як рідка фаза (вода) повертається у виробничий процес [1].

Утилізація твердої фази відходів дозволить частково чи повністю розв'язати проблему забезпечення вітчизняних харчових підприємств

теплом і паром для задоволення виробничих потреб, що особливо важливо в умовах подорожчання природного газу та інших енергоносіїв, тому у статті запропоновано використання спеціального високоефективного обладнання для спалювання відходів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання автоматизації постачання неоднорідного палива (газ + тверді побутові відходи) і контролю процесу в печі для виготовлення цементу розглянуто в дослідженні Юськів А.С. [2]. У цьому дослідженні для вирішення задач створення надійної системи диспетчерського управління створено систему на основі SCADA-системи [3]. Принцип розробки проектів у SCADA-системі TRACE MODE полягає у створенні віртуальних органів управління і контролю (щитів, пультів операторів, віртуальних регуляторів). У дослідженні [2] всі датчики і виконавчі механізми процесу були підключені до віртуального контролера, який

здійснює управління через командну панель. Інтелектуалізація традиційних SCADA систем шляхом застосування експертної системи – один із головних шляхів розвитку засобів штучного інтелекту. Створення експертної системи за рахунок відкритості подання знань про об'єкт управління, адаптування системи до умов функціонування, автоматична корекція керуюча наслідком при зміні істотних параметрів в процесі функціонування було розглянуто у Черкаському державному технологічному університеті [4]. Було вивчено сучасні наукові рекомендації щодо вибору програмованих контролерів для зняття основних показників роботи печі і їх програмної обробки [5; 6]. Автоматизовану систему управління створено з використанням мікропроцесорного комплексу SIMATIC S7-400. Для побудови автоматизованої системи регулювання печі для спалювання органічних відходів використовується технологія переробки ТПВ (твердопаливних відходів) методом газифікації і плавлення японської компанії Mitsubishi Heavy Industries Environmental & Chemical Engineering (МНІЕС). Ця технологія відноситься до так званих технологій третього покоління і дозволяє знизити обсяг відходів, які направляються на поховання, в 6-8 разів у порівнянні з технологією «стокер» [7; 8].

**Постановка завдання.** Мета статті – розробити програмний комплекс на базі SCADA-системи для лінії автоматизованого управління використання твердопаливних відходів як палива паралельно з газом, що забезпечує температурний контроль у печі і контроль нормативних показників продуктів горіння.

Метою розробки системи є створення програми «АРМ оператора», яка реалізує автоматизоване робоче місце оператора технологічного процесу управління нагріву нафтопродуктів у трубчастій печі.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Програмне забезпечення розроблено в SCADA TRACE MODE IDE 6. Для розробки програми в Trace Mode треба розпочати так званий проект. Проект складається з ресурсів (графічні елементи, анімація та ін.), шаблонів програм, шаблонів екранів, шаблонів документів, бібліотеки компонентів та системи вузлів. Вузол – це компонент, який описує сукупність інформаційних каналів (параметрів), екранів, програм, документів. Першим етапом рішення нашої задачі є побудова FBD діаграми. Це можливо після визначення вхідних і вихідних аргументів.

З урахуванням того, що значення коефіцієнтів передачі та постійні часу були надані як завдання

до дослідження, структурна схема об'єкта має вигляд, наведений на рисунку (рисунок 1). Ця математична схема моделі печі є основою для побудови кривих розгону у пакеті Matlab. Криві розгону об'єкта управління по каналу «витрата сміття – температура води» і «витрата сміття – концентрація кисню» під час нанесення одиничних збурень (рисунок 2). Криві розгону об'єкта управління по каналу «витрата газу – температура води» і «витрата газу – концентрація кисню» під час нанесення одиничних збурень (рисунок 3). Криві розгону об'єкта управління по каналу «витрата повітря – температура води» і «витрата повітря – концентрація кисню» під час нанесення одиничних збурень (рисунок 4).

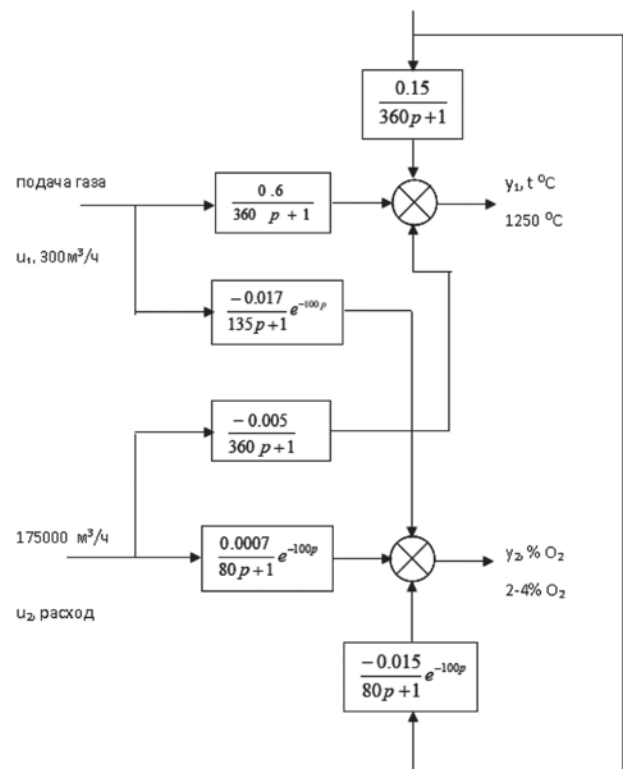


Рис. 1. Структурна схема математичної моделі печі

Для визначення вхідних і вихідних аргументів скористаємось автоматизованою системою управління, створеною на основі мікропроцесорного комплексу SIMATIC S7-400.

Система забезпечує виконання таких функцій:

- 1) автоматичний збір та обробка інформації про технологічний процес;
- 2) автоматична стабілізація параметрів технологічного процесу в режимі прямого цифрового управління;
- 3) автоматична сигналізація про відхилення технологічних параметрів за допустимі межі;
- 4) автоматичний протиаварійний захист;

5) контроль стану основного технологічного обладнання та машин;

6) автоматичне протоколювання відхилень від номінальних значень параметрів технологічного процесу і спрацьовування захистів і блокувань;

7) автоматична друк звітних документів.

Для забезпечення надійної та економічної роботи трубчастої печі передбачені такі контроль-вимірювальні прилади:

1) для контролю температури;

2) для контролю тиску;

3) для вимірювання витрати газу;

4) регулюючі клапани Samson типу 3335/3278, використовувані в системі управління технологічним процесом із застосуванням засобів АСУ ТП (твердого палива), оснащені електропневматичними позиціонерами, з можливістю управління сигналом 4-20 мА і HART-протоколу. Регулюючі клапани комплектуються пневматичним приводом, електропневмопозиціонер з вхідним керуючим сигналом 4-20мА, редуктором тиску повітря з фільтром і відповідними фланцями;

5) в ролі відсікачів застосовані клапани із пневматичним приводом простого дії з поверненням в положення безпеки під дією пружини і запірно-регулюючі клапани, в яких функція відсічення поєднана з функцією регулювання. Відсічні і запірно-регулюючі клапани забезпечені кінцевими вимикачами, відповідними фланцями, соленоїдними клапанами, електропневмоперетворювачами. Клапани-відсічні і запірно-регулюючі клапани використовуються в схемах протиаварійного захисту і відсічення технологічних блоків на установці під час виникнення аварійних відхилень від норм параметрів процесу.

Для збору і обробки інформації встановлено програмований контролер SIMATIC S7-400 компанії Siemens, який включає в себе:

1) модуль центрального процесора;

2) сигнальні модулі, призначені для введення і виведення дискретних і аналогових сигналів;

3) вбудований блок живлення з вихідною напругою = 24В. Для живлення центрального процесора і інших модулів контролера використовується блок

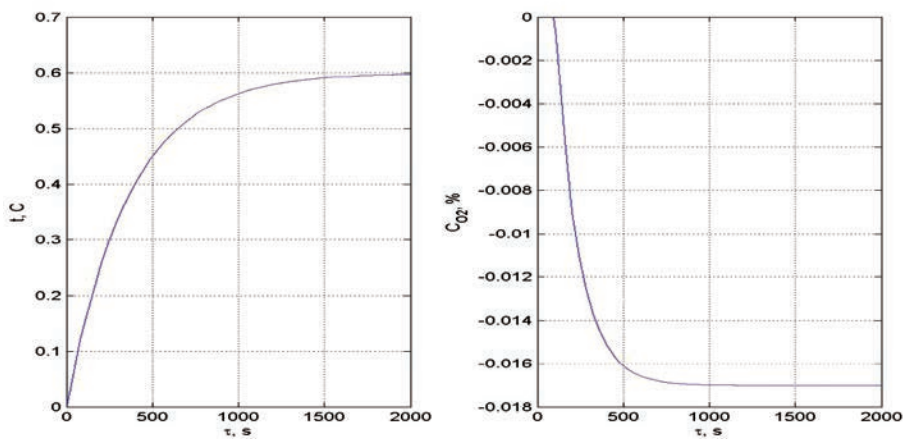


Рис. 2. Криві розгону «витрата сміття – температура води» і «витрата сміття – концентрація кисню»

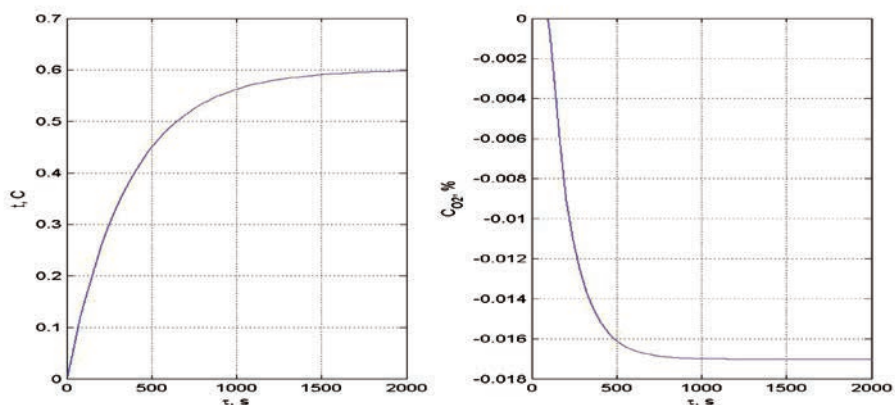


Рис. 3. Криві розгону «витрата газу – температура води» і «витрата газу – концентрація кисню»

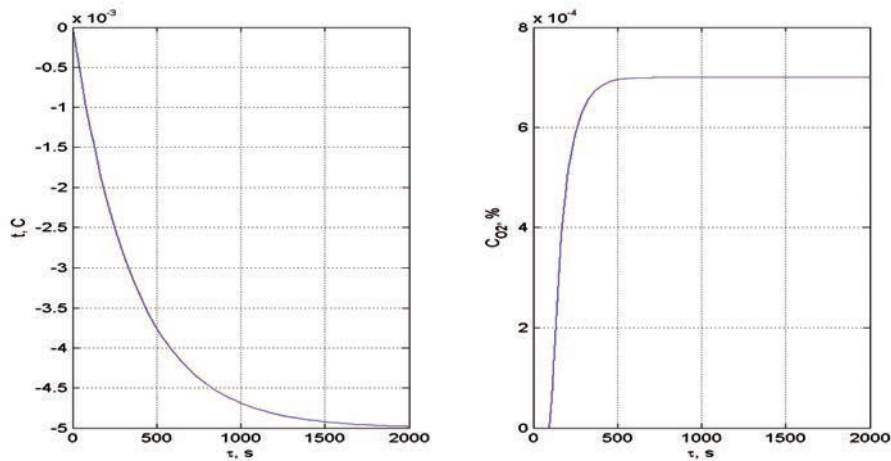


Рис. 4. Криві розгону «витрата повітря – температура води» і «витрата повітря – концентрація кисню»

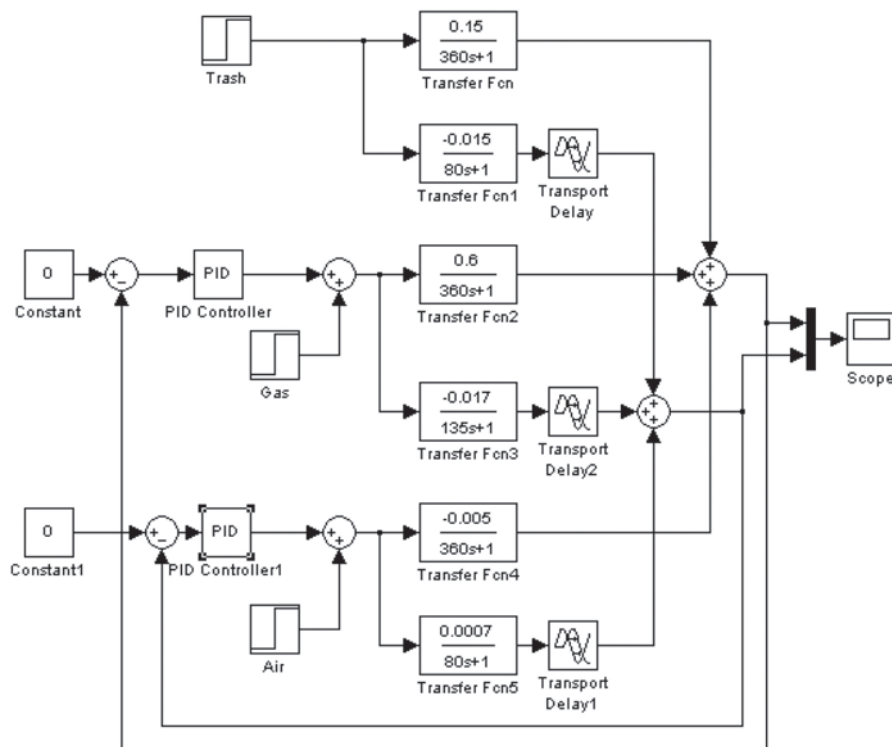


Рис. 5. Структурна схема імітаційного моделювання АСП

живлення PS 405, який використовує для своєї роботи вхідну напругу постійного струму.

Для візуалізації операторського інтерфейсу встановлений промисловий комп'ютер SIMATIC Panel PC IL 77.

Лінійність видаткової характеристики регулюючого клапана, а отже, стійкість системи регулювання до різних впливів технологічного процесу залежить від обраного типу і розміру регулюючого органу. Для регулювання витрати подачі газу на пальники засто-

совується поворотна заслінка на спільній ділянці газопроводу після ПКН (запобіжного клапана низького тиску). Виберемо типорозмір заслінки, побудуємо видаткову характеристику і визначимо коефіцієнт передачі регулюючого органу (РО). Вихідні дані для розрахунку зведені в таблицю 1.

Складемо структурну схему автоматизованої системи регулювання (АСР) в програмному пакеті Simulink (Рисунок 5) і розрахуємо настройки регулятора для подальшого дослідження АСП на ЕОМ.

Використовуємо регулятор і визначимо оптимальні настройки вибраного регулятора для перехідного процесу регулювання. Обробивши криву розгону по каналу «витрата гарячої води -> температура повітря», ми отримали настройки:

$$K_p = 0.6 \frac{^{\circ}C}{кг / с} \quad T = 360 \text{ с} \quad \tau_{ay} = 1 \text{ с}$$

Розрахуємо настройки ПІД регулятора за методикою А.П. Копеловіча

$$K_p = \frac{1.2}{K_{об} * \tau_{ay} / T} = \frac{1.2}{0.6 * 1 / 360} = 720$$

$$T_i = 2 * \tau_{ay} = 2 * 1 = 2$$

$$T_d = 0.4 * \tau_{ay} = 0.4 * 1 = 0.4$$

Звідси:

P складник ПІД регулятора  $K_p = 720$

I складник ПІД регулятора  $K_p / T_i = 720 / 2 = 360$

D складник ПІД регулятора  $K_p * T_d / T_i = 720 * 0.4 / 2 = 144$

Вибрані параметри не задовольняють заданому якості, тому вони були скориговані: P = 720; I = 40; D = 0.

Згідно з отриманими результатами обчислення побудуємо графіки перехідних процесів регулювання температури та концентрації кисню на виході печі для спалювання відходів (рисунок 6).

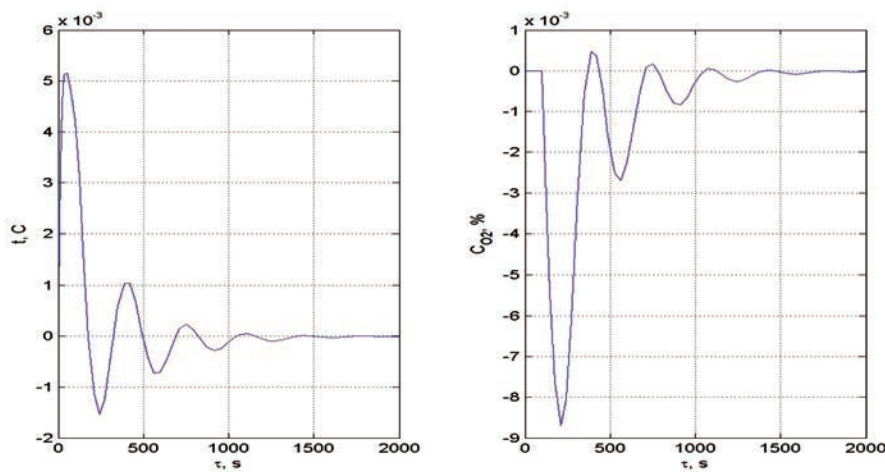


Рис. 6. Перехідні процеси регулювання температури та концентрації кисню на виході печі для спалювання відходів

Таблиця 1

Вихідні дані для розрахунку РО

№ п.п.	Найменування параметру	Умовне позначення	Одиниця виміру	Величина
1.	Щільність вуглеводневого газу при нормальних умовах	$r_{гв}$	кг/м <sup>3</sup>	2.233
2.	температура газу	$t_1$	°C	10
3.	Надлишковий тиск	$P_1$	МПа	0.03
4.	барометричний тиск	$P_б$	МПа	0.1011
5.	Витрата нагрівається мазуту	$D_1$	т/ч кг/с	169.3 47.03
6.	Ентальпія мазуту на вході	$I_{вх}$	ккал/кг кДж/кг	210 880
7.	Ентальпія мазуту на виході	$I_{вих}$	ккал/кг кДж/кг	257 1077
8.	Нижча теплота згоряння газу	$Q_{н}^p$	кДж/м <sup>3</sup>	101300
9.	ККД брутто	$h$	%	97.0
10.	Диаметр газопровода	$D_{гп}$	мм	100
11.	Втрата напору в газопроводі при повністю відкритій заслінці	$DP_{п}$	МПа Н/м <sup>2</sup>	0,003 3000
12.	Коефіцієнт витрати поворотною заслінки представлений на рисунку 5	$a_m$		

На цьому етапі ми отримали всі необхідні дані для побудови FBD діаграми з використанням програмного забезпечення SCADA TRACE MODE IDE 6. Після розробки діаграми на основі зроблених нами обчислень було налаштовано програмне забезпечення для лінії автоматизованого управління використанням твердопаливних відходів як палива паралельно з газом, що забезпечує темпе-

ратурний контроль в печі і контроль нормативних показників продуктів горіння.

**Висновки.** У дослідженні науково обґрунтовано формування робочих моделей, вхідних і вихідних даних і створено програми «АРМ оператора», яка реалізує автоматизоване робоче місце оператора технологічного процесу управління нагріву у трубчастій печі з урахуванням неоднорідності палива.

#### Список літератури:

1. Севостьянов И.В. Процессы и оборудование для виброударного разделения пищевых отходов : монография. Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 417 с. ISBN 978-3-659-47395-1.
2. Юськів А.С. Розробка в Scada-системі імітаційної моделі введення в цементну піч додаткового палива, виробленого з побутових відходів. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки.* Том 29(68). Ч. 2. № 5. 2018. С. 94–99. URL : [http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/5\\_2018/part\\_2/19.pdf](http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/5_2018/part_2/19.pdf) (дата звернення: 16.09.2021).
3. Гурьянов Л.В., Кондратьев Р.Ю., Прошин Д.И. SCADA КРУГ-2000® Новые горизонты применения. *Вісник ИСУП.* 2009. № 2(22). URL : <https://isup.ru/articles/2/322/> (дата звернення: 16.09.2021).
4. Катаева С.Ю., Павлов А.В. АСУ ТП SCADA-SYSTEM в застосуванні інтелектуалізації проектування технологічного процесу. *Young Scientist. Технічні науки.* № 10(50). October, 2017.
5. Галкін П.В., Ключник І.І. Програмування ПЛК в CODESYS : навчальний посібник. Харків : ФОП Панов А.М., 2019. 92 с. ISBN 978-617-7722-62-4.
6. Ritu Shakya, Kritika Rajanwal, Sanskriti Patel, Smita Dinkar. Design and Simulation of PD, PID and Fuzzy Logic Controller for Industrial Application. *International Journal of Information and Computation Technology.* ISSN 0974-2239 Volume 4, Number 4(2014), pp. 363–368.
7. О реализации проекта строительства мусороперерабатывающего завода по технологии газификации и плавления Мицубиси на территории республики Бурятия. URL : <https://www.uncrd.or.jp/content/documents/3205Parallel%20Session-5-Presentation-3-%D0%90%D1%80%D0%B0%D0%B8.pdf> (дата звернення: 19.09.2021).
8. Tomomichi Egusa, Wataru Suzuki, Keiichi Hayashi. Introduction of Remote Monitoring and Operational Support Systems Aiming at Optimal Management of Waste to Energy Plants. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review* Vol. 57 No. 2 (June 2020). URL : <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e572/e572040.pdf> (дата звернення: 19.09.2021).

#### Shuvalov D.R. AUTOMATED FURNACE CONTROL SYSTEM FOR ORGANIC WASTE INCINERATION

*The article examines the methods of solid waste disposal, which will partially or completely solve the problem of providing domestic food companies with heat and steam to meet production needs, which is especially important in the face of rising prices for natural gas and other energy sources. The article presents a comprehensive software package based on SCADA – a system for automated control of solid fuel waste as a fuel in parallel with the gas, which provides temperature control in the furnace and control of normative indicators of combustion products. To build this complex at the first stage developed a block diagram of the control object, at the second stage in the Matlab package built graphs of the acceleration curves of the control object on different channels (“garbage flow – water temperature” and “garbage flow – oxygen concentration”; “gas consumption – water temperature” and “gas consumption – oxygen concentration”; “air flow – water temperature” and “air flow – oxygen concentration”) when applying single perturbations. In the third stage, an automated control system based on the Siemens SIMATIC S7-400 microprocessor complex was used to determine the input and output arguments. The structural scheme of simulation modeling of ACP is constructed. The choice of the regulator is substantiated and its optimal settings for the transient process of regulation are determined. FBD diagram was built using SCADA TRACE MODE IDE 6 software. combustion. The study scientifically substantiates the formation of working models, input and output data and created a program “Workstation operator”, which implements an automated workplace operator technological process of heating control in a tubular furnace, taking into account the heterogeneity of fuel. Experimental application of research results is substantiated by a mathematical apparatus, software is developed. At present, the experimental implementation of the results is being carried out, which will be covered in further work.*

**Key words:** automated furnace control system, SCADA – systems, solid phase waste disposal, SIMATIC microprocessor complex, control of heating in a tubular furnace, inhomogeneous fuel.

УДК 621.165.62-192

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/25>**Беднарська І.С.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Риндюк Д.В.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Лементар С.Ю.**

Національний університет харчових технологій

## МОДЕЛЮВАННЯ ГАЗОДИНАМІКИ ВОЛОГОЇ ПАРИ В ГОЛОВНИХ ПАРОПРОВОДАХ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Стаття присвячена розробці комплексного підходу до вирішення питання збільшення терміну експлуатації основного обладнання електростанцій. Пролонгація експлуатації основного обладнання електростанцій є одним із найефективніших напрямів забезпечення окупності капіталовкладень в енергетичну галузь у світі. Особливо актуальними дослідження є для атомних електричних станцій, основне обладнання яких має надвисоку вартість. Досить важливим елементом обладнання на атомній електростанції є система паророзподілу. Термін експлуатації основного металу паропроводів взаємопов'язаний із напружено-деформованим станом, який залежить від газодинаміки потоку. Тому в статті докладно розглядається процес руху вологої пари по головних паропроводах атомної електричної станції з турбіною К-1000-60/3000, а саме система паропроводів «свіжої» пари, що призначена для транспортування насиченої пари від парогенератора до циліндра високого тиску турбіни й сепаратора-пароперегрівача. Вирішення такої задачі реалізовано шляхом створення математичної моделі руху вологої пари й проведення комплексу числових експериментів, спрямованих на дослідження структури течії пари по вказаних паропроводах. Числові експерименти проведено на базі сучасної інженерно-розрахункової системи ПК FlowVision 3.12.01, що призначена для розв'язування задач газодинаміки й теплообміну. Поставлена задача вирішена в 3-х мірній, стаціонарній постановці, із застосуванням моделі повністю стисливої рідини. У статті представлено результати проведення першого етапу комплексу числових експериментів. Отримано хороший збіг із даними контрольно-вимірювальних приладів, розташованих на паропроводах енергоблоку № 2 Хмельницької атомної електростанції. Результатом моделювання є 3-D газодинамічна структура потоку пари, розподіл швидкостей у потоці, температурні поля та розподіли тисків. Аналіз результатів чисельного моделювання дав можливість досить докладно оцінити вплив геометрії паропроводів на газодинамічні характеристики течії вологої пари. На основі отриманих даних побудовані графіки падіння тиску на кожному із чотирьох паропроводів по характерних точках на розрахункових схемах.

**Ключові слова:** атомна енергетика, паропроводи, газодинаміка, математичне моделювання.

**Постановка проблеми.** Атомна енергетика є основною альтернативою викопним видам палива – вугіллю, нафті й газу – в області отримання електроенергії, а також скорочення водночас викиду в атмосферу вуглекислого газу й, таким чином, парникового ефекту [1, с. 12].

За даними різних джерел останнім часом доля атомних електростанцій у виробленні електроенергії поступово зростає [1, с. 263]. Проте час-

тина блоків атомної електростанції (далі – АЕС) близькі до перевищення свого проєктного терміну експлуатації – 40 років [2, с. 48]. У таку складну ситуацію потрапляють блоки Запорізької АЕС 3, Рівненської АЕС 3, Запорізької АЕС 4, Хмельницької АЕС 1 України. Крім того, Сучасна об'єднана енергосистема у зв'язку зі збільшенням частки вироблення електроенергії на сонячних і вітряних електростанціях змушує великі

енергоблоки АЕС потужністю 1 000 МВт працювати не в розрахунковому базовому, а на змінних режимах зі збільшенням кількості пусків і зупинок, які за весь термін служби обмежені нормативними документами, що є додатковим навантаженням на обладнання. Робота на змінних режимах може привести до необхідності розгляду питання про передчасне виведення деяких атомних енергетичних блоків з експлуатації.

У зв'язку з наближенням закінчення терміну встановленого ресурсу обладнання енергоблоків АЕС стає актуальною проблема оцінки технічного стану обладнання, прогнозування залишкового ресурсу й продовження строків його подальшої експлуатації. Це означає, що необхідно розробити засоби й методи безперервної тривалої роботи елементів станції відповідно до вимог енергетичної системи, почати оцінку ресурсу обладнання та дати рекомендації з його подальшої роботи.

Усе це неминуче вимагає проведення комплексу заходів з аналізу стану основного обладнання (роторів і корпусів турбін, клапанів, основного металу паропроводів), вирішення питання про можливу їх подальшу експлуатацію, а також розробки заходів щодо продовження терміну експлуатації.

Продовження терміну експлуатації діючих атомних енергоблоків електростанцій є одним із найефективніших напрямів забезпечення окупності капіталовкладень в енергетичну галузь у світі.

Одним із важливих елементів обладнання на АЕС є система паророзподілу. Система паропроводів «свіжої» пари призначена для транспортування насиченої пари від парогенератора до циліндра високого тиску (далі – ЦВТ) турбіни й пароперегрівача (далі – СПП). Першим кроком до визначення стану паропроводів є дослідження газодинамічних властивостей середовища, яке рухається паропроводами.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розглянемо ряд робіт, присвячених вищевказаній проблематиці, серед яких варто звернути увагу на [2–11].

У нормативних документах [2–4], які офіційно визнані в галузі, описані граничні умови теплообміну в елементах турбоустановок і методи їх розрахунку. Цими методами й вказівками керувались автори робіт [5–9] під час оцінки залишкового ресурсу й подовження експлуатації корпусів і роторів парових турбін, клапанів та інших деталей енергоблоків.

У роботі [5, с. 17] побудована геометрична модель ротора високого тиску турбоустановки Т-100-130 приватного акціонерного товариства (далі – ПАО) «Харківська ТЕЦ-5» з урахуван-

ням даних візуального контролю, отриманих під час планово-попереджувального ремонту. Розраховані граничні умови теплообміну для ротора під час пусків із холодного стану, з неостиглого й із гарячого стану, які змінюються в часі протягом усього періоду пуску. Граничні умови теплообміну розраховувались відповідно до [3, с. 57]. Також під час їх розрахунку авторами враховані зміни параметрів на змінних режимах роботи.

Робота [6, с. 26] присвячена проблемі продовження терміну експлуатації енергетичного обладнання. Предметом дослідження роботи були пошкоджувальність і залишковий ресурс автоматичних захисних клапанів циліндра середнього тиску парової турбіни К-200-130. Отримано дані з теплового й напружено-деформованого стану корпусів клапанів для різних режимів пуску. Визначено сумарну пошкоджувальність та індивідуальний залишковий ресурс. Розрахунки виконувались згідно з [2, с. 44; 3, с. 12].

Відповідно до методики, що регламентується нормативним документом [3, с. 12], авторами [7, с. 57] розраховано довготривалу міцність, яка базується на визначенні коефіцієнту запасу довготривалої міцності за значеннями еквівалентної напруги й границі довготривалої міцності за умови заданої температури й терміну служби. Основна складність застосування методики пов'язана з визначенням еквівалентної напруги, яка за розглянутий період повинна відтворювати ефект вичерпання довготривалої міцності матеріалу в разі зміни складного напруженого стану.

Отже, в роботах [5–7] була запропонована оцінка ресурсу деталей турбоустановок, описана методика розрахунку теплового стану цих деталей за умови характерних режимів роботи. Розраховувались граничні умови теплообміну в контрольних точках, що показані на розрахункових геометричних моделях, в яких визначались розмахи інтенсивності напружень за всі періоди пусків із різних теплових станів. Проте такий підхід до визначення ресурсу деталей турбоустановок містить людський фактор і, таким чином, потребує великих затрат часу на розрахунки граничних умов I–IV роду. Зауважимо, що з достатньою точністю неможливо визначити граничні умови I–IV роду для об'єктів, які мають складну геометричну форму. Також варто звернути увагу на конструктивні зміни в деталях турбоустановок, що виникли під час всього терміну експлуатації, які неможливо з достатньою точністю врахувати за допомогою методики, яка наведена в [5–7].

**Постановка завдання.** Детально проаналізувавши останні дослідження та публікації, було



зроблено висновок, що вищевказані методи й підходи до визначення ресурсу елементів турбін і клапанів є трудомісткими під час розрахунків граничних умов і недостатньо точними для об'єктів складної геометричної форми.

Метою роботи є розробка альтернативної методики визначення ресурсних показників високотемпературних елементів турбоустановок, що базується на заміні трудомісткого процесу розрахунку граничних умов теплообміну моделюванням газодинаміки течії вологої пари на прикладі головних паропроводів атомної електричної станції з турбіною К-1000-60/3000. Наведено підхід до визначення розподілів тисків, температур і швидкостей середовища за об'ємом досліджуваного об'єкта, що є необхідним для подальшого розрахунку напружено-деформованого стану й ресурсних показників.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Система паропроводів «свіжої» пари складається із чотирьох паралельних магістральних паропроводів «свіжої» пари. Кожен із магістральних паропроводів з'єднує парогенератор (далі – ПГ) зі своїм стопорно-регулюючим клапаном (далі – СРК) турбіни [9, с. 8]. Трасування паропроводів «свіжої» пари приведено на рис. 1.

Основні магістралі паропроводів виконані з труб  $\varnothing 630 \times 25$ , сталь 16ГС, і розташовані в гермозоні, приміщенні А-820 обстройки реакторного відділення та турбінному відділенні. На кожній магістралі послідовно встановлені:

- трійники підключення відгалужень до парового колектора (далі – ПК) і швидкодіючої редукційної установки скиду пари в атмосферу (далі – ШРУ-А) (відмітка 31,4);
- швидкодіючий запірновідсічний клапан (далі – ШЗВК) ТХ (50,60,70,80) S06 (відмітка 31,4);
- зворотний клапан ТХ (50,60,70,80) S07 (відмітка 31,4);
- трійник підключення парових напівколекторів (відмітка 21,3);
- головна парова засувка (ГПЗ) RA (11-14) S01 (відмітка 7,0).

Нумерація магістралей паропроводів відповідає номерам парогенераторів. Номінальні параметри пари в системі паропроводів «свіжої» пари під час роботи енергоблоку з номінальним навантаженням [10, с. 11] представлені в табл. 1.

У разі оснащення системи паропроводів свіжої пари контрольно-вимірювальним обладнанням за місцем встановлено мінімальну кількість приладів.

Таблиця 1

**Номінальні параметри «свіжої» пари**

Назва параметру	Значення
Тиск пари після ПГ (абс.), МПа	6,3
Тиск пари перед СРК ЦВТ (абс.), МПа	5,88
Температура пари перед СРК ЦВТ, °С (К)	274 (547)
Вологість пари перед турбіною, %	0,5
Витрата пари від ПГ, т / год:	5 870
в тому ж числі на СПП, т / год	510

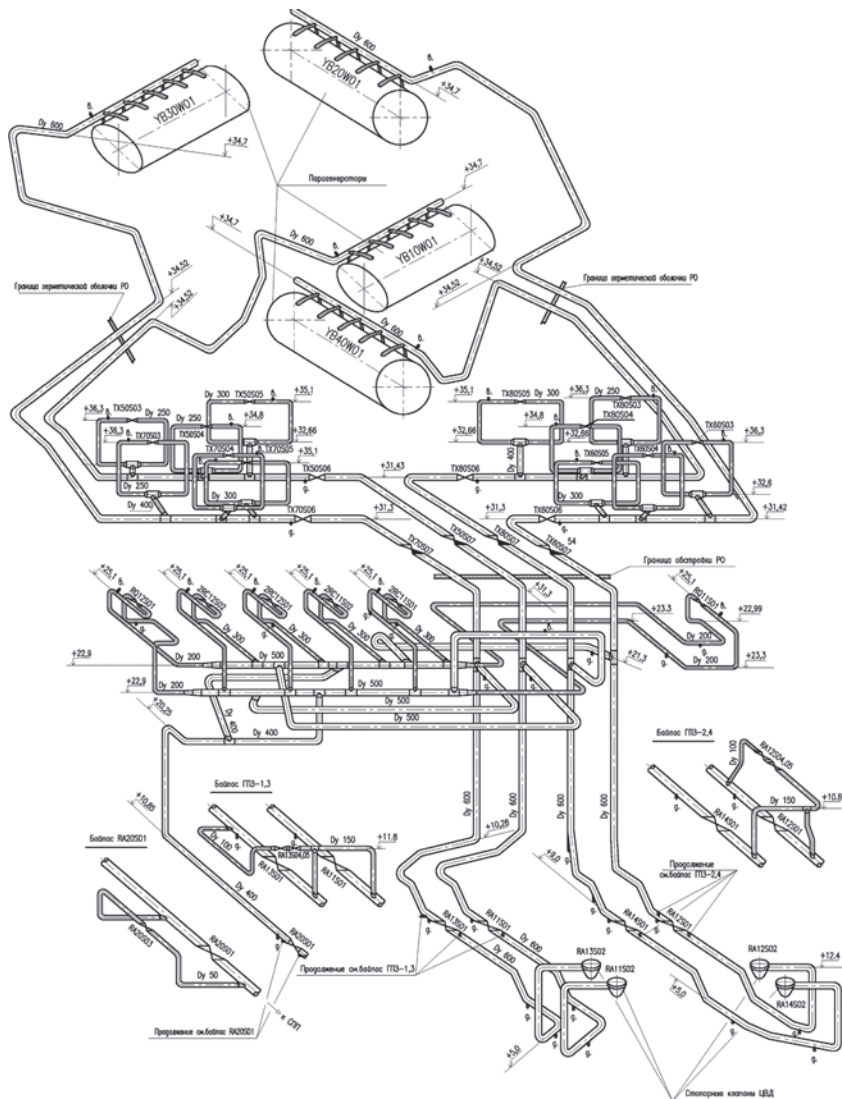


Рис. 1. Трасування паропроводів «свіжої» пари [9, с. 11]

Перелік контрольованих параметрів роботи системи наведено в табл. 2 [10, с. 13]. Перелік параметрів буде використаний для верифікації отриманих даних.

Як видно з наведеного вище переліку контрольованих параметрів (табл. 2), контроль газодинаміки руху пари в паропроводах здійснюється тільки в трьох точках, що явно недостатньо для розуміння «повної картини» процесів, які в них відбуваються. Оскільки непроектно оснащення системи паропроводів АЕС контрольно-вимірювальними приладами контролюється відповідними нормативними документами, втручання на фізичному рівні в конструкцію паропроводу неможливо. Тому доцільно для подальшого визначення стану металу паропроводів та арматури попередньо провести комплекс чисельних експериментів, заснованих на моделюванні течії вологої пари в системі паророзподілу атомної електростанції з турбіною К-1000-60/3000.

Для дослідження газодинаміки в паропроводах застосовувався програмний комплекс FlowVision 3.12.01. Геометрична модель створена в системі 3D-моделювання SolidWorks (рис. 2).

У математичну модель входять закони збереження енергії, маси, імпульсу, рівняння стану рідини або газу, різноманітні замикаючі співвідношення, граничні й початкові умови [12]. Вирішення вищезазначених рівнянь засноване

на методі кінцевих об'ємів [13, с. 78; 14, с. 17], який передбачає їх інтегрування за об'ємами комірок розрахункової сітки. За теоремою Гауса для довільної векторної або тензорної величини:

$$\int_{\Omega} (\nabla \cdot F) d\Omega = \sum_{i=\text{faces}} (F_i \cdot n_i) \cdot \Delta S_i,$$

$\Omega$  – об'єм комірки

$\Delta S_i$  – площа  $i$ -ї грані комірки

Таким чином, під час інтегрування розв'язуваних рівнянь у комірках проводиться підсумовування потоків маси, імпульсу, енергії та турбулентних величин, обчислених на гранях комірок.

Як вихідні і граничні умови приймалися параметри, отримані на енергоблоці № 2 Хмельницької АЕС: температура вологої пари  $t = 274,3$  °С; тиск пара після ПГ  $P = 6,3$  МПа; ступінь сухості пари  $x = 0,995$ ; витрата пари від усіх ПГ  $G = 5870$  т / год; шорсткість для досліджуваних труб  $10^{-4}$  м.

У задачі потрібно визначити розподіл швидкостей, температур і тисків. Поставлене завдання вирішувалося в 3-х мірній, стаціонарній постановці, із застосуванням моделі повністю стисливої рідини. У ході пробних розрахунків були уточнені параметри розрахункової моделі (часовий крок, умови адаптації розрахункової сітки), які дозволили оптимізувати розрахунок та дістати хороший збіг з експериментальними даними, отриманими безпосередньо на станції. Були здобуті дані 3-D газодинамічної структури потоку, розподіл швидкостей у потоці, температурних полях, розподіли тисків. Аналіз результатів чисельного моделювання дав можливість досить докладно вивчити газодинамічні характеристики течії вологої пари паропроводами. Чисельне моделювання дозволило оцінити вплив геометрії паропроводів на газодинаміку потоку.

З огляду на високі вимоги до потужностей електронних обчислювальних машин і значну тривалість

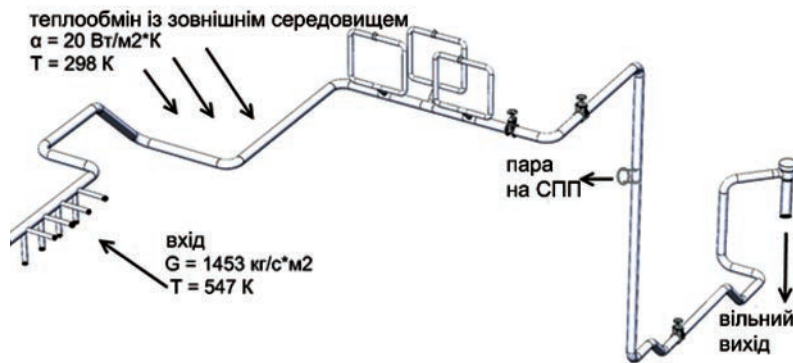


Рис. 2. Розрахункова схема паропроводу YB20W01 від парогенератора № 2

Таблиця 2

Перелік контрольованих параметрів

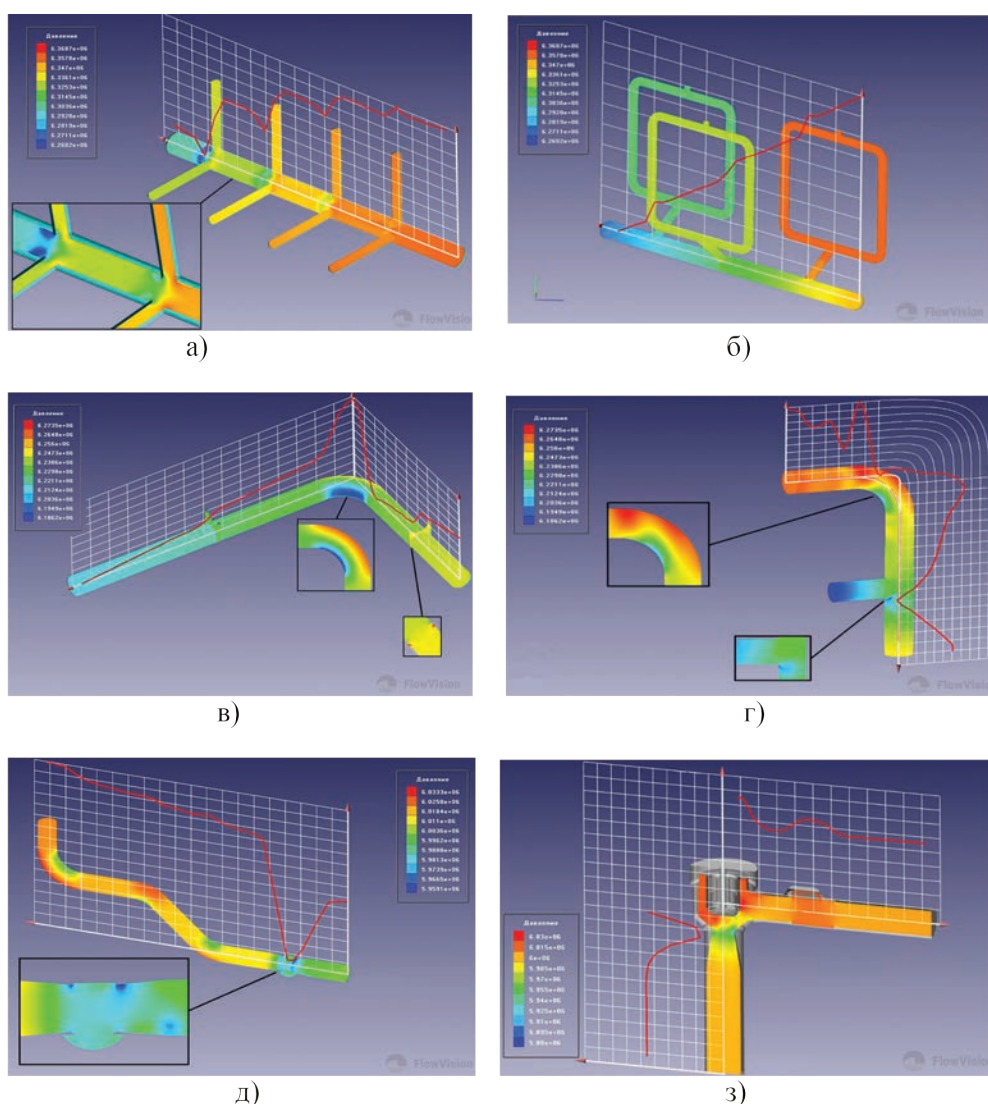
Назва параметру	Номінальне значення	Місце виведення інформації	Позиція датчика
Тиск пари після ПГ (абс.), МПа	6,3	Блочний щит керування	TX(51,61,71,81)P01 TX(52,62,72,82)P01 TX(53,63,73,83)P01
Тиск пари перед ГПЗ (абс.), МПа	6,27	По місцю	RA(11-14)P01
Тиск пари після ГПЗ (абс.), МПа	6,27	По місцю	RA(11-14)P02

розрахунків, було прийнято рішення досліджувати тільки окремі ділянки одного паропроводу, які однаково присутні на кожному із чотирьох. Вжитий захід дав можливість не тільки скоротити час і ресурси, що витрачаються на дослідження повної задачі, але і є досить надійним методом прогнозування зміни тиску на схожих ділянках паропроводів. Також було враховано лінійну зміну параметрів пари на прямих ділянках паропроводів.

У результаті проведених чисельних експериментів отримані розподіли температур, тисків і швидкостей пари в разі руху досліджуваними ділянками паропроводів. Для прикладу, на рис. 3

(а–з) зображені розподіли тисків на характерних ділянках паропроводу.

Як видно з рис. 3-а, де зображені патрубки подачі пари від парогенератора № 2 до паропроводу УВ20W01, максимальний тиск спостерігається в тупиковій частині паропроводу, який досягає 6,37 МПа, що відповідає законам газодинаміки. Спостерігаються різкі падіння тиску в місцях з'єднання патрубків подачі пари від парогенератора № 2 до центрального колектора паропроводу. Після останнього патрубка (по руху пари) тиск вирівнюється та складає 6,3 МПа. Як видно (рис. 1), у кінці ділянки встановлений манометр (табл. 2) на позиції TX61P01 [9, с. 13]. Розбіжність між



**Рис. 3. Графіки падіння тиску на окремих ділянках паропроводу № 1:**

- а) патрубки від парогенератора;
- б) трійники підключення відгалужень до ПК і БРУ-А;
- в) відсичний клапан БЗОК TX50S06 з поворотом і зворотним клапаном TX50S07;
- г) поворот паропроводу з трійником підключення парових напівколекторів;
- д) повороти паропроводів із головною паровою засувкою RA11S01;
- з) стопорно-регулюючий клапан

показниками датчика й отриманими результатами чисельного моделювання становить менше ніж 1%.

Ділянка паропроводу, яка зображена на рис. 3-б, має трійники підключення відгалужень до парогенератора й швидкодіючого редукційного пристрою, який скидає пару в атмосферу й у конденсатор в разі аварійних режимів. У разі закритих клапанів і за нормальної експлуатації пара все одно проходить через ті відгалуження, але повертається в головний паропровід. Така схема потоку теж вносить корективи в газодинаміку пари: спочатку тиск підіймається до 6,3 МПа, а потім падає до 6,27 МПа.

Після трійників досліджуваною ділянкою є частина паропроводу, де встановлений відсічний клапан із поворотом і зворотним клапаном (рис. 3-в). Після проходження через відсічний клапан тиск незначно падає, потім різко знижується в місці вигину біля внутрішньої його стінки, а біля зовнішньої стінки – сильно зростає. Після вигину тиск нормалізується, хоча й спостерігається його незначне падіння після зворотного клапана.

На рис. 3-г зображений вигин паропроводу, після якого встановлений трійник підключення парових напівколекторів, де, як ми бачимо, тиск досліджуваного середовища падає до величини

6,18 МПа, оскільки йде відбір робочого тіла на перегрів пари в сепараторі-пароперегрівачі й для власних потреб. Як видно (рис. 1), у кінці ділянки встановлений манометр (табл. 2) на позиції RA12P01 [9, с. 13]. Розбіжність між показниками датчика й отриманими результатами чисельного моделювання становить близько 2%.

Для ділянки паропроводу, який зображений на рис. 3-д, найважливішим елементом арматури, що впливає на газодинаміку, є головна парова засувка. Отримані результати показують різке падіння тиску в місці розташування головної парової засувки до величини в 5,96 МПа. Далі тиск зростає до 5,99 МПа. У кінці цієї ділянки відповідно до рис. 1 і табл. 2 встановлений манометр на позиції RA12P02 [9, с. 13]. Розбіжність між показниками датчика й отриманими результатами чисельного моделювання становить близько 5%.

Останньою розглянутою ділянкою є стопорно-регулюючий клапан, який зображений на рис. 3-з. Результати чисельного моделювання показують величину тиску на виході з ділянки 5,98 МПа. На жаль, у такому місці відсутні контрольно-вимірвальні прилади. Провести верифікацію отриманих результатів досить складно. Але, виходячи з даних, викладених в інструкції з експлуатації, технічного

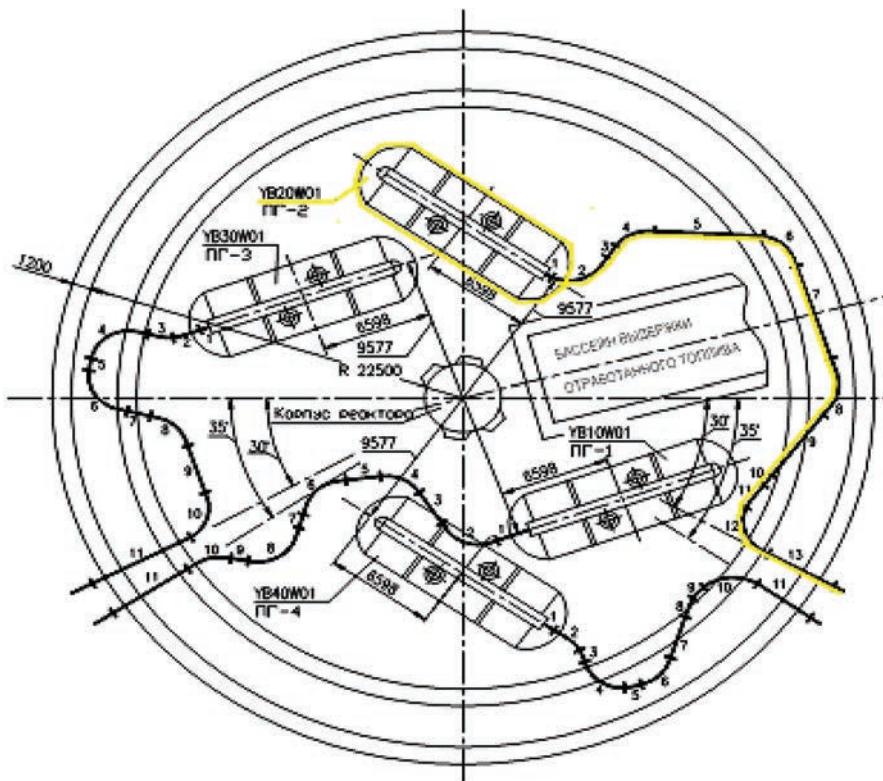


Рис. 4. Розрахункова схема паропроводів «свіжої» пари. Реакторне відділення

опису № 2ТЦ.0244.ТО-01 [11, с. 78], тиск у місці паропроводу повинен бути на рівні 5,88 МПа. Тобто розбіжність становить близько 2%.

Грунтуючись на проведених чисельних експериментах, були побудовані графіки падіння тиску

на кожному із чотирьох паропроводів по характерних точках (1-59) на розрахункових схемах із рис. 4 і 5.

На рис. 6 наведемо криву падіння тиску пари для паропроводу YB20W01 від парогенератора № 2.

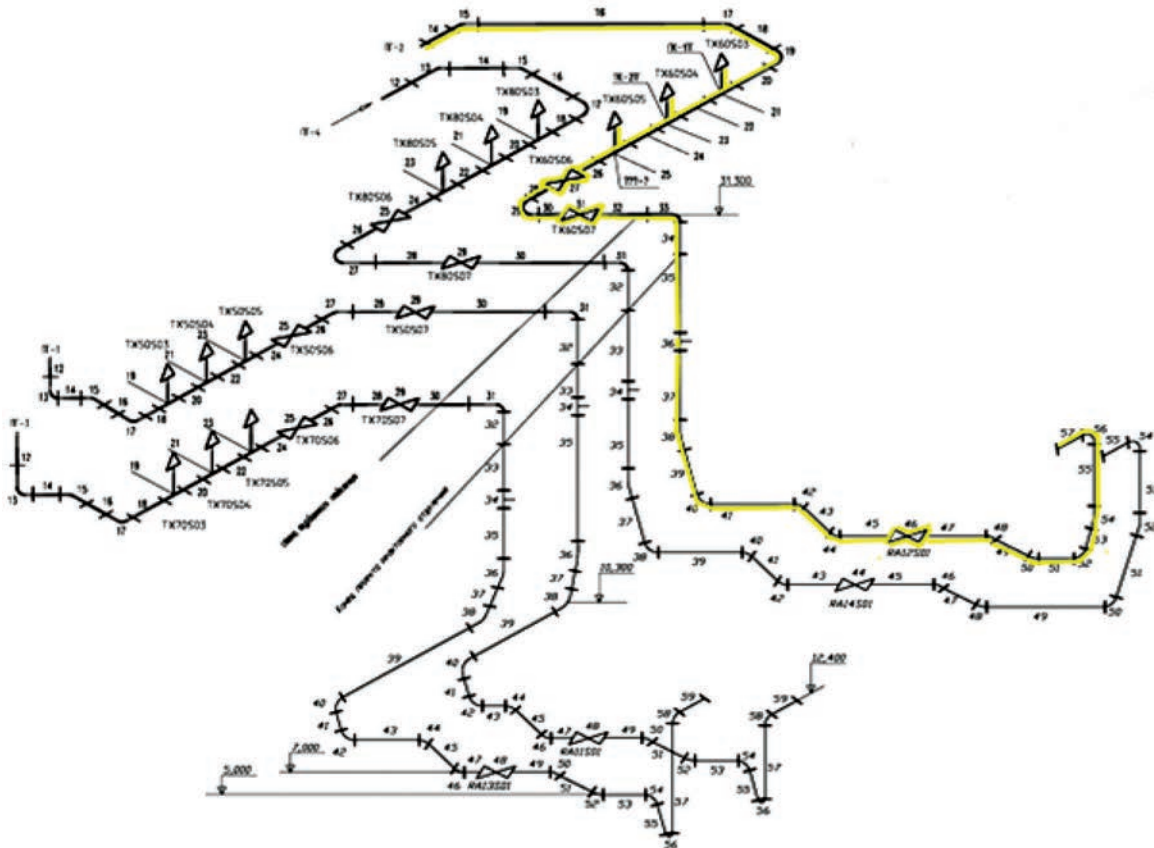


Рис. 5. Розрахункова схема паропроводів «свіжої» пари. Турбінне відділення



Рис. 6. Падіння тиску в паропроводі YB20W01 від парогенератора № 2

Як видно з рис. 6, показники датчиків збігаються з отриманими даними числових експериментів, виконаними на базі розробленої математичної моделі. Отже, розроблена математична модель газодинаміки течії вологої пари по об'єму досліджуваного паропроводу з достатньою адекватністю відбиває реальні характеристики теплоносія та може бути використана в подальших розрахунках для визначення напружено-деформованого стану високотемпературних елементів паророзподільчої системи турбіни й визначення довготривалої міцності й ресурсу металу.

**Висновки.** У результаті виконаного моделювання процесу течії вологої пари від парогенератора № 2 по паропроводах до стопорно-регулю-

ючого клапана на енергоблоці № 2 Хмельницької АЕС отримані дані щодо розподілу тисків, температур і швидкостей середовища за об'ємом паропроводу. Перевірка адекватності чисельної моделі й коректності моделювання була проведена шляхом порівняння розрахункових результатів із даними Хмельницької АЕС (табл. 2). Порівняння результатів дослідження та реальних даних дало задовільний збіг. Середня відносна похибка моделі становить близько 5%. Розроблена імітаційна модель є адекватною та може бути використана для розрахунку параметрів течії пари в паропроводах. Надалі отримані дані будуть використані для визначення залишкового ресурсу головних паропроводів АЕС.

#### Список літератури:

1. Энергетика: история, настоящее и будущее. Т 3. Развитие тепловой и атомной энергетики / Е.Т. Базеев, Б.Д. Билека, Е.П. Васильев и др. Киев : ООО «Редакция издания», 2008. 528 с.
2. СОУ-Н МПЕ 40.17.401:2004. НД МПЕ України. Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій. Офіц. вид. Київ : ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2005. 76 с.
3. РТМ 24.020.16-73. № ВК-002/3209. Турбины паровые стационарные. Расчёт температурных полей роторов и цилиндров паровых турбин методом электро моделирования. Москва, 1973. 104 с.
4. РД 34.17.440-96. Методические указания о порядке проведения работ при оценке индивидуального ресурса паровых турбин и продлении срока их эксплуатации сверх паркового ресурса. Москва, 1996. 98 с.
5. Геометрическая модель и граничные условия теплообмена ротора высокого давления турбоустановки Т-100-130 ПАО «Харьковская ТЭЦ-5» / О. Ю. Черноусенко, Л.С. Бутовский, В.А. Пешко, О.С. Мороз. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: *Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харків : НТУ «ХПІ», 2017. № 11 (1233). С. 16–23.
6. Оценка индивидуального ресурса литых корпусов автоматических защитных клапанов энергоблоков мощностью 200 МВт / О.Ю. Черноусенко, Д.В. Риндюк, В.А. Пешко, В.Ю. Горяженко. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: *Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2018. № 13 (1289). С. 26–32.
7. Комплексна схема оцінювання залишкового ресурсу роторів парових турбін великої потужності / О.Ю. Черноусенко, Т.В. Нікуленкова. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: *Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харків : НТУ «ХПІ», 2013. № 14 (988). С. 54–61.
8. Аналіз підходів до оцінки теплового та напружено-деформованого стану елементів паропроводів АЕС / І.С. Беднарська, Д.В. Риндюк. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. Серія: *технічні науки*. 2019. Том 30 (69). Ч. 2. № 2. С. 12–16.
9. 43-923.203.007.БД.05 Хмельницька АЕС. Енергоблок № 2. База даних ЯПВУ. Частина 5. Технологічні системи другого контуру.
10. Хмельницька АЕС. Енергоблок № 2. Система паропроводів свіжої пари (ТХ, РА). Технічний опис. № 2. ТЦ.0245.ТО-01.
11. Турбіна парова К-1000-60/3000. Інструкція з експлуатації. Технічний опис. № 2ТЦ.0244.ТО-01.
12. FlowVision. Версія 3.09.04. Керівництво користувача. URL: <https://flowvision.ru/index.php/public-downloads/category/8dokumentatsiyaflowvision?download=112:3-09-04-pdf-enu>.
13. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Обчислювальна гідромеханіка та теплообмін. Москва : Мир, 1990. Т. 1–2.
14. Флетчер К. Обчислювальні методи в динаміці рідин. Москва : Мир, 1991. Т. 1–2.

#### **Bednarska I.S., Rindyuk D.V., Lementar S.Yu. SIMULATION OF WET STEAM GAS DYNAMICS IN MAIN STEEL PIPELINES**

*The article is devoted to the development of a comprehensive approach to solving the problem of increasing the service life of the main equipment of power plants. Prolongation of operation of the main equipment of power plants is one of the most effective ways to ensure a return on investment in the energy sector in the world. The research data are especially relevant for nuclear power plants, the basic equipment of which has a*

very high cost. A very important element of equipment at nuclear power plants is the steam distribution system. The service life of the base metal of steam pipes is interrelated with the stress-strain state, which depends on the gas dynamics of the flow. Therefore, the article examines in detail the process of movement of wet steam along the main steam pipelines of a nuclear power plant with a turbine K-1000-60/3000. Namely, the system of steam pipes of "fresh" steam, which is designed to transport saturated steam from the steam generator to the high-pressure cylinder of the turbine and the heater. The solution of this problem is realized by creation of mathematical model of movement of damp steam and carrying out of a complex of numerical experiments directed on research of structure of a stream of steam on the specified steam pipelines. Numerical experiments were performed on the basis of a modern engineering and calculation system PC FlowVision 3.12.01, which is designed to solve problems of gas dynamics and heat transfer. The problem is solved in a 3-dimensional, stationary setting, using a model of fully compressible fluid. The article presents the results of the first stage of a set of numerical experiments. A good coincidence was obtained with the data of control and measuring devices located on the steam pipelines of power unit № 2 of Khmelnsky nuclear power plant. The result of the simulation is a 3-D gas-dynamic structure of steam flow, flow velocity distribution, temperature fields and pressure distributions. Analysis of the results of numerical simulations made it possible to assess in detail the influence of the geometry of steam pipelines on the gas-dynamic characteristics of the flow of wet steam. On the basis of the received data graphs of pressure drop on each of four steam pipelines on characteristic points on settlement schemes are constructed.

**Key words:** nuclear energy, steam pipelines, gas dynamics, mathematical modeling.

**Волощук В.А.**

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

**Любицький С.В.**

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

**Поліщук І.А.**

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

**Поліщук М.А.**

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

## ЗАСТОСУВАННЯ ХМАРНОЇ ПЛАТФОРМИ COLABORATORY ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ЕКСЕРГЕТИЧНОГО АНАЛІЗУ ТЕПЛОНАСОСНИХ УСТАНОВОК

*У статті представлено розроблення інтерактивного розрахункового середовища, яке базується на використанні відкритих онлайн-сервісів для широкого застосування ексергетичного аналізу й оптимізації теплоенергетичних процесів і систем. Це середовище підтримує збір, зберігання та засоби обробки даних і використовує програмне забезпечення з відкритим кодом: Google Colaboratory – хмарний сервіс для створення блокнотів за допомогою об'єктноорієнтованої мови програмування Python – і CoolProp – бібліотеку з розрахунку теплофізичних властивостей робочих тіл. Наведено приклад ексергетичного аналізу теплонасосних установок типу «повітря-вода» й «вода-вода» із застосуванням розробленого ресурсу. Запропоновано розрахункову схему теплонасосних установок і функції користувача для розрахунку теплофізичних властивостей робочих тіл. Наведено приклади розрахунку параметрів теплоносіїв в характерних точках теплонасосних установок та основних ексергетичних показників теплонасосних установок: ексергії палива, ексергії продукту, деструкції ексергії та ексергетичного коефіцієнта корисної дії з представленням результатів у вигляді графіків і таблиць. Використовуючи розроблений ресурс, було розраховано деструкцію ексергії в кожному елементі теплонасосних установок для різних робочих тіл і проведено порівняльний аналіз теплонасосних установок типу «повітря-вода» й «вода-вода» залежно від типу робочого тіла. Показано, що розподіл для запропонованих робочих тіл із боку формування деструкції ексергії в компонентах теплонасосних установок однаковий і що для обох типів теплонасосних установок найбільша сумарна деструкція ексергії відбувається у випадку використання R410A, а найменша – для R1234ze(Z). Також зазначено, що зі зміною типу робочого тіла найбільша зміна деструкції ексергії має відбуватися в дросельному вентилі, що зумовлено різною теплою пароутворення кожного робочого тіла. Досліджено, що приблизно однаковою для всіх наведених робочих тіл є також деструкція ексергії у випарнику й конденсаторі.*

**Ключові слова:** Python, Google Colaboratory, онлайн-сервіс, теплофізичні властивості робочих тіл, теплонасосна установка, ексергетичний аналіз, деструкція ексергії.

**Постановка проблеми.** Ексергетичний підхід є новим витком у теорії моделювання та аналізу об'єктів і систем теплоенергетики. На відміну від енергетичного аналізу, який найчастіше використовується в науковій та інженерній практиці, поєднання ексергетичного, економічного й екологічного методів оцінювання дозволяє визначити місце, значення, джерела,

вартість і негативний вплив на довкілля термодинамічних втрат у процесах передачі й перетворення енергії [1].

Методи ексергетичного аналізу найбільшою мірою розроблено й апробовано в промисловій теплоенергетиці [2]. Разом із тим в останній час з'явився інтерес до використання цих методів у сфері теплозабезпечення будівель [3], у системах



керування об'єктами теплоенергетики [4], а також для діагностування цих об'єктів [5].

Однією з основних перешкод широкого впровадження методів ексергетичного аналізу на практиці є необхідність виконання досить складних і нестандартних математичних розрахунків, які вимагають додаткового часу й зусиль і не завжди можуть реалізуватися за допомогою існуючих програмних продуктів [6]. Для ширшого залучення цих методів у практику проєктування та експлуатації теплоенергетичних систем є потреба у створенні відповідних легкодоступних і зручних розрахункових засобів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Більшість комп'ютерних програм, що з'явилася останнім часом, комерційні. Зусилля, спрямовані на вдосконалення таких продуктів, базуються на Першому законі термодинаміки й методах класичної економіки (наприклад, AspenPlus, Pro / II, EES, Thermoflow, Gate Cycle, Epsilon Professional тощо) [7]. Методи ексергетичного аналізу в них використовуються досить рідко або взагалі не використовуються [8]. Більшість такого програмного забезпечення працює як «чорний ящик». Тобто вони не надають можливості маніпуляції аналітичними залежностями або здійснення покрокового аналізу й зміни алгоритму реалізації програми. Частина таких ресурсів мають досить вузький спектр застосування. З метою реалізації нестандартних задач дослідники змушені вдаватися до поєднання та комбінування декількох програм. Наприклад, одна програма (REFPROP, FLUIDS, CHEMCAD, Thermo-Calc тощо) визначає теплофізичні властивості робочих тіл, інша програма (AspenPlus, Pro / II, EES, Thermoflow, Gate Cycle, Epsilon Professional тощо) моделює енергетичну установку на основі методології закону збереження та перетворення енергії (енергетичний або ентальпійний підхід), а ще інша програма (MathCAD, Maple, Matlab, Mathematica тощо) використовується для ексергетичного аналізу. Так зроблено, зокрема, в роботі [8]. Для реалізації ексергоекономічного аналізу автор [8] експортував з існуючих програмних пакетів (Gatex, Epsilon Professional, Aspen Plus, EES, Excel) результати моделювання у власноруч розроблену програму за допомогою C++. Варто зауважити, що не у всіх випадках таке безпосереднє інтегрування різних пакетів можна легко реалізувати. Потрібно застосовувати попередню обробку (preprocessing). Мало того, в багатьох випадках такі програмні продукти комерційні, тобто потребують затрат коштів на отримання ліцензії та доступні для обмеженого кола дослідників.

У більшості випадків математичне моделювання теплоенергетичних процесів потребує визначення термодинамічних і фізичних властивостей робочих тіл, що використовуються в процесах передачі й перетворення енергії. Зважаючи на широкий вибір робочих тіл і необхідність багатоваріантного аналізу, нині вже непрактично нереально й ненадійно використовувати дані з теплофізичних властивостей теплоносіїв у вигляді таблиць і графіків. Зараз пропонується досить широкий набір комп'ютерних програм із розрахунку властивостей робочих тіл (наприклад, REFPROP, ChemCad, Thermo-Calc тощо). Але знову ж таки ці програми мають досить вузькі можливості їх інтеграції з іншими програмними пакетами, де власне й виконується моделювання теплоенергетичних процесів. Крім того, такі програмні пакети потребують додаткової інсталяції на персональному комп'ютері, постійних оновлень, а також потребують фінансових затрат на придбання.

Нова парадигма у сфері інформаційних технологій – «хмарні» обчислення – ефективне рішення для забезпечення гнучкої та динамічної інфраструктури для різних сфер наукових та інженерних розрахунків із доступом на вимогу. До переваг такої технології можна віднести економію коштів, доступність, динамічність, гнучкість тощо [9]. Підходи й реалізацію «хмарних» розрахунків у теплоенергетиці запропоновано, зокрема, в [10; 11]. Разом із тим такі підходи передбачають застосування платних ліцензій для відповідного програмного забезпечення.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розроблення методів організації процесів моделювання, які б забезпечили практичне впровадження розрахункових моделей на основі термодинамічних підходів, зокрема ексергетичному, були легкодоступними, зручними, не потребували платної ліцензії та спиралися на сучасні інформаційні технології та Інтернет. Реалізацію запропонованого методу потрібно представити на прикладі ексергетичного аналізу теплонасосної установки (далі – ТНУ).

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для реалізації поставлених задач у роботі пропонується використовувати мову програмування Python [12], яка широко застосовується в науковій області для досліджень і розв'язування прикладних завдань. Python працює майже на всіх відомих платформах, є відкритим і вільним програмним забезпеченням, має велику кількість бібліотек.

Реалізацію розрахунку пропонується здійснювати у вигляді спеціальних онлайн документів-блокнотів – Jupyter Notebook. Такий «блокнот» об'єднує

програмний код і результат його виконання в єдиний документ, який містить математичні рівняння, візуалізацію, пояснювальний текст тощо. Які провайдер хмарного розрахунку пропонується сервіс Google Colab або Colaboratory [13], який дозволяє створювати блокноти Jupyter із середовищем виконання Python і зберігати їх на Google-Диску. Ця платформа дає можливість реалізовувати розрахунки безпосередньо в хмарі без встановлення локального програмного забезпечення та купівлі ліцензії. Для роботи потрібен лише браузер і доступ до Інтернету для редагування та перегляду файлів.

Розрахунок теплофізичних властивостей робочих тіл пропонується реалізовувати за допомогою бібліотеки CoolProp [14] – фреймворку з відкритим програмним кодом. Ця бібліотека написана на C++ з обгортками, доступними для більшості мов програмування та комп'ютерних програм. У CoolProp розрахунок властивостей робочих тіл базується на фундаментальному рівнянні Гельмгольца.

Для ТНУ типу «повітря-вода» прийняті такі параметри: температура низькопотенційного джерела теплоти (зовнішнього повітря) знижується у випарнику від 20°C до 15°C; вода нагрівається в конденсаторі від 50°C до 60°C; мінімальний температурний напір у випарнику дорівнює 12 К, а в конденсаторі становить 5 К. У випадку викорис-

тання ТНУ типу «вода-вода» низькопотенційне джерело теплоти охолоджується у випарнику від 8°C до 5°C; нагрів води в конденсаторі такий же, як і в ТНУ типу «повітря-вода» – від 50°C до 60°C; мінімальний температурний напір у випарнику й конденсаторі становить 5 К.

Реалізація запропонованого методу моделювання та ексергетичного аналізу ТНУ розміщено за URL-адресою [https://colab.research.google.com/drive/184OntEULIDlzOvMT\\_YttcH7HWsYXZmDm#scrollTo=G299THjqC64G](https://colab.research.google.com/drive/184OntEULIDlzOvMT_YttcH7HWsYXZmDm#scrollTo=G299THjqC64G).

Розрахункова схема ТНУ наведена на рис. 1, де у випарнику (EV) випаровується та перегрівається робоче тіло ТНУ шляхом охолодження низькопотенційного джерела від температури  $t_{EV,in}$  до  $t_{EV,out}$ . У компресорі (CM) відбувається стиснення робочого тіла, унаслідок чого підвищується його температура. У конденсаторі (CD) перегріта пара робочого тіла охолоджується та конденсується, нагріваючи водночас теплоносієм споживача від температури  $t_{CD,in}$  до  $t_{CD,out}$ . Після конденсатора робоче тіло ТНУ надходить у дросельний вентиль (TV), де знижує свій тиск і температуру, частково перетворюючись на пару, і далі надходить у випарник для повного випаровування та перегріву.

Отже, спочатку за допомогою команди `pip` встановлюється бібліотека CoolProp – бібліотека для розрахунку теплофізичних властивостей робочих тіл (рис. 2).

На рис. 3 наведено створення функцій користувача для розрахунку теплофізичних властивостей робочих тіл. Таке рішення висувається для зручності.

У пакеті CoolProp пропонується свій синтаксис таких функцій. Наприклад, для розрахунку питомої ентальпії в однофазній області використовується такий варіант:

$$\text{PropsSI}('H', 'P', p, 'T', T, wf), \quad (1)$$

де 'H' – це параметр, що розраховується, питома ентальпія;

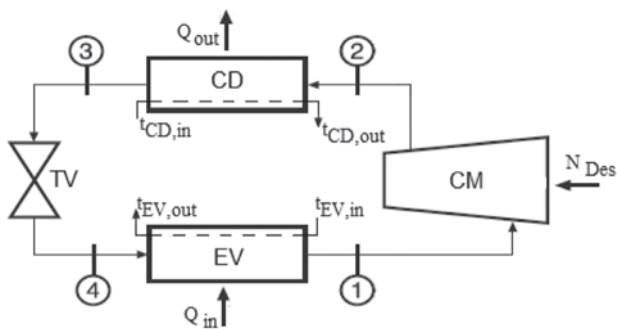


Рис. 1. Розрахункова схема ТНУ

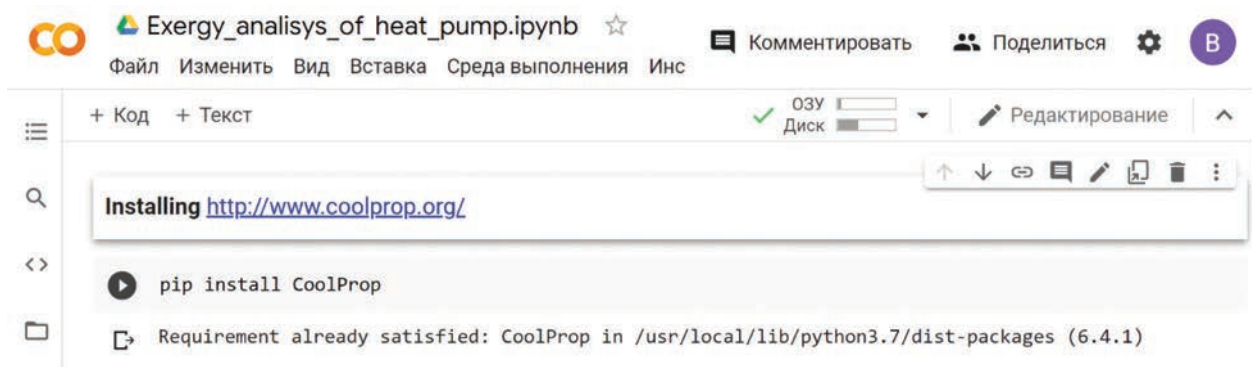


Рис. 2. Встановлення бібліотеки CoolProp

"P" – абсолютний тиск, який є першим аргументом і значення якого вводиться в наступну комірку після "P";

"T" – абсолютна температура, що є другим аргументом і вводиться в комірку після "T";

wf – тип робочого тіла.

Варто зауважити, що у формулу необхідно підставляти параметри в безрозмірному вигляді, але з урахуванням того, що числове значення тиску повинно бути таким, якби воно вимірювалося в Па, а абсолютна температура – в Кельвінах. Зна-

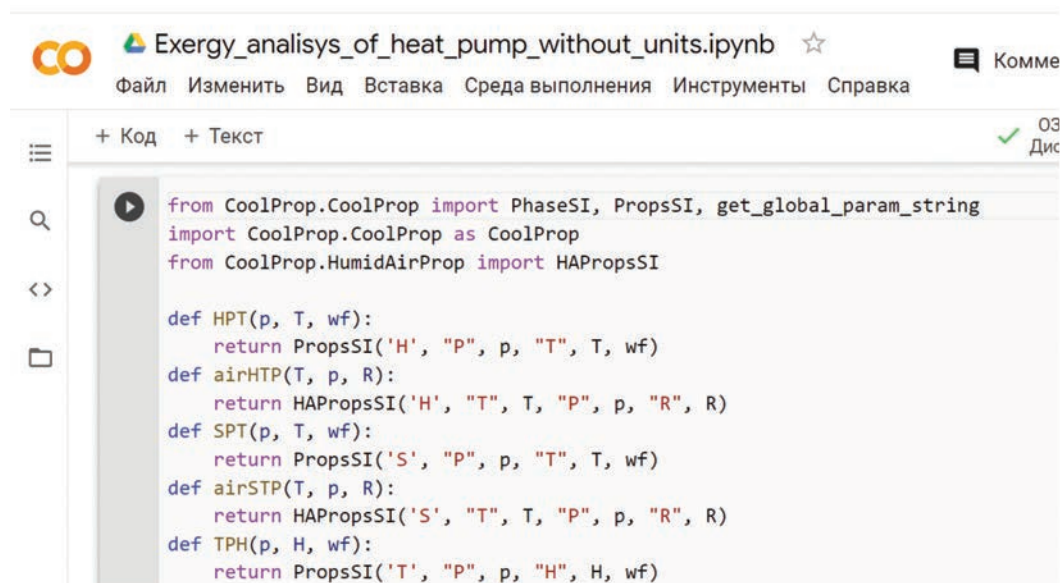
чення питомої ентальпії відповідає одиниці вимірювання Дж/кг.

Як показала практика, такий синтаксис не дуже зручний, оскільки займає багато місця. Тому в роботі за допомогою оператора def створено коротші функції. Наприклад, функцію (1) запропоновано у вигляді:

$$\text{HPT}(p, T, wf), \quad (2)$$

де замість p та T необхідно підставляти чисельні значення абсолютного тиску й температури (рис. 2).

На наступному етапі вводяться вихідні параметри (рис. 4).

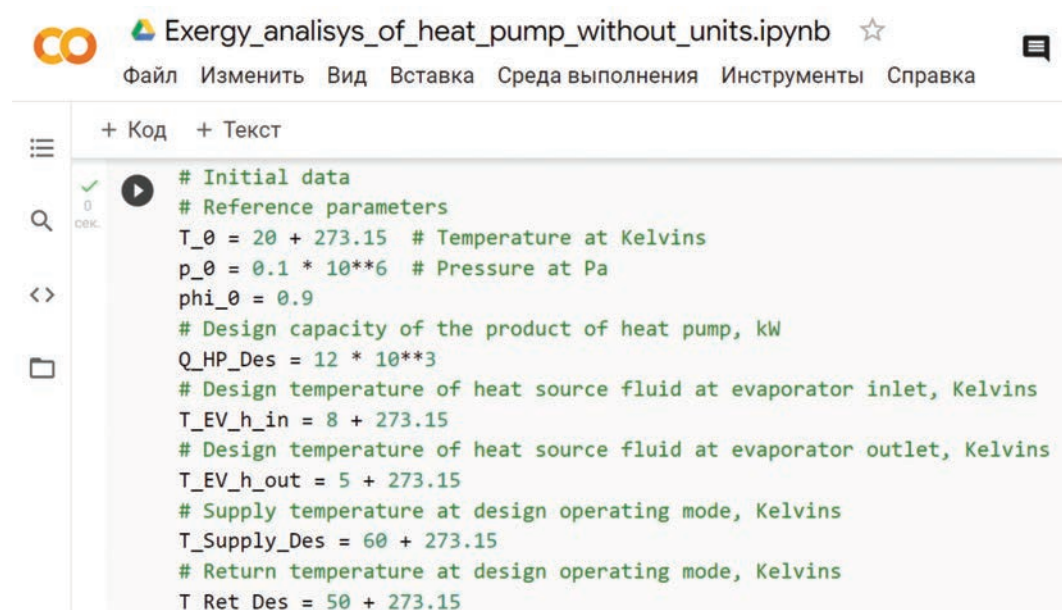


```

from CoolProp.CoolProp import PhaseSI, PropsSI, get_global_param_string
import CoolProp.CoolProp as CoolProp
from CoolProp.HumidAirProp import HAPropsSI

def HPT(p, T, wf):
    return PropsSI('H', "P", p, "T", T, wf)
def airHPT(T, p, R):
    return HAPropsSI('H', "T", T, "P", p, "R", R)
def SPT(p, T, wf):
    return PropsSI('S', "P", p, "T", T, wf)
def airSPT(T, p, R):
    return HAPropsSI('S', "T", T, "P", p, "R", R)
def TPH(p, H, wf):
    return PropsSI('T', "P", p, "H", H, wf)
  
```

Рис. 3. Створення функцій користувача для розрахунку властивостей робочих тіл на основі функцій бібліотеки CoolProp



```

# Initial data
# Reference parameters
T_0 = 20 + 273.15 # Temperature at Kelvins
p_0 = 0.1 * 10**6 # Pressure at Pa
phi_0 = 0.9
# Design capacity of the product of heat pump, kW
Q_HP_Des = 12 * 10**3
# Design temperature of heat source fluid at evaporator inlet, Kelvins
T_EV_h_in = 8 + 273.15
# Design temperature of heat source fluid at evaporator outlet, Kelvins
T_EV_h_out = 5 + 273.15
# Supply temperature at design operating mode, Kelvins
T_Supply_Des = 60 + 273.15
# Return temperature at design operating mode, Kelvins
T_Ret_Des = 50 + 273.15
  
```

Рис. 4. Введення вихідних параметрів

Наступний крок – розрахунок параметрів теплоносіїв. Для прикладу, на рис. 5 наведено визначення питомої ентальпії та ентропії теплоносія низькопотенційного джерела енергії на вході у випарник ТНУ. У такому випадку використовуються створені (див. рис. 3) відповідні функції. Водночас передбачено врахування типу низькопотенційного джерела: вологого повітря з відповідними значеннями абсолютної температури, тиску й відносної вологості чи води з відповідними значеннями абсолютного тиску й температури.

На рис. 6 наведено фрагмент розрахунку параметрів у характерних точках ТНУ. Усі ці величини необхідні для реалізації ексергетичного аналізу.

На рис. 7 наведено фрагмент розрахунку таких основних ексергетичних характеристик компресора ТНУ: ексергії палива, ексергії продукту, деструкції ексергії та ексергетичного ККД. Водночас ураховано різне співвідношення параметрів робочого тіла ТНУ щодо параметрів відліку ексергії.

Результати розрахунків можна представити у вигляді графіків, таблиць або у вигляді чисел із поясненнями, як це наведено, наприклад, на рис. 8 і в табл. 1.

Отже, використовуючи розроблений ресурс, було розраховано деструкцію ексергії в кожному елементі ТНУ для робочих тіл, які зараз використовуються або пропонуються використовувати в майбутньому. Результати наведено на рис. 9 та 10.

Більшість теперішніх ТНУ використовують фторвуглеводні (зокрема, R410A, R134a, R32, R407c, R152a), які мають менший негативний вплив на довкілля в порівнянні з хлорфторвуглеводнями. Хоча через значний потенціал глобального потепління (GWP) зараз проводяться дослідження щодо можливості застосування альтернативних робочих тіл: гідрофторолефінів (наприклад, R1234yf, R1234ze) [15] і вуглеводнів (наприклад, R290, R1270) [16].

З рис. 9 і 10 бачимо, що для заданих параметрів ТНУ типу «повітря-вода» й «вода-вода» розподіл

```

Exergy_analysys_of_heat_pump_without_units.ipynb ☆
Файл  Изменить  Вид  Вставка  Среда выполнения  Инструменты  Справка

+ Код  + Текст

if wf_EV_h == 'Air':
    h_EV_h_in_Des = airHTP(T_EV_h_in, p_EV_in, phi_0)
if wf_EV_h == 'Water':
    h_EV_h_in_Des = HPT(p_EV_in, T_EV_h_in, wf_EV_h)

if wf_EV_h == 'Air':
    h_EV_h_in_Des_0 = airHTP(T_0, p_EV_in, phi_0)
if wf_EV_h == 'Water':
    h_EV_h_in_Des_0 = HPT(p_EV_in, T_0, wf_EV_h)
    
```

Рис. 5. Приклад розрахунку питомої ентальпії та ентропії теплоносія низькопотенційного джерела енергії на вході у випарник ТНУ

```

Exergy_analysys_of_heat_pump_without_units.ipynb ☆
Файл  Изменить  Вид  Вставка  Среда выполнения  Инструменты  Справка  Комментировать

+ Код  + Текст  ОЗУ  Диск

# Pressure of the working fluid at the condenser inlet
p_2_Des = PSVT(T_Supply_Des + delta_T_CD_h, wf)
# Pressure of the working fluid at the condenser outlet
p_3_Des = p_2_Des
# Temperature of the working fluid at the condenser outlet
T_3_Des = TSLP(p_3_Des, wf)
# Liquid temperature of the working fluid on the saturation line in the condenser
T_sl_CD_Des = T_3_Des
# Liquid specific entropy of the working fluid on the saturation line in the condenser
s_sl_CD_Des = SSLT(T_sl_CD_Des, wf)
    
```

Рис. 6. Фрагмент розрахунку параметрів у характерних точках ТНУ

запропонованих робочих тіл із боку формування деструкції ексергії в компонентах ТНУ – однаковий. Для обох типів ТНУ найбільша сумарна деструкція ексергії відбувається у випадку вико-

ристання R410A, а найменша – для R1234ze(Z). Якщо проаналізувати зміну деструкції ексергії в кожному компоненті ТНУ, то можна зробити висновок, що в основному зі зміною типу

Таблиця 1

Значення ексергетичних характеристик ТНУ

Component/Value	Exergy of fuel,kW	Exergy of product,kW	Exergy destruction, kW	Exergetic efficiency
CM	4.21	3.54	0.67	0.84
CD	1.6	1.28	0.32	0.8
TV	1.94	0.62	1.31	0.32
EV	0.57	0.38	0.19	0.66
HP, total	3.78	1.28	2.5	0.34

```

Exergy_analysys_of_heat_pump_without_units.ipynb
Файл  Изменить  Вид  Вставка  Среда выполнения  Инструменты

+ Код  + Текст

# Exergy of fuel in the compressor
if T_1_Des < T_0 < T_2_Des:
    E_F_CM_Des = E_5_Des + E_1_T_Des
if T_0 < T_1_Des:
    E_F_CM_Des = E_5_Des
# Exergy of product in the compressor
if T_1_Des < T_0 < T_2_Des:
    E_P_CM_Des = E_2_M_Des - E_1_M_Des + E_2_T_Des
if T_0 < T_1_Des:
    E_P_CM_Des = E_2_Des - E_1_Des
# Exergy destruction in the compressor
E_D_CM_Des = E_F_CM_Des - E_P_CM_Des
# Exergetic efficiency of the compressor
epsilon_CM = E_P_CM_Des / E_F_CM_Des
    
```

Рис. 7. Фрагмент розрахунку основних ексергетичних характеристик компресора ТНУ

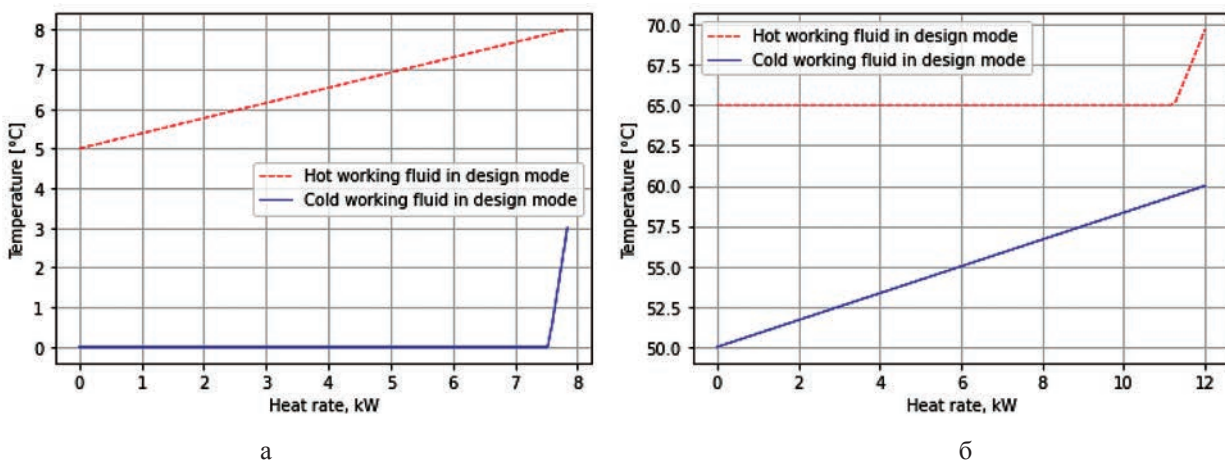


Рис. 8. QT-діаграми випарника (а) та конденсатора (б)

робочого тіла найбільша зміна деструкції ексергії має відбуватися в дросельному вентилі. В інших компонентах деструкція ексергії суттєво не змінюється, за виключенням R32.

Якщо проаналізувати цикли ТНУ з різними робочими тілами в Ts-діаграмі, то можна дійти висновку, що такий характер зміни деструкції ексергії в компонентах ТНУ, який наведено на рис. 9 та 10, зумовлений в основному різною теплою пароутворення кожного робочого тіла. На рис. 11 показано цикли ТНУ в Ts-діаграмі для R1234ze(Z), R1234ze(E) та R1234yf.

Деструкцію ексергії можна визначити за формулою Гюї-Стодоли:

$$\dot{E}_{D,k} = T_0 \cdot \dot{m} \cdot \Delta s, \quad (3)$$

де  $\dot{E}_{D,k}$  – деструкція ексергії в k-му компоненті, Вт;  
 $T_0$  – температура навколишнього середовища, К;  
 $\dot{m}$  – масова витрата робочого тіла, кг / с;  
 $\Delta s$  – генерація ентропії у процесі, Дж / (кг · К).

Отже, якщо проаналізувати процес дроселювання 3–4 (рис. 11), то можна побачити, що генерація питомої ентропії R1234ze(Z), R1234ze(E)

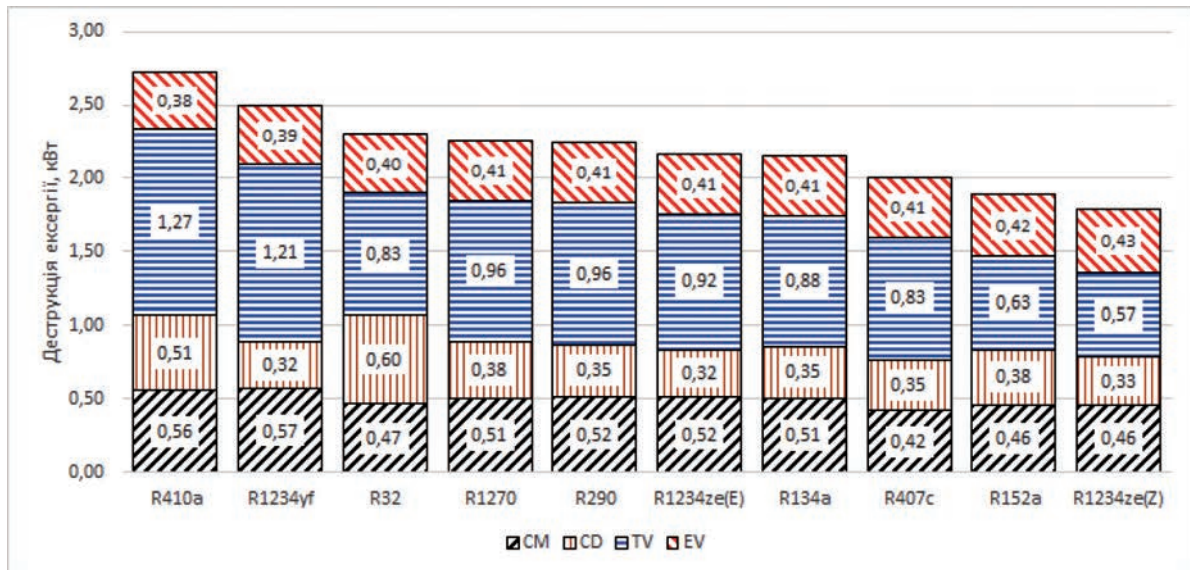


Рис. 9. Значення деструкції ексергії в компонентах ТНУ типу «повітря-вода» залежно від типу робочого тіла

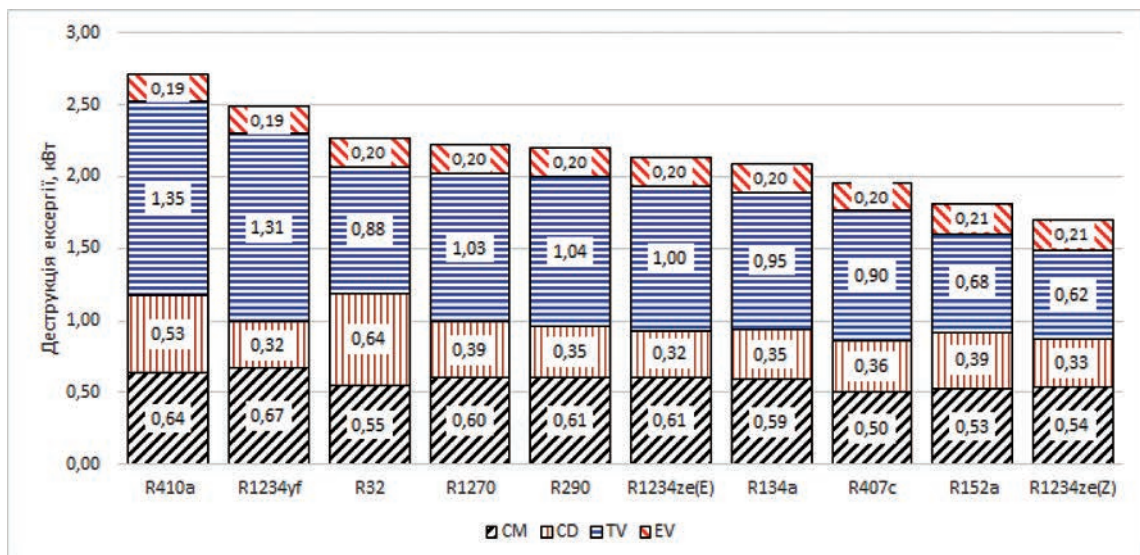


Рис. 10. Значення деструкції ексергії в компонентах ТНУ типу «вода-вода» залежно від типу робочого тіла

та R1234yf майже однакова (лінії дроселювання паралельні). Разом із тим саме через малу теплоту пароутворення R1234yf витрата такого робочого тіла буде найбільшою серед цих трьох робочих тіл. Тоді згідно з формулою (3) деструкція ексергії в дросельному вентилі з робочим тілом R1234yf буде найбільшою, а для R1234ze(Z) – найменшою. Що ж стосується процесу стиснення 1–2, то з Ts-діаграми на рис. 11 можна зробити висновок, що у випадку використання R1234ze(Z) питома генерація ентропії буде найбільша серед цих трьох робочих тіл, а для R1234yf – найменша. Це також можна виявити на основі розрахункових значень ентропії в характерних точках, отриманих за допомогою запропонованого ресурсу. Отже, визначено, що у випадку використання R1234yf генерація ентропії в процесі стискання рівна 21 Дж / (кг · К), а для R1234ze(Z) – 29 Дж / (кг · К). Разом із тим значення витрати для R1234yf є більшим, а для R1234ze(Z) – меншим. У результаті згідно з формулою (3) деструкція ексергії в процесі стиснення цих робочих тіл приблизно однакова (рис. 10).

Приблизно однакова для всіх наведених робочих тіл також деструкція ексергії у випарнику й конденсаторі. Це можна пояснити таким чином. У випадку передачі теплоти в теплообміннику, наприклад, випарнику питома генерація ентропії, віднесена на 1 кг робочого тіла ТНУ, буде визначатися за формулою:

$$\Delta s = \frac{\dot{m}_{air(water)}}{\dot{m}} \cdot (s_{EV,in} - s_{EV,out}) - (s_1 - s_4), \quad (4)$$

де  $\dot{m}_{air(water)}$  – витрата низькопотенційного джерела енергії (повітря або вода), кг / с;

$s_{EV,in}, s_{EV,out}$  – питома ентропія низькопотенційного джерела енергії на вході й виході з випарника, Дж / (кг · К).

Отже, для всіх робочих тіл ТНУ добуток  $\dot{m}_{air(water)} \cdot (s_{EV,in} - s_{EV,out})$  однаковий. Разом із тим, чим більша теплота пароутворення, тим менша витрата й тим більший доданок  $\frac{\dot{m}_{air(water)}}{\dot{m}} \cdot (s_{EV,in} - s_{EV,out})$ , а також різниця  $s_1 - s_4$ . У результаті генерація ентропії у випадку використання робочого тіла з більшою теплотою пароутворення зростає, а через зменшення витрати робочого тіла деструкція ексергії для всіх випадків приблизно однакова.

#### Список літератури:

1. Morosuk T., Tsatsaronis G. Advanced exergy-based methods used to understand and improve energy-conversion systems. *Energy*. 2019. Vol. 169. P. 238–246.
2. Sciubba E., Wall G. A brief Commented History of Exergy From the Beginnings to 2004. *International Journal of Thermodynamics*. 2007. Vol. 10. No. 1. P. 1–26.
3. Hepbasli A. Low exergy (LowEx) heating and cooling systems for sustainable buildings and societies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16 (1). P. 73–104.

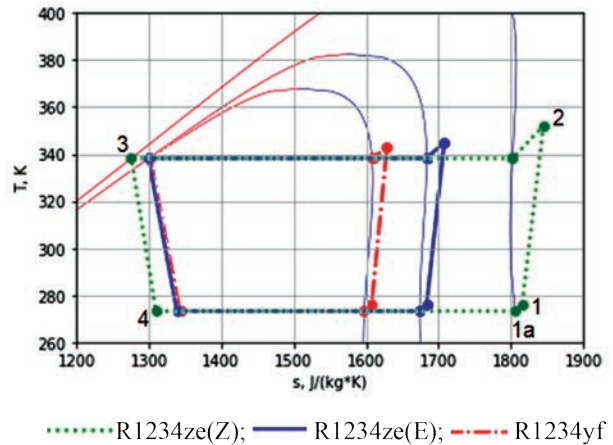


Рис. 11. Ts-діаграми ТНУ типу «вода-вода» залежно від типу робочого тіла

**Висновки.** У роботі запропоновано розвиток відкритого, інтерактивного середовища, яке базується на залученні хмарних технологій, для широкого впровадження на практиці методології ексергетичного аналізу теплоенергетичних систем.

Таке середовище спирається на використання Jupyter блокнотів, створених мовою програмування Python, і сервісу Google Colab для їх редагування, збереження та виконання. Такий підхід дає можливість відмовитися від спеціалізованих програмних продуктів і платних ліцензій для них.

Передбачено розрахунок теплофізичних властивостей робочих тіл, інтерактивні й відкриті алгоритми й інструменти для реалізації ексергетичного аналізу з використанням сучасних математичних методів розрахунків, швидкий, універсальний і зручний доступ до розрахунків за допомогою мережі Інтернет.

Реалізовано ексергетичний аналіз ТНУ типу «повітря-вода» й «вода-вода» з різними робочими тілами. З'ясовано, що деструкція ексергії в таких установках менша (а енергетична ефективність, відповідно, більша) для тих розглянутих робочих тіл, для яких теплота пароутворення – більша.

Стаття підготовлена в рамках виконання проєкту «Розроблення техніко-технологічних схем і систем керування теплозабезпечення населених пунктів на основі термодинамічних підходів» (номер державної реєстрації – НДР 0120U102168).

4. Sangi R., Müller D. Application of the second law of thermodynamics to control: A review. *Energy*. 2019. Vol. 174. P. 938–953.
5. Wang L., Fu P., Wang N., Morosuk T., Yang Y., Tsatsaronis G. Malfunction diagnosis of thermal power plants based on advanced exergy analysis: The case with multiple malfunctions occurring simultaneously. *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 148. P. 1453–1467.
6. Morosuk T., Tsatsaronis G. Strengths and limitations of advanced exergetic analyses. *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* : Conference, November 15–21, 2013. San Diego, California (USA), 2013. P. 1–11.
7. Jebaraj S., Iniyar S. A review of energy models. *Renew Sustain Energy Rev*. 2006. Vol. 10 (4). P. 283–311.
8. Zhao Z. Computer Program for the Exergoeconomic Analysis of Energy Conversion Plants : Doctoral thesis ; Technischen Universität Berlin, 2015. 153 S.
9. Furht B., Escalante A. Handbook of Cloud Computing. New York : Springer, 2010. 634 p.
10. Ochkov V., Orlov K., Voloshchuk V. Thermal Engineering Studies with Excel, Mathcad and Internet. Switzerland : Springer international publishing, 2016. 307 p.
11. Voloshchuk V.A. On-line, interactive tools and algorithms for thermal calculations of heat pumps. *Program and Proceedings* : The 13th International Conference of Young Scientists on Energy Issues (CYSENI-2016), Kaunas, Lithuania, May, 26–27, 2016. Kaunas, 2016. P. II-72–II-81.
12. Python.org. URL: <https://www.python.org> (дата звернення: 15.06.2021).
13. Google Colab. URL: <https://colab.research.google.com> (дата звернення: 15.06.2021).
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. Vol. 53 (6). P. 2498–2508.
15. Nawaz K., Shen B., Elatar A., Baxter V., Abdelaziz O. R-1234yf and R-1234ze(E) as Low-GWP Refrigerants for Residential Heat Pump Water Heaters. *International Journal of Refrigeration*. 2017. Vol. 82. P. 348–365.
16. Nawaz K., Shen B., Elatar A., Baxter V., Abdelaziz O. R290 (propane) and R600a (isobutane) as natural refrigerants for residential heat pump water heaters. *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 127. P. 870–883.

#### **Voloshchuk V.A., Liubyt'skyi S.V., Polishchuk I.A., Polishchuk M.A. APPLICATION OF CLOUD PLATFORM COLABORATORY FOR IMPLEMENTATION OF EXERGETIC ANALYSIS OF HEAT PUMP SYSTEMS**

*The paper presents the development of an interactive computing environment based on the use of open online services for the widespread use of exergy analysis and optimization of thermal processes and systems. This environment supports the collection, storage and processing of data and uses open source software: Google Collaboratory – a cloud service for developing notebooks using the object-oriented programming language Python and CoolProp – a library for calculating the thermophysical properties of working bodies. An example of exergy analysis of air-to-water and water-to-water heat pumps (HP) on the base of the developed service is given. The calculation scheme of HP and user functions for calculation of thermophysical properties of working bodies are offered. Examples of calculation of parameters and the main exergetic variables (fuel of exergy, product of exergy, exergy destruction and exergetic efficiency) of HP are provided in the form of graphs and tables. On the base of the developed resource, the exergy destruction in each component of HP for different working fluids was calculated and a comparison between air-water and water-water HPs was performed. It has been shown that the distribution of exergy destruction in HP components within the proposed working fluids is almost the same. For both types of HPs the largest total exergy destruction belongs to the system using R410A, and the smallest – to the system with R1234ze (Z). It is also found that with the change of the type of working fluid the largest change in exergy destruction belongs to the throttle valve and is due to the different value of heat of vaporization of each working fluid. It had been also shown that the exergy destruction in the evaporator and condenser is approximately the same for the all analyzed working bodies.*

**Key words:** Python, Google Collaboratory, online service, thermophysical properties of working fluids, heat pump, exergy analysis, destruction of exergy.



УДК 621.18.018.4

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/27>**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»**Гікало П.В.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**ЕКСЕРГЕТИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ КОГЕНЕРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ  
З УРАХУВАННЯМ ЗМІННИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ**

На відміну від енергетичного аналізу, який найчастіше використовується у науковій та інженерній практиці і базується на застосуванні тільки першого закону термодинаміки, ексергетичний підхід, що поєднує як перший, так і другий закон термодинаміки, дозволяє визначити місце, значення і джерела термодинамічних втрат під час передачі та перетворення енергії.

У роботі наведено ексергетичне оцінювання когенераційної установки на базі протитискової парової турбіни типу P-2,5-15/3M з урахуванням змінного навантаження, зумовленого зміною споживання теплоти житловим комплексом. Розрахункове теплове навантаження на опалення і гаряче водопостачання від когенераційної установки взимку дорівнює 49 МВт. Розрахункова температура прямої води системи теплопостачання взимку становить 115°C, а зворотної – 70°C. У літній період розрахункове теплове навантаження на гаряче водопостачання дорівнює 13 МВт, а розрахункова температура прямої і зворотної води системи теплопостачання становить відповідно 70°C та 50°C. Динаміку режимів роботи установки запропоновано здійснити на основі квазістаціонарного підходу з часовим кроком 24 години із визначенням добових і річних значень таких параметрів ексергетичного оцінювання, як деструкція ексергії та ексергетичного ККД. У програмному пакеті MathCad із застосуванням бібліотеки для розрахунку теплофізичних властивостей робочих тіл Coolprop розроблено і впроваджено відповідну математичну і комп'ютерну модель, представлену системою алгебраїчних рівнянь. Для розв'язання системи рівнянь використано градієнтний числовий метод пошуку рішення, вбудований у MathCad. На основі отриманих даних показано, що для підвищення енергетичної ефективності ТЕЦ потрібно передусім підвищити термодинамічну ефективність парового котла шляхом збільшення параметрів (тиску і температури) пари, а потім – мережевого підігрівача за рахунок зменшення температурного напору у ньому шляхом зниження тиску пари після парової турбіни.

**Ключові слова:** когенераційна установка, змінні режими роботи, деструкція ексергії, ексергетичний ККД.

**Постановка проблеми.** Комбіноване виробництво теплової та електричної енергії є високо-ефективним процесом, який одночасно генерує електрику і тепло, може забезпечити суттєву економію первинної енергії порівняно із роздільним виробництвом [1].

Упродовж останніх десятиліть в Україні підготовлено базу для широкого впровадження когенераційної техніки у різних галузях економіки: розроблено конкретні проекти когенераційних установок різного типу, досліджені потенціальні можливості розвитку когенерації в Україні [2, 3],

прийнято у 2005 році Закон України «Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерацію) і використання скидного енергопотенціалу» [4], а також підзаконні акти до нього, які стимулюють розвиток когенерації в Україні із дотриманням принципів та положень законодавства Європейського Союзу.

У випадку аналізу систем когенерації важливу роль відіграють показники та методи їх визначення. Зокрема, одним із можливих методів оцінювання ефективності когенерації є так званий коефіцієнт використання теплоти палива [5]:

$$\eta_f = \frac{Q + N}{BQ_p^H}, \quad (1)$$

де  $Q$  та  $N$  – кількість теплоти та електроенергії, що відпускається;

$B$  – витрата палива;  $Q_p^H$  – нижча теплота згорання палива.

У виразі (1) підсумовування теплової та електричної енергії, які не можна вважати рівноцінними видами енергії, є некоректним. Відповідно і коефіцієнт використання теплоти палива у когенераційній установці не дає об'єктивної інформації енергетичної ефективності таких систем.

Науково обґрунтованими методами оцінювання ефективності когенераційних установок можуть бути ті, які базуються на поєднанні як першого, так і другого законів термодинаміки. У цьому випадку є можливість кількісного оцінювання якості енергоресурсів, що використовуються або отримуються.

На відміну від енергетичного аналізу, який найчастіше використовується у науковій та інженерній практиці, поєднання ексергетичного, економічного та екологічного методів оцінювання дозволяє визначити місце, значення, джерела, вартість і негативний вплив на довкілля термодинамічних втрат під час процесів передачі та перетворення енергії [6].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Постановці та розв'язанню задач оцінки вартості двох продуктів системи, що виробляються одночасно на основі ексергетичного підходу (так звана CGAM-задача), присвячено серію робіт [7, 8], де кожен із авторів запропонував застосування власного методу поєднання ексергетичного та економічного аналізу для визначення оптимальних параметрів когенераційної ГТУ у стаціонарному режимі роботи.

У роботі [9] наведено огляд публікацій, присвячених енергетичному, ексергетичному, ексергоекономічному та економічному (4E) оцінюванню теплових електростанцій. Проаналізовано шістнадцять робіт, які досліджували саме когенераційні установки з позицій ексергетичного аналізу.

У статті [10] наведено огляд робіт з ексергетичного аналізу та порівняння когенераційних установок різних типів і показано, зокрема, що:

– в існуючих публікаціях не досить уваги приділено ексергетичному оцінюванню когенераційних установок невеликої потужності для теплозабезпечення житлового сектору;

– мало робіт присвячено рішенням із підвищення ексергетичної ефективності таких установок.

Автори [11] пропонують огляд праць, присвячених ексергоекономічному аналізу та оптимізації когенераційних установок. Розглянуто дизельну

когенераційну систему та запропоновано залежності для її ексергоекономічного оцінювання.

На основі проведеного аналізу існуючих праць можна зробити висновок, що нині є потреба подальшого розроблення і здійснення методів ексергетичного оцінювання когенераційних систем із метою обґрунтування параметрів та режимів роботи задля підвищення їх ефективності. У роботах, присвячених ексергетичному аналізу когенераційних систем, розглядалися переважно стаціонарні режими. Застосування таких критеріїв ексергетичного аналізу, як деструкція ексергії, ексергетичний ККД як для окремих елементів, так і для системи загалом, а також здійснення методології поглибленого ексергетичного, ексергоекономічного та ексергоприродничого оцінювання з урахуванням змінного навантаження дозволило би більш обґрунтовано і точніше визначити параметри та режими роботи когенераційних установок.

**Формулювання цілей статті.** Метою роботи є ексергетичне оцінювання когенераційної установки на основі протитискової парової турбіни з урахуванням її змінного навантаження, зумовленого зміною споживання теплоти житловим комплексом.

**Виклад основного матеріалу.** У рамках цієї роботи використано методологію ексергетичного аналізу, розроблену представниками німецької школи прикладної термодинаміки, яка містить уведення понять «ексергія палива» ( $E_p$ ) та «ексергія продукту» ( $E_r$ ) [12, 13].

Для оцінювання термодинамічної неефективності розраховуються «деструкція ексергії» ( $\dot{E}_D$ ) та «втрати ексергії» ( $\dot{E}_L$ ) [13, 14]

$$\dot{E} = \dot{E}_D + \dot{E}_L \quad (2)$$

Деструкція ексергії (exergy distruction) – це необоротності, наявні в елементі системи (хімічна реакція, передача теплоти за кінцевої різниці температур, змішування речовин із різним складом або станом, тертя, самовільне розширення). Наприклад, передача теплоти від гарячого потоку до холодного можлива тільки за наявності температурного напору. Як результат, енергія з вищого температурного рівня переходить на нижчий, тобто наявна деструкція (втрати, розсіювання, знищення) ексергії. Різниця температур між гарячим і холодним теплоносієм, з одного боку, визначає деструкцію ексергії, а з іншого – визначає площу теплообмінної поверхні (капітальні затрати, затрати на ремонт та обслуговування теплообмінника). Втрати ексергії (exergy losses) відбуваються під час аналізу умов взаємодії компонента системи із навколишнім середовищем. Наприклад, якщо температура зовнішньої

оболонки теплообмінника є вищою за температуру навколишнього середовища, то у цьому випадку якраз відбуваються втрати ексергії. Для спрощення аналізу втрати ексергії визначають для системи загалом  $\dot{E}_{L,tot}$  [15, 16].

Тоді ексергетичний баланс для усієї системи передачі та перетворення енергії матиме вигляд [17]:

$$\dot{E}_{F,tot} = \dot{E}_{P,tot} + \sum_k \dot{E}_{D,k} + \dot{E}_{L,tot}, \quad (3)$$

де  $\dot{E}_{F,tot}$ ,  $\dot{E}_{P,tot}$  – відповідно ексергія палива і продукту системи загалом;

$\dot{E}_{D,k}$  – деструкція ексергії у  $k$  – елементі.

Ексергетичний баланс для  $k$ -го елемента системи має вигляд [0]:

$$\dot{E}_{F,k} = \dot{E}_{P,k} + \dot{E}_{D,k}, \quad (4)$$

Величини  $\dot{E}_{D,k}$  та  $\dot{E}_{L,tot}$  є абсолютними характеристиками термодинамічної ефективності системи.

У роботі також використано відносні показники термодинамічної ефективності [0]:

– ексергетичний ККД системи

$$\mu_{tot} = \frac{\dot{E}_{P,tot}}{\dot{E}_{F,tot}} = 1 - \frac{\dot{E}_{D,tot} + \dot{E}_{L,tot}}{\dot{E}_{F,tot}}; \quad (5)$$

та для  $k$ -го елемента

$$\mu_k = \frac{\dot{E}_{P,k}}{\dot{E}_{F,k}} = 1 - \frac{\dot{E}_{D,k}}{\dot{E}_{F,k}}. \quad (6)$$

Моделювання здійснювалося на основі рівнянь масового, енергетичного, ексергетичного балансів контрольних об'ємів (для окремих елементів системи), рівнянь теплопередачі, а також емпіричних і напівемпіричних залежностей, які описують теплоенергетичні процеси у компонентах системи.

Наразі прийнято, що тривалість перехідних процесів є значно меншою порівняно з динамікою зміни режиму роботи системи. Саму динаміку режимів роботи системи пропонують здійснити на основі квазістаціонарного підходу із часовим кроком  $\tau_n = 24$  години. Відповідно критерії ексергетичного аналізу як для окремих елементів, так і для системи загалом визначалися для кожного добового проміжку часу. Крім добових значень цих критеріїв також розраховувалися річні значення деструкції ексергії у компонентах установки та у системі загалом:

$$E_{D,k}^{yr} = E_{F,k}^{yr} - E_{P,k}^{yr}, \quad (7)$$

а також осереднений ексергетичний ККД

$$\varepsilon_k^{yr} = \frac{E_{P,k}^{yr}}{E_{F,k}^{yr}}, \quad (8)$$

де  $E_{F,k}^{yr}$ ,  $E_{P,k}^{yr}$  – річні значення ексергії палива та продукту відповідно, які розраховувалися шляхом підсумовування їх добових значень, кВт·год.

Математичне моделювання досліджуваної установки базується на здійсненні алгоритму розв'язання системи нелінійних алгебраїчних рівнянь, які містять рівняння теплових балансів і теплопередачі як для окремих частин (охолодження, конденсація) мережевого підігрівача та охолоджувача конденсатора, так і загалом для цих поверхонь підігріву; балансові рівняння масових витрат; рівняння, що описують окремі процеси у системі (розширення робочого тіла у турбіні); рівняння із визначення гідравлічних опорів під час руху робочих тіл і теплоносіїв. Загалом розроблена математична модель містить більше 25-ти рівнянь. Теплофізичні властивості робочих тіл визначалися за допомогою пакету Coolprop [0]. Розв'язок цієї системи можна здійснити за допомогою програмних пакетів. У роботі використаний MathCad [0] і градієнтний числовий метод пошуку рішення, прямо вбудований у цей програмний пакет.

Принципова схема паротурбінної когенераційної установки представлена на рис. 1. У котлі 1 генерується перегріта пара із тиском 1,5МПа і температурою 380°C, яка потім подається на протитискову парову турбіну із тиском на виході 0,2 МПа і температурою 190°C (турбіна типу Р-2,5-15/3М). Після турбіни пара подається на мережевий підігрівач 3, де конденсується, передаючи енергію у формі теплоти для нагрівання мережевої води системи централізованого теплопостачання. Після цього мережева вода ще додатково нагрівається в охолоджувачі конденсату 4; останній потім подається через деаератори та інше допоміжне обладнання (для спрощення тут не показано) назад у котел. Розрахункове теплове навантаження на опалення та гаряче водопостачання від когенераційної установки взимку дорівнює 49МВт. Розрахункова температура прямої води системи теплопостачання становить 115°C, а зворотної – 70°C. У літній період розрахункове теплове навантаження на гаряче водопостачання дорівнює 13МВт, а розрахункова температура прямої і зворотної води системи теплопостачання становить відповідно 70°C та 50°C.

На рис. 2 зображено отримані на основі розробленої моделі значення добових показників деструкції ексергії  $E_{D,k}(\tau_n)$  в елементах когенераційної установки упродовж року. За даними рис. 2, абсолютні значення деструкції ексергії в елементах установки змінюються протягом року. Причому упродовж опалювального сезону ці зміни є більш суттєвими, ніж упродовж періоду тільки гарячого водопостачання. Крім того, у

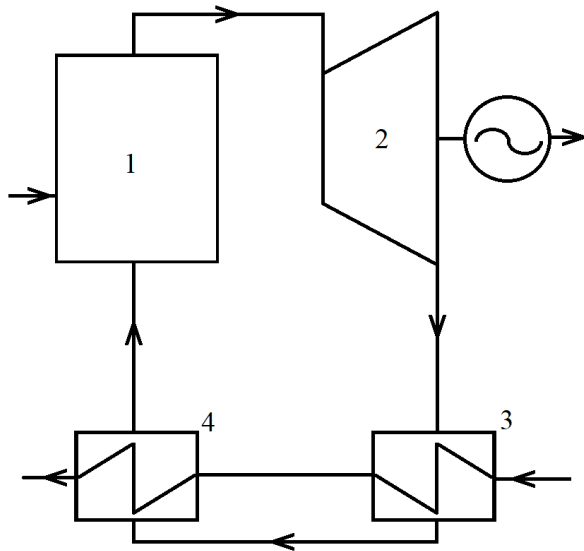


Рис. 1. Принципова схема досліджуваної паротурбінної когенераційної установки: 1 – котел; 2 – турбіна; 3 – мережевий підігрівач; 4 – охолоджувач конденсату

межах опалювального сезону для котла, мережевого підігрівача і системи загалом добові значення деструкції ексергії є більшими порівняно із періодом, коли опалення було відсутнім. Зокрема,

для котла протягом холодного періоду добові значення деструкції ексергії змінюються у межах 300-700 кВт·год. У мережевому підігрівачі для цього ж періоду  $E_{D,k}(\tau_n)$  коливаються у межах 14-65 кВт·год. У турбіні та охолоджувачі конденсату добові значення деструкції ексергії є незначними і коливаються у межах 0,5-13 кВт·год. Для системи загалом параметр  $E_{D,tot}(\tau_n)$  коливається у межах опалювального сезону від 300 до 780 кВт·год.

У теплий період року, коли наявне тільки гаряче водопостачання, деструкція ексергії у компонентах установки змінюється несуттєво. Наприклад, у котлі добове значення цього параметру знаходиться на рівні 330 кВт·год, у мережевому підігрівачі, охолоджувачі конденсату і турбіні – не перевищує 15 кВт·год. Для досліджуваної установки загалом параметр  $E_{D,tot}(\tau_n)$  знаходиться на рівні 350 кВт·год.

На рис. 3 показано зміну протягом року ексергетичного ККД основних елементів досліджуваної паротурбінної когенераційної установки. Видно, що цей коефіцієнт змінюється протягом усього року, що зумовлено змінними режимами роботи компонентів. За даними рис. 3, найбільший ексергетичний ККД характерний для парової турбіни (вище 90%). Ексергетичні ККД мережевого

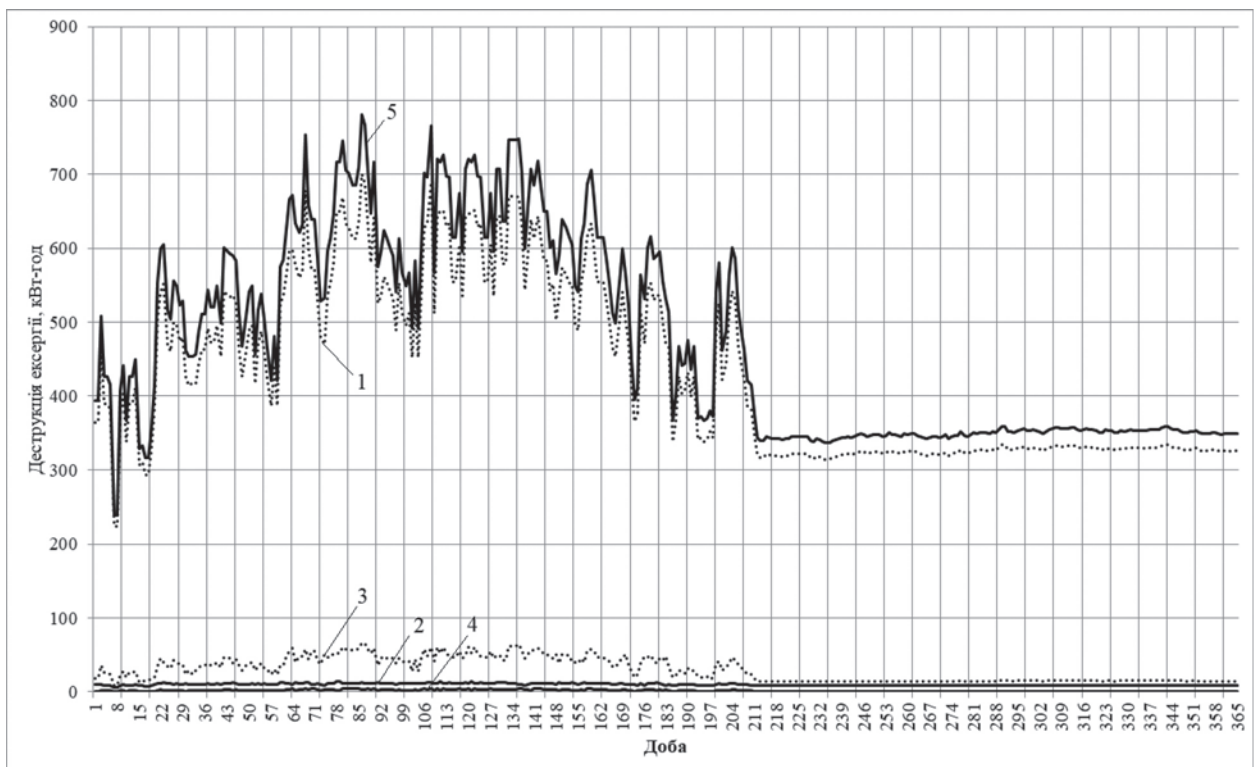


Рис. 2. Зміна добових значень деструкції ексергії у компонентах паротурбінної когенераційної установки протягом опалювального сезону: 1 – котел; 2 – турбіна; 3 – мережевий обігрівач; 4 – охолоджувач конденсату; 5 – система загалом

підігрівача та охолоджувача конденсату приблизно однакові і знаходяться на рівні 65-76%. Ексергетичний ККД парового котла є найнижчим і змінюється у межах 31-35%. Унаслідок цього ексергетичний ККД паротурбінної когенераційної установки загалом є нижчим за 30%.

За даними рис. 4, найбільші сумарні значення річної деструкції ексергії відмічені у паровому котлі

і дорівнюють 157835 кВт-год. У турбіні, мережевому підігрівачі та охолоджувачі конденсату сумарні значення річної деструкції ексергії відповідно дорівнюють 3574, 10788 та 554 кВт-год, тобто на 90% є меншими порівняно з паровим котлом. Основний внесок у формування річного значення деструкції ексергії в установці загалом (172751 кВт-год.) спричинений необоротностями у котлі.

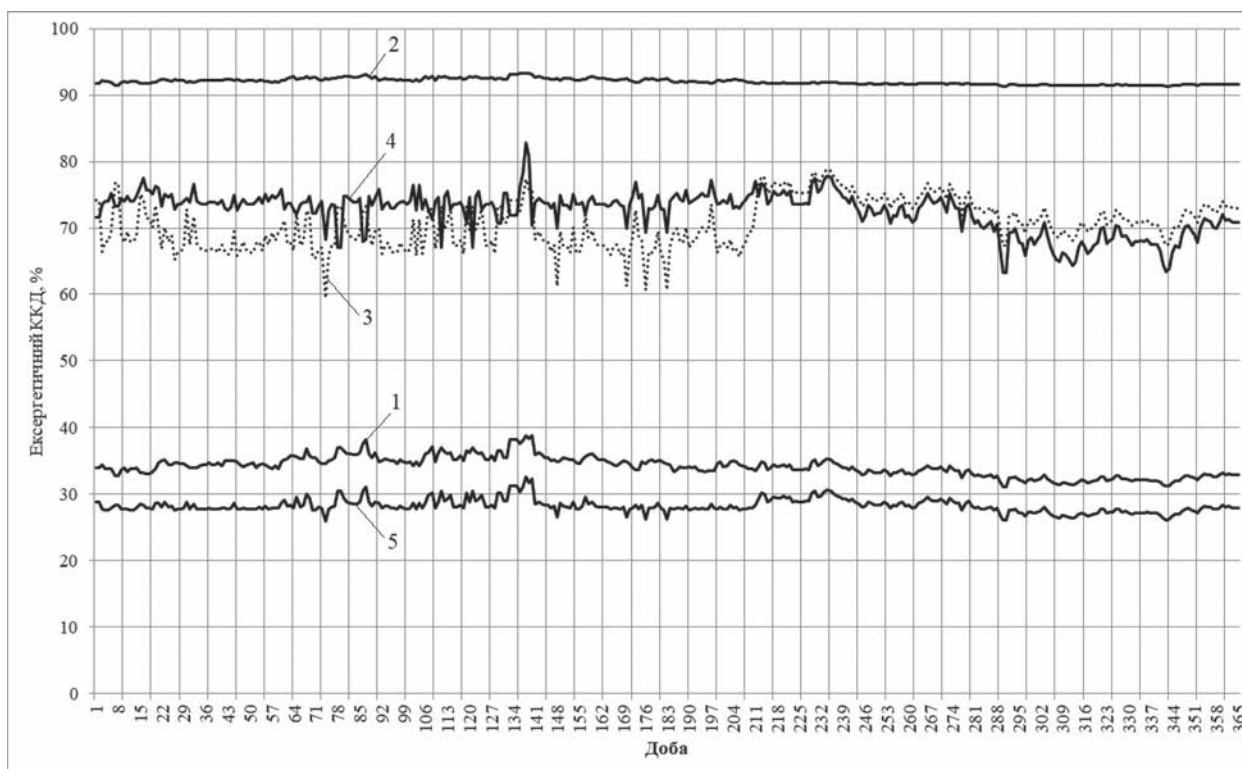


Рис. 3. Зміна добових значень ексергетичного ККД компонентів паротурбінної когенераційної установки протягом опалювального сезону:

1 – котел; 2 – турбіна; 3 – мережевий підігрівач; 4 – охолоджувач конденсату; 5 – система загалом

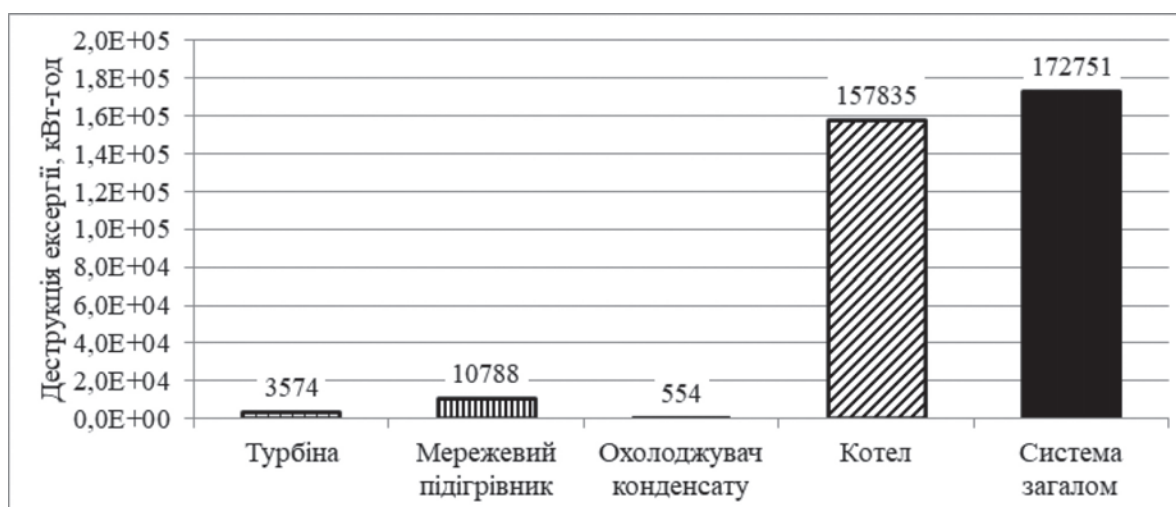


Рис. 4. Річні значення деструкції ексергії в основних елементах паротурбінної когенераційної установки

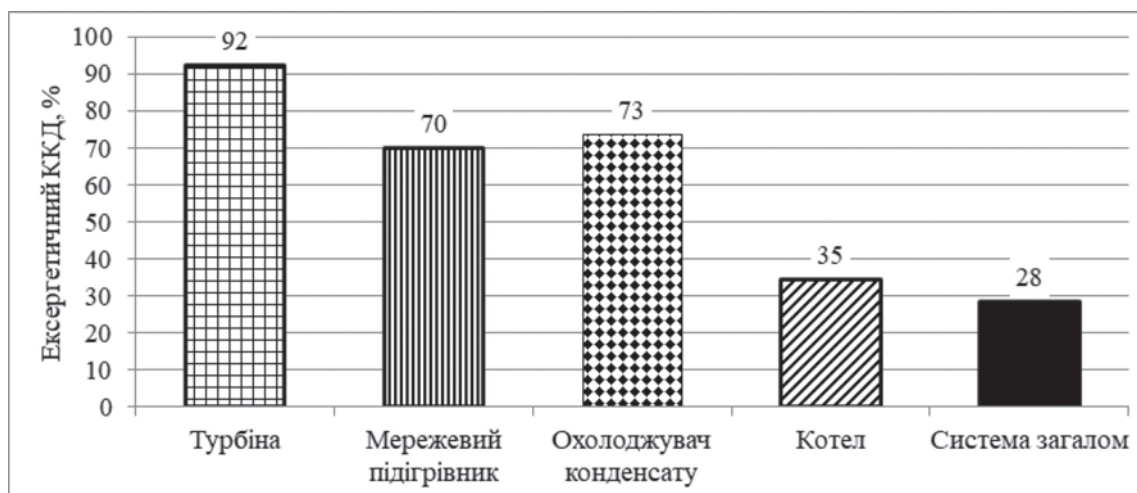


Рис. 5. Середньозважені річні ексергетичні ККД основних елементів паротурбінної когенераційної установки

На рис. 5 наведено осереднені річні ексергетичні ККД основних елементів паротурбінної когенераційної установки, за якими видно, що коефіцієнт для турбіни, мережевого підігрівача, охолоджувача конденсату і котла дорівнює відповідно 92, 70, 73 та 35%. Середньозважений річний ексергетичний ККД ТЕЦ дорівнює 28%.

Підсумовуючи отримані результати, можна зробити висновок, що найбільшого підвищення енергетичної ефективності досліджуваної паротурбінної когенераційної установки можна забезпечити шляхом зниження необоротних процесів у паровому котлі. Як відомо, до процесів, які спричиняють найбільші необоротності у котлі, відносять сам процес горіння і передачу теплоти від продуктів згоряння до води та водяної пари. Якщо процесу згоряння у цьому випадку уникнути неможливо, то знизити необоротність під час передачі теплоти можна шляхом підвищення параметрів (тиску і температури) пари, що генерується котлом. Як показує аналіз, деякого підвищення енергетичної ефективності установки можна досягти за допомогою зниження необоротностей у мережевому підігрівачі шляхом зменшення температурного напору у ньому. У випадку незмінних температур мережевої води це можна досягти шляхом зниження тиску пари після парової турбіни.

У подальшому передбачено здійснення поглибленого ексергетичного, ексергоекономічного та ексергоприродничого оцінювання подібних когенераційних установок з урахуванням перехідних процесів.

**Висновки.** В роботі наведено ексергетичне оцінювання когенераційної установки на базі протитискової парової турбіни з урахуванням її змінного навантаження, зумовленого зміною споживання теплоти житловим комплексом. Задля цього розроблено відповідну математичну та комп'ютерну модель, представлену системою алгебраїчних рівнянь, що дозволило здійснити квазістаціонарний підхід із часовим кроком 24 години для дослідження змінних режимів роботи установки у межах року.

Показано, що для підвищення енергетичної ефективності ТЕЦ потрібно передусім підвищити термодинамічну ефективність парового котла шляхом збільшення параметрів (тиску і температури) пари, а потім мережевого підігрівача за рахунок зменшення температурного напору у ньому шляхом зниження тиску пари після парової турбіни.

Статтю підготовлено у рамках виконання проекту «Розроблення техніко-технологічних схем і систем керування теплозабезпеченням населених пунктів на основі термодинамічних підходів» (номер державної реєстрації НДР 0120U102168).

#### Список літератури:

1. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: Учебник для вузов – 7-е изд., стереотип. Москва : Изд-во МЭИ, 2001. 472 с.
2. Басок Б. І., Новосельцев О.В., Дубовський С.В., Базеев Є.Т. Модернізація системи теплопостачання населених пунктів України. Теплофізика, Енергоефективність, Енергоекономіка, Екологія. Київ, 2018. 412 с.

3. Клименко В.М. Перспективи застосування когенераційних технологій у комунальній енергетиці. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2018. №40(3). С. 32-37.
4. Закон України Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерацію) та використання скидного енергопотенціалу. *Відомості Верховної Ради*. 2005. № 20. С. 278-285.
5. Morosuk T., Tsatsaronis G. Advanced exergy-based methods used to understand and improve energy-conversion systems. *Energy*. 2019. Vol. 169. P. 238-46.
6. Tsatsaronis G., Pisa J., Valero A., Lozano M.A., Serra L., Von Spakovsky M.R., Frangopoulos C. CGAM Problem: Definition and conventional solution. *Energy*. 1994. Vol. 19. P. 279–286.
7. Tsatsaronis G. Exergoeconomic evaluation and optimization of energy systems – application to the CGAM problem. *Energy*. 1994. Vol. 19. P. 287–321.
8. Von Spakovsky M.R. Application of engineering functional analysis to the analysis and optimization of the CGAM problem. *Energy*. 1994. Vol. 19. P. 343–364.
9. Frangopoulos C. Application of the thermoeconomic functional approach to the CGAM problem. *Energy*. 1994. Vol. 19. P. 323–342.
10. Valero A., Lozano M.A., Serra L., Torres C. Application of the exergetic cost theory to the CGAM problem. *Energy*. 1994. Vol. 19. P. 365–381.
11. Kumar R. A critical review on energy, exergy, exergoeconomic and economic (4- E) analysis of thermal power plants. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2017. Vol. 20(1). P. 283-92.
12. Mahian O., Mirzaie M.R., Kasaeian A., Mousavi S.H. Exergy analysis in combined heat and power systems: a review. *Energy conversion and management*. 2020. Vol. 226 P. 113467. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113467.
13. Abusoglu A., Kanoglu M., Exergoeconomic analysis and optimization of combined heat and power production: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2009. Vol. 13 (9). P. 2295–2308.
14. Tsatsaronis G. Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics. *Energy*. 2007. Vol. 32. P. 249–253.
15. Bejan A. Tsatsaronis G., Morgan M. *Thermal Design and Optimization*. New York. Wiley. 1996. 542 p.
16. 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. Vol. 53(6). P. 2498-2508.
17. Mathcad: engineering calculation software: URL: <https://www.mathcad.com/en/>

### **Voloshchuk V.A., Nekrashevych O.V., Hikalo P.V. EXERGETIC PERFORMANCE ESTIMATION OF COGENERATION SYSTEM TAKING INTO ACCOUNT VARIABILITY OF OPERATION MODES**

*In contrast to the energy-based approach which is widely applied in research and engineering and uses the first law of thermodynamics the exergy-based one which combines both the first and the second laws of thermodynamics provides a possibility to identify and calculate the location, magnitude and causes of thermodynamic inefficiencies in processes of energy transfer and conversion.*

*The paper presents exergetic evaluation of combined heat and power system based on the boiler and backpressure steam turbine of R-2.5-15-3M type taking into into account variability of loads due to changes of heat consumption. The design capacity of the combined heat and power system for heating and domestic hot water is equal to 49 MW. The supply and return temperatures for the design mode in winter are equal to 115°C and 70 °C, respectively. For the summer period the design capacity for domestic hot water is equal to 13 MW and the temperatures of supply and return water are equal to 70°C and 5 °C, respectively.*

*The dynamics of the operation modes is estimated on the base of quasi-steady state approach with 24 hr time step exergetic parameters and further calculation of their year values. MathCad software and Coolprop library have been applied for development and implementation of a mathematical and computer model, consisting of a system of algebraic equations. The systems of equations were solved with a gradient numerical method built in MathCad.*

*The obtained results have shown that for increasing energy efficiency of the investigated system the improvement of thermodynamic efficiency of the steam boiler by increasing outlet steam pressure and temperature should be implemented. The network heater is a component of the second priority for improvement by reducing steam turbine outlet pressure.*

**Key words:** *combined heat and power system, variable modes of operation, exergy destruction, exergetic efficiency*

**Самойлик О.В.**

Черкаський державний технологічний університет

**Ткаченко В.Ф.**

Черкаський державний технологічний університет

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ У СКЛАДІ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ

*Проведений аналіз базових тенденцій під час використання малої розподіленої генерації показав, що застосування її із боку споживачів електроенергії у складі електротехнічного комплексу має низку позитивних ефектів і є своєрідним трендом, обумовленим, зокрема, актуальним нормативно-правовим середовищем. Установлено, що існує певний «дефіцит» науково обґрунтованих підходів (методів, процедур і правил) до визначення фізично обґрунтованих характеристик енергоблоків РГ у складі електротехнічного комплексу із розподіленою генерацією та ефективною топологією такого ЕТК. У роботі розглянуто алгоритм оптимізації параметрів РГ на етапі проєктування окремого електротехнічного комплексу та об'єднання декількох ЕТК на основі РГ в єдину електричну мережу із забезпеченням оптимальної топології отриманої електричної мережі.*

*На основі залежностей, що характеризують вплив параметрів і структури електротехнічних комплексів із розподіленими джерелами енергії на показники режиму роботи розподільної мережі, запропоновано цільову функцію оптимізації цих параметрів і структури. Запропоновано методику параметричної оптимізації ЕТК із РГ щодо визначення фізично обґрунтованих характеристик енергоблоків, яка містить три етапи: формування вихідних даних, визначення граничних потужностей енергоблоку, прямий відбір (оптимізація). Проаналізовано ефективність об'єднання декількох електротехнічних комплексів на основі малої розподіленої генерації в єдину електричну мережу із забезпеченням оптимальної топології отриманої електричної мережі. Особливістю такого технологічного об'єднання є додаткова «опція», яка полягає у солідарному покритті навантаження за рахунок організації, зокрема, додаткових ліній електропередачі. Розглянуто імовірне об'єднання на прикладі групи раніше незалежних електротехнічних комплексів на основі малої розподіленої генерації. Ідеологія формування «технологічного об'єднання» наявних ЕТК спрямована на підвищення ефективності електропостачання за рахунок максимального використання усього потенціалу розподіленої генерації.*

**Ключові слова:** розподілена генерація, оптимізація, енергоблок, моделювання, електрична потужність.

**Постановка проблеми.** Одним із напрямів модернізації вітчизняної електроенергетики є активне впровадження малої розподіленої генерації (РГ), зокрема на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Використання розподільної генерації із боку споживачів електроенергії у складі електротехнічного комплексу (ЕТК) має низку загальновідомих позитивних ефектів [1, с. 1] і є своєрідним трендом, обумовленим, зокрема, актуальним нормативно-правовим середовищем. Але недослідженість питань визначення комплексного підходу до вибору фізично обґрунтованих характеристик енергоблоків РГ і їх оптимального застосування у складі ЕТК, відсутність типових алгоритмів визначення структури і топології таких комплексів, істотно невелика методична пропрацьованість і обмеженість застосування багатьох формалізованих підходів

ускладнює можливість ефективно використовувати всі переваги розподільної генерації. Тому актуальним є комплексний підхід до визначення оптимальних характеристик блоків розподільної генерації і вибору ефективною топологією можливого технологічного об'єднання (ТО) декількох ЕТК на базі РГ в єдину електричну мережу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз базових тенденцій у роботах [2, с. 54-56; 3, с. 24-26; 4, с. 75-66 ] показав, що більшість досліджень висвітлюють питання оптимізації таких параметрів РГ, як довгострокове планування розвитку; зменшення втрат під час передачі і розподілення електроенергії шляхом певної локалізації; раціональне планування розміщення генерації у вузлах енергосистеми; підвищення стійкості, збереження і поліпшення параметрів якості електроенергії; оптимальний розподіл активного і



реактивного навантаження електричних мереж між відновлювальними джерелами електроенергії. Такий підхід застосовується зазвичай під час розгляду оптимізації переважно зовнішніх розподільних електропостачальних компаній.

Водночас існує певний «дефіцит» науково обґрунтованих підходів (методів, процедур і правил) до визначення фізично обґрунтованих характеристик енергоблоків РГ у складі електротехнічного комплексу із розподіленою генерацією та ефективною топологією такого ЕТК.

Надалі ми будемо керуватися концепцією «внутрішнього» підходу до реалізації РГ в електрогосподарстві споживача. Отже, вихідною базою для побудови зазначеного підходу є процеси і параметри, які спостерігаються у системі внутрішнього електропостачання споживачів.

**Постановка завдання.** Мета роботи – розроблення методики параметричної оптимізації засобів розподіленої генерації у складі локальних електротехнічних комплексів та оцінювання доцільності, ефективною топологією можливого технологічного об'єднання декількох ЕТК на основі РГ в єдину електричну мережу.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Поставлена мета роботи має два зазначених складники, що дозволяє аргументовано застосувати запропонований нижче дворівневий підхід, а саме: на першому рівні розглянемо алгоритм оптимізації параметрів РГ на етапі проектування окремого електротехнічного комплексу, на другому – об'єднання декількох ЕТК на основі РГ в єдину електричну мережу із забезпеченням оптимальної топології отриманої електричної мережі. Це дозволяє коректно означити шляхи визначення оптимізації засобів РГ у складі локальних ЕТК та розглянути допустимість та ефективність технологічного об'єднання окремих ЕТК на базі РГ в єдину електричну мережу за типом «віртуальної електростанції».

*Перший рівень.* Під час побудови методики оптимізації параметрів РГ ми розділимо алгоритм рішення на три етапи: формування вихідних даних; визначення граничних потужностей енергоблоку; безпосередній відбір (оптимізація). Відзначимо, що водночас кожен запропонований етап може бути адаптований під умови конкретного завдання; є можливість його практичного здійснення для неоднорідних задач різного ступеня складності і комплексності поставлених цілей.

Метою першого етапу є збір первинної інформації про об'єкт дослідження і технологічні можливості здійснення завдання, отже, він утворює

передпроектну стадію роботи. Далі відбувається розв'язання задачі; цей процес навмисно розділено на три послідовні етапи. Розглядаючи оптимізацію РГ як комплексний процес, доцільно виділити у ньому окремими стадіями алгоритми структурної і параметричної оптимізації.

Параметрична оптимізація полягає у визначенні номінальних параметрів елементів системи. Метою параметричної оптимізації нашої задачі стане визначення фізично обґрунтованих характеристик енергоблоків стосовно розв'язання завдань можливості і допустимості здійснення запланованих варіантів. Структурна оптимізація спрямована, з одного боку, на вибір оптимальної топології і режиму функціонування систем, із другого – на досягнення максимального техніко-економічного ефекту.

Надалі ми опишемо поетапний алгоритм оптимізації.

Етап I – формування первинних вихідних даних. На першому етапі відбувається запис бази вихідних даних для оптимізації параметрів енергоблоків і навантаження. Із математичного погляду для подальшого вирішення зручною формою запису є матриці. На основі оброблення первинних даних обчислюються розрахункові характеристики, які надалі використовуються на подальших етапах (як для умовного відбору, так і для обчислення критеріїв оптимізації).

I-I. Масиви параметрів навантаження визначаються електроспоживанням споживача (активної  $P_i$ , реактивної  $Q_i$  і повної потужностей  $S_i$ ) у максимальному і мінімальному стані (наприклад, для режимних днів) та у загальному вигляді записуються в такий спосіб:

$$MP_{\min/\max} = \begin{bmatrix} P_1 & \dots & P_t \\ Q_1 & \dots & Q_t \\ S_1 & \dots & S_t \\ \cos \varphi_1 & \dots & \cos \varphi_t \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де  $t$  – кількість періодів усереднення.

Кожний стовпець матриці відображає параметри режимів електропостачання за період усереднення, отже, описуються графіки навантаження споживача. На підставі подальшого розрахунку характеристик графіків формується матриця МС, у рядках якої записуються результати у вигляді коефіцієнтів і величин, що характеризують графіки активного і реактивного навантаження (P, Q):

$$MC_{\min/\max} = \begin{bmatrix} K_{\max.P} & K_{\phi.e.P} & K_{z.e.P} & P_{ск.P} & \dots \\ K_{\max.Q} & K_{\phi.e.Q} & K_{z.e.Q} & P_{ск.Q} & \dots \end{bmatrix}. \quad (2)$$

де  $K_{\max.P}$ , ( $K_{\max.Q}$ ) – коефіцієнт максимуму навантаження активного (реактивного);

$K_{\phi, \epsilon, P}$ , ( $K_{\phi, \epsilon, Q}$ ) – коефіцієнт форми графіку навантаження активного (реактивного);

$K_{\phi, \epsilon, P}$ , ( $K_{\phi, \epsilon, Q}$ ) – коефіцієнт заповнення графіка навантаження активного (реактивного);

$P_{ck, P}$ , ( $P_{ck, Q}$ ) – середньоквадратична потужність навантаження активного (реактивного).

I-II. Массив параметрів генерації є матрицею, аналогічною MP, проте стовпці матриці характеризують вихідні параметри установок:

$$RG = \begin{bmatrix} P_{RG1} & \dots & P_{RGn} \\ Q_{RG1} & \dots & Q_{RGn} \\ S_{RG1} & \dots & S_{RGn} \\ \cos \varphi_{RG1} & \dots & \cos \varphi_{RGn} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Отже, матриця RG є повною базою розглянутих у задачі установок. Під час розгляду декількох виробників або типів установок можна зробити проміжний поділ бази на підмасиви, що не виключає об'єднання на наступних стадіях для зручності розв'язання глобальної і локальних задач.

Етап II – визначення граничних потужностей енергоблока. Основним завданням цієї дії є встановлення меж вибору, які визначають мінімальну і максимальну потужність, що видається енергоблоком. Під мінімальною потужністю розуміють нижню межу вироблюваної потужності (потужність одиначної установки). Максимальна потужність визначає виконання вимог до необхідного і достатнього забезпечення розрахункового навантаження об'єкта. Визначення граничних потужностей енергоблока залежить від мети оптимізації і планованого профілю роботи джерела живлення: паралельна або ізолювана робота, повна або часткова компенсація зовнішнього споживання. Для завдань із повною компенсацією мінімальний рівень потужності, що виробляється, визначають мінімальними значеннями графіка навантаження:

$$P_{\Sigma, PG, \min} = \frac{P_{MP \min}}{k_k}, \quad (4)$$

де  $P_{MP \min}$  – мінімальне значення потужності, обране з масиву  $MP_{\max}$ ;

$k_k \approx 0,7 \div 0,8$  – коригуючий коефіцієнт, який умовно є коефіцієнтом запасу і приймається відповідно до максимального значення ККД для одиначної установки.

Для забезпечення розрахункових навантажень споживача потрібні і достатні межі енергоблоку визначаються такою системою:

$$\begin{cases} P_{\Sigma, PG, \max} \geq \frac{P_{MP \max}}{k_k} \\ P_{\Sigma, PG, \max} \leq \frac{P_{MP \max}}{k_k k_s} \end{cases}, \quad (5)$$

де  $P_{MP \max}$  – максимальне значення потужності, обране з масиву  $MP_{\max}$ ;

$k_s$  – коефіцієнт запасу, який приймається з урахуванням кількості агрегатів, можливих за вимогами технологічного резервування.

Практично неможливо сформувати незмінний у часі графік навантаження споживачів. Водночас за рахунок скоординованого використання зовнішніх джерел енергії та засобів РГ можна досягти певного підвищення однорідності графіків навантаження, що формуються в електричних мережах. Тоді ступінь однорідності характеризуватиметься коефіцієнтом форми відповідного графіка навантаження. Теоретично здійснити подібну політику можна шляхом застосування диференційованих тарифів на електроенергію, наприклад, подібно до формування оплати за спожиту реактивну потужність для споживачів, які беруть участь у її регулюванні спільно із енергосистемою.

Для задач із неповною компенсацією, спрямованою на зрізання піків навантаження під час паралельної роботи із енергосистемою, вводяться межі, зумовлені формою графіка навантажень:

$$P_{\Sigma, PG, \min} = \frac{P_{MP \min}}{k_k \cdot K_{\phi, \epsilon, P}}, \quad (6)$$

$$P_{\Sigma, PG, \max} = \frac{P_{MP \max}}{k_k \cdot K_{\phi, \epsilon, P}}, \quad (7)$$

де  $P_{MP \min}$  – мінімальне значення потужності, обране з масиву  $MP_{\min}$ ;

$K_{\phi, \epsilon, P}$  – коефіцієнт форми графіка навантаження споживача.

Етап III – безпосередній відбір (оптимізація). На етапі безпосереднього відбору проводиться структурна оптимізація. Математичним відображенням критерію оптимальності є цільова функція (ЦФ)  $f$ , яку складають на основі базового математичного апарату задачі. Зазвичай основою для синтезу ЦФ виступають як технічні, так і економічні показники. Серед останніх найбільшої популярності набувають критерії окупності та оцінювання ефективності інвестицій у будівництво об'єктів РГ. Іншим шляхом визначення оптимальності рішення є розрахунок технічних характеристик як визначальних критеріїв: мінімум втрат електроенергії, підвищення надійності електропостачання і показників якості електроенергії.

На основі залежностей, які характеризують вплив параметрів і структури електротехнічних комплексів із розподіленими джерелами енергії на показники режиму роботи розподільної мережі, може бути представлена цільова функція оптимізації цих параметрів і структури.

В якості першого критерію пропонують приймати мінімум втрат активної потужності в електротехнічному комплексі у режимі максимального навантаження ( $P_{втрат.мін.н}$ ), який є функцією активної ( $P_{РГ}$ ) і реактивної ( $Q_{РГ}$ ) потужностей генератора, а також місця його установки ( $\lambda_{РГ}$ ):

$$f_1 = P_{втрат.макс.н}(P_{РГ}, Q_{РГ}, \lambda_{РГ}). \quad (8)$$

Наступним критерієм обрано мінімум втрат активної потужності в електротехнічному комплексі у режимі мінімального навантаження ( $P_{втрат.мін.н}$ ), який також є функцією активної і реактивної потужностей генератора і місця його установки:

$$f_2 = P_{втрат.мін.н}(P_{РГ}, Q_{РГ}, \lambda_{РГ}). \quad (9)$$

Основною умовою обмеження під час оптимізації режиму роботи розподільної мережі промислового підприємства є очевидні вимоги до значень тривало допустимого струму  $I_{доп.м}$  у лінії  $ij$ :

$$I_{ij} \leq I_{доп.м}, \quad (10)$$

де  $I_{ij}$  – діюче значення струму у лінії  $ij$ ;  
 $I_{доп.м}$  – тривало допустимий струм у лінії  $ij$ .

Окрім того, напруга у вузлі ( $i$ ) має перебувати, згідно з діючими нормативами, у межах проміжку  $[0,9 \cdot U_{ном}; 1,1 \cdot U_{ном}]$ :

$$0,9 \cdot U_{ном} \leq U_i \leq 1,1 \cdot U_{ном}, \quad (11)$$

де  $U_i$  – діюче значення напруги вузла ( $i$ );  
 $U_{ном}$  – номінальна напруга розподільчої мережі.

Для визначення оптимальної структури електротехнічного комплексу із локальними джерелами енергії передбачається застосування цільової функції, отриманої методом скаляризації:

$$F = \mu_{\min(\max)} \cdot f_1 + \mu_{\min(\min)} \cdot f_2, \quad (12)$$

$$\mu_{\min(\max)} = \frac{t_{P_{\max}} + t_{Q_{\max}}}{(t_{P_{\max}} + t_{Q_{\max}}) + (t_{P_{\min}} + t_{Q_{\min}})}$$

ваговий коефіцієнт за функції мінімуму втрат активної потужності в години максимуму навантаження;

$$\mu_{\min(\min)} = \frac{t_{P_{\min}} + t_{Q_{\min}}}{(t_{P_{\max}} + t_{Q_{\max}}) + (t_{P_{\min}} + t_{Q_{\min}})}$$

ваговий коефіцієнт за функції мінімуму втрат активної потужності в години мінімуму навантаження;

$t_{P_{\max}}$  – тривалість максимуму навантаження з активної потужності;

$t_{Q_{\max}}$  – тривалість максимуму навантаження з реактивної потужності;

$t_{P_{\min}}$  – тривалість мінімуму навантаження з активної потужності;

$t_{Q_{\min}}$  – тривалість мінімуму навантаження з реактивної потужності.

Застосування обмежень до функції (12) помітно зменшує розмірність множини допустимих значень і, як наслідок, рішень. Водночас цільова функція має мінімальне значення, що відповідає оптимальній потужності генератора.

*Другий рівень.* Розглянемо ефективність об'єднання декількох ЕТК на базі РГ в єдину електричну мережу із забезпеченням оптимальної топології отриманої електричної мережі. Відмітимо, що це об'єднання має таку додаткову «опцію», як солідарне покриття навантаження за рахунок організації, зокрема, додаткових ліній електропередачі (ЛЕП).

Проаналізуємо імовірне об'єднання на прикладі групи раніше незалежних ЕТК, яке представлено на рис. 1. Два ЕТК (ЕТК1 і ЕТК3) автономні, не мають зв'язку з електроенергетичною системою (ЕЕС); ЕТК2 має зв'язок із ЕЕС. Досить імовірно, що у разі створення такого альянсу роль Центрального управляючого пункту виконує ЕТК2. Але цілком можливо, що кожному ЕТК вигідніше буде побудувати власні зв'язки із зовнішньою системою. За такої умови місця приєднання ЛЕП та їхні характеристики є невідомими і підлягають подальшому визначенню.

Отже, об'єктом подальших досліджень є технологічне об'єднання (ТО), утворене окремо розташованими електротехнічними комплексами на основі розподіленої генерації, заснованої на ВДЕ з накопичувачами енергії (рис. 2).

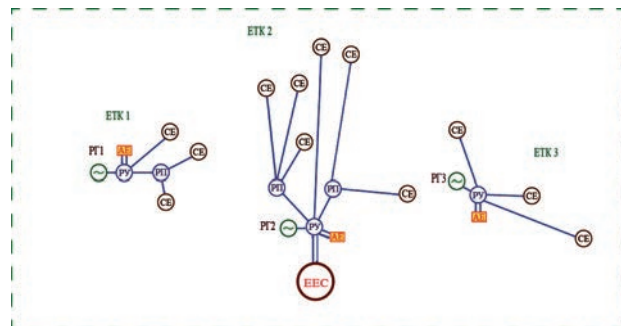


Рис. 1. Група незалежних ЕТК: ЕЕС – електроенергетична система; СЕ – споживач електроенергії; РГ – розподілена генерація; ЕТК – електротехнічний комплекс; РУ – розподільча установка; АЕ – акумулятор енергії; РП – розподільчий пункт

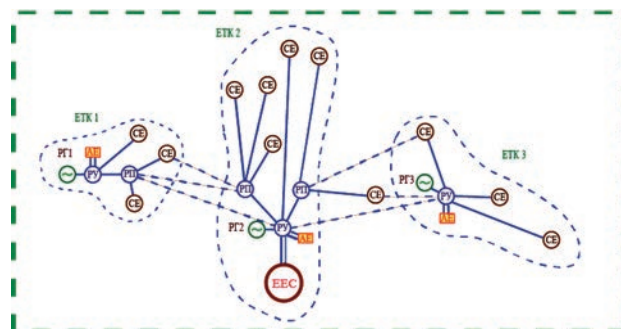


Рис. 2. Технологічне об'єднання ЕТК

Вибір в якості ТО вихідних електротехнічних комплексів зі структурою, представленою на рис. 1, апіорі передбачає потребу у роботі джерел РГ із максимальною видачею потужності незалежно від рівня навантаження як окремих споживачів, так і сумарного навантаження. Водночас позитивний ефект полягає у можливості продажу надлишків потужності (енергії) власниками окремих ЕТК та у розширенні можливості покриття графіка навантаження (для споживачів).

Зрозуміло, що на характер такого об'єднання накладаються загальновідомі обмеження. Першим очевидним обмеженням є співвідношення між робочим струмом ( $I_{ij}$ ) у нормальному режимі і тривало припустимим ( $I_{ij\text{ доп.м}}$ ) для цієї лінії електропередачі (співвідношення) (10).

Водночас проходження робочого струму поданої лінії не повинно спричинювати падіння напруги нижче допустимого значення:

$$\Delta U_{ij} = \sqrt{3} \cdot I_{ij} \cdot L_{ij} \cdot (r_{o\ ij} \cdot \cos \varphi_{ij} + x_{o\ ij} \cdot \sin \varphi_{ij}) \leq 0,1 \cdot U_{ном}, \quad (13)$$

де  $L_{ij}$  – довжина ( $i, j$ )-го приєднання;

$r_{o\ ij}, x_{o\ ij}$  – відповідно питомий активний і реактивний опір ( $i, j$ ) – ої лінії електропередачі;

кут  $\varphi_{ij}$  – характеризує зсув фаз між струмом і напругою в лінії ( $i, j$ ).

Кількість новостворених ліній між діючими ЕТК (рис. 2) та їхні техніко-економічні характеристики повинні мати характеристики залежно від основних цілей такого технологічного об'єднання, до яких можна віднести, наприклад, забезпечення потрібного класу надійності енергопостачання, отримання додаткової гнучкої потужності, новий рівень роботи зі споживачами, можливість пропонувати нові програми керування споживанням та інші. Поставлені завдання мають бути відповідним чином скоординованими.

Очевидно, що повнота і якість отриманих переваг за технологічного об'єднання значною мірою визначається додатковими варіантами топології новоствореної мережі.

Розглянемо один із можливих алгоритмів оцінки структурних властивостей на прикладі технологічного об'єднання ЕТК, утвореного трьома ЕТК (рис. 1). В якості інструмента ми використовуємо структурний аналіз систем [5, с. 50-52]. Формалізацію опису структури проведемо на основі теорії графів. Найбільш наочна форма формалізованого завдання графа – графічне представлення – застосоване нами для подання взаємодій взаємозв'язків між елементами на рис. 2. Окремі ЕТК (на рис. 2 ЕТК 1 – ЕТК 3) є підсистемами, тоді як окремі об'єкти (розподільні установки і пункти, споживачі тощо), які утво-

рюють їх – елементами системи. Представлений граф є орієнтованим, оскільки складається тільки з орієнтованих ребер. Орієнтація відповідає переважним напрямкам передачі потужності в мережі. Вершинами графа є елементи системи – розподільні установки, розподільчі пункти, розподілені генератори, акумулятори енергії і споживачі електроенергії. Вершини (вузлів) графа відповідають величинам електричної потужності, ємності і споживання (навантаження). Гілками графів служать лінії електропередачі, які характеризуються напрямком передачі потужності, довжиною, величинами питомого активного і реактивного опорів, обраними техніко-економічними показниками. На рис. 2 потенційно можливі доцільні варіанти електричних зв'язків зображені пунктирними лініями.

Для подальшого аналізу зручно представити граф у числовому вигляді, а саме у вигляді матриці. Представлений на рис. 2 граф технологічного об'єднання описується за допомогою матриці суміжності вершин:

$$A = \|a_{ij}\|_m^n, \quad i = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, m}$$

де  $a_{ij}$  – елементи матриці  $A$ ;

$n$  – кількість вузлів графа;  $m$  – кількість гілок (дуг) графа.

Елементи матриці  $a_{ij}$  суміжності вершин  $A$  для орієнтованого графа визначаються таким чином:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{при наявності зв'язку (якщо з вершини і можна перейти в вершину j);} \\ 0 & \text{при відсутності зв'язку} \end{cases}$$

Вид матриці суміжності орієнтованих графів суттєво залежить від обраного порядку нумерації вершин  $i$ , вибравши певний принцип нумерації вершин для деяких видів графів (без контурів), можна звести матрицю  $A$  до трикутного вигляду, де  $a_{ij} = 0$  за  $j > i$ . Матриця суміжності вершин  $A$  є матрицею прямих шляхів графа, що мають довжину, яка дорівнює 1. Загальну кількість транзитних шляхів від вершини ( $i$ ) до ( $j$ ) довжиною ( $k$ ) можна отримати унаслідок зведення матриці ( $A$ ) у ступінь ( $k$ ).

Структурні властивості електричної мережі, створеної після технологічного об'єднання декількох ЕТК, можна визначити на основі структурно-топологічних характеристик графа, які розраховуються за допомогою матриці суміжності вершин.

Для оцінки якості структури ТО і її елементів із позицій системного підходу слід визначити основні структурні характеристики.

*Зв'язність структури.* Цей кількісний параметр дає змогу виявити наявність обривів у структурі, висячі вершини та інші. Найбільш повно і кількісно зв'язність елементів орієнтованого графа визначається матрицею зв'язності  $C = \|c_{ij}\|$ .

Чим більшою є величина  $C$ , тим вище значення зв'язності, тим потенційно більш надійною є розглянута топологія електричної мережі. Для орієнтованого графа параметр  $C$  можна визначити згідно з виразом:

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij},$$

де  $n$  – кількість вузлів графа,  
 $c_{ij}$  – елемент матриці зв'язності  $C$ , який визначається за співвідношенням:

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } a_{ij}^{\Sigma} \geq 1 \\ 0, & \text{якщо } a_{ij}^{\Sigma} = 0 \end{cases}$$

де  $a_{ij}^{\Sigma}$  – елемент сумарної матриці суміжності  $A_{\Sigma}$ , який визначає сумарну кількість шляхів від вузла ( $i$ ) до вузла ( $j$ ).

Матрицю  $A_{\Sigma}$  можна визначити таким чином:

$$A_{\Sigma} = \sum_{k=1}^n A^k,$$

де  $A$  – матриця суміжності вершин графа;  
 $k$  – довжина шляху (кількість ділянок) від вершини ( $i$ ) до вершини ( $j$ ).

*Структурна надмірність.* Структурний параметр, який відображає перевищення загальної кількості зв'язків над мінімально необхідними, називається структурною надмірністю ( $R$ ) і визначається таким чином:

$$R = \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \right] \cdot \frac{1}{n-1} - 1, i \neq j$$

де  $a_{ij}$  – елемент матриці суміжності вершин  $A$ ;  
 $n$  – кількість вершин графа.

Найбільш економічна топологія повинна мати мінімальну кількість надлишкових електричних зв'язків, наявність яких збільшить витрати на будівництво додаткових ЛЕП, потрібну комутаційну і захисну апаратуру.

Отже, в якості кращої має розглядатися топологія із найменшим значенням характеристики.

Нерівномірність розподілу зв'язків – параметр, який характеризує недовикористання можливостей заданої топології за досягнення максимальної зв'язності; він виражається показником квадратичного відхилення заданого розподілу ступеня вершин і визначається відповідно до виразу:

$$\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^n \left( \rho_i^2 - \frac{4m^2}{n} \right),$$

де  $\rho_i$  – дійсний ступінь  $i$ -ої вершини графа (кількість ребер, інцидентних  $i$ -ої вершині графа);  
 $m$  – кількість ребер графа;  
 $n$  – кількість вершин графа.

Значення параметра, яке дорівнює нулю, характеризує рівномірну топологію. Чим більшою є величина  $\varepsilon^2$ , тим більша нерівномірність зв'язків.

Отже, більш оптимальною вважатиметься топологія із найменшою величиною параметра.

*Структурна компактність.* Для кількісної оцінки структурної компактності вводиться параметр, який відображає близькість елементів між собою. Близькість двох елементів ( $i$  і  $j$ ) між собою визначатимемо через мінімальну довжину шляху для орієнтованого графа (ланцюга – для неорієнтованого)  $d_{ij}$ . Тоді величина  $W$  відображає загальну структурну близькість елементів між собою у системі:

$$W = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij}, i \neq j$$

де  $d_{ij}$  – мінімальна довжина шляху із вершини  $i$  у вершину  $j$ ;

$n$  – кількість вершин графа.

Для кількісної оцінки структурної компактності дуже часто використовують відносний показник:

$$W_{\text{відн}} = W / W_{n2}^1,$$

де  $W_{n2}^1 = n(n-1)$  – значення компактності для структури системи типу «повний граф».

Структурну компактність можна характеризувати й іншим показником – діаметром структури:

$$d = \max_{ij} d_{ij}.$$

*Ступінь централізації у структурі.* Для кількісної оцінки ступеня централізації у структурі використовується поняття «індекс центральності»:

$$\delta = (n-1) \frac{2Z_{\max} - n}{Z_{\max}(n-2)}$$

де  $n$  – кількість вершин графа.

Компонент указаної формули можна знайти у такий спосіб:

$$Z_{\max} = \max \{Z_i\},$$

де  $Z_i$  – величина, що визначається відповідно до наступного виразу:

$$Z_i = \frac{W}{2} \left( \sum_{j=1}^n d_{ij} \right), i = \overline{1, n}; i \neq j,$$

де  $W$  – структурна компактність топології;

$d_{ij}$  – мінімальна довжина шляху ( $i$ ) вершини ( $i$ ) у вершину ( $j$ );

$n$  – кількість вершин графа.

Чим меншим є значення параметра, тим надійніша топологія. Високе значення ступеня централізації висуває підвищені вимоги до пропускної здатності центрального елемента у топології мережі, через який встановлюється велика кількість зв'язків, а також до надійності його функціонування, оскільки відмова цього елемента призводить до порушення нормальної роботи всієї системи. За великої величини параметра має сенс дублювання центрального елемента із метою

підвищення надійності топології. Топологія мережі із меншим значенням параметра є кращою.

Оцінка і подальше порівняння варіантів топології мережі окремо за кожною структурно-топологічною характеристикою зазвичай є досить тривіальним завданням. Однак вибір оптимальної топології мережі з урахуванням усього комплексу розглянутих параметрів, тобто рішення багатокритеріальної задачі, представляє певні труднощі. Урахування впливу окремих факторів (наприклад, наявність, характеристики та режимні обмеження акумуляторів енергії), додає задачі додаткові особливості мультифакторної проблеми.

Нині існує досить велика кількість методів розв'язання багатокритеріальних задач. Остання часто зводиться до однокритеріальної. Цей підхід має на увазі використання суперкритерію у вигляді скалярної функції векторного аргументу:

$$q_0(x) = q_0(q_1(x), q_2(x), \dots, q_p(x)),$$

де  $q_1(x), q_2(x), \dots, q_p(x)$  – критерії;  
 $x$  – альтернатива із множини  $X$ .

Вид функції  $q_0$  залежить від внеску кожного окремого критерію у загальний суперкритерій. Зазвичай у цьому випадку застосовують адитивні і мультиплікативні функції виду:

$$q_0 = \sum_{i=1}^p \alpha_i q_i;$$

$$1 - q_0 = \prod_{i=1}^p (1 - \beta_i q_i),$$

де  $\alpha_i$  і  $\beta_i$  – вагові коефіцієнти.

Головною складністю цього методу є визначення вагових коефіцієнтів  $\alpha_i$  або  $\beta_i$ .

Резюмуючи зазначене, можна стверджувати, що ідеологія формування «технологічного об'єднання» діючих ЕТК спрямована на підвищення ефективності електропостачання за рахунок максимального використання всього потенціалу розподіленої генерації.

**Висновки.** Запропоновано методику параметричної оптимізації ЕТК із РГ, яка полягає у визначенні фізично обґрунтованих характеристик енергоблоків і складається із трьох етапів: формування вихідних даних, визначення граничних потужностей енергоблоку, прямий відбір (оптимізація).

Формування вихідної параметричної бази і використання гнучких критеріїв підбору варіантів допускає динамічне настроювання завдання і його застосування як для проектування об'єктів, що будуються, так і для діючих модернізованих систем.

Розглянуто об'єднання декількох ЕТК на основі РГ в єдину електричну мережу та можливі шляхи забезпечення оптимальної топології отриманої електричної мережі.

Перспективними дослідженнями у цьому напрямку, на нашу думку, є розроблення алгоритму раціонального розміщення можливих додаткових споживачів, а також послідовність і алгоритм нарощування навантаження без радикального коригування визначеної раніше топології технологічного об'єднання ЕТК.

#### Список літератури:

1. Лежнюк П.Д., Гунько І.О. Дослідження впливу РДЕ та секціонування на режими роботи локальних електричних систем. *Наукові праці ВНТУ*. 2016, № 2. С. 1-12.
2. Козирський В.В., Гай О.В., Бодунов В.М., Костюк В.А. Формування динамічної моделі відновлення електропостачання споживачів в системах з джерелами розподіленої генерації. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2013. Вип. 13. Т.2. С. 50-56.
3. Самойлик О. В., Курбака Г. В., Дудник М. В. Аналіз балансу потужності локальної системи електропостачання на базі поновлювальних джерел енергії та акумуляторних батарей. *Енергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2016. № 11 (154). С. 22–32.
4. Лежнюк П. Д., Рубаненко О.С., Малогулко Ю.В. Оптимізація функціонування розосереджених джерел енергії у локальних електричних системах. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПИ" : зб. наук. пр. Темат. вип. : Механіко-технологічні системи та комплекси*. Харків. 2014. № 60 (1102). С. 68-77.
5. Воропай Н.И. Теория систем для электроэнергетиков: Учебное пособие. Новосибирск : Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 2000. 273 с.

#### **Samoilyk O.V., Tkachenko V.F. INCREASE OF THE DISTRIBUTED GENERATION EFFICIENCY IN THE ELECTROTECHNICAL COMPLEX**

*The analysis of basic trends in the use of small distributed generation has shown that its use on the part of electricity consumers as a part of the electrotechnical complex has a number of positive effects and is a kind of trend, which is due, inter alia, to the current regulatory environment. It is established that there is a certain "deficit" of scientifically substantiated approaches (methods, procedures and rules) to determine the physically sound characteristics of DG power units in the electrotechnical complex with distributed generation and the effective topology of such ETC. The*

algorithm of optimization of DG parameters at the stage of designing a separate electrotechnical complex, as well as the integration of several ETCs on the basis of DG into a single electrical network with ensuring the optimal topology of the obtained electrical network are considered in the paper.

Based on the dependences characterizing the influence of parameters and structure of electrotechnical complexes with the distributed energy sources on indicators of an operating mode of a distribution network, the target function of optimization of these parameters and structure is offered. The method of parametric optimization of ETS with DG for determination of physically substantiated characteristics of power units, which consists of three stages: formation of initial data; determination of the maximum capacities of the power unit; direct selection (optimization), is offered. The efficiency of integration of several electrical complexes based on small distributed generation into a single electrical network with the provision of the optimal topology of the obtained electrical network is analyzed. A peculiarity of such a technological integration is in an additional "option", which consists in solidarity coverage of the load at the expense of the organization, inter alia, of additional power lines. The probable integration on the example of a group of previously independent electrotechnical complexes based on small distributed generation is considered. The ideology of forming a "technological association" from the existing ETCs is aimed at improving the efficiency of electricity supply by maximizing the full potential of distributed generation.

**Key words:** distributed generation, optimization, power unit, modeling, electric power.

**Семичасівський С.В.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Якіменко М.Л.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Осадчук М.В.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

## ПРО НЕОБХІДНІСТЬ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ ВАЛІДАЦІЇ МОДЕЛІ ГОРІННЯ ТУРБІННОГО МАСЛА МАРКИ ТП-22

*У статті проаналізовано вітчизняні і закордонні публікації із питання горіння турбінного масла марки ТП-22 у машинних залах енергетичних підприємств, а також питання про моделювання цього процесу.*

*Наведено методику проведення експериментальних досліджень із визначення у лабораторних умовах критичної інтенсивності подавання тонкорозпиленої води під час гасіння турбінного масла марки ТП-22 на об'ємах меншого розміру.*

*Представлено лабораторну установку, яка є стендом для проведення експериментальних досліджень із визначення відносної вогнегасної ефективності водних вогнегасних речовин для гасіння вогнищ пожежі класу В тонкорозпиєними струменями. Наведено результати вищезазначених експериментальних досліджень.*

*Зазначено вихідні параметри для проведення моделювання експерименту за допомогою програмного забезпечення Fire Dynamic Simulator (FDS).*

*Акцентовано увагу на тому, що для розрахунку трьохвимірних турбулентних течій, які виникають під час горіння і поширення диму, у FDS чисельно вирішується система рівнянь Нав'є-Стокса, записана у дозвуковому наближенні. Для моделювання турбулентності застосовано метод великих вихрів (LES) із використанням статичної моделі Смагоринського або моделі Дідорфа. За моделювання горіння розглянуто глобальну незворотну одностадійну реакцію окиснення горючого (турбінного масла), в якій окрім кінцевих продуктів окиснення ( $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$ ) утворюється монооксид вуглецю (CO) та сажа (C). Задля математичного описання дисперсного складу часток рідини використовують закони теорії імовірностей і рівняння статистичних кривих у вигляді так званих диференціальних та інтегральних функцій розподілу числа, поверхні або об'єму (маси) крапель за діаметром.*

*Окрім того наведено, що математичний опис дисперсного складу часток рідини є аналогічним законам аналітичного описання гранулометричного складу сипучих речовин. Для моделювання процесу атомізації рідини у програмному забезпеченні FDS передбачено чотири можливих типи розподілу крапель: постійне (встановлюється за замовчуванням), Розіна-Раммлера, логнормальне та комбіноване (Розіна-Раммлера – логнормальне).*

*Указано на необхідність проведення експериментальної валідації моделі горіння турбінного масла марки ТП-22 шляхом порівняння результатів експерименту і результатів моделювання вищезазначеного експерименту.*

**Ключові слова:** валідація, критична інтенсивність, машинні зали, моделювання, турбінне масло марки ТП-22.

### 1. Вступ

Турбінне масло є основним пожежним навантаженням у машинних залах атомних і теплових електростанцій (далі – АЕС і ТЕС). Пожежі турбінного масла унаслідок розгерметизації систем змазування та ущільнення турбогенераторів призводять до катастрофічних наслідків, руйнуванню огорожжуваних конструкцій машинних залів і знищенню вартісного технологічного обладнання.

Прикладом цього є резонансна пожежа із горінням турбінного масла, що сталася 29 березня 2013 року у машинному залі котлотурбінного цеху №1 Вуглегірської ТЕС, унаслідок чого була знищена покрівля машзалу на площі 10880 м<sup>2</sup>, а також технологічне обладнання цеху. Пожежа призвела до загибелі і травмування людей [1].

Під час дослідження пожежної небезпеки машинних залів АЕС і ТЕС потрібно викорис-



товувати сучасні методи моделювання процесів пожежі, зокрема засоби обчислювальної гідродинаміки (CFD - аналіз). Проведення моделювання горіння турбінного масла марки ТП-22 та роботи систем пожежогасіння у машинних залах АЕС і ТЕС в умовах різних варіантів аварій дозволить виявити неефективні елементи цих систем і сформулювати пропозиції щодо підвищення їх ефективності [1].

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

В Україні проблему забезпечення пожежної безпеки об'єктів енергетики досліджували М.М. Семерак, А.В. Субота, В.М. Новак, [2] та інші. Зокрема, статтю [2] присвячено математичному моделюванню вогнестійкості несучих металевих конструкцій машинних залів електростанцій; проаналізовано причини виникнення і перебігу в них пожеж; розглянуто процес горіння водню і воднево-масляних сумішей у машинних залах за умов пожежі; проаналізовано найбільш вірогідні місця виникнення пожежонебезпечних концентрацій сумішей водень-масло-повітря; розроблено методику дослідження теплових процесів, які тривають під час пожежі; визначено температурні потоки, зумовлені випромінюванням газомасляного факела пожежі тощо. Слід зазначити, що стаття [2] не містить відомостей про здійснення експериментальної валідації моделі горіння турбінного масла.

Серед закордонних наукових публікацій, у котрих висвітлено результати досліджень пожежної безпеки енергетичних підприємств, є відомими публікації [3-23].

У [3] указано, що міжнародна лабораторія Fire Technology Laboratory використовує комп'ютерні програми для моделювання пожеж у приміщеннях із великою пожежною небезпекою. Наявні два основних типи цих програм. Програма першого типу призначена для моделювання пожежі в одному певному відсіку і раніше мала назву Harvard Fire Code CFC V. Більш пізня її версія була перейменована на First. У статті [3] спочатку представлено результати, розраховані за допомогою програми First для випадку горіння розливу турбінного масла площею  $3\text{ м}^2$  та  $2\text{ м}^2$  у відсіку об'ємом  $70\text{ м}^3$  у нижній його частині. Описано польові моделі горіння розливання турбінного мастила та руху газів у великих приміщеннях, таких як машинні зали атомних електростанцій. Програма розраховує температурні поля, турбулентну кінетичну енергію, швидкість розсіювання, хімічну концентрацію, інтенсивність

випромінювання у трьох координатах. У публікації [3] описано моделі горіння розливання турбінного масла, але відсутні результати моделювання цього процесу.

У статті [4] представлено результати оцінки ризику пожеж у машинних залах атомних електростанцій за допомогою комп'ютерного моделювання пожежі для подальшої оцінки вразливості систем безпеки станції у разі пожеж. Проте у публікації не розглянуто можливі сценарії розвитку пожежі під час витоку турбінного масла із маслонаповненого обладнання у машинній залі енергетичного підприємства та не представлено результатів здійснення експериментальної валідації відповідної моделі.

У статтях [5-23] також не розглянуто питання необхідності проведення експериментальної валідації моделі горіння турбінного масла, зокрема марки ТП-22, тому це питання є актуальним і підлягає розкриттю у цій статті.

## **3. Мета і завдання дослідження**

Метою роботи є обґрунтування необхідності проведення експериментальної валідації моделі горіння турбінного масла марки ТП-22.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання: 1) навести методику проведення й описати результати експериментальних досліджень із визначення у лабораторних умовах критичної інтенсивності подавання тонкорозпиленої води під час гасіння турбінного масла марки ТП-22 на об'ємах зменшеного розміру; 2) зазначити вихідні дані для проведення моделювання експерименту за допомогою програмного забезпечення Fire Dynamic Simulator (FDS); 3) обґрунтувати необхідність проведення експериментальної валідації моделі горіння турбінного масла марки ТП-22 у програмному забезпеченні (FDS) шляхом порівняння результатів експерименту і результатів моделювання вищезазначеного експерименту.

## **4. Методика проведення і результати експериментальних досліджень із визначення у лабораторних умовах критичної інтенсивності подавання тонкорозпиленої води під час гасіння турбінного масла марки ТП-22 на об'ємах зменшеного розміру**

Для визначення критичної інтенсивності подавання тонкорозпиленої води під час гасіння турбінного масла марки ТП-22 на об'ємах зменшеного розміру використано експериментальний метод, застосований на лабораторній установці, наведеній нижче.

Лабораторна установка є стендом для проведення експериментальних досліджень із

визначення відносної вогнегасної ефективності водних вогнегасних речовин для гасіння вогнищ пожежі класу В тонкорозпиленими струменями, схема якого представлена на рис. 1.

Нижче представлена методика проведення експериментальних досліджень. За допомогою компресора в емності створюється надлишковий тиск 0,6 МПа, значення якого контролюється манометром. Запірна арматура закривається. Для створення струменя тонкорозпиленої води в якості розпилювача використовується форсунка Danfoss 1,65-S-45° [24], яка встановлюється на висоті 0,2 м від поверхні дзеркала горючої речовини – турбінного масла.

У камері для гасіння розміщуються металеві дека із внутрішнім діаметром від 100±1 мм до 200±1 мм, висотою 25 мм і товщиною стінок 2,5 мм.

У дека у певних об'ємах заливають турбінне масло і підпалюють його.

Після (30±5) секунд вільного горіння відкривають запірний кран і починають подавати тонкорозпилену воду на поверхню турбінного масла, яке горить упродовж не більше 30 секунд до моменту гасіння.

У разі успішного гасіння вогнища розмір дека збільшують і повторюють дослід із кількістю турбінного масла, встановленого для кожного розміру дека. Таким чином визначають максимальний розмір дека, яке було впевнено погашено тонкорозпиленою водою у трьох послідовно проведених дослідях.

Досліди починають із модельного вогнища пожежі діаметром 0,1 м. У випадку його успішного гасіння поступово переходять до вогнищ пожежі із діаметрами 0,12 м, 0,14 м, 0,16 м, 0,18 м, 0,2 м. У випадку отримання негативного результату для вогнищ із діаметрами 0,12 м, 0,14 м, 0,16 м, 0,18 м, 0,2 м переходять до менших вогнищ із діаметрами відповідно 0,11 м, 0,13 м, 0,15 м, 0,17 м, 0,19 м.

Таблиця 1  
Результати експериментального дослідження із визначення критичної інтенсивності подавання тонкорозпиленої води під час гасіння турбінного масла марки ТП-22

Номер дослідження	Діаметр дека (D), м	Площа дека (S), м <sup>2</sup>	Тиск, створений компресором, (P), атм	Витрата тонкорозпиленої води (R), мл/с	Час гасіння, (τ), с	Результат гасіння	Критична інтенсивність, (J), мл/м <sup>2</sup> ·с
1	0,20	0,0314	6	1,098	26	потушено	34,961
2	0,20	0,0314	6	1,195	21	потушено	38,071
3	0,20	0,0314	5	1,029	30	потушено	32,771

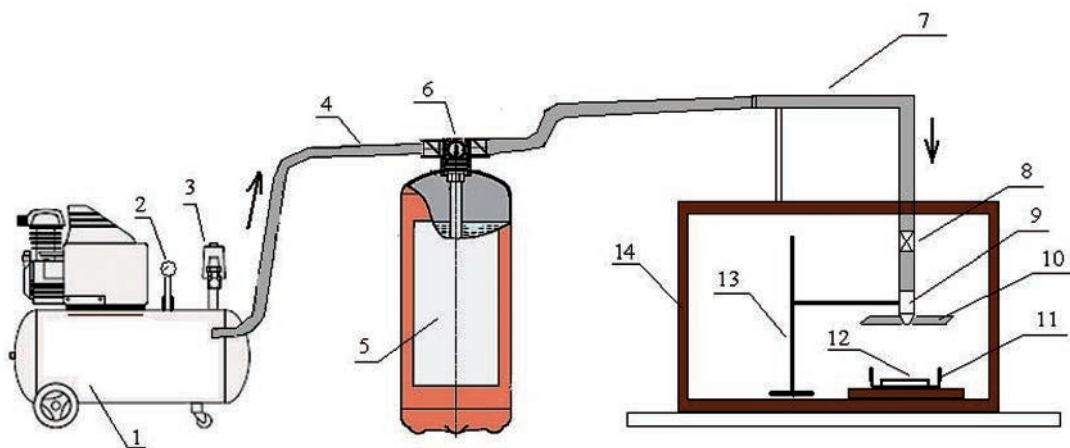


Рис. 1. Стенд для проведення експериментальних досліджень із визначення відносної вогнегасної ефективності водних вогнегасних речовин для гасіння вогнищ пожежі класу В тонкорозпиленими струменями:

1 – компресор; 2 – манометр; 3 – запобіжний клапан; 4 – трубопровід подавання робочого газу; 5 – емність для водних вогнегасних речовин на основі вогнегасника; 6 – наливна горловина із запірною арматурою; 7 – трубопровід подавання водних вогнегасних речовин до зрошувача (форсунки); 8 – запірний вентиль; 9 – перехідник із форсункою-розпилювачем; 10 – захисний екран; 11 – піддон; 12 – дека; 13 – штатив; 14 – витяжна шафа для проведення дослідження.

Після завершення гасіння модельного вогнища запірний кран закривають. Витрату вогнегасної речовини (води)  $R$  (см<sup>3</sup>/с) визначають за формулою (1):

$$R = \frac{m^1 - m^0}{\tau \cdot \rho}, \quad (1)$$

де  $m^0$  – маса посуду для збирання розпиленої води, г;  
 $m^1$  – маса посуду із зібраною водою, г;  
 $\tau$  – час збирання води, с;  
 $\rho$  – густина води, г/см<sup>3</sup>.

Кінцевим результатом визначення показника витрат вогнегасної речовини (тонкорозпиленої води) вважають середнє арифметичне значення трьох результатів дослідів. Максимальне відхилення кожного із трьох результатів досліджень від середнього арифметичного значення не повинно перевищувати 5 %.

Значення критичної інтенсивності подавання вогнегасної речовини  $I_{кр}$  (л·с<sup>-1</sup>·м<sup>-2</sup>) визначають за формулою (2):

$$I_{кр} = \frac{R \cdot 10^{-3}}{S_{max}}, \quad (2)$$

де  $S_{max}$  – площа найбільшого дека, погашеного в умовах експерименту, м<sup>2</sup>.

Значення параметрів, отриманих під час експериментального дослідження, представлені у табл. 1.

### 5. Вихідні параметри для проведення моделювання вищезазначеного експерименту за допомогою програмного забезпечення Fire Dynamic Simulator (FDS)

Для моделювання роботи стенду з експериментальних досліджень із визначення відносної вогнегасної ефективності водних вогнегасних речовин для гасіння вогнищ пожежі класу В тонкорозпиленими струменями за допомогою програмного забезпечення FDS створена модель із межами обчислювальної сітки за осями X, Y та Z розміром 1,0 м × 1,0 м × 0,5 м відповідно. Обчислювальна сітка має 40 чарунок вісі X, 40 чарунок вісі Y і 20 чарунок вісі Z. Розміри чарунок сітки становлять відповідно 0,025 м × 0,025 м × 0,025 м.

За аналогією з [25], основними компонентами моделі є такі: засоби розрахунку турбулентної течії багатокомпонентної газової реагуючої суміші; модель перенесення теплового випромінювання; модель горіння; модель витоку, атомізації, руху, нагрівання і випаровування тонкорозпиленої води; модель газифікації турбінного масла марки ТП-22; модель локального погашення фрагментів турбулентного полум'я; модель для врахування впливу зрошення на швидкість газифікації пожежного навантаження. Для розрахунку трьохвимірних турбулентних течій, які виникають під час горіння і поширення диму, у FDS

чисельно вирішується система рівнянь Нав'є-Стокса, записана у дозвуковому наближенні. Для моделювання турбулентності застосовують метод великих вихрів (LES) із використанням статичної моделі Смагоринського або моделі Дідорфа.

За моделювання горіння розглядають глобальну незворотну одностадійну реакцію окиснення горючого (турбінного масла), в якій окрім кінцевих продуктів окиснення (CO<sub>2</sub> і H<sub>2</sub>O) утворюється монооксид вуглецю (CO) і сажа (C).

Згідно з [26] було задано реакцію горіння для турбінного масла марки ТП-22, яке має такий атомарний склад:

атоми вуглецю – 6,9;  
 атоми водню – 14,6;  
 атоми кисню – 12,9;  
 атоми азоту – 0,0.

Підтверджене експериментально-розрахунковим методом значення нижчої теплоти згорання, згідно з [27], становить 4,4751 · 10<sup>4</sup> кДж/кг.

Згідно з [26] виділення чадного газу CO ( $Y_{CO}$ ) становить 0,122 кг/кг, виділення сажі ( $Y_s$ ) – 0,028 кг/кг. Значення коефіцієнту димоутворення турбінного масла марки ТП-22, уточнене експериментально-розрахунковим методом [28], становить  $D_m = 674$  м<sup>2</sup>/кг.

Згідно з [28] коефіцієнт димоутворення  $D_m$  визначається за формулою (3):

$$D_m = Y_s \cdot K_m, \quad (3)$$

де  $K_m = 7600$  м<sup>2</sup>/кг – масовий коефіцієнт екстинкції (поглинання світла).

Виходячи із вищезазначеного, уточнене значення виділення сажі ( $Y_s$ ) становить 0,089 кг/кг.

Експериментально підтверджене нами значення температури автозаймання становить 360°C [27].

Вогнище горіння має розміри 0,2 м × 0,2 м × 0,025 м і задані поверхні типу Inert за осями мінімум X, максимум X, мінімум Y, максимум Y, мінімум Z. Для максимуму Z задана поверхня типу «турбінне масло».

Матеріал вогнища горіння вибрано подібним до сталі згідно із [26].

На висоті 0,2 м від поверхні вогнища горіння задана форсунка (Nozzle) з такими параметрами:

витрата – 0,0717 л/хв [24];  
 діаметр сопла – 2,1 · 10<sup>-4</sup> м [29];

кути розпилення задаються: SPRAY\_ANGLE=0.00, 22.5/.

Згідно з [25] для моделювання турбулентного газокрапельного струменя, що випаровується, використовують дискретно-траєкторний підхід і застосовують класичну модель нагрівання і випаровування сферичних крапель.

Як відомо, для математичного описання дисперсного складу часток рідини використовують закони теорії імовірностей і рівняння статистичних кривих у вигляді так званих диференціальних та інтегральних функцій розподілу числа, поверхні або об'єму (маси) крапель за діаметром [30]. Математичний опис дисперсного складу часток рідини є аналогічним законам аналітичного описання гранулометричного складу сипучих речовин. Для моделювання процесу атомізації рідини у програмному забезпеченні FDS передбачено чотири можливих типи розподілу крапель, а саме: постійне (встановлюється за замовчуванням), Розіна-Раммлера, логнормальне та комбіноване (Розіна-Раммлера – логнормальне).

Згідно з [31,32] сукупний об'єм розподілу для розпилення рідини є поєднанням розподілів логарифмічно нормального і Розіна-Раммлера та виражається формулою (4):

$$F_V(D) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^D \frac{1}{\sigma D} \exp\left(-\frac{[\ln(D'/Dv_{0,5})]^2}{2\sigma^2}\right) dD' & (D \leq Dv_{0,5}) \\ 1 - \exp\left(-0,693 \left(\frac{D}{Dv_{0,5}}\right)^\gamma\right) & (Dv_{0,5} < D) \end{cases}, \quad (4)$$

де  $Dv_{0,5}$  ( $dv_{50}$ ) – початковий об'ємний медіанний діаметр крапель, який є точкою на кривій розподілу крапель води, ліворуч і праворуч від якої знаходиться по 50% їх розподілу;

$\gamma$  та  $\sigma$  – емпіричні постійні величини. Параметр  $\gamma$ , який позначається також  $D(\sigma)$ , є середньквдратичним відхиленням від масиву відповідних діаметрів крапель. Параметр  $\gamma$ , який позначається також  $D(\sigma)$ , згідно з [32] пов'язаний із параметром  $\sigma$  співвідношенням (5):

$$\sigma = 2 / (\sqrt{2\pi} (\ln 2)^\gamma) = 1,15 / \gamma, \quad (5)$$

Згідно із результатами аналізу дисперсності розпилення водних вогнегасних речовин, проведених нами раніше за допомогою програми Matlab версії 2.1, для обраного комбінованого роз-

поділу крапель води (логарифмічно нормального та Розіна-Раммлера) задаються такі параметри, як початковий об'ємний медіанний діаметр крапель  $dv_{50}$ , що дорівнює 97,1 мкм; мінімальний діаметр крапель, що дорівнює 1,704 мкм; максимальний діаметр крапель, що дорівнює 182,48 мкм. Окрім того, задаються параметри  $D(\sigma) = 30,8$  і  $D(\gamma) = 0,037$ , розраховані у програмі Exel 2016.

Слід відмітити, що подібні дослідження описані у зарубіжній публікації [33], на відміну від яких у наших дослідженнях буде змодельовано не тільки розпилення струменів тонкорозпиленої води зрошувачем у приміщенні, але і процес припинення горіння вогнища турбінного масла марки ТП-22.

Порівняння результатів експериментального дослідження із результатами моделювання дозволить провести валідацію, тобто оцінити придатність цієї моделі, що дає змогу у майбутньому здійснити моделювання горіння турбінного масла марки ТП-22 у межах реальних геометричних розмірів машинних залів АЕС і ТЕС.

## 6. Висновки

1. Представлено методику проведення і результати експериментального дослідження із визначення у лабораторних умовах критичної інтенсивності подавання тонкорозпиленої води під час гасіння турбінного масла марки ТП-22 на об'ємах зменшеного розміру.

2. Визначено вихідні параметри для проведення моделювання вищезазначеного експерименту за допомогою програмного забезпечення Fire Dynamic Simulator (FDS).

3. Обґрунтовано необхідність проведення у майбутньому експериментальної валідації моделі горіння турбінного масла марки ТП-22 у програмному забезпеченні FDS шляхом порівняння результатів експерименту і результатів його моделювання.

## Список літератури:

1. С.Ю. Огурцов С.В. Семичаєвський К вопросу необходимости обоснования исходных данных для моделирования процессов горения турбинного масла. *Науковий вісник «Цивільний захист та пожежна безпека»*. 2016. № 2(2). Р. 44–47.
2. Семерак М.М., Субота А.В., Новак В.М., Байтала В.М. Математичне моделювання вогнестійкості несучих металевих конструкцій машинних залів електростанцій. *Пожежна безпека: Збірник наукових праць*. Львів: ЛДУБЖД, 2012. № 21. С. 7-11.
3. Keski-Rahkonen O., Eloranta E., Huhtanen R. Use of numerical simulation computer codes to fire problems in nuclear power plants in Finland. *Nuclear Engineering and Design*. 2012. Vol.125. P. 377-382.
4. Niolette V.F., Nowlen S.P. Fire models for assessment of nuclear power plant fires. *Nuclear Engineering and Design*. 2011. Vol. 125. P. 389-394.
5. Kazarians M., Apostolakis G. On the fire hazard in nuclear power plants. Sandia National Laboratories. *Nuclear Engineering and Design*. 2012. Vol. 47. P. 157-168.

6. Hockenbury R.W., Gallucci R.H.V., Parker D.J., Yeater M.L. Occurrence rates of fires in nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*. 2013. Vol. 66. P. 233-240.
7. Vesely W.E. Nuclear Power Plants: A Unique Challenge to Fire Safety, Department of Nuclear Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy. *Fire Safety Journal* . 2011. Vol. 19. P.3-18.
8. Nowlen S.P. Development of probabilistic models to estimate fire-induced cable damage at nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*. 2013. Vol. 239. P. 1113–1127.
9. Valbuena G., Modarres M. Performance-based fire fighting strategies for confined fire zones in nuclear power plants. *Progress in Nuclear Energy*. 2013. Vol. 62.
10. Moon-Hak Jee, Chan-Kook Moon, Hyeong-Taek Kim. Analysis of the effect of an external fire on the safety operation of a power plant, Nuclear Safety Laboratory, KHNP Central Research Institute, 70-1312-gil, Yuseong-daero, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Republic of Korea, article in press, *Fire Safety Journal*. 2014. Vol. 41. P. 486–490.
11. Vidmar P., Petelin S. An integrated methodology to predict the likelihood of spurious actuation of AC circuits due to fires in commercial nuclear power plants, Faculty of Maritime Studies and Transportation, University of Ljubljana, Pot pomorscakov 4, Portoroz, Slovenia. *Fire Safety Journal* 2011. Vol.46. P. 388–396.
12. Raymond H.V. Gallucci N. I. Numerical Simulation Study on Sprinkler Control Effect in UBS Fuel Tank Room of Nuclear Power Plants, Office of Nuclear Reactor Regulation, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC 20555-0001, USA. *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 43. P. 276 – 281.
13. Shi Qiang , Ma Rongyi, Li Juan, Zuo Jiaxu, Zhang Chunming, Chai Jianshe, Performance-Based Fire Protection in the Nuclear Power Plant Design, Capital University of Economics and Business, No. 121 Zhangjialu, Fengtai District, Beijing 100070, China, Nuclear and Radiation Safety Center, No. 54 Hongliannancun, Haidian District, Beijing100082, China. *Procedia Engineering* . 2012. Vol.43. P. 318 – 323.
14. Van Hees P. Validation and verification of fire models for fire safety engineering. *Procedia Eng*. 2013. Vol.62. P.154–68.
15. McGrattan K, Peacock R, Overholt K. Validation of Fire Models Applied to Nuclear Power Plant Safety. *Fire Technol* [Internet]. 2016. Vol. 52(1). P. 5–24. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/s10694-014-0436-z>.
16. Magnusson S. E. and s. Thelandersson. A Discussion of Compartment Fires. *Fire Technology*. 2011. Vol. 10, No 3. P. 228- 246.
17. Alger R. S., Wiersma J. Ship Fire Characteristics Part I-Sealed Compartments. Naval Surface Weapons Center Report. NSWC/WOL TR 76-125, Dahlgren, VA, November 2014.
18. V. Babrauskas V., Williamson R.B. Post-Flashover Compartment Fires, University of California-Berkeley Report UCB FRG 75-1. Berkeley, CA. December 2011.
19. Robertson A.F., Gross D. Fire Load, Fire Severity, and Fire Endurance. Fire Test Performance. ASTM STP 464, American Society for Testing and Materials . 2015. P. 3-29.
20. R. Baldwin R., Thomas P.H. Passive and Active Fire Protection- The Optimum Combination. *Fire Technology*. Vol.10, No 2. P. 140-146.
21. Lie T.T. Characteristic Temperature Curves for Various Fire Severities. *Fire Technology*. 2013. Vol. 10, No 4. P.315- 326.
22. Harmathy T. Z. Designers Option-Fire Resistance or Ventilation. 6th c. I. B. Congress, Budapest. 2011.
23. Waterman T.E. Scaling of Fire Conditions Supporting Room Flashover, Illinois Institute of Technology Research Institute Report M 6170. Chicago IL. December 2013.
24. Форсунки Danfoss. Тип LE: Техническое описание. [Electronic resource] // [http://www.danfoss-msk.ru/instruction/LE\(rus\).pdf](http://www.danfoss-msk.ru/instruction/LE(rus).pdf). с. 2.
25. Цой А. Режимы и механизмы подавления пламени распыленной водой: Автореф. дис...канд.техн. наук: 01.04.14. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2016. 21 с.
26. Карькин И.Н. Работа в программном комплексе FireCat. Библиотека реакций и поверхностей горения в PyroSim. Редакция 3. 2014. 27 с.
27. Семичаєвський С.В., Огурцов С.Ю. Експериментальне обґрунтування вихідних даних для моделювання горіння турбінної оливи марки ТП-22. Науковий вісник «Цивільний захист та пожежна безпека». 2017. № 2(4).
28. Карькин И.Н. Методика расчета ОФП полевым методом. Исходные данные для расчета гражданских зданий. Данные для расчета видимости № 6011-1-РЗ. Екатеринбург : ООО “СИТИС,” 2007. 33 с.
29. Виноградов А.Г., Огурцов С.Ю., Дуношкин В.А., Бенедюк В.С. Экспериментальное исследование экранирования теплового излучения распыленной водой. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2014. № 2(30). С. 10.
30. Братута Э., Переселков А. Сопоставление одно- и двухпараметрических уравнений функции распределения объема капель по диаметру. С. 42–47.
31. Chan T.S. Measurements of Water Density and Droplet Size Distributions of Selected ESFR Sprinklers. *J. Fire Prot. Eng*. 1994. № 6(2). P. 79–87.

32. Fire dynamics simulator (FDS). Версия 6. Техническое руководство к программе моделирования динамики пожара. Математическая модель (перевод на русский язык). ООО "СИТИС," 2013. 104 с.
33. Iqbal Mahmud H.M., Khalid A.M., Moinuddin G.R.T. Experimental and numerical study of high-pressure water-mist nozzle sprays. *Fire Saf. J.* 2016. № 81. P. 109-117.

**Semichaevsky S.V., Yakimenko M.L., Osadchuk M.V. ON THE NECESSITY OF EXPERIMENTAL VALIDATION OF THE TP-22 TURBINE OIL COMBUSTION MODEL**

*The article analyzes domestic and foreign publications related to the combustion of TP-22 turbine oil in the engine rooms of energy companies, as well as the modeling of this process.*

*The method of conducting experimental studies to determine in the laboratory the critical intensity of the supply of finely sprayed water during the extinguishing of turbine oil brand TP-22 on volumes of reduced size.*

*A laboratory installation is presented, which is a stand for conducting experimental studies to determine the relative fire-extinguishing efficiency of aqueous fire-extinguishing substances for extinguishing class B fires with fine-spray jets. The results of the above experimental studies are presented.*

*The initial data for modeling the experiment using Fire Dynamic Simulator (FDS) software are specified.*

*It is emphasized that in order to calculate the three-dimensional turbulent flows that occur during the combustion and propagation of smoke, the FDS numerically solves the system of Navier-Stokes equations, which is written in the subsonic approximation. The large vortices (LES) method using the static Smagorinsky model or the Didorf model is used to model turbulence. Combustion simulations consider a global irreversible one-stage oxidation reaction of fuel (turbine oil), in which, in addition to the final oxidation products ( $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}$ ), carbon monoxide (CO) and soot (C) are formed. To mathematically describe the dispersed composition of liquid particles, the laws of probability theory and the equations of statistical curves in the form of so-called differential and integral distribution functions of the number, surface or volume (mass) of droplets by diameter are used.*

*It is also stated that the mathematical description of the dispersed composition of liquid particles is similar to the laws for the analytical description of the particle size distribution of bulk substances. To model the process of liquid atomization, the FDS software provides four possible types of droplet distribution, namely: constant (set by default), Rosin-Rammler; lognormal, and combined Rosin-Rammler - lognormal.*

*The need for experimental validation of the combustion model of TP-22 turbine oil by comparing the results of the experiment and the simulation results of the above experiment is indicated.*

**Key words:** *critical intensity, engine rooms, modeling, TP-22 turbine oil, validation.*

УДК 621.311  
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/30>

**Шрайбер О.А.**

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

**Дубровський В.В.**

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

**Тесленко О.І.**

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

## СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ У СВІТІ

*У статті представлено результати аналітичного огляду сучасного стану і перспектив розвитку водневої енергетики в європейських країнах та інших країнах світу.*

*Нині використання водню як потенційної альтернативи викопному вуглецевому паливу претендує на статус одного з основних каталізаторів енергетичної трансформації у напрямку сталого розвитку суспільства із всеохоплюючим застосуванням відновлювальних джерел енергії (ВДЕ).*

*Водень розглядають передусім як енергоносіє, здатний переносити надлишок енергії, виробленої із ВДЕ, у ті періоди доби або сезону, коли в енергосистемі виникає дефіцит енергії. «Зелений» водень, вироблений із використанням вітрової або сонячної електроенергії методом електролізу води, у майбутньому посідатиме важливе місце у світовій економіці та може використовуватися для заміни природного газу як у сфері енергетики, так і у промисловості або транспорті.*

*Однак для виробництва надзвичайно багатого енергією водню методом електролізу води потрібна величезна кількість електроенергії, що зумовлює нині його більшу вартість, ніж традиційного викопного палива. За даними Європейської комісії за 2020 рік, «сірий» водень на основі викопного палива коштує близько 1,50 євро/кг; орієнтовна вартість «синього» водню, отриманого із природного газу з уловлюванням вуглецю, становить 2 євро/кг, тоді як «зелений» водень коштує від 2,50 євро/кг до 5,50 євро/кг.*

*Слід зазначити, що відносно прогнозів використання водню світ нині знаходиться у такій ситуації, в якій перебував раніше під час поширення ВДЕ у 2000–2005 роках. Наступні десять-п'ятнадцять років, імовірно, є достатнім проміжком часу для встановлення статусу водню як більш конкурентоспроможного. За прогнозами, до 2050 року у більшості регіонів світу «зелений» водень разом із суттєвим зменшенням витрат на отримання електроенергії із ВДЕ може вироблятися за ціною від 0,8 до 1,6 дол. США/кг. Транспортування водню трубопроводами із Північної Африки до Німеччини може здійснюватися за ціною 0,5 дол. США/кг.*

*В енергетиці перспективним напрямом застосування водню як палива є газові турбіни, здатні працювати на чистому водні як за постійного навантаження, так і за маневрених і пікових режимів експлуатації, що потрібно для балансування енергетичних систем із значною часткою ВДЕ.*

*Газоподібний водень (при тиску 350 бар) може застосовуватися для важковантажних транспортних засобів, таких як вантажівки, поїзди або будівельна техніка.*

*Основною технологією виробництва сталі із залізорудної сировини буде технологія прямого відновлення заліза із використанням водню. До 2050 року частка використання різних видів палива у металургії докорінно зміниться: споживання вугілля скоротиться на 40%, а споживання електроенергії подвоїться; 30% цієї електроенергії (або близько 700 ТВт · год) використовуватиметься для виробництва електролізного водню, що потребуватиме близько 165 ГВт електричної потужності електролізерів.*

*Норвезька компанія Nel Hydrogen розпочала будівництво найбільшого у світі повністю автоматизованого заводу із виробництва електролізерів загальною потужністю 360 МВт на рік, який постачатиме дешеві, але водночас найефективніші електролізери.*

*Перспективним напрямом великомасштабного сезонного підземного зберігання водню (underground hydrogen storage, UHS) є його накопичення у геологічних формаціях.*

*За прогнозами, у 2050 році водень забезпечуватиме 24% світових потреб в енергії, а глобальні викиди від викопного палива зменшаться на третину; до 2030 року річний попит на «зелений» водень зростатиме до 8,7 млн. т.*

У Європейській водневій стратегії викладено трьохетапний план, який починається із будівництва електролізерів для виробництва «зеленого» водню для подальшого використання у промисловості (сталеливарної, хімічної, нафтопереробної) до 2024 року, надалі створюватимуться локальні виробництва водню (до 2030 р.), які будуть пов'язані між собою задля формування великої європейської водневої інфраструктури. У період 2030 – 2050 рр. чисті водневі технології будуть широко використовуватися у важкій промисловості. Європейський союз (ЄС) планує до 2024 р. мати 6 ГВт електролізерів для «зеленого» водню, які вироблятимуть до 1 млн. тонн «зеленого» водню, а до 2030 р. – 40 ГВт електролізерів, які вироблятимуть 10 млн. тонн водню, а також до 120 ГВт вітрових та сонячних електростанцій для них. Очікується, що в ЄС до 2030 р. будуть інвестовані 40 млрд. євро у виробничі потужності для «зеленого» водню. До 2050 р. сукупні інвестиції у «зелений» водень в Європі можуть становити до 180-470 млрд. євро.

Представлено аналіз особливостей водневих стратегій Європейських країн та інших країн світу.

**Ключові слова:** водень, відновлювані джерела енергії, сучасний стан, перспективи розвитку.

Нині використання водню як потенційної альтернативи викопному вуглецевому паливу стає актуальною темою дискусій у галузі енергетики і претендує на статус одного з основних каталізаторів енергетичної трансформації у напрямку сталого розвитку суспільства із всеохоплюючим застосуванням відновлювальних джерел енергії (ВДЕ). В якості стимулюючих чинників такої енергетичної трансформації все частіше розглядаються дві основні технології – накопичувачі енергії і водень, які можуть забезпечити потрібне зберігання енергії, виробленої від ВДЕ стохастичного характеру – сонця і вітру. Для різних сфер застосування ці дві технології можуть успішно доповнювати одна одну. Якщо водень виявиться більш дешевим варіантом порівняно з іншими рішеннями у таких областях, як накопичення і зберігання енергії, високотемпературні промислові процеси, важковаговий автомобільний транспорт, морські перевезення та авіація, то він стане першорядним. Водень отримує новий політичний пріоритет на міжнародному рівні: більше 30 країн усього світу розробили свої власні водневі стратегії.

Перспектива рентабельного, так званого «зеленого» водню із нульовим рівнем викидів зумовлена широким упровадженням ВДЕ. Найбільші економіки світу готують «зелені» інвестиції для прискорення їх зростання. Міжнародне енергетичне агентство (МЕА) заявило, що технологія «зеленого» водню «готова до великого часу» і закликала уряди країн спрямувати інвестиції у водневу економіку.

**Метою роботи** є аналітичний огляд сучасного стану і перспектив розвитку водневої енергетики в Європейському Союзі та в інших країнах світу.

У роботі «Водень із відновлюваної електрики. Технологічний прогноз для енергетичної трансформації» Міжнародного агентства відновлюваної енергії (IRENA) наголошено, що водень, вироблений із використанням вітрової або сонячної елек-

троенергії методом електролізу води, у майбутньому посяде важливе місце у світовій економіці. Використання водню для зберігання надлишкової (у періоди низького попиту і високого вироблення) електроенергії, отриманої з ВДЕ, буде необхідним елементом енергосистеми з великою часткою ВДЕ, що забезпечуватиме її маневреність [1]. Прогноз Bloomberg New Energy Finance (BNEF) щодо водневої економіки також показує, що водень, вироблений із ВДЕ, може використовуватися для заміни природного газу як у сфері електроенергетики, так і у промисловості [2].

Водень як енергоносіє є незамінним для досягнення нульового рівня викидів парникових газів, насамперед двоокису вуглецю ( $\text{CO}_2$ ). Мета країн Європейського Союзу (ЄС) щодо досягнення «кліматичної нейтральності» до 2050 р. передбачає скорочення викидів  $\text{CO}_2$  в ЄС на 95% від рівня 1990 р. Попит на природний газ в ЄС знизиться з  $\sim 5000$  ТВт·год у 2020 р. до  $\sim 4000$  ТВт·год у 2050 р. До 2030-х років споживання природного газу буде незначно зростати внаслідок запланованого припинення електрогенерації із вугілля. У той час споживання природного газу без уловлювання вуглецю знизиться до нуля. Газ, що залишиться у системі, до 2050 р. повинен бути відновлюваним або очищеним від вуглецю (декарбонізованим до або після того, як він досягне ЄС). У 2050 р. від 300 до 800 ТВт·год електроенергії, виробленої в ЄС із використанням ВДЕ, спрямовуватиметься на роботу електролізерів для її трансформації у водень (power-to-gas). За даними МЕА, додавання усього 20% водню в європейську газову мережу призведе до щорічного скорочення викидів  $\text{CO}_2$  на 60 млн. т [1].

Тільки ВДЕ здатні забезпечити стійку водневу економіку. Великомасштабне виробництво водню збільшує попит на електроенергію від ВДЕ. Для досягнення мети ЄС щодо скорочення викидів  $\text{CO}_2$  до 2030 р. до мінус 55% порівняно



з 1990 р. потрібно розширити масштаби упровадження водневих технологій і прискорити темпи зростання використання ВДЕ.

Паливна цінність водню (142 кДж/г) є втричі вищою, ніж у традиційного палива, водночас він не чинить шкідливого впливу на навколишнє середовище. Близько 33,33 кВт·год енергії виробляється з 1 кг водневого палива, але тільки 12 кВт·год/кг і 14,7 кВт·год/кг – із бензину і стисненого природного газу відповідно. Автомобілі на паливних елементах проїжджають від 100 до 131 км, використовуючи 1 кг водню, тоді як традиційні автомобілі – 16 км, використовуючи 1 кг бензину [1]. Але для виробництва надзвичайно багатого енергією водню методом електролізу води потрібна величезна кількість електроенергії, що зумовлює нині його більшу вартість, ніж традиційного викопного палива.

Слід зазначити, що відносно прогнозів використання водню світ нині знаходиться в аналогічній ситуації, у якій перебував під час поширення ВДЕ у 2000-2005 рр. Наступні десять-п'ятнадцять років, імовірно, є достатнім проміжком часу для отримання воднем статусу більш конкурентоспроможного.

**Сфери використання водню.** Нині високий попит на водень існує на підприємствах металургійної, аміачної, хімічної і нафтопереробної промисловості, які потребують створення інноваційної водневої інфраструктури. Окрім того, прогнозується значний потенціал використання водню на транспорті у 2030-х і 2040-х рр., особливо на важковантажних комерційних транспортних засобах, а також в якості заміника природного газу [3].

*Енергетика.* Питання застосування водню як палива для електрогенерації вирішує низка компаній. Усі великі виробники енергетичних газових турбін – Mitsubishi Hitachi Power Systems, GE Power, Siemens Energy і Ansaldo Energia – розробляють моделі, здатні працювати на чистому водні як за постійного навантаження, так і за маневрених і пікових режимів експлуатації. Концерн Siemens Energy готує модифікацію промислової газової турбіни SGT-400, адаптовану для спалювання чистого водню, яка встановлюватиметься на ТЕЦ у Франції і Німеччині. У 2020 р. в Японії на водневому паливі запрацювала газотурбінна електростанція «Мідзуе» (компанії Taо Oil) зі встановленою потужністю 80 МВт. Японська Асоціація технологічного розвитку водневої енергетики (АНЕАД) планує до 2030 р. після відпрацювання технології на пілотних системах щорічно постав-

ляти в Японію 350 тис. т водню як палива для гігаватної електростанції. Компанія Mitsubishi Hitachi Power Systems отримала замовлення на водневосумісні турбіни для трьох газових проєктів у США загальною потужністю 3300 МВт. Спочатку (після 2022 і 2023 років) газові турбіни будуть здатні працювати на суміші 30% водню і 70% природного газу. Проєкт потужністю 840 МВт із переобладнання вугільної електростанції використовуватиме турбіни Mitsubishi Hitachi Power Systems, призначені для поступового переходу на використання 100% екологічно чистого водню. У проєктах буде використовуватиметься надлишок електроенергії із ВДЕ для виробництва водню [1, 4].

*Транспорт.* В автомобільному транспорті прогнозують заміну парку автобусів на дизельному паливі на автобуси, які працюють на водні. Газоподібний водень (при тиску 350 бар) може застосовуватися для важковантажних транспортних засобів, таких як вантажівки, поїзди або будівельна техніка. Автовиробники Daimler та Volvo оприлюднили плани щодо виведення протягом наступного десятиліття на ринок важковантажних транспортних засобів, які працюють на водні. На відміну від електроавтомобілів більш екологічні автомобілі із водневими паливними елементами, в яких щільність енергії є на порядок більшою порівняно з акумуляторними батареями, можуть заправлятися паливом протягом декількох хвилин.

У залізничному транспорті у 2019 р. був представлений прототип першого британського водневого поїзда HydroFlex, в одному з вагонів якого встановлений 100-кіловатний паливний елемент, літій-іонні батареї та ємність стисненого водню на 20 кг. Велика Британія (як і деякі інші країни) має намір із часом відмовитися від використання дизельних поїздів: остаточна заміна майже чотирьох тисяч дизельних поїздів запланована до 2040 р. Залізничні оператори низки країн за останні роки почали розглядати водневі потяги в якості екологічної альтернативи дизелю (електрифікація залізничних колій є високовартісним заходом). Французька компанія Alstom представила свій водневий потяг у 2016 році, а два роки потому ці водневі потяги стали курсувати за одним із маршрутів у Німеччині.

В авіації літаки з модифікованими газотурбінними двигунами на рідкому водневому паливі із нульовим викидом вуглекислого газу можуть бути введені в експлуатацію у 2035 р. [1].

*Металургія.* За оцінкою МЕА, яке розробило дорожню карту технологічних змін у металургійній промисловості світу, до 2070 р. основною

технологією виробництва сталі із залізорудної сировини буде технологія прямого відновлення заліза із використанням водню (до 41% загального виробництва сталі). Для низьковуглецевого отримання 1 т губчатого заліза за технологією його прямого відновлення із залізної руди потрібно витратити  $\sim 1000 \text{ м}^3$  водню. До 2050 р. частка використання різних видів палива у металургії докорінно зміниться: споживання вугілля скоротиться на 40%, а споживання електроенергії подвоїться; 30% цієї електроенергії (або близько  $700 \text{ ТВт} \cdot \text{год}$ ) використовуватиметься для виробництва електролізного водню, що потребуватиме близько  $165 \text{ ГВт}$  електричної потужності електролізерів [5, с. 53].

У Китаї компанією HBIS уже будується завод із упровадженням технології прямого відновлення заліза воднем. На першому етапі наприкінці 2021 р. із використанням водню, вловленого із коксового газу від коксових печей, вироблятиметься 0,6 млн. т сталі на рік. На другому етапі розвитку заводу щорічно вироблятиметься 0,6 млн. т заліза із застосуванням водню, отриманого за електролізною технологією із використанням електроенергії тільки від ВДЕ. На третьому етапі п'ятирічного плану розвитку компанія HBIS передбачає зростання обсягів щорічного виробництва до 3,6 млн. т заліза із застосуванням водню, отриманого за використання 100 % електроенергії від ВДЕ [6].

**Виробництво водню.** Нині 99,6% водню виробляють із вичерпаного палива з уловлюванням вуглецю («синій» водень) або без уловлювання («сірий» водень) шляхом парової конверсії метану або газифікації вугілля, причому використання таких методів спричинює утворення великих обсягів  $\text{CO}_2$ . Отримання «зеленого» водню з води із використанням електролізної технології, яка споживає електроенергію із ВДЕ, є енергоємним, але безвуглецевим процесом, здатним замінити вичерпане паливо відповідно до плану ЄС щодо скорочення викидів парникових газів до нуля до 2050 р. Виробництво «синього» та «сірого» водню нині є дешевшим, ніж електролізного «зеленого», однак зростаючий попит і технічний розвиток може знизити собівартість виробництва «зеленого» водню. Двома найважливішими факторами витрат на екологічно чистий водень є ціна електроенергії із ВДЕ, яка продовжує знижуватись, і коефіцієнт використання електролізерів, який підвищується зі збільшенням попиту на екологічно чистий водень.

Зниженню собівартості виробництва водню за допомогою електролізерів сприяють успіхи у

пошуках альтернатив платиновому каталізатору, який нині є найефективнішим, проте його не можна використовувати для електролізу морської води. Розроблено недорогі каталізатори з міді із домішками нікелю і хрому, які можуть генерувати водневе паливо з води так само ефективно, як і платина, та використовувати морську воду без додаткового оброблення (опріснення) [1].

**Електролізери.** За оцінками компанії Wood Mackenzie, в ЄС є близько  $135 \text{ МВт}$  потужності електролізерів, але заплановані проекти можуть довести цю потужність до  $5,2 \text{ ГВт}$ . У 2019 р. у світі експлуатувалося більше 500 активних електролізерів. Найбільший у світі електролізер, який працює нині, – це багатомодульна установка загальною потужністю  $10 \text{ МВт}$ , яка живиться електроенергією від сонячної електростанції потужністю  $20 \text{ МВт}$  і розташована неподалік від міста Фукусіма в Японії [1, 7].

Європа та Австралія домінують у проектах електролізерів потужністю  $1 \text{ ГВт}$  і більше. У Китаї будується завод, який міститиме сонячну і берегову вітряні електростанції, енергія яких забезпечуватиме річне виробництво від 400 до 500 тис. т водню на рік [8]. Норвезька компанія Nel Hydrogen розпочала будівництво найбільшого у світі повністю автоматизованого заводу з виробництва електролізерів, який постачатиме дешеві, але водночас найефективніші електролізери; їхній випуск становитиме  $360 \text{ МВт}$  на рік, що на порядок більше нинішнього світового річного випуску електролізерів [1].

**Зберігання водню.** У Канаді оцінили потенціал великомасштабного сезонного підземного зберігання водню (underground hydrogen storage, UHS) у геологічних формаціях країни. UHS має безліч переваг порівняно із звичайними надземними сховищами, зокрема більш високий тиск зберігання, меншу площу зайнятої поверхні, більш високі стандарти безпеки, менший вплив на навколишнє середовище, більш тривалий термін служби і зниження питомих інвестиційних витрат. Кращими місцями для UHS є соляні печери, глибокі водоносні горизонти, виснажені родовища нафти і газу, а також кам'яні печери. Соляні печери є найперспективнішим варіантом через низькі інвестиційні витрати і герметичність [9].

У 2021 р. у Німеччині компанія EWE планує будівництво печерного сховища водню. Випробувальна печера для 100-відсоткового водню об'ємом  $500 \text{ м}^3$  буде побудована на глибині  $1000 \text{ м}$ . Обсяг печери достатній для одночасного зберігання 5-6 т водню [10].

**Вартість зеленого водню.** За даними британської аналітичної компанії Aurora Energy Research, загальне річне споживання водню в Європі у 2020 р. становило 327 ТВт·год, із яких найбільша частка припадала на Німеччину, Нідерланди і Францію. До 2050 р. попит на водень в Європі має зрости у вісім разів, тобто до 2500 ТВт·год на рік. У роботі «Перспективи водневої економіки» (Hydrogen Economy Outlook) дослідницької компанії BloombergNEF стверджується, що до 2050 р. у більшості регіонів світу «зелений» водень у поєднанні із суттєвим зменшенням витрат на отримання електроенергії з ВДЕ може вироблятися за ціною від 0,8 до 1,6 дол. США/кг, а в багатих ВДЕ країнах вартість може бути ще нижчою. Витрати на виробництво «зеленого» водню знижуються швидше, ніж очікувалося. З урахуванням витрат на зберігання і транспортну інфраструктуру вартість «зеленого» водню із доставкою в Китай, Індію або Західну Європу може знизитися приблизно до 2 дол./кг у 2030 р. та 1 дол./кг у 2050 р. У сприятливих щодо ВДЕ регіонах «зелений» і «сірий» водень можуть знаходитися на однаковому ціновому рівні уже у 2028 р., а в інших регіонах – між 2032 і 2034 рр. До 2030 р. водень може бути навіть дешевшим за традиційне викопне паливо. Транспортування водню трубопроводами із Північної Африки до Німеччини може здійснюватися за ціною 0,5 дол. США/кг. За даними Європейської комісії, у 2020 р. «сірий» водень на основі викопного палива коштує близько 1,50 євро/кг, або 1,81 дол. США/кг, тоді як орієнтовна вартість «синього» водню, отриманого із природного газу з уловлюванням вуглецю, становить 2 євро/кг (або 2,42 дол. США/кг). «Зелений» водень коштує від 2,50 євро/кг до 5,50 євро/кг (або від 3,02 до 6,65 дол. США/кг) [1 – 3, 11, 12].

Згідно з аналітичними дослідженнями IHS Markit витрати на виробництво «зеленого» водню з 2015 р. зменшилися на 50% і можуть знижуватися ще на 30% до 2025 р. завдяки перевагам великих масштабів виробництва і технологічних удосконалень. До 2030 р. «зелений» водень буде конкурентоспроможним за ціною порівняно із «сірим» та «синім» воднем [13].

За даними дослідження Wood Mackenzie, вартість виробництва «зеленого» водню до 2040 р. знизиться на 64% в умовах зростання ринку і зрівняється із воднем на основі викопного палива. У деяких країнах, таких як Німеччина, це станеться до 2030 року. Зростання цін на викопне паливо підвищить конкурентоспроможність «зеленого» водню [14]. За останнє десятиліття сві-

товий попит на водень виріс на 28%, досягнувши піку у 2020 році. На 10 провідних країн припадає 70% світового попиту, із них на Китай і США – 21 і 19% відповідно; загалом 85 країн використовують водень [15].

**Перспективи виробництва «зеленого» водню у світі.** За прогнозом компанії Bloomberg NEF, падіння цін на «зелений» водень призведе до того, що він у 2050 р. забезпечуватиме 24% світових потреб в енергії, а глобальні викиди від викопного палива зменшаться на третину. За даними іншого джерела – Водневої ради (Hydrogen Council) – водень до 2050 р. забезпечуватиме до 18% кінцевого споживання енергії на планеті. До 2030 р. річний попит на «зелений» водень прогноують на рівні 8,7 млн. т [1, 2].

Деякі країни із надзвичайно високим потенціалом ВДЕ і великими неосвоєними територіями (наприклад, Алжир, Об'єднані Арабські Емірати та Австралія) мають переваги у виробництві «зеленого» водню і можуть стати його експортерами в Європейський Союз (ЄС), особливо якщо наявні газопроводи можна буде перепрофілювати для транспортування водню. У більш довгостроковій перспективі усе зводиться до конкуренції між конкретними технологіями із нульовим викидом та їхньою економічністю.

У спільному дослідженні McKinsey і Hydrogen Council проаналізовано перспективи водневих проєктів у всьому світі та оцінено потенціал водню щодо енергетичного переходу до кліматично нейтрального суспільства. Визначено 228 великих проєктів, 85% з яких належать Європі, Азії та Австралії. Якщо всі заявлені проєкти будуть реалізовані, загальний обсяг інвестицій до 2030 р. перевищить 300 млрд. дол. США. Водень може стати найбільш конкурентоспроможним безвуглецевим рішенням для більш ніж 20 застосувань до 2030 р., зокрема для далеких вантажних і морських перевезень, аміачних, нафтопереробних і металургійних підприємств [16, 17].

*Європейський Союз.* В Європейській водневій стратегії ( «Воднева стратегія для кліматично-нейтральної Європи (ЄС)» ) вказується, що пріоритетом є відновлюваний водень (renewable hydrogen), вироблений із використанням енергії вітру і сонця. Водень зможе забезпечувати зберігання енергії для балансування змінних потоків ВДЕ. У стратегії викладено трьохетапний план, який починається із будівництва електролізерів для виробництва «зеленого» водню для подальшого використання у промисловості (сталеливарної, хімічної, нафтопереробної) до 2024 р.,

надалі створюватимуться локальні виробництва водню (до 2030 р.), які будуть пов'язані між собою задля формування великої європейської водневої інфраструктури. У період 2030-2050 рр. чисті водневі технології будуть широко використовуватись у важкій промисловості. Європейський союз планує до 2024 р. мати 6 ГВт електролізерів для «зеленого» водню, які вироблятимуть до 1 млн. т «зеленого» водню, а до 2030 р. – до 40 ГВт електролізерів, які вироблятимуть 10 млн. т водню, а також 120 ГВт вітрових і сонячних електростанцій для них. Очікується, що в ЄС до 2030 р. будуть інвестовані 40 млрд. євро у виробничі потужності для «зеленого» водню. До 2050 р. сукупні інвестиції у «зелений» водень в ЄС можуть становити до 180-470 млрд. євро [1, 13, 18].

Для вирішення проблем, пов'язаних із побудовою європейської і світової водневої економіки, надзвичайно важливим є злагоджене і своєчасне співробітництво країн.

*Німеччина.* Міністерством економіки та енергетики Німеччини розроблена Національна воднева стратегія (Nationale Wasserstoffstrategie), в якій у межах плану із скорочення викидів парникових газів у країні відображено збільшення виробництва і використання водню. Воднева стратегія допоможе прискорити енергетичний перехід Німеччини. Водень, отриманий із природного газу із використанням уловлювання і зберігання вуглецю, має використовуватись тільки «на перехідному етапі». Згідно зі стратегією Німеччина має на меті будівництво промислових підприємств із виробництва водню загальною потужністю 5 ГВт до 2030 р. разом із потрібними береговими і морськими ВДЕ. До 2040 р. країна планує встановити 10 ГВт електролізних потужностей. Окрім того, планується використати частину наявних газопроводів для транспортування водню. Згідно зі стратегією Німеччина виділить 7 млрд. євро на розвиток водневих технологій, ще 2 млрд. євро будуть інвестовані у створення потужних заводів із виробництва водню у країнах-партнерах. Німеччина є країною з високим споживанням енергії, яка має намір імпортувати великі обсяги «зеленого» водню у майбутньому, оскільки у країні не вистачає місця для установки величезної кількості потужних електростанцій на ВДЕ. Задля цього потрібно створювати транспортну інфраструктуру. Вартість виробництва «зеленого» водню в усьому світі значно відрізняється. Виробництво водню шляхом електролізу у країнах із кращими вітряними і сонячними можливостями приблизно на 40% є дешевшим, ніж у Німеччині

(з енергією від морських вітряних турбін). Нині у Німеччині діючий газопровід уперше переводиться на чистий водень. Моніторинг має підтвердити, що водень не впливає на структуру матеріалу труби і герметичність наявного обладнання. До цього часу у Німеччині існував технічний стандарт, який обмежує додавання максимум 10% водню (за об'ємною часткою) у газотранспортну мережу природного газу. У межах проєкту перевіряється, чи можна використовувати наявну інфраструктуру для транспортування і розподілення чистого водню. Модернізація газової мережі для використання водню є важливою передумовою успіху енергетичного переходу [1, 19, 20].

Німецька промислова компанія Uniper за поетапної відмови від вугілля планує протягом п'яти років переоснастити своє вугільне енергетичне обладнання на виробництво електроенергії із використанням «зеленого» водню. Компанія Siemens Gas and Power надає їй технічну підтримку. Газова компанія Linde приступила до будівництва заводу із виробництва і зріджування «зеленого» водню на хімічному і нафтопереробному заводах. Електролізний завод потужністю 24 МВт буде найбільшим у світі після його введення в експлуатацію у 2022 р. Завод працюватиме від ВДЕ. Щорічно має вироблятися до 3200 т «зеленого» водню. Електролізер буде побудовано на основі високоефективної технології PEM (протонообмінної мембрани). Електролізери PEM – це найбільш економічний спосіб виробництва «зеленого» водню із ВДЕ, оскільки вони здатні витримувати їх переривчасту роботу [5].

*Нідерланди.* У Нідерландах розроблено план розвитку водневої енергетики до 2030 р. вартістю 2,8 млрд. євро, який містить 33 інвестиційних проєкти. Потужність установок для електролізу води планують довести до гігаватного рівня. Окрім того, планують будівництво підземного водневого сховища в соляних печерах. У планах передбачають розроблення і будівництво «водневих» вітрових турбін із вбудованими електролізерами. Нафтогазовий концерн Royal Dutch Shell і голландська газова інфраструктурна компанія Gasunie оприлюднили плани найбільшого в Європі підприємства для виробництва екологічно чистого водню з використанням офшорних вітрових електростанцій електричною потужністю до 10 ГВт у Північному морі, здатних до 2040 р. виробляти 800 тис. т водню на рік. Необхідні інвестиційні вкладення тільки у будівництво 10 ГВт офшорних вітрових електростанцій оцінюють приблизно у 30 млрд. дол. США [21].

Окрім того, компанії Shell, Mitsubishi Heavy Industries (MHI) і Vattenfall вивчають, якою мірою діюча інфраструктура на місці вугільної електростанції може використовуватися для вироблення енергії із ВДЕ; планується виробництво «зеленого» водню із використанням сонячних і вітряних електростанцій та будівництво електролізера потужністю 100 МВт [21].

*Франція.* У межах своєї водневої стратегії Франція оприлюднила план вартістю 7 млрд. євро із створення до 2030 року 6,5 ГВт водневих потужностей. Генеруюча компанія EDF (оператор усіх атомних електростанцій Франції і найбільший оператор АЕС у світі) оголосила про створення компанії Hynamics, яка здійснюватиме розвиток водневої енергетики. Для отримання водню використовуватиметься насамперед електроенергія, вироблена 58 наявними у Франції атомними енергоблоками, а також електрика із ВДЕ [1].

*Данія.* Компанія Ерстед, найбільший у світі розробник офшорних вітроелектростанцій, планує до 2025 р. інвестувати 30 млрд. дол. США у проекти, які використовуватимуть енергію вітру для виробництва водневого палива. У прибережному пілотному проєкті буде випробувано електролізер мегаватного масштабу для роботи у морському середовищі. Електролізна система буде інтегрована із морською вітряною турбіною. Проєкт також об'єднуватиме процеси опріснення та очищення води, що дозволить використовувати морську воду під час електролізу [22].

*Італія.* Енергетичні компанії Enel і Eni розробляють два проєкти із виробництва екологічно чистого водню за допомогою електролізерів, які працюють із використанням ВДЕ, поблизу двох нафтопереробних заводів. Кожен проєкт міститиме електролізери потужністю близько 10 МВт, які почнуть виробляти «зелений» водень до 2022-2023 рр. Розташування електролізерів поруч із нафтопереробними заводами дозволить уникнути будівництва складної транспортної інфраструктури для переміщення водню [23].

*Росія.* У Росії при Кольській АЕС створено інфраструктуру для відпрацювання технологій водневої енергетики; опрацьовують варіанти використання надлишків електроенергії атомних електростанцій із метою виробництва водню. Воднева енергетика введена до переліку пріоритетних напрямів технологічного розвитку [1].

*Австралія.* В Австралії планується масштабне виробництво відновлюваного водню, яке вважають ключовим рішенням проблеми зберігання і транспортування енергії за одночасного ско-

рочення викидів парникових газів. Проєкт вартістю 300 млн. доларів було розроблено компанією Infinite Blue Energy, яка планує побудувати і ввести в експлуатацію у 2022 р. найбільший в Австралії завод із виробництва водню потужністю 25 т «зеленого» водню на добу із використанням тільки вітрової і сонячної електроенергії [24]. Азіатський центр відновлюваної енергії AREH планує використовувати ВДЕ в Австралії, виділяючи до 23 ГВт потужностей для виробництва «зеленого» водню з морської води. Прогнозована ціна водню буде нижче 2 доларів за кілограм, за якої він стає конкурентоспроможним порівняно з іншими джерелами енергії [25]. Компанія Hydrogen Park South Australia (HyP SA) вводить в експлуатацію електролізер потужністю 1,25 МВт, здатний виробляти 480 кг зеленого водню на добу. Після його повного введення в експлуатацію у 2020 р. з'явилася можливість подавати 5% «зеленого» водню у газотранспортну мережу природного газу. HyP SA розробляє плани щодо безпечного переходу на 100% водень (або водень плюс біогаз) у своїй мережі до 2050 р. [26].

Перше у світі судно Suiso Frontier японської компанії Kawasaki Heavy Industries для транспортування водню спустили на воду у 2020 р. Це судно є результатом спільної роботи австралійського та японського бізнесу за фінансової підтримки цих двох держав. Судно призначене для транспортування морем на великі відстані зрідженого до 1/800 від свого початкового обсягу водню, охолодженого до температури  $-253^{\circ}\text{C}$ , що стало можливим завдяки новому вантажному танкеру LH2 об'ємом  $1250\text{ м}^3$  із подвійною оболонкою, між внутрішньою і зовнішньою стінкою якого знаходиться вакуум. Танкер створений на основі технологій, призначених для зберігання рідкого ракетного палива. Для того, щоб це судно могло завантажувати і відвантажувати водень, були побудовані термінали з його конвертації у зріджений стан і регазифікації зрідженого водню (в японському місті Кобе та австралійському місті Латроб-Веллі). В Австралії побудований завод із газифікації бурого вугілля і виробництва очищеного водню. Перша партія зрідженого водню з Австралії має прийти до Японії навесні 2022 р. Усього Kawasaki Heavy Industries планує побудувати 80 LH2-танкерів для перевезення 9 млн. т зрідженого водню [27].

*Китай.* У 2019 р. Китайська воднева асоціація China Hydrogen Alliance повідомила про плани водневої енергетики і паливних елементів, згідно з якими у короткостроковій перспективі

(2020-2025 рр.) обсяг промислового виробництва водневої промисловості у країні досягне 148 млрд. дол. США, а парк автомобілів на паливних елементах у Китаї становитиме 50000 одиниць із інфраструктурою у вигляді 200 водневих заправок. У 2026-2035 рр. обсяг витрат на промислове виробництво зростатиме до 740 млрд. дол. США, кількість водневих автомобілів досягне 15 млн. одиниць, а водневих паливних заправок – до 1500 станцій. До 2050 р. водень становитиме 10% від енергоспоживання Китаю (60 млн. т  $H_2$ /рік). До 2030 р. Китай планує мати 2 млн. автомобілів на водневих паливних елементах. За даними Bloomberg, китайські інвестиції у водневий транспорт до 2023 р. становитимуть понад 17 млрд. дол. США, з яких Китайська національна корпорація важковантажних перевезень вкладатиме 7,6 млрд. дол. США. Окрім того, буде налагоджено масштабне виробництво паливних елементів і побудована мережа високотехнологічних АЗС. Водневі автомобілі доповнять електричні, для яких Китай вже став найбільшим ринком [1].

*Сполучені Штати Америки.* Міністерство енергетики США опублікувало Стратегію розвитку водневої енергетики, яка відкриває шлях до стійкого довгострокового економічного зростання. Ключовим аспектом стратегії є забезпечення виробництва водню із різноманітного набору низьковуглецевих внутрішніх джерел енергії, зокрема із ВДЕ, ядерної енергії і викопного палива (з уловлюванням, використанням і зберіганням вуглецю) [28].

*Канада.* Уряд Канади наприкінці 2020 р. оприлюднив нову стратегію країни із розвитку водневої економіки. У документі підкреслено, що розвиток водневої промисловості може призвести до створення 350 000 нових робочих місць у різних секторах економіки до 2050 року. Очікують, що паливо із нульовим рівнем викидів забезпечить близько 6% кінцевого споживання енергії у Канаді до 2030 р. і близько 30% - до 2050 р. Водночас Канада має значний потенціал для великомасштабного сезонного підземного зберігання водню у геологічних формаціях [29].

*Україна.* Міністерство енергетики України у жовтні 2020 р. повідомило про плани проведення досліджень потенціалу і можливостей упровадження в Україні безвуглецевої водневої енергетики, яка ґрунтується на ВДЕ. Дослідження мають містити обґрунтування можливих технологій, етапів і кількісних показників отримання водню, зокрема завдяки енергії вітру і сонця; визначення можливостей споживання водню в Україні,

зокрема як засобу тривалого зберігання енергії, палива, сировини у промисловості, експортного потенціалу; визначення найоптимальніших зон для здійснення пілотних проєктів із виробництва водню тощо. Очікується, що «Нафтогаз» і «Енергоатом» будуть спільно розвивати водневу енергетику в Україні [30].

У жовтні 2020 р. Міненерго України представило у Німеччині перелік потенційних інвестиційних проєктів із виробництва водню. У Міненерго України заявляють, що питання розвитку водневої енергетики та у цьому контексті перспективи використання інфраструктури газотранспортної системи України нині на порядку денному через значні зміни в економічній та енергетичній сферах, а також через розвиток водневих технологій у країнах ЄС. Україну розглядають як можливого постачальника водню у Німеччину. Задля забезпечення транспортування «зеленого» водню в ЄС можливе використання потужностей газотранспортної системи України (ГТС). Це питання має бути додатково опрацьовано спільно з експертами ЄС для визначення відповідних маршрутів і комплексу заходів щодо забезпечення надійності і безпеки роботи ГТС із новим енергоносієм [31].

У світі все більше країн оцінюють свої відновлювані ресурси, природні властивості, можливості рентабельного транспортування «зеленого» водню і позиціонують себе як експортери екологічно чистого водню. У роботі [32], опублікованій у лютому 2021 р., вказано, що привабливі перспективи у геополітичній гонці за екологічно чисту водневу економіку, особливо з європейського погляду, має Україна, яка має сонячні і вітрові ресурси, трубопроводи в Європу і політичну зацікавленість в енергонезалежності.

У вересні 2021 р. чотири провідні компанії газотранспортної інфраструктури EUSTREAM (компанія-оператор ГТС Словаччини), Оператор ГТС України (ОГТСУ), NET4GAS (компанія-оператор ГТС Чехії) та OGE (провідна компанія-оператор ГТС Німеччини), заявили про об'єднання зусиль задля створення водневої магістралі через Центральну Європу з України до Німеччини. Цей Центрально-Європейський водневий коридор для транспортування чистого водню в обсязі до 120 ГВт·год на добу (що в енергетичному еквіваленті дорівнює 11,4 млн.  $m^3$  природного газу або до 4 млрд.  $m^3$  на рік) може бути створений частково за рахунок перепрофілювання наявної газотранспортної інфраструктури у поєднанні із цільовими інвестиціями у нові спеціалізовані водневі трубопроводи та компресорні станції, що

дозволить забезпечити транспортування водню на великі відстані за доступною ціною [33]. Слід зазначити, що за останні роки Україна щорічно імпортувала до 10 млрд. м<sup>3</sup> природного газу.

Німецька Siemens Energy та український енергохолдинг "ДТЕК" за підтримки урядів двох країн узгодили пілотний проєкт із будівництва заводу із виробництва водню на металургійному комбінаті гірничо-металургійної групи "Метінвест" у місті Маріуполь (Донецька область, Україна), за яким передбачено встановити обладнання для електролізу води потужністю 8,5 МВт і вартістю 25 млн. євро [34].

**Висновки.** Нині водень претендує на статус одного з основних каталізаторів енергетичної трансформації у напрямку сталого розвитку су-

спільства із всеохоплюючим застосуванням відновлювальних джерел енергії. Воднева економіка активно розвивається в усьому світі. Водень, вироблений методом електролізу із використанням вітрової або сонячної електроенергії, у майбутньому посідатиме важливе місце у багатьох сферах економічної діяльності. З метою скорочення викидів парникових газів, насамперед двоокису вуглецю, країни світу все більше покладаються на використання «зеленого» водню як кліматично нейтрального джерела енергії, розробляють і починають активно втілювати національні водневі стратегії. За прогнозами експертів, до 2050 р. попит на водень тільки в Європі має зрости у вісім разів порівняно з 2020 р. (до 2500 ТВт·год на рік).

#### Список літератури:

1. Водородная Энергетика. URL: <https://energy.hse.ru/hydroenergy> (дата звернення 01.09.2021).
2. Vorrath S. BNEF: Renewable hydrogen can replace gas in power generation. URL: <https://ieefa.org/bnef-renewable-hydrogen-can-replace-gas-in-power-generation/> (дата звернення 10.09.2021).
3. Dierman R. Aurora Energy Research erwartet in Europa Verachtfachung der Wasserstoff-Nachfrage bis 2050. URL: <https://www.pv-magazine.de/2020/11/04/aurora-energy-research-erwartet-in-europa-verachtfachung-der-wasserstoff-nachfrage-bis-2050/> (дата звернення 03.09.2021).
4. Hering G. Mitsubishi wins orders for hydrogen-compatible turbines at three planned U.S. gas-fired projects. URL: [https://ieefa.org/mitsubishi-wins-orders-for-hydrogen-compatible-turbines-at-three-planned-u-s-gas-fired-projects/?utm\\_source=rss&utm\\_medium=rss&utm\\_campaign=mitsubishi-wins-orders-for-hydrogen-compatible-turbines-at-three-planned-u-s-gas-fired-projects&utm\\_source=Weekly+IEEFA+Newsletter&utm\\_campaign=f3e6b8e2e5-IEEFA\\_WeeklyDigest&utm\\_medium=email&utm\\_term=0\\_30c2b8506b-f3e6b8e2e5-128745689](https://ieefa.org/mitsubishi-wins-orders-for-hydrogen-compatible-turbines-at-three-planned-u-s-gas-fired-projects/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=mitsubishi-wins-orders-for-hydrogen-compatible-turbines-at-three-planned-u-s-gas-fired-projects&utm_source=Weekly+IEEFA+Newsletter&utm_campaign=f3e6b8e2e5-IEEFA_WeeklyDigest&utm_medium=email&utm_term=0_30c2b8506b-f3e6b8e2e5-128745689) (дата звернення 03.09.2021).
5. Iron and Steel Technology Roadmap. Towards more sustainable steelmaking. Chapter 2. The future of steelmaking. International Energy Agency (IEA).2020. 190 p. URL: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap> (дата звернення 06.09.2021).
6. Yu Yong. Low-carbon development at HBIS. World Steel Association. URL: <https://www.worldsteel.org/media-centre/blog/2021/Low-carbon-development-at-HBIS.html> (дата звернення 06.09.2021).
7. Radowitz B. Linde announces major green hydrogen investment. URL: <https://ieefa.org/linde-announces-major-green-hydrogen-investment/> (дата звернення 01.09.2021).
8. Global green hydrogen project pipeline tops 60GW—Rystad Energy. URL: [https://ieefa.org/global-green-hydrogen-project-pipeline-tops-60gw-rystad-energy/?utm\\_source=rss&utm\\_medium=rss&utm\\_campaign=global-green-hydrogen-project-pipeline-tops-60gw-rystad-energy](https://ieefa.org/global-green-hydrogen-project-pipeline-tops-60gw-rystad-energy/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=global-green-hydrogen-project-pipeline-tops-60gw-rystad-energy) (дата звернення 13.09.2021).
9. Bellini E. Underground hydrogen storage in Canada. URL: <https://www.pv-magazine.com/2020/11/05/underground-hydrogen-storage-in-canada/> (дата звернення 08.09.2021).
10. Dierman R. EWE baut Kavernenspeicher für Wasserstoff. URL: <https://www.pv-magazine.de/2020/12/18/ewe-baut-kavernenspeicher-fuer-wasserstoff/> (дата звернення 05.09.2021).
11. Chestney N., Abnett K. Green hydrogen's time has come, say advocates eyeing post-pandemic world. URL: <https://www.reuters.com/article/us-health-coronavirus-hydrogen-analysis/green-hydrogens-time-has-come-say-advocates-eying-post-pandemic-world-idUSKBN22K0MJ> (дата звернення 12.09.2021).
12. Naschert C. Norwegian electrolyzer firm seeks price parity for green hydrogen by 2025. URL: <https://ieefa.org/norwegian-electrolyzer-firm-seeks-price-parity-for-green-hydrogen-by-2025/> (дата звернення 04.09.2021).
13. Willuhn M. IHS Markit says green hydrogen will be cost competitive by 2030. URL: [https://ieefa.org/ihs-markit-says-green-hydrogen-will-be-cost-competitive-by-2030/?utm\\_source=rss&utm\\_medium=rss&utm\\_campaign=ihs-markit-says-green-hydrogen-will-be-cost-competitive-by-2030&utm\\_source=Weekly+IEEFA+Newsletter&utm\\_campaign=91d75e527d-IEEFA\\_WeeklyDigest&utm\\_medium=email&utm\\_term=0\\_30c2b8506b-91d75e527d-128745689](https://ieefa.org/ihs-markit-says-green-hydrogen-will-be-cost-competitive-by-2030/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=ihs-markit-says-green-hydrogen-will-be-cost-competitive-by-2030&utm_source=Weekly+IEEFA+Newsletter&utm_campaign=91d75e527d-IEEFA_WeeklyDigest&utm_medium=email&utm_term=0_30c2b8506b-91d75e527d-128745689) (дата звернення 07.09.2021).
14. Parnell J. Wood Mackenzie: 2020s will be the 'decade of hydrogen'. URL: <https://ieefa.org/wood-mackenzie-2020s-will-be-the-decade-of-hydrogen/> (дата звернення 11.09.2021).

15. Hydrogen production costs to 2040: Is a tipping point on the horizon? URL: [https://www.woodmac.com/our-expertise/focus/transition/hydrogen-production-costs-to-2040-is-a-tipping-point-on-the-horizon/?utm\\_campaign=energy-transition&utm\\_medium=article&utm\\_source=gtm&utm\\_content=hydrogen-costs](https://www.woodmac.com/our-expertise/focus/transition/hydrogen-production-costs-to-2040-is-a-tipping-point-on-the-horizon/?utm_campaign=energy-transition&utm_medium=article&utm_source=gtm&utm_content=hydrogen-costs) (дата звернення 12.09.2021).
16. Hannen P. Wasserstoff-Großprojekte für mehr als 300 Milliarden US-Dollar in der Pipeline. URL: <https://www.pv-magazine.de/2021/02/19/wasserstoff-grossprojekte-fuer-mehr-als-300-milliarden-us-dollar-in-der-pipeline/> (дата звернення 03.09.2021).
17. Matich B. Global hydrogen project pipeline expected to exceed \$300 billion by 2030. URL: <https://www.pv-magazine.com/2021/02/18/global-hydrogen-project-pipeline-expected-to-exceed-300-billion-by-2030/> (дата звернення 15.09.2021).
18. Appunn K. EU releases plan for sharp increase in green hydrogen production capacity by 2030. URL: [https://ieefa.org/eu-releases-plan-for-sharp-increase-in-green-hydrogen-production-capacity-by-2030/?utm\\_source=rss&utm\\_medium=rss&utm\\_campaign=eu-releases-plan-for-sharp-increase-in-green-hydrogen-production-capacity-by-2030&utm\\_source=Weekly+IEEFA+Newsletter&utm\\_campaign=9dfef03f73-IEEFA\\_WeeklyDigest&utm\\_medium=email&utm\\_term=0\\_30c2b8506b-9dfef03f73-128745689](https://ieefa.org/eu-releases-plan-for-sharp-increase-in-green-hydrogen-production-capacity-by-2030/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=eu-releases-plan-for-sharp-increase-in-green-hydrogen-production-capacity-by-2030&utm_source=Weekly+IEEFA+Newsletter&utm_campaign=9dfef03f73-IEEFA_WeeklyDigest&utm_medium=email&utm_term=0_30c2b8506b-9dfef03f73-128745689) (дата звернення 08.09.2021).
19. Appunn K. Freja Eriksen Julian Wettengel Germany's greenhouse gas emissions and energy transition targets. URL: <https://www.cleanenergywire.org/news/german-hydrogen-strategy-aims-global-leadership-energy-transition> (дата звернення 03.09.2021).
20. Energiewirtschaftliches Institut (EWI). Grüner Wasserstoff: Weltweit große Kostenunterschiede und hohe Transportkosten. URL: <https://www.pv-magazine.de/unternehmensmeldungen/gruener-wasserstoff-weltweit-grosse-kostenunterschiede-und-hohe-transportkosten/> (дата звернення 10.09.2021).
21. Enkhardt S. Erzeugung von grünem Wasserstoff in großem Stil am bisherigen Kohlekraftwerkstandort in Hamburg geplant. URL: <https://www.pv-magazine.de/2021/01/22/erzeugung-von-gruenem-wasserstoff-in-grossem-stil-am-bisherigen-kohlekraftwerkstandort-in-hamburg-geplant/> (дата звернення 05.09.2021).
22. Naschert C. EU funds Ørsted pilot project to produce green hydrogen with offshore wind. URL: [https://ieefa.org/eu-funds-orsted-pilot-project-to-produce-green-hydrogen-with-offshore-wind/?utm\\_source=rss&utm\\_medium=rss&utm\\_campaign=eu-funds-orsted-pilot-project-to-produce-green-hydrogen-with-offshore-wind](https://ieefa.org/eu-funds-orsted-pilot-project-to-produce-green-hydrogen-with-offshore-wind/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=eu-funds-orsted-pilot-project-to-produce-green-hydrogen-with-offshore-wind) (дата звернення 07.09.2021).
23. Enel, Eni form green hydrogen partnership in Italy. URL: [https://ieefa.org/enel-eni-form-green-hydrogen-partnership-in-italy/?utm\\_source=rss&utm\\_medium=rss&utm\\_campaign=enel-eni-form-green-hydrogen-partnership-in-italy](https://ieefa.org/enel-eni-form-green-hydrogen-partnership-in-italy/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=enel-eni-form-green-hydrogen-partnership-in-italy) (дата звернення 11.09.2021).
24. Mazengarb M. Australian company secures funding for major green hydrogen project. URL: [https://ieefa.org/australian-company-secures-funding-for-major-green-hydrogen-project/?utm\\_source=Weekly+IEEFA+Newsletter&utm\\_campaign=4a305de28d-IEEFA\\_WeeklyDigest&utm\\_medium=email&utm\\_term=0\\_30c2b8506b-4a305de28d-128745689](https://ieefa.org/australian-company-secures-funding-for-major-green-hydrogen-project/?utm_source=Weekly+IEEFA+Newsletter&utm_campaign=4a305de28d-IEEFA_WeeklyDigest&utm_medium=email&utm_term=0_30c2b8506b-4a305de28d-128745689) (дата звернення 09.09.2021).
25. Filatoff N. \$50 Billion green hydrogen hub gets Federal Government Guernsey. URL: [https://www.pv-magazine-australia.com/2020/10/25/50-billion-green-hydrogen-hub-gets-federal-government-guernsey/?utm\\_source=Biblio&utm\\_campaign=Internal](https://www.pv-magazine-australia.com/2020/10/25/50-billion-green-hydrogen-hub-gets-federal-government-guernsey/?utm_source=Biblio&utm_campaign=Internal) (дата звернення 14.09.2021).
26. Filatoff N. Australian green hydrogen project secures first commercial offtaker. URL: <https://www.pv-magazine.com/2020/10/28/australian-green-hydrogen-project-secures-first-commercial-offtaker/> (дата звернення 05.09.2021).
27. World's First Liquefied Hydrogen Carrier SUIISO FRONTIER Launches Building an International Hydrogen Energy Supply Chain Aimed at Carbon-free Society URL: [https://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/?f=20191211\\_3487](https://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/?f=20191211_3487) (дата звернення 01.09.2021).
28. Министерство энергетики США опубликовало стратегию развития водородной энергетики. URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2020/11/17/108920> (дата звернення 01.09.2021).
29. Bellini E. Canada joins hydrogen race with dedicated strategy. URL: <https://www.pv-magazine.com/2020/12/21/canada-joins-hydrogen-race-with-dedicated-strategy/> (дата звернення 03.09.2021).
30. Міненерго оголосило тендер на проведення дослідження потенціалу водневої енергетики в Україні. URL: <https://kosatka.media/uk/category/gaz/news/minenergo-obyavilo-tender-na-provedenie-issledovaniya-potenciala-vodorodnoy-energetiki-v-ukraine> (дата звернення 11.09.2021).
31. Міненерго представило в Німеччині портфель потенційних проєктів для вироблення водню. URL: <https://kosatka.media/uk/category/gaz/news/minenergo-predstavilo-v-germanii-portfel-potencialnyh-proektov-dlya-vyrabotki-vodoroda> (дата звернення 03.09.2021).
32. Matich B. The race for green hydrogen. URL: <https://www.pv-magazine.com/2021/02/13/the-weekend-read-what-asia-needs-to-turn-away-from-coal/> (дата звернення 10.09.2021).
33. Компанії газового сектору представляють Центрально-Європейський водневий коридор. Оператор ГТС України. URL: <https://tsoua.com/news/kompaniyi-gazovogo-sektoru-predstavlyayut-czentralno-evropejskij-vodnevyj-korydor/> (дата звернення 23.09.2021).



34. ДТЕК і Siemens за підтримки урядів узгодили водневий проект на EUR25 млн у Маріуполі. Інформаційне агентство Інтерфакс - Україна. URL: <https://ua.interfax.com.ua/news/greendeal/731349.html> (дата звернення 23.09.2021).

### **Shraiber O.A., Dubrovskiy V.V., Teslenko O.I. CURRENT STATE AND PROSPECTS OF HYDROGEN ENERGY DEVELOPMENT IN THE WORLD**

*This article presents the results of an analytical review of the current state and prospects for the development of hydrogen energy in European countries and in other countries. Currently, the use of hydrogen as a potential alternative to fossil carbon fuels claims the status of one of the main catalysts for energy transformation in the direction of sustainable development of society with the comprehensive use of renewable energy sources (RES). Hydrogen is considered primarily as an energy carrier capable of carrying excess energy produced from RES in those periods of the day or season when there is a shortage of energy in the energy system. "Green" hydrogen produced using wind or solar electricity by water electrolysis will in the future play an important role in the world economy and can be used to replace natural gas, both in energy and in industry or transport.*

*However, the production of extremely high-energy hydrogen by electrolysis of water requires a huge amount of electricity, which currently determines its higher cost than traditional fossil fuels. According to the European Commission for 2020, "gray" hydrogen based on fossil fuels costs about 1.50 euros / kg, the estimated cost of "blue" hydrogen obtained from natural gas with carbon capture is 2 euros / kg, "green" hydrogen costs from 2.50 euros / kg to 5.50 euros / kg. It should be noted that in terms of hydrogen use forecasts, the world is now in a similar situation to that with the proliferation of RES in 2000-2005. The next ten to fifteen years are probably enough time to make hydrogen more competitive. According to forecasts, by 2050 in most regions of the world "green" hydrogen in combination with a significant reduction in the cost of electricity from RES can be produced at a price of \$ 0.8 to 1.6 US / kg. Hydrogen can be transported by pipeline from North Africa to Germany for \$ 0.5 US / kg.*

*In the energy sector, gas turbines capable of operating on pure hydrogen, both at constant load and in maneuvering and peak operating modes, are a promising area of application of hydrogen as a fuel, which is necessary for balancing energy systems with a significant share of RES.*

*Hydrogen gas at a pressure of 350 bar can be used for heavy vehicles such as trucks, trains or construction equipment. The main technology for the production of steel from iron ore will be the technology of direct reduction of iron using hydrogen. By 2050, the share of the use of different fuels in metallurgy will change radically: coal consumption will be reduced by 40%, and electricity consumption will double. 30% of this electricity (or about 700 TWh) will be used to produce electrolytic hydrogen, which will require about 165 GW of electrical power from the cells. The Norwegian company Nel Hydrogen has started construction of the world's largest fully automated plant for the production of electrolyzers with a total capacity of 360 MW per year; which will supply cheap, but at the same time the most efficient electrolyzers.*

*A promising area of large-scale seasonal underground hydrogen storage (UHS) is its accumulation in geological formations.*

*According to forecasts, in 2050 hydrogen will provide 24% of global energy needs, and global emissions from fossil fuels will be reduced by a third, and by 2030 the annual demand for "green" hydrogen will increase to 8.7 million tons.*

*The European Hydrogen Strategy sets out a three-stage plan, which begins with the construction of electrolyzers for the production of "green" hydrogen for further use in industry (steel, chemical, refining) until 2024, and then creates local hydrogen production (until 2030), which will be interconnected to form a large European hydrogen infrastructure. In the period 2030 - 2050, pure hydrogen technologies will be widely used in heavy industry. The European Union plans to have 6 GW of electrolyzers for "green" hydrogen by 2024, which will produce up to 1 million tons of "green" hydrogen, and by 2030 up to 40 GW of electrolyzers, which will produce 10 million tons of hydrogen, and also up to 120 GW of wind and solar power plants for them. It is expected that the EU will invest 40 billion euros in production capacity for "green" hydrogen by 2030. By 2050, total investment in "green" hydrogen in Europe could reach 180 - 470 billion euros.*

*The analysis of features of hydrogen strategies of the European countries and other countries of the world is presented.*

**Key words:** hydrogen, renewable energy sources, current state, development prospects.

## РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.235.5: 622.271

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/31>

**Коновал В.М.**

Черкаський державний технологічний університет

**Ищенко К.С.**

Інститут геотехнічної механіки імені М.С. Полякова Національної академії наук України

### ОЦІНКА ЕНЕРГОЄМНОСТІ РУЙНУВАННЯ АНІЗОТРОПНИХ ГІРСЬКИХ ПОРІД СКЛАДНОЇ БУДОВИ ЗА РІЗНИХ УМОВ ЇХ ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

У дослідженні розкрито особливості внутрішньої будови й фізико-механічні властивості родовищ нерудних корисних копалин Українського щита, що істотно впливають на механізм руйнування їх енергією вибуху. Проведено детальний аналіз отриманих показників фізико-механічних характеристик порід складної будови, таких як міцність на одновісне стискування, щільність, швидкість поздовжніх і поперечних хвиль, коефіцієнт Пуассона й модуль Юнга на відібраних зразках породи родовища гранітів «Сівач» (Черкаська обл.), кар'єрів Новопавлівський і Капустянський (Кіровоградська обл.). На відібраних зразках породи в лабораторних умовах на верстаті відрізним алмазним диском виготовляли моделі кубічної форми з розміром ребра  $40 \pm 2$  мм для проведення їх випробувань згідно із чинними Держстандартами. За результатами руйнування зразків гранітів вище наведених родовищ зарядами різної форми перерізу й вільно падаючого вантажу на ударному копрі проведено комплексну оцінку енергоємності їх руйнування. Для цього зразки порід кубічної форми руйнувалися зарядами високбризантної вибухової речовини типу тену масою 150 мг. Подовжені заряди циліндричної форми у вигляді квадратної та трикутної призм розміщали в зарядній порожнині, пробуреній у центрі однієї з граней моделі на глибину  $2/3$  її висоти й діаметром 4–5 мм. Підриг зарядів проводили детонатором миттєвої дії з використанням неелектричної системи ініціювання типу «Прима ЕРА» дистанційно вибуховим приладом ПІВ 100. Продукти руйнування розділяли на фракції методом ситового аналізу, за даними якого розраховували новоутворену поверхню, а питому енергоємність руйнування зразків вибухом зарядами різної форми перерізу й вільно падаючим вантажем на ударному копрі оцінювали за показниками новоутворених поверхонь продуктів руйнування моделей. Результати експериментів показали, що найефективнішим зарядом за енергоємністю руйнування гранітів є подовжені заряди вибухової речовини трикутної форми в поперечному перерізі. Заряди вибухової речовини квадратної форми поперечного перерізу й суцільної конструкції мало відрізняються за показниками енергоємності руйнування зразків гранітів, однак подовжені заряди у вигляді квадратної призми забезпечують зменшення виходу Perezdrіbnenih фракцій на контакті «вибухова речовина – порода».

**Ключові слова:** граніт, вибух, удар, новоутворена поверхня, енергоємність руйнування.

**Постановка проблеми.** Характерна особливість розробки родовищ корисних копалин відкритим способом – це значне збільшення глибини кар'єрів і відповідне зростання обсягів видобутку обводнених гірських порід. Особливо це зазначено на прикладі залізрудних кар'єрів Кривбасу, Полтавського гірничозбагачувального комбінату, гранітних кар'єрів України, обводненість гірських порід яких зросла до 60–85%, а на деяких кар'єрах досягла 90% і більше.

Зростання обводненості гірських порід на кар'єрах негативно позначається на ефектив-

ності буропідричних робіт як із позиції якості дроблення, так і з позиції економії процесів вибухової відбійки. Водночас ефективність підричних робіт залежить від багатьох факторів, у тому числі від фізико-механічних властивостей і структурних особливостей масиву гірських порід, його гідрогеологічного стану, діаметру й форми поперечного перерізу свердловинного заряду, просторового розміщення заряду в масиві, схем підривання, конструкції заряду, типу вибухових речовин тощо [1]. Рішення сформульованих вище

проблем потребує впровадження невідкладних заходів щодо вдосконалення існуючих і розробки нових технічних рішень з ефективності відбійки міцних гірських порід складної структури з урахуванням гірничотехнічних і гідрогеологічних умов розробки корисних копалин.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Визначальним фактором у процесі вибухового руйнування гірських порід є енергія, що передається твердому середовищу під час детонації вибухової речовини. Дроблення гірських порід у загальному випадку залежить від енергоємності руйнування під час механічних і динамічних навантажень, а також від коефіцієнта корисної дії енергії вибуху. Звідси випливає, що важливим аспектом у підвищенні ефективності руйнування міцних порід складної будови є присутність у масиві зв'язаної води, що впливає на міцності властивості порід, які необхідно враховувати під час оцінки можливої зміни характеру їх вибухового дроблення. Зокрема, доведено [2], що, якщо в сухих породах основним механізмом впливу на них енергії вибуху заряду вибухової речовини (далі – ВВ) є ударна хвиля, яка з відстанню переходить у хвилю напружень і продукти детонації, що розширюються, то в обводнених породах з'являються механізми впливу на породу, пов'язані з присутністю в зарядній порожнині води, її зміщенням і витісненням. Під час вибуху заряду в заповненій водою зарядній порожнині енергія ВВ витрачається на нагрівання води й на збільшення кінетичної енергії прилеглих до поверхні частинок води, що утворюється після детонації ВВ у вибуховій порожнині. За великих швидкостей під час розширення порожнини виникає ударна хвиля, яка переходить у породу й сприяє її попередньому руйнуванню. Продукти детонації, що розширюються, сприяють проникненню води в утворені хвилиною напружень тріщини, змінюючи характер руйнування породного масиву.

З вище сказаного випливає, що робочим інструментом під час виконання вибухових робіт є енергія вибуху заряду ВВ, яка залежить від типу ВВ, а для сучасних ВВ, до яких належать найпростіші й емульсійні ВВ, – енергія, яка змінюється в значних межах.

Аналіз сучасного стану буропідричних робіт (далі – БПР) на кар'єрах України, глибина яких досягла 360–370 м і більше, показує, що частка міцних порід залізородних кар'єрів Кривбасу становить близько 75% [3], тоді як міцність порід на кар'єрах нерудної промисловості нижче й коливається в межах 6–16 балів за шкалою проф.

М.М. Протод'яконова. Тому вибір типу ВВ визначається як за міцністю порід, так і за рівнем їх обводненості, а також за технічними можливостями підприємств. Згідно з наведеними вище вимогами визначаються тенденції у виборі вибухових речовин для відкритих гірських робіт, що забезпечують економічну й екологічну безпеку на гірничовидобувних підприємствах України.

Так, донедавна асортимент промислових ВВ для відкритих гірничих робіт в Україні був представлений в основному ВВ із вмістом тротилу (гранулол, грамоніт 79/21, акватол Т-20Г (ГЛТ-20Г), а також гранулітами типу КС-1, Д-5, АС-4, АС-8, ігданітом, а останнім часом (до 90%) – емульсійними ВВ типу «Україніт», Анімікс, ПРИМА ЕРА й іншими ВВ найпростішого складу.

Практика ведення вибухових робіт із використанням емульсійних ВВ і ВВ найпростішого складу показала переважаючі перспективи їх використання на кар'єрах рудної та нерудної промисловості. А завдяки розробкам ефективних технологій формування свердловинних зарядів із використанням гідроізоляційних оболонок [4–8] їх застосування забезпечить зниження вартості БПР та екологічну безпеку на підприємствах гірничо-металургійного комплексу.

Одним зі шляхів поліпшення безпеки та якості відбійки гірських порід є врахування структури масиву й анізотропії фізико-механічних властивостей гірських порід, які суттєво впливають на характер їх руйнування енергією вибуху. Традиційний шлях зниження негативного впливу масових вибухів у кар'єрах – це зменшення маси ВВ у зарядах, що одночасно підриваються, але за такої умови не враховують структуру масиву гірських порід (анізотропія фізико-механічних властивостей порід, що підриваються, присутність тріщин із різними морфологічними характеристиками та їх інтенсивністю), які впливають на характер поширення вибухових хвиль. А тим часом урахування особливостей тріщинно-тектонічної будови масиву в нових способах вибухової відбійки порід складної будови, що розробляються, може не тільки істотно підвищити якість видобутку рудних і нерудних корисних копалин, а й значно зменшити хвилюву дію масового вибуху (далі – МВ). Причому, як встановлено раніше [9–11], в анізотропному гірському масиві в процесі еволюції сформувались подовжені зони підвищеної тріщинуватості, які чергуються із зонами виключно монолітних порід. Присутність таких зон у масиві, що розробляється, істотно ускладнює ведення вибухових робіт у кар'єрах. Із цього

впливає, що процеси, що відбуваються в масиві складної будови на контакті «ВР-порода», не досить вивчені. Крім того, немає чіткого уявлення про вплив макроструктури на характер поширення хвиль напружень та їх впливу на об'єкти, що знаходяться під охороною (житлові будинки й споруди). Тим часом якість дроблення гірських порід у процесі руйнування їх вибухом можна оцінити, враховуючи багато чинників, таких як: енергія, що передається твердому середовищу, питома поверхнева енергія руйнування, новоутворена поверхня, діаметр середнього куска й ступінь подрібнення.

У зв'язку із цим дослідження, пов'язані з розробкою нових ресурсозберігаючих способів відбійки гірських порід, які базуються на врахуванні тріщино-тектонічної будови масиву й анізотропії їх фізико-механічних властивостей, залишаються актуальними й натеper.

Робота виконується відповідно до комплексної програми Національної академії наук України з розробки безвідходних технологій видобування корисних копалин відкритим способом «Наукове обґрунтування розвитку безвідходних технологій видобування корисних копалин відкритим способом зі зменшенням їх шкідливого впливу на навколишнє середовище» (№ ДР 0120U101113).

**Постановка завдання.** Метою роботи є дослідження структурних особливостей і фізико-механічних властивостей міцних гірських порід складної будови родовищ гранітів Українського щита (далі – УЩ), а також оцінка їх впливу на енергоємність руйнування за різних умов їх динамічного навантаження. Для досягнення мети проведено

комплексні дослідження на відібраних зразках порід, з яких виготовлені прозорі петрографічні шліфи, і за допомогою оптичних методів виконано аналіз структурних особливостей порід, на моделях кубічної форми досліджено їх фізико-механічні властивості й оцінено енергоємність їх руйнування за різних умов їх динамічного навантаження.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для вивчення фізико-механічних властивостей, структурних особливостей та оцінки питомої енергії руйнування гірських порід складної будови за різних умов їх динамічного навантаження були розроблені способи оцінки їх змін у лабораторних і полігонних умовах [12–13].

Вивчення цих змін проводилось на зразках порід, які відібрані на кар'єрах «Сівач», Новопапівський і Капустянський в аналогічних гірничо-геологічних умовах у формі куба з ребром 350 мм. Відомості про зразки порід наведено в табл. 1.

Для детального аналізу отриманих показників фізико-механічних характеристик порід складної будови, таких як міцність на одновісне стискання, щільність, швидкість поздовжніх і поперечних хвиль, коефіцієнт Пуасону й модуль Юнга, з відібраних проб зразків породи (табл. 1) у лабораторних умовах на верстаті відрізним алмазним диском виготовляли моделі кубічної форми з розміром ребра  $40 \pm 2$  мм для проведення їх випробувань згідно з діючими Держстандартами й відомими методиками [14–19].

Значення акустичних і фізико-механічних характеристик досліджуваних зразків гірських порід наведені в табл. 2, а оцінку структурних особливостей гірських порід проводили на про-

Таблиця 1

**Відомості про зразки порід, відібрані для досліджень їх структурних особливостей, фізико-механічних властивостей і питомої енергії їх руйнування**

№ п/п	Тип породи	Місто відбору проб	Розмір зразка, мм	Характеристика породи
1	Граніт – сірий великозернистий	Кар'єр «Сівач» м. Корсунь-Шевченківський Черкаська обл.	350 x 350 x 350 мм	Структура овоїдна польового шпату, з вкрапленнями світло-сірого кольору дрібних зерен ортоклазу, розовато-коричневого відтінку
2	Граніт – рожевий великозернистий	Кар'єр «Сівач» м. Корсунь-Шевченківський Черкаська обл.	350 x 350 x 350 мм	Структура овоїдна, утворена крупними овоїдами польового шпату (розмір до 5 см), в основному ортоклазу рожевого кольору
3	Граніт – сірий, орієнтований	Кар'єр Новопапівський, гор. +80 м Кіровоградська обл.	350 x 350 x 350 мм	Граніт світло-сірий (плагіо-граніт), середньої великозернистої текстури
4	Граніт – червоний великозернистий	Кар'єр Капустянський, гор. +26 м Кіровоградська обл.	350 x 350 x 350 мм	Граніт м'ясочервоний, великозернистий, міцний

зорих петрографічних шліфах (рис. 1) оптичними методами з використанням мікроскопу МП-2.

Для визначення питомої енергії руйнування гранітів динамічними навантаженнями різних видів, тобто ударом вільно падаючого вантажу й вибухом подовжених зарядів ВР із різною формою поперечного перерізу була розроблена спеціальна методика експериментальних досліджень, яка дозволяє в лабораторних і полігонних умовах оцінювати характер і питому енергію їх руйнування.

Відповідно до розробленої методики передбачалось провести дві серії експериментальних досліджень, а саме: руйнування зразків гірських порід вільно падаючим вантажем і руйнування зразків гірських порід під час вибуху зарядів ВР різної форми перерізу.

Згідно з розробленою методикою були проведені експериментальні дослідження на моделях, виготовлених із сірого, рожевого, червоного сірого великозернистого, сірого орієнтованого

гранітів міцністю  $f = 12-13$  балів за шкалою проф. М.М. Протодьяконова, відібраних на кар'єрах «Сівач» (Черкаська обл.), Новопавлівський і Капустянський (Кіровоградська обл.), на яких відбійку порід веде приватне акціонерне товариство «Укргровибухпром».

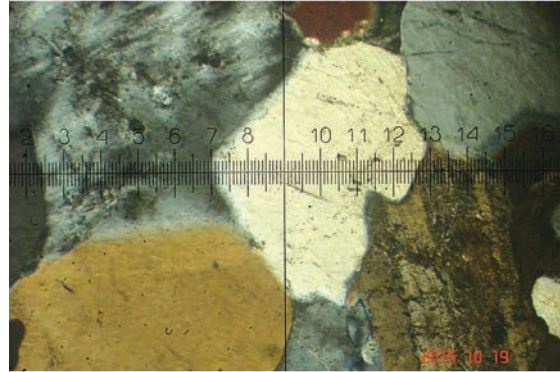


Рис. 1. Мікрофотографія структури граніту – сірого великозернистого (кар'єр «Сівач», Черкаська обл.; прозорий шліф, збільшення 150×)

Таблиця 2

Основні фізико-механічні характеристики досліджуваних зразків гірських порід

Тип породи	Місце відбору проб	Щільність, $\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/см <sup>3</sup>	Межа міцності на стиснення, $\sigma_{ст}$ , МПа	Швидкість подовженої хвилі, $V_p$ , м / с	Коефіцієнт Пуассону, $\nu$	Модуль Юнга Е, ГПа
Граніт – сірий великозернистий	Кар'єр «Сівач» м. Корсунь-Шевченківський Черкаська обл.	2,7	186,0	4 450	0,24	18,6
Граніт – рожевий великозернистий	Кар'єр «Сівач» м. Корсунь-Шевченківський Черкаська обл.	2,8	180,0	4 350	0,22	19,2
Граніт – сірий, орієнтований	Кар'єр Новопавлівський, гор. +80 м Кіровоградська обл.	2,65	205,2	4 950	0,29	65,0
Граніт – червоний великозернистий	Кар'єр Капустянський, гор. +26 м Кіровоградська обл.	2,55	210,6	5 100	0,28	66,3

Таблиця 3

Характеристики зразків порід

Тип породи	Умови навантаження	Усереднений розмір ребра зразка, $D_{cp}$ , см	Об'єм, $V$ , см <sup>3</sup>	Маса, $m$ , г	Щільність, $\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/см <sup>3</sup>	Початкова поверхня, $S_0$ , см <sup>2</sup>
Граніт – рожево-червоний, кар'єр «Сівач»	копер	4,1	70,6	185,0	2,62	102,5
	вибух	4,1	68,9	180,0	2,61	100,9
Граніт – сірий (великозернистий), кар'єр «Сівач»	копер	4,1	68,9	185,0	2,68	100,9
	вибух	4,0	64,0	175	2,65	96,0
Граніт – сірий, орієнтований	копер	4,0	66,9	175,0	2,61	99,2
	вибух	4,0	65,4	165,0	2,52	97,6
Граніт – червоний (великозернистий)	копер	4,1	70,6	185,0	2,62	102,5
	вибух	4,1	68,9	180,0	2,61	100,9

Характеристики зразків порід, підготовлених для досліджень, наведено в табл. 3.

Мета експериментів – оцінка енергетичної ефективності розроблених конструкцій свердловинних зарядів.

Для визначення питомої енергії руйнування вибухом зразків гранітів у підготовлених моделях кубічної форми у центрі однієї з граней бурилась вибухова порожнина діаметром 4–5 мм і глибиною 2 / 3 її висоти, в яких формувались заряди різної форми перерізу для оцінки корисної дії вибуху.

У поперечному перерізі приведені заряди мають форму кола, рівностороннього трикутника й квадрата, які були вписані в коло, з повітряним зазором між поверхнею зарядної порожнини й відповідної форми заряду (рис. 2).

Руйнування моделей вибуховим навантаженням здійснювали в полігонних умовах у закритому металевому боксі, внутрішня поверхня якого футерована гумою. Маса зарядів для всіх моделей високобризантного ВР (тену) складала 150 мг. Підрив зарядів проводили детонатором миттєвої дії з використанням неелектричної системи ініціювання (далі – НСИ) типу «Прима ЕРА» дистанційно вибуховим приладом ПІВ 100. Усього було підірвано 18 моделей (по три заряди з квадратними й трикутними призмами – експериментальними – і три із зарядами суцільної конструкції, а також контрольні для кожного виду граніту).

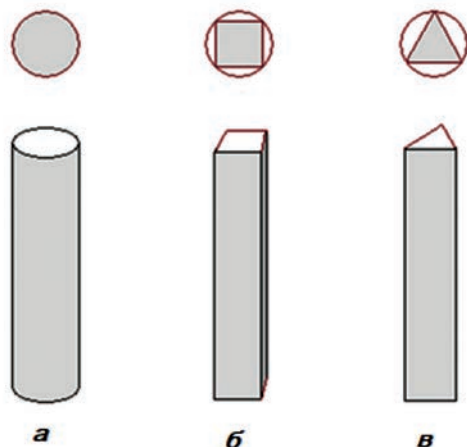


Рис. 2. Конструкції зарядів ВР різної форми перерізу для підірвання гранітних моделей енергією вибуху:

- а – циліндричний суцільної конструкції;
- б – квадратний із повітряним проміжком;
- в – трикутний із повітряним проміжком

Гранітні моделі руйнували також на вертикальному копрі вільно падаючим із висоти 1 м вантажем масою 21,4 кг. Енергія падаючого вантажу становила 210 Дж. На вертикальному копрі

вільно падаючим вантажем зруйновано 6 моделей. Передбачалось, що наведена вантажем енергія в момент удару повністю трансформується в роботу руйнування зразка гірської породи. Іншими словами, енергія, що витрачається на руйнування зразка гірської породи, вресіт-ресіт витрачається на утворення нових поверхонь у зруйнованій породі. Обчислення питомих витрат енергії на одиницю новоутвореної поверхні за результатами руйнування породи в технологічних процесах дає можливість оцінити процес руйнування з боку його енергоефективності.

Дослідження гранулометричного складу зруйнованих ударом і вибухом зразків гірської породи з метою встановлення величини новоутвореної поверхні проводили методом ситового аналізу за допомогою лабораторних сит типу СЛ-200 № 58 із розміром отворів 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 5,0; 7,0; 10,0; 12,0; 16,0; 20,0; 26,0; 30,0; 40,0; 50,0; 60,0; 70,0; 80,0 мм та аналізатору ситового А30 (рис. 3) для оцінки гранулометричного складу на макрорівні за відомими методиками [20].

Під час обробки гранулометричного складу зруйнованої моделі подрібнений матеріал аналізували за такими основними показниками: інтенсивність руйнування моделі в цілому; визначення загальної маси моделі; діаметр середнього куска; площа новоутвореної поверхні.

Новостворену поверхню зруйнованих зразків після поділу їх на фракції для визначення гранулометричного складу, розраховували за відомою формулою [13]:

$$S_n = \frac{6}{\rho} \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{d_i} - S_0, \quad (1)$$

де  $\rho$  – щільність матеріалу моделі, кг/м<sup>3</sup>;  $S_0$  – початкова поверхня зразка моделі, см<sup>2</sup>;  $m_i$ ,  $d_i$  – відповідно, маса (г) і діаметр (см) середнього куска  $i$ -тої фракції, а діаметр середнього куска визначали за формулою:

$$d_{\text{сеп}} = \sum_{i=1}^i w_i d_i, \quad (2)$$

де  $w_i = m_i/m$  – вміст  $i$ -тої фракції чи  $i$ -того куска, частки одиниці;  $m_i$  – маса  $i$ -тої фракції, г;  $m$  – загальна маса всіх фракцій, г;  $d_i$  – середній розмір  $i$ -того куска чи  $i$ -тої фракції, см.

Енергоемність створеної одиниці нової поверхні характеризує величина, яка називається питомою поверхневою енергією ( $\gamma$ ).

Під час руйнування зразків гірських порід ударом вільно падаючого вантажу енергія, що витрачається одиницею новоутвореної поверхні, розраховується за формулою:



Рис. 3. Зовнішній вигляд аналізатору ситового А30 (а) і набір лабораторних сит СЛ-200 № 58 (б)

$$\gamma_y = \frac{mgh}{S_{ny}}, \quad (3)$$

де  $S_{ny}$  – новоутворена поверхня під час удару;  $m$  – маса вантажу, 21,4 кг;  $g$  – прискорення вільного падіння, 9,8 м/с;  $h$  – висота падіння вантажу, 1,0 м.

Під час руйнування таких же за розміром зразків гірських порід вибухом зарядів вибухової речовини масою  $M$  і теплою вибуху  $Q$  (кДж / кг) енергія  $\gamma_{в}$ , що витрачається на створення одиниці новоутвореної поверхні, розраховувалась таким чином:

$$\gamma_a = \frac{MQ}{S_{на}}, \quad (4)$$

де  $S_{на}$  – новоутворена поверхня під час вибуху, см<sup>2</sup>;  $M$  – маса заряду, кг;  $Q$  – теплота вибуху, кДж/кг; а ступінь подрібнення зразків гранітів розраховувалась за формулою:

$$K_d = D_{cp} / d_{cp}, \quad (5)$$

де  $D_{cp}$  – усереднений розмір ребра зразка моделі, см;  $d_{cp}$  – діаметр середнього куска.

За розрахованими значеннями новоутвореної поверхні зруйнованих зразків гранітів визначали основні енергетичні показники: питому поверхневу енергію руйнування за вільно падаючого вантажу й під час вибуху; діаметр середнього куска і

ступінь подрібнення зразків гірської породи розраховували за формулами (1), (2), (3), (4) і (5).

Результати експериментальних досліджень з оцінки енергетичних показників руйнування гранітів на прикладі родовища «Сівач» наведено в табл. 4, а чисельні значення новоутворених поверхонь сірих і рожевих гранітів, зруйнованих вибухом зарядів різної форми й вільно падаючим вантажем, наведено на рис. 4.

Аналіз даних, наведених у табл. 4 і на рис. 4, свідчить про таке. На питому поверхневу енергію руйнування гранітів істотно впливає форма заряду ВР, а також щільність дефектів будови у вигляді мікротріщин у гранітах.

Установлено, що максимальну питому поверхневу енергію отримано за руйнування сірих гранітів зарядами у формі трикутної призми, а мінімальну питому поверхневу енергію встановлено в разі руйнування рожевих гранітів цими ж зарядами. Також під час руйнування рожевих гранітів подовженими зарядами з трикутною формою поперечного перерізу ступінь подрібнення їх енергією вибуху досягає максимального значення.

Експериментально доведено, що для подовжених зарядів із квадратною формою поперечного

Таблиця 4

**Результати експериментальних досліджень з оцінки енергетичних показників руйнування гранітних моделей (родовище «Сівач») зарядами ВВ різної форми й вільно падаючим вантажем**

Умови навантаження зразків порід вибухом	Новоутворена поверхня, $S_n$ , см <sup>2</sup>		Середній розмір куска, $d_{cp}$		Питома поверхнева енергія руйнування, Дж / см <sup>2</sup>		Ступінь подрібнення зразка, $K_d = D_{cp} / d_{cp}$		Середній діаметр частинок фракції 0–100 мкм	
	Сірий граніт	Рожевий граніт	Сірий граніт	Рожевий граніт	Сірий граніт	Рожевий граніт	Сірий граніт	Рожевий граніт	Сірий граніт	Рожевий граніт
Циліндр	2 417,3	2 696,5	3,64	3,26	0,056	0,028	25,18	28,09	19,44	18,47
Квадратна призма	2 498,0	3 335,8	3,52	2,64	0,058	0,038	26,02	34,75	28,82	27,38
Трикутна призма	2 230,4	3 356,3	3,95	2,62	0,025	0,078	23,23	34,96	16,82	15,47
Ударний копер*	1 025,2	2 098,0	0,205	0,100	–	–	10,68	21,85	–	–

\* – руйнування на ударному копрі вільно падаючим вантажем

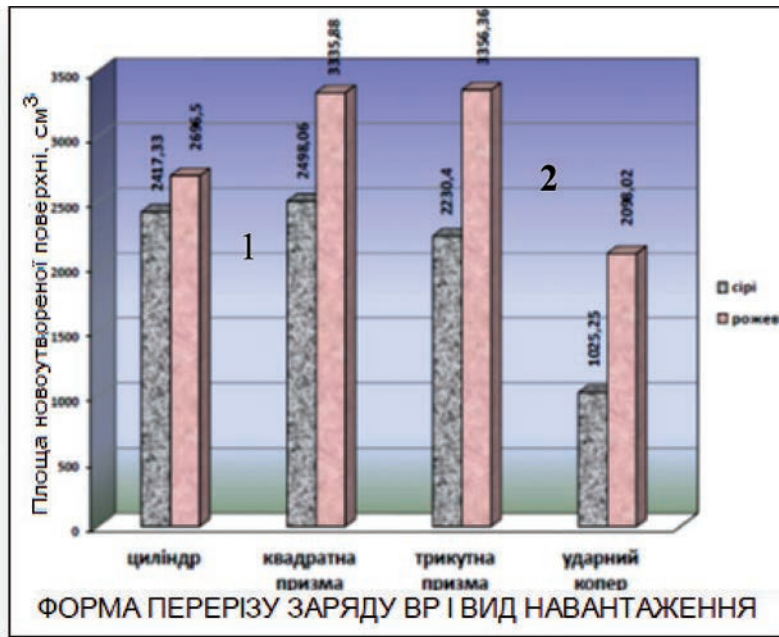


Рис. 4. Площа новоутвореної поверхні за динамічного навантаження зразків гранітів родовища «Сівач»: 1 – сірі граніти; 2 – рожеві граніти

перерізу енергетичні показники руйнування – новоутворена поверхня, питома поверхнева енергія, ступінь подрібнення зразка – мало відрізняються від аналогічних характеристик для циліндричних зарядів у разі руйнування сірих гранітів. Істотні відмінності вищенаведених характеристик спостерігаються під час використання циліндричних зарядів суцільної конструкції для руйнування рожевих гранітів. На наш погляд, така обставина пояснюється відмінностями в особливостях внутрішньої будови сірих і рожевих гранітів. Авторами роботи [10] встановлено, що для гранітів характер руйнування вибухом визначається видом структурних зв'язків між елементами його будови, до яких належать тріщинуватість і шаруватість. Водночас, оскільки кварц у гранітах кристалізується останнім із гранітного розплаву та є свого роду «цементом», що зв'язує між собою зерна інших мінералів, характер руйнування гранітів у цілому залежить від міцності «кварцового цементу». Зі збільшенням кількості

мікротріщин у зернах кварцу зростає інтенсивність руйнування гранітів вибуховими навантаженнями.

**Висновки.** У результаті дослідження отримані такі результати:

- встановлено, що використання подовжених зарядів з трикутною та квадратною формою поперечного перерізу дозволяє збільшити ефективність використання енергії вибуху для руйнування полімінеральних середовищ складної будови, зокрема гранітів;

- визначено, що мікротріщинуватість мінеральних компонентів, що складають породу, зокрема кварцу, сприяє зростанню енергоефективності зарядів різної форми;

- доведено, що для зростання енергетичних показників під час руйнування гранітів з інтенсивно розвинутою мікротріщинуватістю, а саме питомої поверхневої енергії, найефективнішим зарядом є продовжний заряд ВР із трикутною формою поперечного перерізу;

- заряди з квадратною формою поперечного перерізу й циліндричні заряди ВР суцільної конструкції мало відрізняються за питомою поверхневою енергією руйнування, проте заряди у вигляді подовженої квадратної призми забезпечують менший вихід Perezdrіbnenih фракцій на контакті «ВР-порода»

- енергетичні показники руйнування гранітних моделей на ударному копрі вільно падаючим вантажем та енергією вибуху значно відрізняються (в 1,5–2,0 раза), що доводить недостатність енергії, яка необхідна для розриву міжзернових контактів у породах складної будови;

- отримані результати досліджень сприятимуть пошуку й розробці нових технічних рішень із підвищення ефективності руйнування міцних гірських порід складної будови енергією вибуху на кар'єрах нерудних корисних копалин.

#### Список літератури:

1. Ефремов Э.И., Мячина Н.И., Никифорова В.А. Влияние свойств горных пород на характер разрушения при взрыве. *Методы и средства разрушения горных пород*. Москва : Из-во МГГУ, 2001. С. 445–455.
2. Станюкович К.П. Неустановившиеся движения сплошной среды. Москва : Наука, 1971. 854 с.
3. Ищенко Н.И., Лисицын Н.В., Монаков В.Ф. Перспективы развития взрывных технологий на карьерах Кривбасса и использования ВМ. *УСИБ*. 2003. С. 18–37.
4. Галкин В.В. Заряжание обводненных скважин неводоустойчивыми ВВ. *Горный журнал*. 1980. № 3. С. 40–45.
5. Бондаренко Н.М., Ткаченко С.С. Заряжание обводненных скважин неводоустойчивыми ВВ. *Горный журнал*. 1988. № 1. С. 39–40.



6. Ефремов Э.И., Петренко В.Д., Чайковский А.И., Кратковский И.Л., Кочерга В.И. Механизированное зарядание взрывных скважин неводоустойчивыми ВВ для дробления обводненных пород. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1989. № 2. С. 41–42.

7. Спосіб формування свердловинного заряду вибуховими речовинами : пат. 6518 Україна / Е.І. Єфремов, А.В. Пономарьов, В.В. Бараннік, В.Г. Ковалевич, В.П. Мартиненко № у 20040907557 ; заявл. 16.09.04 ; опубл. 16.05.05. Бюл. № 5.

8. Прокопенко В.С. Фізико-технічні основи руйнування скельних порід вибухами свердловинних зарядів вибухових речовин у рукавах : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.15.11. Київ : Національний НДІ охорони праці, 2003. 35 с.

9. Ефремов Э.И., Петренко В.Д., Рева Н.П., Кратковский И.Л. Механика взрывного разрушения пород различной структуры. Киев : Наук. думка, 1984. 192 с.

10. Кратковский И.Л. Влияние метасоматоза на кливаж гранитоидов. *Геотехническая механика* : Межвед. сб. науч. тр. ; Ин-т геотехн. мех. НАН Украины. Днепропетровск, 2004. Вып. 47. С. 141–151.

11. Ищенко К.С., Кратковский И.Л. Экспериментальные исследования влияния микроструктуры на характер взрывного разрушения урановых руд Ватутинского месторождения. *Научный вестник ДВНЗ «НГУ»*. Днепропетровск, 2008. № 8. С. 58–64.

12. Спосіб оцінки структурних змін анізотропних гірських порід при динамічному навантаженні на моделях : пат. 85757 Україна / К.С. Іщенко, І.Л. Кратковський, О.С. Баскевич № у 201308029 ; заявл. 25.06.13 ; опубл. 25.11.13. Бюл. № 22.

13. Спосіб оцінки енергоємності руйнування анізотропних гірських порід при різних видах навантаження на моделях : пат. 95218 Україна / К.С. Іщенко, С.В. Коновал, Д.В. Савельєв, І.Л. Кратковський, В.В. Круковська № у 201407830 ; заявл. 11.07.14 ; опубл. 10.12.14. Бюл. № 23.

14. ГОСТ 21153.0–75. Породы горные. Отбор проб и общие методы физических испытаний. [Введен с 1975-07-01]. Москва : Изд-во стандартов, 1976. 20 с.

15. ГОСТ 10181.2–81. Смеси бетонные. Методы определения плотности. [Введен с 1981-01-01]. Москва : Изд-во стандартов, 1981. 25 с.

16. ГОСТ 21153.2–84. Породы горные. Метод определения предела прочности при одноосном сжатии. [Введен с 1986-07-01]. Москва : Изд-во стандартов, 1986. 10 с.

17. Временные методические указания по экспресс-определению упругих свойств горных пород ультразвуковым методом на необработанных образцах зерна геологоразведочных скважин РД / А.А. Яланский, Т.А. Паламарчук, С.И. Скипочка и др. Ленинград : ВНИМИ, 1987. 41 с.

18. ГОСТ 21153.7–75. Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн. [Введен с 1975-01-01]. Москва : Изд-во стандартов, 1976. 35 с.

19. Барон Л.И., Позин Е.З. Определение свойств горных пород. Москва : Гос.научн.-техн.изд.лит.по горному делу, 1962. 332 с.

20. Барон Л.И. Кусковатость и методы ее измерения. Москва : Изд-во АН СССР, 1960. 124 с.

## Konoval V.M., Ishchenko K.S. ESTIMATION OF ENERGY CONTAINMENT OF ANISOTROPIC DESTRUCTION OF ROCKS THE COMPLEX STRUCTURE UNDER DIFFERENT CONDITIONS OF THEIR DYNAMIC LOAD

*The study reveals the features of the internal structure and physical and mechanical properties of deposits of non-metallic minerals of the Ukrainian Shield, which significantly affect the mechanism of their destruction by the energy of the explosion. A detailed analysis of the obtained indicators of physical and mechanical characteristics of rocks of complex structure, such as strength under uniaxial compression, density, velocity of longitudinal and transverse waves, Poisson's ratio and Young's modulus on selected samples of rock granite deposit "Sivach" (Cherkasy region) Novopavlovsky and Kapustyansky (Kirovgrad region). On the selected samples of the rock in the laboratory on a machine with a cutting diamond disk made models of cubic shape with a rib size of  $40 \pm 2$  mm for testing in accordance with current State Standards. According to the results of the destruction of granite samples of the above deposits by charges of different cross-sectional shape and free-falling cargo on the impact dill, a comprehensive assessment of the energy intensity of their destruction. For this purpose, the samples of cubic rocks were destroyed by charges of high-explosive explosive of the tan type weighing 150 mg. Elongated cylindrical charges in the form of square and triangular prisms were placed in the charging chamber, drilled in the center of one of the faces of the model to a depth of  $2/3$  of its height and diameter 4–5 mm. The charges were detonated by an instantaneous detonator using a non-electric initiation system (NSI) type "Prima ERA" remotely blasting machine PIV 100. The destruction products were divided into fractions by sieve analysis according to which the newly formed surface was calculated, and the specific and free-falling load on the impact dill was evaluated by the indicators of the newly formed surfaces of the destruction products of the models. The results of the experiments showed that the most effective charge on the energy intensity of the destruction of granites are elongated charges of explosives of triangular shape in cross section. The charges of explosives of square cross-section and solid construction differ little in the energy intensity of destruction of granite samples, but elongated charges in the form of a square prism provide a reduction in the yield of crushed fractions at the contact "Explosives-rock".*

**Key words:** granite, blast, blow, newly formed surface, energy intensity of destruction.

## ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

UDC 661.961.2

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/32>

**Zabiaka N.A.**

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”

**Kanunnikova N.A.**

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”

**Pyrozhenko E.V.**

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”

**Bairachniy V.B.**

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”

**Tykhomyrova T.S.**

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”

### **INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE RATE OF RELEASE OF HYDROGEN THROUGH THE INTERACTION OF AK7 ALLOY WITH ALKALINE-CHLORIDE SOLUTION**

*The dissolution rates of the test alloy and the evolution of hydrogen depend on the activity of the components of the test solution, which can be increased by changing the concentrations of sodium hydroxide and halide activators, changing the surface roughness of the samples, applying additional mixing and temperature control.*

*This work is devoted to determining the effect of the temperature of the test solution on the rate of hydrogen evolution by the interaction of the aluminum casting alloy brand AK7 with an alkaline-chloride medium. The influence of the temperature factor was investigated in the intervals (293 ÷ 323) K in a solution of sodium hydroxide with a concentration of 2.5 mol /dm<sup>3</sup> with impurities of sodium chloride with a concentration of 0.1 mol /dm<sup>3</sup>.*

*The results of the research proved the activating effect of the temperature factor on the dissolution rate of the AK7 alloy and, as a consequence, the rate of hydrogen evolution. When the temperature rises to 323 K during the interaction of the alloy AK7 with an alkaline-chloride solution, there is a rapid increase in the rate of hydrogen evolution by an order of magnitude compared to room temperature and equal to 1.25 m<sup>3</sup> per 1 m<sup>2</sup> per 1 hour. This behavior is due to the activity of the components of the test solution, which with increasing temperature acts on the surface of the aluminum alloy accelerating the process of its dissolution and the rate of hydrogen evolution reaches such large values.*

*The value of activation energy  $H$  for the temperature rang (303 ÷ 323) K, which varies from 9 to 14 kJ/mol, is calculated, which indicates the diffusion nature of the rate of interaction of the aluminum alloy brand AK7 with alkaline-chloride solution.*

*Using the software package MS Exel 2016, regression polynomial relations were determined, which characterize the behavior of the dissolution rates of the sample and the indicators of the synthesized hydrogen from changes in temperature in the alkaline-chloride solution.*

**Key words:** hydrogen, AK7 alloy, the dissolution rate of the alloy, alkaline-chloride solutions, temperature, hydrogen evolution rate, halides, chemical dissolution.

**Introduction.** The modern energy sector needs development, which consists in the use of environmentally friendly energy sources, which play an important role in hydrogen production. Industrial synthesis of hydrogen is an integral part of its use,

because it is almost not found in nature in pure form and must be extracted from other compounds by various chemical and electrochemical methods.

To date, a large number of works on the synthesis of hydrogen, mainly for its use as an environmentally safe

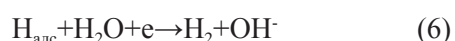
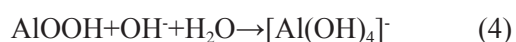
and alternative source of heat [1]. Its largest volumes are obtained by high-temperature conversion of coal and natural gas [1-3]. However, the cost of this hydrogen increases significantly compared to natural gas due to the need for additional purification operations. Electrochemical methods for producing hydrogen and methods of depolarizing destructive dissolution of metals are used to a lesser extent due to significant energy costs. The cost of this hydrogen increases 5-8 times compared to natural gas. Despite the high economic costs, hydrogen production by thermoelectric depolarizing cycles and electrolysis is constantly improved due to the high degree of purity of the obtained hydrogen [4]. To reduce energy and economic costs, a new method of hydrogen synthesis has been proposed - the method of biocatalytic systems [5]. However, its implementation takes a long time.

Modern methods of hydrogen production are characterized by the high cost of the final product due to additional purification operations, unsatisfactory economic consequences, utilization of by-products of the reaction, which inhibits the development of the hydrogen industry.

Alternative methods of hydrogen synthesis are chemical-thermal cycles by which hydrogen is obtained by the interaction of some metals with solutions, where they dissolve with the release of hydrogen. One of the most promising in this regard is the release of hydrogen by dissolving aluminum or its alloys in alkaline solutions. Given the large volumes of aluminum production, its use in the form of alloys, production waste and lack of products can actually reduce the cost of synthesized hydrogen by dissolving these alloys in alkaline solutions [7].

#### Analysis of recent research and publications.

In [8] it is shown that when reacting with alkaline solutions, aluminum and its alloys show thermodynamic instability, which is associated with the destructive process of the metal. When aluminum interacts with alkali solutions, aluminate and complex hydroxide ions  $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$  are formed: at  $\text{pH} > 11$  the dissolution reaction proceeds by a destructive mechanism with hydrogen depolarization [2, 9-12]. Reactions of ionization of aluminum proceed gradually, they include stages of interaction of an oxide film with hydroxide and dissolution of metal on the following reactions:



The final product of reactions (1-6) is  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , which can still be used in the production of aluminum, but in [14-17] as an experimental alloy selected brand AK7, which includes other impurities that affect the stationary potential alloy, namely the shift to the positive region due to the action of potentials and impurities at a given pH.

The rate of interaction of the aluminum alloy brand AK7 with alkaline solutions is slowed down due to the presence of impurities in the alloy. It contains 6-8% silicon, as well as impurities of copper, iron, manganese and zinc, which do not exceed 1.5%. When the AK7 alloy interacts with alkaline solutions, all these impurities form insoluble surface oxides of these metals [14]. Such compounds are localized on the surface of the alloy in the form of a porous and hydrated film, which changes the composition and, depending on the composition of the solution, the surface roughness of the sample diffuses from its surface.

In [15-19] the results of the rate of hydrogen evolution by the interaction of the alloy AK7 with the classes of surface purity from  $\nabla 3$  to  $\nabla 7$  in alkaline-halide solutions; the influence of fluoride and chloride ions on hydrogen synthesis was determined. The research results show that the most effective is the simultaneous use of chloride and fluoride activators with concentrations of  $0.09 \div 0.11 \text{ mol/dm}^3$  and  $0.19 \div 0.21 \text{ mol/dm}^3$ , respectively, in a solution of  $2.4 \div 2.6 \text{ mol/dm}^3 \text{ NaOH}$ . Simultaneous action of NaCl and NaF accelerators allows promising use in hydrogen production, as the obtained data on the specific dissolution rates of AK7 alloy are 10 times higher than the absence of impurities and are characterized by the following values:  $\Delta P = 2321,43 \text{ g}$  and  $V_{\text{H}_2} = 1126,4 \cdot 10^3$  in terms of  $1 \text{ m}^2$  for 1 hour. The choice of the purity class of the sample surface is substantiated. The technologically selected surface roughness is recommended for which  $\nabla 5$ , for which  $\Delta P = 1000 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$ , and  $V_{\text{H}_2} = 830 \text{ cm}^3/\text{h}$ .

However, in works there are no researches of such indicator as change of temperature of solution. It can be assumed that by regulating the temperature, the components of the solution will accelerate the diffusion of the reaction products (metal oxides are formed from impurities) from the aluminum surface, increasing the rate of hydrogen evolution.

**The aim** of the work is to study the effect of temperature on the rate of hydrogen evolution in an alkaline-chloride solution containing  $2.5 \text{ mol/dm}^3 \text{ NaOH} + 0.1 \text{ mol/dm}^3 \text{ NaCl}$ .

**Results and discussions.** The effect of temperature on the dissolution rate of the alloy AK7 is determined

by the temperature dependence of the rate constant of this reaction in diffusion or kinetic control according to the exponential law of Arrhenius:

$$K(\Delta m) = Ae^{-Q/RT}, \quad (7)$$

where  $K(\Delta m)$  – the rate of change of the alloy mass,  $g / cm^2 \cdot h$ ;  $A$  – constant, which is equal to  $\Delta m$  at  $1/T=0$ ;  $Q$  – activation energy;  $R=1,987$  cal/mol (8.31 J / mol).

The logarithm of formula (7) allows to obtain a linear equation of the dependence of the rate of interaction of the aluminum alloy with an alkali chloride solution from  $1/T$ :

$$\lg K = \lg A - (H/2,303T), \quad (8)$$

where  $H$  – effective activation energy, which is determined from experimental data.

According to M.P. Juka [20], the activation energy of the destructive process is due to the kinetic nature, which includes the formation of new compounds in the aluminum alloy due to its significant values not exceeding  $15 \div 20$  kJ/g · mol, or purely diffusion processes occurring on the surface of the reactive alloy diffusion nature of the solution, reaction products in the form of aluminum oxide compounds and hydrogen evolution.

The logarithmic interpretation of the dependence of the dissolution rate of the aluminum alloy AK7 in alkaline-chloride solution on the effect of temperature is shown in Fig. 1. The obtained interpretation allows us to estimate the activation energy of the dissolution of the alloy and the mechanism of hydrogen evolution, which is associated with the interaction of the destructive medium (solution) with the aluminum alloy.

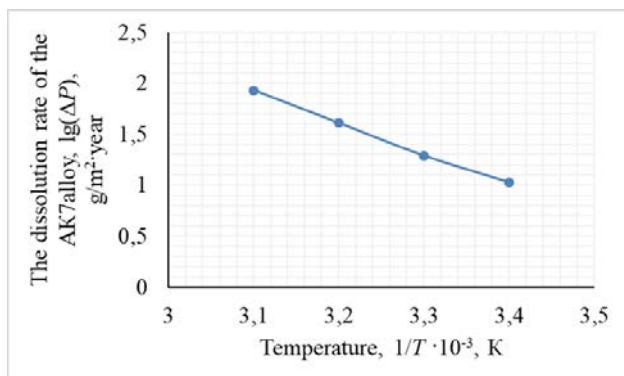


Fig. 1. Logarithmic interpretation of the dependence of the dissolution rate of the AK7 alloy in the temperature range (293÷323) K

The calculation of the activation energy according to Figs. 1 for the temperature range (303÷323) K varies from 9 to 14 kJ/mol, which indicates the diffusion nature of the rate of interaction of the alloy AK7 with an alkali-chloride solution.

Fig. 2 shows the dependence of the rate of hydrogen evolution during the interaction of the alloy AK7 with an alkaline-chloride solution of NaOH  $2.5 \text{ mol/dm}^3 + \text{NaCl } 0.1 \text{ mol/dm}^3$  in the temperature range (293÷323) K for one hour.

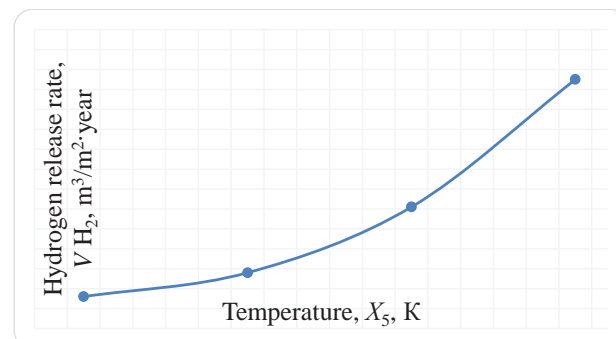


Fig. 2. The rate of evolution of hydrogen in alkaline-chloride solution at temperatures (293÷323) K

Fig. 2 indicates that with increasing temperature, the rate of hydrogen evolution increases markedly: at temperatures (293÷303) K the rate of hydrogen evolution is  $0.16-0.28 \text{ m}^3/m^2 \cdot h$ , and with its increase to (313 ÷ 323) K the rate of hydrogen evolution increases to  $0.61-1.25 \text{ m}^3 / m^2 \cdot h$ , which is several times higher than the alkaline solution, in which activator impurities are absent.

The behavior of the specific dissolution rate of the aluminum alloy is similar to the rate of hydrogen evolution: with increasing temperature from 293 K to 323 K, the dissolution rate of AK7 increases reaching values from  $10.71 \text{ g} / m^2 \cdot h$  (at  $T = 293$  K) to  $85.57 \text{ g} / m^2 \cdot h$  (at  $T = 323$  K).

The results of studies of chemical dissolution of AK7 alloy in alkaline-chloride solution correspond to polynomial functions and are interpreted by the following equations:

– hydrogen release rate:

$$V_{H_2} = 0,0013X_5^2 - 0,7648X_5 + 112,65, \quad (9)$$

– the dissolution rate of the alloy AK7:

$$\Delta P = 0,09X_5^2 - 52,962X_5 + 7804,7, \quad (10)$$

where  $X_5$  – temperature, K.

The obtained equations (9), (10) determine the change in the specific indicators of the rate of hydrogen evolution in accordance with Figs. 2, and the dissolution rate of the AK7 alloy, which is affected by the reaction rate of the interaction of aluminum with  $\text{OH}^-$  and  $\text{Cl}^-$  ions. In addition, with increasing temperature, the intensity of diffusion of the reaction products of the aluminum alloy with the solution also increases.

**Conclusions.** The results of these studies indicate a rapid increase in the rate of hydrogen evolution with

increasing temperature of the alkali chloride solution. In a solution of  $2.5 \text{ mol/dm}^3 \text{ NaOH} + 0.1 \text{ mol/dm}^3 \text{ NaCl}$  at temperatures ( $303 \div 313$ ) K, the index  $V_{H_2}$  becomes larger than the temperature of 293 K. This behavior is due to the formation of significant activity of the components of the solution, which with increasing

temperature act on the surface of the reacting alloy, accelerating the process of its dissolution.

Prospects for further research are characterized by the substantiation of technological parameters of hydrogen production by the interaction of aluminum alloy brand AK7 with alkali-halide solutions.

#### References:

1. Козин Л. Ф., Волков С. В. Современная энергетика и экология. Проблемы и перспективы. Київ : Наукова думка, 2006. 272 с.
2. Anthony Newell, Ravindranathan Thampi K. Novel amorphous aluminum hydroxide catalysts for aluminum–water reactions to produce  $H_2$  in demand. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42. P. 23446–23454.
3. Степаненко А. М., Рейтер Л. Г., Ледовских В. М., Иванов С. В. Общая и неорганическая химия. Часть II. Київ : Педагогічна преса, 2000. 783 с.
4. Xiani Huang, Tong Gao, Xiaole Pan, Dong Wei, Chunju Lv, Laishun Qin, Yuxiang Huang. Feasibility of hydrogen generation from the reaction between aluminum and water for fuel cell applications. *Journal of Power Sources*. 2013. Vol. 229. P. 133–140.
5. Щурська К.О., Кузьмінський Є. В. Способи продукування біоводню. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2011. № 3. С. 105–114.
6. Забіяка Н. А., Байрачний В. Б. Металевий хімічний цикл синтезу водню для потреб енергетики. *XI Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів*: матеріали конф. У 3 ч. Ч.3. Харків, 18–21 квіт. 2017 р. Харків, НТУ «ХПІ», 2017. С. 28–29.
7. Забіяка Н. А., Байрачний В. Б. Хімічний цикл синтезу водню з використанням сплавів алюмінію для отримання екологічно безпечного тепла в енергетиці. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: матеріали XXV міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD. 2017. У 4 ч. Ч. III. Харків, 17-19 травня 2017 р. Харків : НТУ «ХПІ», 2017. С. 25.
8. Байрачний В. Б., Желавская Ю. А., Воронина Е. В., Ковалева А. А. Влияние природы электродного материала на электросинтез водорода в щелочных хлоридных растворах. *Современные электрохимические технологии и оборудование – 2016*: материалы докл. Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 24–25 ноября 2016 г. Минск : БГТУ, 2016. С. 279–282.
9. Лукашук Т. С., Ларин В. И. Коррозионное поведение алюминия и его сплавов в растворах гидроксида натрия. *Вестник Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина*. 2009. № 870. С.253-258.
10. Porciunkula C. B., Marcilio N. R., Tessaro I. C., Gerchmann M. Production of hydrogen in the reaction between aluminum and water in the presence of NaOH and KOH. *Brasilian Journal of Chemical Engineering*. 2012. Vol. 29. P. 337–348.
11. Pyukhina A. V., Pyukhin A. S., Shkolnikov E. I. Hydrogen generation from water by means of activated aluminum. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012. Vol. 37. P. 16382–16387.
12. Korosh Mahmoodi, Babak Alinejad. Enhancement of hydrogen generation rate in reaction of aluminum with water. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010. Vol. 35. P. 5227–5232.
13. Григорьева И. О. Дресвянников А. Ф., Масник О. Ю., Закиров Р. А. Электрохимическое поведение алюминия в растворах гидроксида аммония и гидроксида натрия. *Вестник Казанского технологического университета*. 2011. № 6. С. 72–78.
14. Лидин Р. А., Молочко В. А., Андреева Л. Л. Химические свойства неорганических веществ: монография. Москва : Химия, 1997. 480 с.
15. Забіяка Н. А. Влияние кинетических параметров на производительность выделения водорода из щелочно-хлоридных растворов. *Экология и промышленность*. 2019. № 1. С. 55-58.
16. Забіяка Н. А., Байрачний В. Б., Руденко Н. О., Желавська Ю. А. Вплив технологічних параметрів на ефективність виділення водню шляхом розчинення алюмінієвого сплаву АК7. *Colloquium-journal*. 2019. № 6 (30). С. 24-27.
17. Забіяка Н. А., Байрачний В. Б. Вплив кінетичних параметрів на ефективність виділення водню шляхом розчинення сплаву АК7 в лужних розчинах з домішками активаторів. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2019. № 5 (138). С. 115-121. DOI: <https://doi.org/DOI:10.30857/1813-6796.2019.5.13>.
18. Байрачний В. Б., Забіяка Н. А., Байрачний В. Б., Руденко Н. О., Лещенко С. А. Моделирование технологических параметров синтеза водню розчиненням сплаву АК7 в лужних розчинах. *Colloquium-journal*. 2020. № 33 (85). С.55-58. DOI: [10.24412/2520-2480-2020-3385-55-58](https://doi.org/10.24412/2520-2480-2020-3385-55-58).

19. Zabiia N. A., Kanunnikova N. A., Bukatenko N. O. Influence of kinetic parameters on hydrogen release by interaction of AK7 alloy with alkaline-halogenide solution. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Т. 32 (71), № 4. С. 207-211.

20. Жук Н. П. Курс теории коррозии и защиты металлов: учеб. пособие для студ. металлургических ВУЗов и фак. Москва : Металлургия, 1976. 472 с.

**Забіяка Н.А., Кануннікова Н.О., Пироженко Є.В., Байрачний В.Б., Тихомирова Т.С.  
ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА ШВИДКІСТЬ ВИДІЛЕННЯ ВОДНЮ ШЛЯХОМ  
ВЗАЄМОДІЇ СПЛАВУ АК7 ІЗ ЛУЖНО-ХЛОРИДНИМ РОЗЧИНОМ**

*Швидкість реакції розчинення дослідного сплаву і виділення водню залежить від активності компонентів дослідного розчину, яку можна збільшити, змінюючи концентрацію гідроксиду натрію і домішок галогенідних активаторів, шорсткість поверхні зразків, а також застосовуючи додаткове перемішування і регулювання температури.*

*Цю роботу присвячено визначенню впливу температури дослідного розчину на швидкість виділення водню шляхом взаємодії алюмінієвого ливарного сплаву марки АК7 із лужно-хлоридним середовищем. Вплив температурного фактору досліджено в інтервалах (293÷323) К у розчині гідроксиду натрію за концентрації 2,5 моль/дм<sup>3</sup> із домішками хлориду натрію концентрацією 0,1 моль/дм<sup>3</sup>.*

*Наведені результати досліджень довели активуючу дію температурного фактору на швидкість розчинення сплаву АК7 і, як наслідок, швидкість виділення водню. За підвищення температури до 323 К під час взаємодії сплаву АК7 із лужно-хлоридним розчином відмічено стрімке зростання швидкості виділення водню на порядок порівняно із кімнатною температурою, яке дорівнює 1,25 м<sup>3</sup>, перераховане на 1 м<sup>2</sup> за 1 годину. Така поведінка дослідного розчину зумовлена активністю його компонентів, яка за збільшення температури діє на поверхню алюмінієвого сплаву, прискорюючи процес його розчинення, тому швидкість виділення водню досягає великих значень.*

*Представлено розрахунок величини енергії активації  $H$  для інтервалу температур (303÷323) К, який змінюється від 9 до 14 кДж/моль, що вказує на дифузійну природу швидкості взаємодії алюмінієвого сплаву марки АК7 із лужно-хлоридним розчином.*

*За допомогою програмного пакету MS Excel 2016 визначено регресійні поліноміальні співвідношення, що характеризують поведінку швидкостей розчинення зразку, і показники синтезованого водню залежно від зміни температури у лужно-хлоридному розчині.*

**Ключові слова:** водень, сплав АК7, швидкість розчинення сплаву, лужно-хлоридні розчини, температура, швидкість виділення водню, галогеніди, хімічне розчинення.

УДК 621.35

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/33>**Майзеліс А.О.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

**Пінчук Н.В.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

**Волощук В.В.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

## ВПЛИВ УМОВ ОСАДЖЕННЯ БАГАТОШАРОВИХ ПОКРИТТІВ НА ЇХ МІКРОТВЕРДІСТЬ

Перспективним є захист металевих виробів багатошаровими покриттями з нанорозмірним періодом, які в оптимальних умовах забезпечують високу зносостійкість, корозійну стійкість, надтвердість, низький коефіцієнт тертя та інші. Сфера їх застосування надзвичайно широка: машинобудування (інструментальна галузь), атомна енергетика, оптоелектроніка, оптика, медицина й аерокосмічне обладнання, а також верстатобудування. Стаття присвячена дослідженню впливу умов осадження багатошарових покриттів на основі сплавів мідь-олово різного складу й багатошарових покриттів на основі нітридів титану й цирконію на їх мікротвердість. Багатошарові покриття  $(\text{Cu-Sn})_1/(\text{Cu-Sn})_2$  отримували в полілігандному пірофосфатно-трилонатному електроліті двоімпульсним потенціостатичним методом із використанням потенціостату Elins P-45X. Мікротвердість покриттів за Вікерсом визначали на мікротвердомірі ПМТ-3. Елементний склад зразків визначали рентгенофлуоресцентним методом за допомогою спектрометру СПРУТ. Багатошарові нітридні покриття  $\text{TiN/ZrN}$  осаджувалися вакуумно-дуговим методом в атмосфері азоту на установці «Булат-6М», яка додатково забезпечена генератором високовольтних імпульсів. Мікроіндентування проводили в режимі активного навантаження із застосуванням піраміди Берковича (установка згідно з ISO 14577) за навантаженням у межах 20 Г з автоматичним навантаженням і розвантаженням протягом 30 с. Виявлено, що підвищенню мікротвердості покриттів  $(\text{Cu-Sn})_1/(\text{Cu-Sn})_2$  з 277 HV до 511 HV (що значно перевищує значення мікротвердості дрібнокристалевих одношарових покриттів сплавом  $\text{Cu-Sn}$ ) сприяє збільшення концентрації мездрового клею в електроліті до  $0,3 \text{ г/дм}^3$  і зменшення товщини бішару від 55,1 нм до 20 нм. Показано, що високовольтна стимуляція позитивно впливає на мікротвердість багатошарових нітридних покриттів  $\text{TiN/ZrN}$ , осаджених вакуумно-дуговим методом. Під час використання імпульсного потенціалу зміщення  $U_i$  амплітудою  $-2000 \text{ В}$  зі збільшенням кількості бішарів до 267 (і, відповідно, зі зменшенням товщини бішарів у ряді 1500, 750, 200, 100, 50 нм) спостерігається збільшення мікротвердості від 26 ГПа до 37 ГПа при  $U_c = -200 \text{ В}$  і до 45 ГПа при  $U_c = -140 \text{ В}$ .

**Ключові слова:** багатошарові покриття, мікротвердість, нітридні покриття,  $\text{TiN/ZrN}$ , вакуумно-дуговий метод, електроосадження, сплав мідь-олово, пірофосфатно-трилонатний електроліт.

**Постановка проблеми.** Найчастіше конструкційні метали і сплави не можуть забезпечити необхідної надійності і довговічності виробів в умовах експлуатації при високих робочих навантаженнях та температурах, в агресивних середовищах. Ефективним рішенням даних проблем є нанесення захисних покриттів, що дозволяє істотно розширити сферу застосування виробів і підвищити їх ресурс при експлуатації.

Технології осадження покриттів впроваджуються в такі важливі галузі виробництва як машинобудування (інструментальна галузь), атомна енергетика, оптоелектроніка, оптика, медицина, і аерокосмічне обладнання, а також верстатобуду-

вання [1–3]. Відповідно, існує велика різноманітність методів осадження покриттів, від електроосадження як дешевого, зручного до керування методом, до методу фізичного осадження з парової фази (PVD), що найбільше використовується для отримання покриттів з унікальними заданими властивостями на різних підкладках.

На сьогоднішній день найбільш перспективними є багатошарові покриття з нанорозмірним періодом, які в оптимальних умовах забезпечують комплекс унікальних властивостей, а саме: високу зносостійкість, корозійну стійкість, надтвердість, низький коефіцієнт тертя та ін. Виходячи з цього, з'являється все більший інтерес до особливостей

формування багат шарових покриттів з різними комбінаціями складу шарів в залежності від умов осадження. Тобто, змінюючи параметри осадження, можна в широких діапазонах впливати на властивості осаджених покриттів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Багат шарові структури, що містять мідь і олово, електроосаджують як методом двох ванн [4], так і методом моно-ванни [5]. У [6; 7] показано переваги застосування імпульсного режиму. Однак, вкрай мало наведено даних щодо механічних властивостей цих багат шарових покриттів. В свою чергу, відомо, що у багат шарових покриттів сплавами, що осаджують двоімпульсним методом, наприклад, Zn-Ni [8], Cu-Sn [9] найвищі показники мікротвердості та корозійної стійкості спостерігались при товщині складових шарів до 100 нм. Тому інтерес представляє оптимізація умов електрохімічного формування мультишарових покриттів з тонких, до 100 нм, шарів сплавів Cu-Sn для підвищення їх мікротвердості.

Нітрид титану має високу твердість та корозійну стійкість [10] і широко використовується як покриття для ріжучого інструменту та ін., але останнім часом плівки нітриду цирконію все більше привертають увагу завдяки кращій корозійній стійкості та зносостійкості, ніж TiN [11]. У праці [12] показано, що багат шарові покриття TiN/ZrN мають більш високу твердість ніж однокомпонентні покриття TiN і ZrN. Покриття, отримані при додатковій імпульсній стимуляції, є досить новим і перспективним напрямком для досліджень. Однак великий обсяг наукових праць в цій галузі зосереджений на вузькому інтервалі постійних та імпульсних потенціалів зміщення.

Багат шарові покриття характеризуються унікально високими механічними властивостями, які пов'язані з відносно великим вмістом границь розділу фаз. Тому встановлення закономірностей формування нан шарових  $(\text{Cu-Sn})_1/(\text{Cu-Sn})_2$ , які отримані електроосадженням, та TiN/ZrN-покриттів, які отримані методом вакуумно-дугового осадження, представляють як науковий, так і практичний інтерес.

**Постановка завдання.** Метою досліджень було визначення впливу умов осадження багат шарових покриттів на основі нанорозмірних шарів сплавів Cu-Sn та нітридів TiN і ZrN на їх мікротвердість.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**  
*Методика.* Хроноамперограми формування багат шарових покриттів  $(\text{Cu-Sn})_1/(\text{Cu-Sn})_2$  двоімпульсним потенціостатичним методом

одержані з використанням потенціостатуу Elins P-45X у триелектродній комірці. Використовували насичений хлорид-срібний електрод порівняння, з'єднаний з робочим електролітом за допомогою сольового мостику. Всі потенціали наведені відносно цього електроду порівняння. Покриття осаджували на зразки зі сталі марки Ст3, поверхню яких зачищали карбідсіліконовим папером почергово 500, 1 500, 2 000 grit, знежирували у розчині Лабоміду, активували у HCl та промивали. Склад пірофосфатно-трилонатного електроліту для нанесення покриттів, моль /  $\text{дм}^3$ :  $\text{Cu}^{2+} - 0,15$ ;  $\text{Sn}^{2+} - 0,3$ ;  $\text{P}_2\text{O}_7^{4-} - 1,0$ ; трилон Б  $- 0,25$ ; гідроксидон  $- 10 \text{ г / дм}^3$ ; рН 8,5. Мікротвердість покриттів за Віккерсом визначали за допомогою мікротвердоміру ПМТ-3, хімічний склад – рентгенофлуоресцентним методом за допомогою спектрометру СПРУТ.

Осадження багат шарових нітридних покриттів TiN/ZrN вакуумно-дуговим методом проводилось на неорієнтованих підкладках в атмосфері азоту на установці «Булат-6М», яка додатково забезпечена генератором високовольтних імпульсів. Поліровані підкладки з нержавіючої сталі 12X18H9T з розмірами 20 x 20 x 3 мм попередньо промивали лужним розчином в ультразвукової ванні і потім у нефрасі С2-80/120. Після відкачування вакуумної камери до тиску 0,001 Па на підкладки подавали негативний потенціал 1 000 В і при струмі дуги 100 А, проводили очищення і активацію їх поверхні бомбардуванням іонами титану протягом 3...4 хв. Мікроіндентування проводили в режимі активного навантаження із застосуванням піраміди Берковича (установка згідно з ISO 14577) при навантаженні в межах 20 Г з автоматичним навантаженням та розвантаженням протягом 30 с.

*Результати досліджень.*

**Вплив умов електроосадження багат шарових покриттів  $(\text{Cu-Sn})_1/(\text{Cu-Sn})_2$  на їх мікротвердість.**

Багат шарові покриття  $(\text{Cu-Sn})_1/(\text{Cu-Sn})_2$  осаджували двоімпульсним потенціостатичним методом з різною тривалістю імпульсів: більш збагачені оловом шари  $(\text{Cu-Sn})_1$  – при потенціалі  $-1,15 \text{ В}$  відносно насиченого хлоридсрібного електроду порівняння, більш збагачені міддю шари  $(\text{Cu-Sn})_2$  – при потенціалі  $-0,9 \text{ В}$ .

При збільшенні товщини шарів  $(\text{Cu-Sn})_1$  вдвічі в початковій період густина струму їх осадження збільшується, але густина струму осадження шарів  $(\text{Cu-Sn})_2$  знижується (рис. 1). За тривалого електролізу форма хроноамперограм в обох випадках



вирівнюється, а мікротвердість покриттів практично не змінюється: мікротвердість покриття з товщиною шарів  $h_1/h_2 = 18,7 \text{ нм} / 36,4 \text{ нм}$  (кр. 1) і з товщиною шарів  $h_1/h_2 = 38,6 \text{ нм} / 37,2 \text{ нм}$  (кр. 2) дорівнює 277 HV.

Зменшення товщини бішару  $k$  (кр. 1 рис. 2), за рахунок меншої амплітуди струму осадження шарів  $(\text{Cu-Sn})_1$  при низькій концентрації мездрового клею в електроліті, призводить до збільшення мікротвердості покриттів  $(\text{Cu-Sn})_1/(\text{Cu-Sn})_2$  з 277 HV (кр. 2,  $H = 55,1 \text{ нм}$ ) до 319 HV (кр. 1,  $k = 20,9 \text{ нм}$ ).

Додавання мездрового клею стабілізує частки хроноамперограм осадження шарів  $(\text{Cu-Sn})_2$  (кр. 2 рис. 3), що сприяє підвищенню мікротвердості покриттів  $(\text{Cu-Sn})_1/(\text{Cu-Sn})_2$  з 277 HV до 386 HV.

Ще більше зменшення товщини бішару  $k$  в електроліті з більшою концентрацією мездрового клею (рис. 4) призводить до підвищення мікротвердості покриттів  $(\text{Cu-Sn})_1/(\text{Cu-Sn})_2$  від 386 HV (кр. 2,  $H = 39 \text{ нм}$ ) до 511 HV (кр. 1,  $k = 20 \text{ нм}$ ) при зменшенні вмісту в них загального олова (рис. 4, б).

Вплив потенціалу зміщення на мікротвердість багатшарових покриттів TiN/ZrN з різною товщиною шарів

Для осадження багатшарових нітридних покриттів TiN/ZrN на сталеву підкладку поряд з постійним потенціалом зміщення  $U_c$  подавали імпульсний потенціал зміщення  $U_i$  амплітудою  $-2000 \text{ В}$ , тривалістю  $7 \text{ мкс}$  і частотою пульсації  $7 \text{ кГц}$ . Загальна товщина покриттів  $13\text{--}18 \text{ мкм}$ , орієнтовна швидкість осадження шарів  $5 \text{ нм} / \text{с}$ .

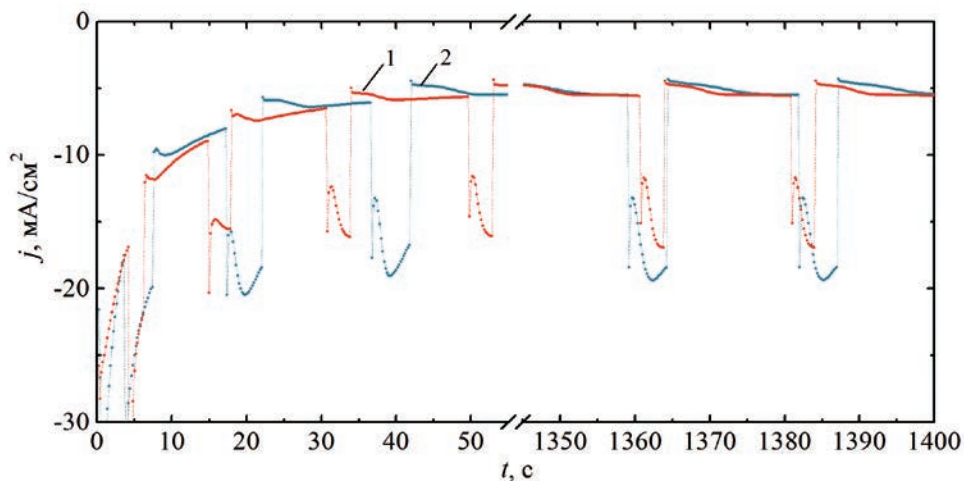


Рис. 1. Хроноамперограми осадження на сталь Ст3 покриттів  $(\text{Cu-Sn})_1/(\text{Cu-Sn})_2$  з пірофосфатно-трилонатного електроліту в режимі  $(-1,15 \text{ В до } 0,044 \text{ Кл} / \text{см}^2) / (-0,9 \text{ В до } 0,088 \text{ Кл} / \text{см}^2)$  (1) і  $(-1,15 \text{ В до } 0,088 \text{ Кл} / \text{см}^2) / (-0,9 \text{ В до } 0,088 \text{ Кл} / \text{см}^2)$  (2)

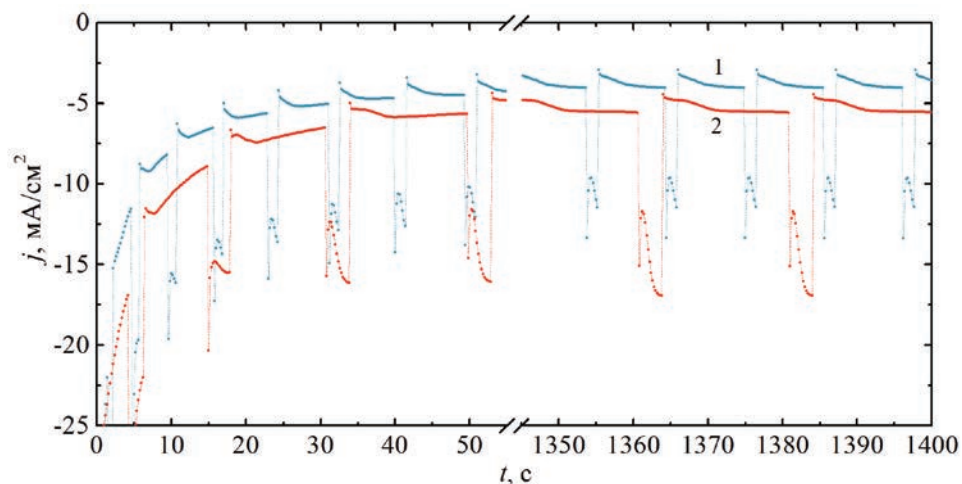


Рис. 2. Хроноамперограми осадження на сталь Ст3 покриттів  $(\text{Cu-Sn})_1/(\text{Cu-Sn})_2$  з пірофосфатно-трилонатного електроліту, що містить  $0,15 \text{ г} / \text{дм}^3$  мездрового клею, в режимі  $(-1,15 \text{ В} - 0,017 \text{ Кл} / \text{см}^2) / (-0,9 \text{ В} - 0,034 \text{ Кл} / \text{см}^2)$  (1) і  $(-1,15 \text{ В} - 0,044 \text{ Кл} / \text{см}^2) / (-0,9 \text{ В} - 0,088 \text{ Кл} / \text{см}^2)$  (2)

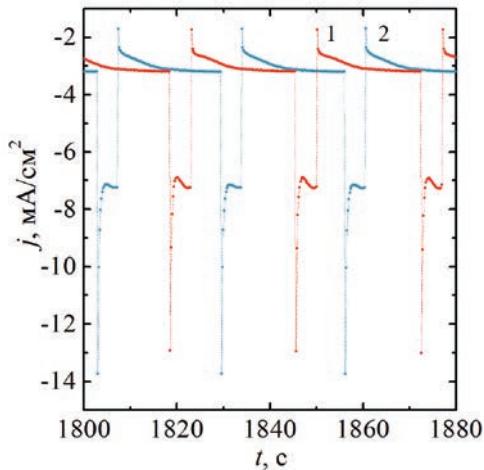


Рис. 3. Хроноамперограми осадження на сталь Ст3 покриттів  $(\text{Cu-Sn})_1/(\text{Cu-Sn})_2$  в режимі  $(-1,15 \text{ В} - 0,044 \text{ Кл} / \text{см}^2)/(-0,9 \text{ В} - 0,088 \text{ Кл} / \text{см}^2)$  із пірофосфатно-трилонатного електроліту з додаванням  $0,15 \text{ г} / \text{дм}^3$  (1) і  $0,3 \text{ г} / \text{дм}^3$  (2) мездрового клею

Розглянуто вплив постійних потенціалів змінення величиною  $-200 \text{ В}$  і  $-140 \text{ В}$  на мікротвердість покриттів з урахуванням різної кількості бішарів (кількість бішарів  $k = n/2$ , де  $n$  – число шарів).

Зі збільшенням кількості бішарів (і відповідно зі зменшенням товщини бішарів  $\lambda$  в ряді 1 500, 750, 200, 100, 50 нм) спостерігається збільшення мікротвердості, особливо в разі переходу від найменшої кількості бішарів з найбільшою товщиною бішару (близько 1,5 мкм) (рис. 5, кр. 2). Надалі зі зростанням  $k$  значення твердості збільшується повільніше.

Аналіз результатів вимірювання мікротвердості багат шарових покриттів  $\text{TiN/ZrN}$  в разі меншого за величиною  $U_c = -140 \text{ В}$  (як і для розглянутого вище  $U_c = -200 \text{ В}$ ) показує, що збільшення числа шарів  $k$  до 267, і відповідно зменшення при цьому товщини бішарів  $\lambda$ , приводить до зростання мікротвердості (рис. 5, кр. 1). Також можна відзначити, що в разі меншого

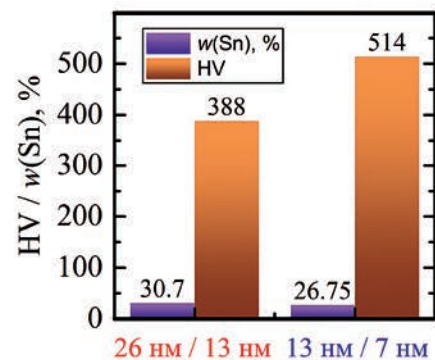
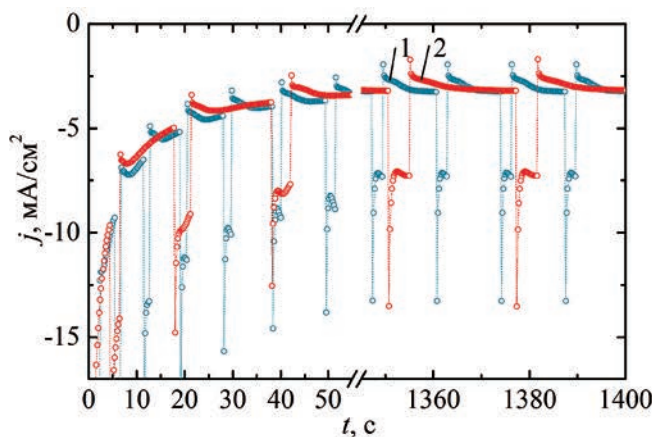


Рис. 4. Хроноамперограми (а) осадження на сталь Ст3 покриттів  $(\text{Cu-Sn})_1/(\text{Cu-Sn})_2$  із пірофосфатно-трилонатного електроліту, що містить  $0,3 \text{ г} / \text{дм}^3$  мездрового клею, в режимі  $(-1,15 \text{ В} - 0,017 \text{ Кл} / \text{см}^2)/(-0,9 \text{ В} - 0,034 \text{ Кл} / \text{см}^2)$  (1) і  $(-1,15 \text{ В} - 0,0446 \text{ Кл} / \text{см}^2)/(-0,9 \text{ В} - 0,088 \text{ Кл} / \text{см}^2)$  (2) та діаграма мікротвердості і вмісту олова в покриттях (б)

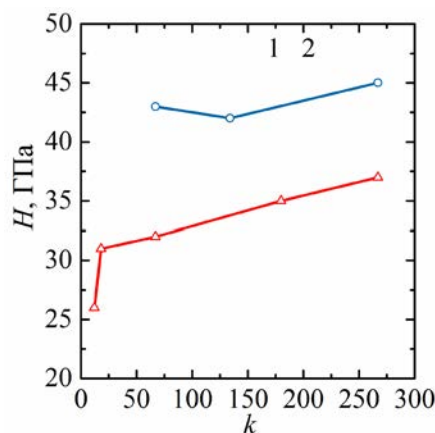


Рис. 5. Залежність мікротвердості ( $H$ , ГПа) покриттів  $\text{TiN/ZrN}$ , отриманих при  $U_c = -140 \text{ В}$  (1) і  $U_c = -200 \text{ В}$  (2),  $p_N = 0,4 \text{ Па}$ , від кількості бішарів  $k$

$U_c = -140$  В значення твердості вище за абсолютною величиною.

Високовольтна стимуляція позитивно впливає на механічні властивості багат шарових покриттів TiN/ZrN. Так, залежність мікротвердості від постійного потенціалу зміщення при імпульсному впливі має такий характер: при зміні постійного потенціалу зміщення  $U_c$  від діапазону  $-5 \dots -8$  В до  $-20$  В і  $-230$  В мікротвердість покриттів TiN/ZrN, отриманих при  $U_i = -2000$  В ( $\tau = 7$  мкс),  $k = 267$ ,  $p_N = 0,66$  Па, змінюється від 26 ГПа до 20 ГПа і 44 ГПа відповідно. Такий характер зміни мікротвердості при різній  $U_c$  можна пояснити різним рівнем радіаційного впливу на процеси перемішування на міжфазних границях при осадженні кожного з шарів. Дійсно, якщо вважати, що при збільшенні середньої енергії з підвищенням  $U_c$  підвищується щільність дефектів на міжфазній границі шару, а це сприяє перемішуванню і утворення твердого розчину в міжшаровій області товщиною до 2 нм, тому збільшення  $k$  приводить до збільшення кількості таких міжшарових областей, які в свою чергу підвищують мікротвердість.

#### Висновки.

При товщині збагачених оловом шарів (Cu-Sn)<sub>1</sub> вище за 18,7 нм і більшої вдвічі товщині (навколо 37 нм) шарів (Cu-Sn)<sub>2</sub>, збагачених міддю, мікротвердість багат шарових покриттів (Cu-Sn)<sub>1</sub>/(Cu-Sn)<sub>2</sub> знаходиться на рівні мікротвердості дрібнокристалевих одношарових покриттів сплавом Cu-Sn. Зменшення товщини бішару  $k$  від 55,1 нм до 20,9 нм при низькій концентрації мездрового клею

(0,15 г / дм<sup>3</sup>) в електроліті приводить до підвищення мікротвердості від 277 HV до 319 HV, а його додавання в концентрації 0,3 г/дм<sup>3</sup> сприяє підвищенню мікротвердості покриттів до 386 HV. При цій концентрації зменшення товщини бішару  $k$  до 20 нм призводить до підвищення мікротвердості покриттів (Cu-Sn)<sub>1</sub>/(Cu-Sn)<sub>2</sub> до 511 HV, що значно перевищує мікротвердість дрібнокристалевих одношарових покриттів сплавом Cu-Sn.

Мікроіндентування в режимі активного навантаження із застосуванням піраміди Берковича багат шарових нітридних покриттів TiN/ZrN, осаджених вакуумно-дуговим методом в атмосфері азоту на неорієнтуючу підкладку з нержавіючої сталі, показало, що високовольтна стимуляція позитивно впливає на мікротвердість покриттів. При використанні імпульсного потенціалу зміщення  $U_i$  амплітудою  $-2000$  В значення мікротвердості вище за абсолютною величиною при постійному потенціалі зміщення  $U_c = -140$  В ніж при  $U_c = -200$  В, а зі збільшенням кількості бішарів до 267 (і відповідно зі зменшенням товщини бішарів в ряді 1 500, 750, 200, 100, 50 нм) спостерігається збільшення мікротвердості від 26 ГПа до 37 ГПа при  $U_c = -200$  В і до 45 ГПа при  $U_c = -140$  В. Мікротвердість збільшується за рахунок збільшення кількості міжшарових областей з більшої щільністю дефектів при перемішуванні і утворенні твердого розчину в міжшаровій області товщиною до 2 нм в умовах збільшення середньої енергії з підвищенням  $U_c$ .

#### Список літератури:

1. Bobzin K. High-performance coatings for cutting tools. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2017. Vol. 18. P. 1–9.
2. Giles C., Lamont-Friedrich C.J., Michl T.D., Griesser H.J., Coad B.R. The importance of fungal pathogens and antifungal coatings in medical device infections. *Biotechnology Advances*. 2018. Vol. 36. Is. 1. P. 264–280.
3. Geyao L., Yang D., Wanglin C., Chengyong W. Development and application of physical vapor deposited coatings for medical devices: A review. *Procedia CIRP*. 2020. Vol. 89. P. 250–262.
4. Walsh F.C., Low C.T.J. Composite, multilayer and three-dimensional substrate supported tin-based electrodeposits from methanesulphonic acid. *Transactions of the IMF*. 2016. Vol. 94 (3). P. 152–158.
5. Рева О.В., Воробьєва Т.Н., Свиридов В.В. Осаждение наноструктурированных композиционно модифицированных покрытий Cu-Sn и Cu-Zn в условиях периодического изменения плотности тока. *Электрохимия*. 1999. Т. 35. № 9. С. 1070–1075.
6. Wu L., Graves, J.E., Copley A.J. Mechanism for the development of Sn-Cu alloy coatings produced by pulsed current electrodeposition. *Materials letters*. 2018. Vol. 217. P. 120–123.
7. Wu L., Copley A.J. Investigation into the effects of magnetic agitation and pulsed current on the development of SnCu alloy electrodeposits. *Thin Solid Films*. 2019. Vol. 683. P. 118–127.
8. Майзеліс А.О. Вплив умов формування мультишарових покриттів (Zn-Ni)<sub>1</sub>/(Zn-Ni)<sub>2</sub> на їх механічну та корозійну стійкість. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2019. Том 30 (69). № 4. Ч. 2. С. 61–66.
9. Майзеліс А.О. Електроосадження мультишарових покриттів (Cu-Sn)<sub>1</sub>/(Cu-Sn)<sub>2</sub> з пірофосфатно-трилонатного електроліту. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2019. Том 30 (69). № 5. Ч. 2. С. 69–75.

10. Akkaya S.S., Vasyliiev V.V., Reshetnyak E.N., Kazmanl K., Solak N., Strel'nitskij V.E., Ürgen M. Structure and properties of TiN coatings produced with PIII&D technique using high efficiency rectilinear filter cathodic arc plasma. *Surface and Coatings Technology*. 2013. Vol. 236. P. 332–340.

11. Heinrich S., Schirmer S., Hirsch D., Gerlach J.W., Manova D., Assmann W., Mändl S.. Comparison of ZrN and TiN formed by plasma based ion implantation & deposition. *Surface & Coatings Technology*. 2008. Vol. 202. P. 2310–2313.

12. Tokarev O.A., Demchyshyn A.V., Avtonomov G.A. The structure and mechanical properties of multilayer nanocrystalline TiN/ZrN coatings obtained by vacuum-arc deposition. *Processing and Application of Ceramics*. 2007. Vol. 1. P. 43–47.

### **Maizelis A.O., Pinchuk N.V., Voloshchuk V.V. INFLUENCE OF CONDITIONS OF DEPOSITION OF MULTILAYER COATINGS ON THEIR MICROHARDNESS**

*Protection of metal products by multilayer coatings with a nanoscale period providing high wear resistance, corrosion resistance, superhardness, low coefficient of friction, etc in optimal conditions is promising. Their scope is extremely wide: mechanical engineering (tool industry), nuclear energy, optoelectronics, optics, medicine, and aerospace equipment, as well as machine tool construction. The work is devoted to the study of the influence of deposition conditions of multilayer coatings based on copper-tin alloys of different composition and multilayer coatings based on titanium and zirconium nitrides on their microhardness. Multilayer  $(\text{Cu-Sn})_1/(\text{Cu-Sn})_2$  coatings were obtained in a polyligand pyrophosphate-trilonate electrolyte by two-pulse potentiostatic method using a potentiostat Elins P-45X. The Vickers microhardness of coatings was determined using PMT-3 microhardness tool. The elemental composition of the samples was determined by XRF. Multilayer nitride TiN/ZrN coatings were deposited by vacuum-arc method in a nitrogen atmosphere using "Bulat-6M" tool additionally equipped with a high-voltage pulse generator. Microindentation was performed in the active load mode using Berkovich pyramid (according to ISO 14577) at a load within 20 g<sub>F</sub> with automatic loading and unloading for 30 s. It was found that increasing in microhardness of  $(\text{Cu-Sn})_1/(\text{Cu-Sn})_2$  coatings from 277 HV to 511 HV (which significantly exceeds the value of microhardness of fine-crystalline single-layer coatings with Cu-Sn alloy) leads to increase in concentration of glue in the electrolyte to 0.3 g / dm<sup>3</sup> and to reduce in the thickness of the bilayer from 55.1 nm to 20 nm. It is shown that high-voltage stimulation has a positive effect on the microhardness of multilayer nitride TiN/ZrN coatings deposited by vacuum-arc method. When using pulse bias potential  $U_i$  with an amplitude of -2 000 V increase in the number of bilayers to 267 (and respectively decrease in the thickness of the bilayers in the range of 1500, 750, 200, 100, 50 nm) leads to increase in microhardness from 26 GPa to 37 GPa at  $U_c = -200$  V and up to 45 GPa at  $U_c = -140$  V is observed.*

**Key words:** multilayer coatings, microhardness, nitride coatings, TiN/ZrN, vacuum-arc method, electrodeposition, copper-tin alloy, pyrophosphate-trilonate electrolyte.

# ТРАНСПОРТ

УДК 656.13

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/34>**Бурлакова Г.Ю.**

Приазовський державний технічний університет

**Букіна М.Д.**

Приазовський державний технічний університет

## ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ СКЛАДОВИХ КОМПОНЕНТІВ ПОКАЗНИКА «НАДІЙНІСТЬ» У СИСТЕМІ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ НАДАННЯ ПОСЛУГ ПІД ЧАС ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

У статті надано детальніший розгляд показника «надійність» і його складових компонентів для визначення важливості кожного компонента показника у системі оцінки якості надання послуг із перевезення пасажирів автомобільним транспортом. Визначено вміст складових компонентів цього показника у системі оцінювання якості пасажирських перевезень, а також ступінь впливу кожного компонента на якість надання послуг із перевезення пасажирів автомобільним транспортом.

За аналізом робіт науковців, які досліджували показник «надійність», неможливо класифікувати елементи показників, оскільки відсутнє дроблення суцільного показника «надійність» на елементи. Але єдиний показник є недоцільним, оскільки надійність має розглядатись у симбіозі таких чотирьох видів надійності: транспортної інфраструктури, транспортних засобів, людського ресурсу (водія), інформаційного забезпечення.

На підставі проведення анкетування пасажирів і перевізників м. Маріуполь із визначення наявності і використання запропонованих компонентів показника «надійність» за оцінки якості перевізного процесу під час пасажирських автомобільних перевезень розглянуто і визначено динаміку змін цих компонентів. Унаслідок експертної оцінки працівниками автотранспортних підприємств і пасажирами із визначення наявності та використання запропонованих компонентів показника оцінки якості перевізного процесу під час пасажирських автомобільних перевезень можна зробити такі висновки: динаміка збільшення всіх компонентів показника «надійність» свідчить про те, що надійні умови перевезення пасажирів поліпшуються (за наявності збільшення коефіцієнтів).

Аналіз розглянутих компонентів показника «надійність» у системі оцінки якості транспортного обслуговування пасажирів дозволяє зробити такі висновки:

- 1) фахівцями з оцінки якості послуг міського пасажирського транспорту (МПТ) по-різному представляється значущість показника «надійність»;
- 2) аналізований показник «надійність» різний за своєю змістовною сутністю, тому постає потреба цифровізувати його складники разом із усіма компонентами;
- 3) показник «надійність» під час пасажирських перевезень має розглядатися диференційовано задля виваженої оцінки усіх компонентів у системі оцінки якості пасажирських перевезень.

**Ключові слова:** оцінка якості, показники, надійність, перевізний процес, пасажирські перевезення, компоненти.

**Постановка проблеми.** Рівень якості повинен встановлюватися за допомогою кількісного оцінювання, що дозволить визначати якість обслуговування пасажирів не на вербальному рівні («погано», «добре»), а на рівні цифрового порівняння. Таке оцінювання потрібно для обґрунтування прийнятих рішень за комплексного вивчення ринку транспортних послуг, оцінки перспектив

здійснення послуг на ринку, встановлення і коригування тарифів, моніторингу якості послуг; вироблення коригувальних, попереджуючих і поліпшувальних заходів; визначення переможців конкурсу з обслуговування автобусних маршрутів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розглядаючи показники, представлені у наукових роботах, у державних і міжнародних стандартах

щодо оцінки якості послуг пасажирського транспорту в ієрархічній системі показників або за рівнем ранжирування, визначено такі загальні групи показників [1]: 1) доступність; 2) надійність; 3) регулярність; 4) своєчасність; 5) швидкість; 6) інформативність; 7) економічність; 8) комфортність; 9) збереження багажу; 10) контактність; 11) безпека; 12) результативність; 13) зручність користування.

Відомо, що вимоги пасажирів полягають у забезпеченні найменших витрат часу на поїздку та її мінімальної вартості, максимальної надійності перевезень, високого рівня комфорту під час поїздки і безпеки переміщення.

З аналізу зарубіжного досвіду організації роботи муніципального транспорту визначено, що якість обслуговування постійно контролюється і є максимально наближеною до потреб пасажирів [2-7]. Залишається відкритою низка питань, а саме: кількісне вимірювання якості транспортного обслуговування населення; форми, методи і методики її контролю та удосконалення тощо.

На думку автора [8], показники якості перевезення процесу та системи перевезень визначають об'єктивну особливість рівня організації і здійснення перевезень пасажирів, проявляючись у разі задоволення транспортних потреб пасажирів. Ці властивості автор поділяє на прості і складні та вважає показник «надійність» одним із основних показників оцінки якості пасажирських перевезень, де називає його показником зі складними властивостями, тобто ним згруповано прості властивості, поєднані за функціональною ознакою.

До простих властивостей показника «надійність» відносяться регулярність сполучення, гарантованість рівня обслуговування, безпека поїздки. Прості властивості характеризуються показниками якості. Залежно від ступеню прояву властивостей показник набуває деякого значення. Показники якості простих властивостей поняття «надійність» автор [8] визначає як коефіцієнт регулярності, середньоквадратичне відхилення від регулярності руху; рівень ймовірності відмови пасажирів у посадці; динамічний показник безпеки руху. Отже, можна зауважити, що деякі прості властивості та їхні показники якості можуть відноситися до складових інших показників із оцінки якості процесу перевезень. Регулярність руху увійде як компонент показника «своєчасність», де визначатиме середньоквадратичне відхилення від розкладу руху і його регулярності. Щодо показника «безпека руху» автор не надає детального розгляду складових компонентів показника, тому треба зазначити, що його

доцільно розглядати окремо, із визначенням усіх складових компонентів.

Показник, який за рівнем ранжирування [9] (на думку науковців, які досліджують проблеми цього напрямку) посідає друге місце, котре виявляється значущим – це надійність.

#### Формулювання цілей статті

Мета роботи – визначення вмісту складників і компонентів показника «надійність» у системі показників оцінювання якості пасажирських перевезень; розгляд доцільності кожного компонента цього показника, визначення ступеня впливу компонента «надійність» на якість надання послуг із перевезення пасажирів автомобільним транспортом.

**Виклад основного матеріалу.** Визначені компоненти показника надійності функціонування транспортних засобів [9] характеризують особливості, що зумовлюють за їх використання безвідмовну роботу протягом рейсу або іншого заданого інтервалу часу. До показників надійності відносять такі: ресурс, термін служби; ймовірність безвідмовної роботи; напрацювання на відмову; періодичність контролю технічного стану транспортних засобів органами державного нагляду; наявність документа, що підтверджує допуск транспортного засобу до експлуатації.

Надійність переміщення точно за графіком (час поїздки) є першим компонентом показника «надійність», який належить до створеного автором [10] комплексного показника рівня пасажирського сервісу.

Другим компонентом показника «надійність» визначено термін служби автобусу, який визначає коефіцієнт відповідності фактичного строку служби автобусу нормативному.

Третій компонент показника «надійність» автори [11] визначили як надійність функціонування автобусів та оцінюють його як коефіцієнт технічної готовності автобусу ( $\alpha_{tr}$ ), але цей компонент є тотожним компоненту «ймовірність безвідмовної роботи транспорту». Автор [10] відносить цей показник до створеного комплексного показника рівня пасажирського сервісу за показником ступеня, що характеризує вагомість відповідного показника рівня сервісу та може відноситися до показника «надійність» у системі оцінки якості перевезення пасажирів автотранспортом.

Отже, компонентами цього показника є:

- переміщення точно за графіком – (час поїздки  $t_p$ );
- термін служби автобусу (коефіцієнт відповідності фактичного строку служби автобусу нормативному –  $\lambda$ ;
- вірогідність безвідмовної роботи автобусу –  $P_{op}$ .

На підставі проведення анкетування пасажирів і перевізників м. Маріуполь щодо визначення

наявності та використання запропонованих компонентів показника «надійність» в оцінці якості перевізного процесу під час пасажирських автомобільних перевезень було розглянуто та визначено динаміку змін цих компонентів (рис. 1).

Унаслідок експертної оцінки працівниками автотранспортних підприємств і пасажирами наявності та використання запропонованих компонентів показника якості перевізного процесу під час пасажирських автомобільних перевезень можна зробити такі висновки: відбувається збільшення усіх компонентів показника «надійність» і динаміка цього збільшення свідчить про те, що надійні умови для транспортування пасажирів з погляду на надійність поліпшуються (за наявності підвищення коефіцієнтів за рис. 1).

Отже, вищезазначені компоненти відносяться до двох з основних складників показника «надійність», а саме: переміщення точно за графіком як складник інформаційного забезпечення; термін служби автобусу і вірогідність безвідмовної роботи автобусу (до складника транспортної інфраструктури).

Подальший детальний розгляд низки досліджень науковців, міжнародних і вітчизняних стандартів щодо вмісту компонентів показника «надійність» дозволяє визначити чотири основні складові компоненти цього показника (рис. 2).



Рис. 2. Схема складових компонентів показника «надійність»

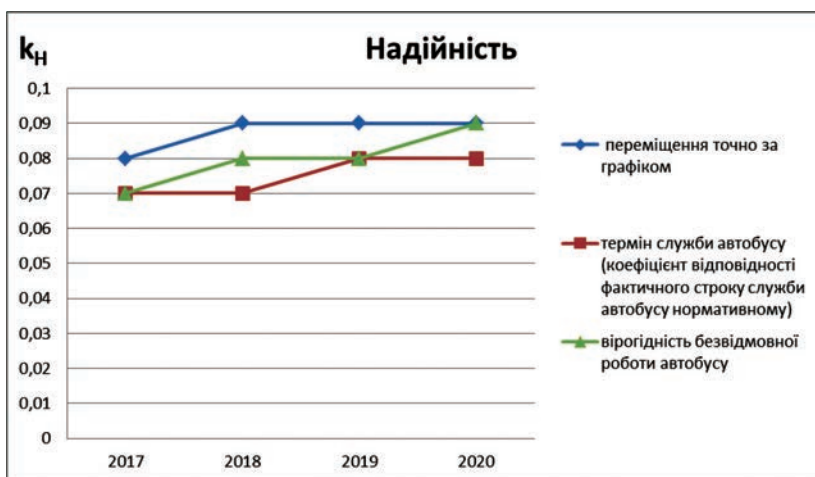


Рис. 1. Динаміка змін компонентів показника «надійність»

Ми визначаємо коефіцієнт показника «надійність» за такою формулою (1):

$$12K_H = 0.025D + 0.025T + 0.025U + 0.025t_n + 0.025\lambda + 0.025P_{бр} + 0.025K_B + 0.025P_{\Phi\psi} + 0.025Z_{ПДР} + 0.025I_n + 0.025I_{оц} + 0.025I_i$$

$$K_H = 0,3$$

де  $D$  – надійність дороги (відповідність стандартам);  $T$  – надійність тротуарів;  $U$  – надійність узбіччя;  $P_{нв}$  – напрацювання на відмову;  $\lambda$  – термін служби автобусу (коефіцієнт відповідності фактичного строку служби автобусу нормативному);  $P_{бр}$  – вірогідність безвідмовної роботи автобусу;  $K_B$  – кваліфікація водія;  $P_{\Phi\psi}$  – психофізіологічний стан водія;  $Z_{ПДР}$  – знання ПДР;  $I_n$  – інформатизація пасажирів;  $I_{оц}$  – інформатизація диспетчерського центру;  $I_i$  – інформатизація інфраструктури.

Отже, визначено основні складові компоненти показника «надійність», до яких увійшли: транспортна інфраструктура, транспортні засоби, людський ресурс та інформаційне забезпечення. Складові компоненти показника «надійність» представлені на табл. 1.

Складовий компонент, що увійшов до показника «надійність» як компонент «транспортна інфраструктура», може відноситись і до складу показника «безпека». Ці компоненти майже

Таблиця 1

Складові компоненти показника «надійність»

транспортної інфраструктури	транспортних засобів	людського ресурсу (водія)	інформаційного забезпечення
1. Дорога 2. Тротуари 3. Узбіччя	1. Термін служби 2. Напрацювання на відмову 3. Вірогідність безвідмовної роботи	1. Кваліфікація водія 2. Психофізіологічний стан водія 3. Знання ПДР	1. Інформатизація пасажирів 2. Інформатизація диспетчерського центру 3. Інформатизація інфраструктури

тотожні та визначають як надійність, так і безпеку у системі оцінки якості надання послуг із перевезення пасажирів автотранспортом. Унаслідок надійної проїжджої частини, тротуарів та узбіччя, котрі відповідають нормативним вимогам, процес перевезення пасажирів стає безпечним, що впливає на покращення якості надання послуг.

Стосовно компонентів складника «людський ресурс» слід зазначити, що ці компоненти також тотожні компонентам показника «безпека» як критерій «професійна придатність», який може оцінюватись, виходячи із підтвердженої кількості ДТП за минулий рік.

«Інформаційне забезпечення» як складник показника «надійність» визначає для споживача отримання достовірної інформації щодо розкладу руху, тим самим надаючи диспетчерам контроль за графіком руху у реальному часі. Слід зазначити, що компоненти складника «інформаційне забезпечення» можуть відноситись і до компонентів показника «своєчасність», які характеризують властивості пасажирських перевезень, що обумовлюють рух транспортних засобів відповідно

до встановленого розкладу або інших вимог за часом їх руху.

Отже, у показника «надійність» виявляється низка своїх складових компонентів, тим самим цей показник стає досить значущим за інші показники у системі оцінки якості перевезень пасажирів автомобільним транспортом.

#### Висновки

Аналіз розглянутих компонентів показника «надійність» у системі оцінки якості транспортного обслуговування пасажирів дозволяє зробити такі висновки:

1) фахівцями з оцінки якості послуг міського пасажирського транспорту (МПТ) по-різному представляється значущість показника «надійність»;

2) аналізований показник «надійність» різний за своєю змістовною сутністю, тому постає потреба цифровізувати його складники разом із усіма компонентами;

3) показник «надійність» під час пасажирських перевезень має розглядатися диференційовано задля виваженої оцінки усіх компонентів у системі оцінки якості пасажирських перевезень.

#### Список літератури:

1. Бурлакова Г.Ю., Букіна М.Д. Систематизація оцінки якості перевізного процесу при пасажирських перевезеннях. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. Маріуполь. 2019. № 39. С. 166-174.
2. Johansen K.W., Larsen O.I., Norheim B. Towards achievement of both allocative efficiency and X-efficiency in public transport. *Journal of Transport Economics and Policy*. 2001. Vol. 35, № 3. P. 491-511.
3. Hensher D., Stopher P., Bullock P. Service quality – developing a service quality index in the provision of commercial bus contracts. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2003. Vol. 37, № 6. P. 499-517.
4. Hensher D., Stanley J. Performance-based quality contracts in bus service provision. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2003. Vol. 37, № 6. P. 519-530.
5. Friman M. Implementing quality improvements in public transport. *Journal of Public Transportation*. 2004. Vol. 7, № 4. P. 49-65.
6. Bates J., Polak J., Jones P.A. Cook The valuation of reliability for personal travel. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2001. Vol. 37, № 2/3. P. 191-229.
7. Swanson J., Ampt L., Jones P. Measuring bus passenger preferences. *Traffic Engineering and Control*. 1997. Vol. 38, № 6. P. 330-336.
8. Спирин И.В. Перевозки пассажиров городским транспортом: Справочное пособие. Москва : Академкнига, 2002. 448 с.
9. Бурлакова Г.Ю., Букіна М.Д. Обґрунтування ступеня необхідності показників якості в системі оцінювання пасажирських перевезень. *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура*. Харків, 2020. Том 4, № 157. С. 152-157.
10. Шабанов А.В. Региональные логистические системы общественного транспорта: методология формирования и механизм управления. Ростов-на-Дону : СКНЦ ВЦ, 2001. 205 с.
11. ДСТУ ISO 9000-2001. Системи управління якістю. Основні положення та словник. Введ. 2001-06-27. Національний стандарт України. Київ : Держстандарт України, 2001. 33 с.

#### **Burlakova H.Yu., Bukina M.D. DETERMINATION OF THE CONTENT OF THE COMPONENTS OF “RELIABILITY” IN THE SYSTEM OF QUALITY ASSESSMENT OF SERVICES IN PASSENGER TRANSPORTATION.**

*The article provides a more detailed review of the "Reliability" indicator and its components to determine the importance of each component of the indicator in the system of quality assessment of the transportation of*



passengers by road. The content of the components of the quality of passenger transportation is determined in the system of quality assessment of passenger transport, as well as the degree of influence of each component on the quality of the provision of services for the transportation of passengers by road.

From the analysis of the works of scientists who have studied the reliability indicator, it is not possible to make a classification of the indicators' elements, because there is no splitting of the solid reliability indicator into elements. But a single indicator is impractical, because reliability should be considered in the symbiosis of four types of reliability (transport infrastructure, vehicles, human resource (driver), information support). Based on a survey of passengers and carriers in Mariupol to determine the presence and use of the proposed components of the "reliability" indicator in assessing the quality of the transportation process in passenger road transport, the dynamics of changes in these components were considered and determined. As a result of an expert assessment by employees of road transport enterprises and passengers to determine the presence and use of the proposed components of the indicator for assessing the quality of the transportation process in passenger road transport, the following conclusions can be drawn: the dynamics of an increase in all components of the "reliability" indicator indicates that reliable conditions for the presence of an increase in the coefficients).

Analysis of the considered components of the "reliability" indicator in the system for assessing the quality of transport services for passengers allows us to draw the following conclusions:

1. Experts in assessing the quality of urban passenger transport (UTP) services in different ways represent the significance of the indicator "reliability";
2. The considered indicator "reliability" is different in its content, therefore there is a need to digitize its components including all components;
3. The indicator "reliability" in passenger transportation should be considered differentially for a balanced assessment of the reliability of all components in the system for assessing the quality of passenger transportation

**Key words:** quality assessment, indicators, reliability, transport service, transportation process, passenger traffic, components.

**Гімпель Р.М.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Ткаченко В.В.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Рященко О.І.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Тришин В.В.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

## **МЕТОДИКИ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ТУРБОВАНИХ ДВИГУНІВ ШВИДКІСНИХ СУДЕН ІЗ ЧАСТКОВО ЗАНУРЕНИМИ ГВИНТАМИ**

*У процесі експлуатації швидкісних суден із високооборотними турбованими двигунами виникають відмови й несправності, пов'язані з конструктивними особливостями пропульсивного комплексу, а також помилковими діями екіпажу. Крім того, натеper відсутні сталі методики проведення діагностики й контролю параметрів такого типу двигунів, що мають свої особливості. Інтуїтивне управління двигунами й екіпажем призводить до підвищених навантажень на головні двигуни, високих рівнів вібрації, швидкого виходу з ладу складної енергетичної апаратури. Виникаючі відмови призводять до зниження безпеки мореплавання, простою суден, а також до значних витрат на виконання ремонтних робіт. Отже, актуальне розроблення методик контролю параметрів турбованих двигунів швидкісних суден із частково зануреними гвинтами.*

*Натеper практично відсутні науково обґрунтовані технічні рішення та організаційно-методичні заходи, спрямовані на підвищення ефективності експлуатації пропульсивних комплексів швидкісних суден (із частково зануреними гвинтами) на різних режимах роботи. Розробкою та впровадженням ефективних методів і засобів оцінки фактичного стану судових технічних засобів, удосконаленням їх технічної експлуатації займалася та зробила значний внесок низка вчених, які розглядали завдання, що визначають надійність безпечної експлуатації суден за межами призначених термінів служби; розробляли й впроваджували ефективні методи й засоби оцінки фактичного стану судових технічних засобів; розглядали завдання, пов'язані з проєктуванням та узгодженням теплотехнічних характеристик турбокомпресорів і двигуна.*

*У статті розроблено комплекс методик оцінювання технічного стану пропульсивного комплексу із частково зануреними гвинтами, що дозволяють провести відповідну оцінку. Виконано аналіз конструктивних особливостей та експлуатаційних режимів роботи сучасних суден із частково зануреними гвинтами. Аналіз відмов і несправностей пропульсивного комплексу із частково зануреними гвинтами показав, що аварія головного двигуна (2%), муфт (6%), ушкодження лопатей гребних гвинтів (10%), поява тріщин на транці судна (4%), систем гідравліки (56%) є результатом роботи головного двигуна на підвищених навантаженнях і наслідком впливу вібрації елементів пропульсивного комплексу із частково зануреними гвинтами. Експериментальні дослідження показали, що сполучення особливостей (режими руху судна, роботи головного двигуна й турбокомпресора, приводів Арнесона, неправильне управління) призводять до граничних значень теплотехнічних параметрів ( $Ne_{гд} = 100\%$ ,  $t_{ог} = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) і високим рівням вібрації ( $\text{Вскз}$  до  $14\text{ мм/с}$ ).*

**Ключові слова:** високошвидкісне судно, пропульсивний комплекс, несправності, суднова енергетична установка, турбований двигун.

**Постановка проблеми.** У процесі експлуатації швидкісних суден із високооборотними турбованими двигунами виникають відмови й несправності, пов'язані з конструктивними особливостями пропульсивного комплексу (далі – ПК), а також помилковими діями екіпажу. Крім того,

натеper відсутні сталі методики проведення діагностики й контролю параметрів такого типу двигунів, що мають свої особливості. Інтуїтивне управління такими двигунами екіпажем призводить до підвищених навантажень на головні двигуни, високих рівнів вібрації,

швидкого виходу з ладу складної енергетичної апаратури. Виникаючі відмови призводять до зниження безпеки мореплавання, простою суден, а також до значних витрат на виконання ремонтних робіт. Отже, актуальним є розроблення методик контролю параметрів турбованих двигунів швидкісних суден із частково зануреними гвинтами.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Натепер практично відсутні науково обґрунтовані технічні рішення та організаційно-методичні заходи, спрямовані на підвищення ефективності експлуатації пропульсивних комплексів швидкісних суден із частково зануреними гвинтами (далі – ЧЗГ) на різних режимах роботи. Розробкою та впровадженням ефективних методів і засобів оцінки фактичного стану суднових технічних засобів (далі – СТЗ), удосконаленням їх технічної експлуатації займалися та зробили значний внесок: О.Г. Антушев, А.М. Басін, Е.В. Голуб, Н.Д. Карачун, К.Н. Куліков, А.А. Коломієць, Е.З. Мадорський, Е.Л. Мишинський, В.І. Попков, В.І. Швеев та інші.

Зазначені вище вчені:

- розглядали завдання, що визначають надійність безпечної експлуатації суден за межами призначених термінів служби;
- розробляли й впроваджували ефективні методи й засоби оцінки фактичного стану СТЗ;
- розглядали завдання, пов'язані з проектуванням та узгодженням теплотехнічних характеристик турбокомпресорів і двигуна.

**Постановка завдання.** Мета статті полягає у формуванні комплексу науково обґрунтованих технічних рішень, спрямованих на підвищення ефективності експлуатації ПК швидкісних суден ЧЗГ на різних режимах експлуатації на основі контролю параметрів.

**Виклад основного матеріалу.**

### I. Основні характеристики двигуна.

До складу двохвального ПК швидкісного судна із ЧЗГ (рис. 1) входять агрегати й обладнання, що наведені в таблиці 1 [1, с. 12].

Особливістю реєстрової системи турбонаддуву дизеля “MTU” 10V2000 M93 (рис. 2) є два турбокомпресори (далі – ТК).

Таблиця 1

Склад ПК із ЧЗГ

№ з/п	Найменування та виробни	Позначення	Фірма-виробник	Країна
1	Дизельний двигун	10V2000 M93	MTU	Німеччина
2	Редуктор	ZF 2050	H	Німеччина
3	Гребні гвинти	ЧЗГ	ZF	Швейцарія
4	Привід Арнесона	ASD-14	Twin Disc	США
5	Торсіонний вал	CENTADISC-CD 70	CENTA	Німеччина

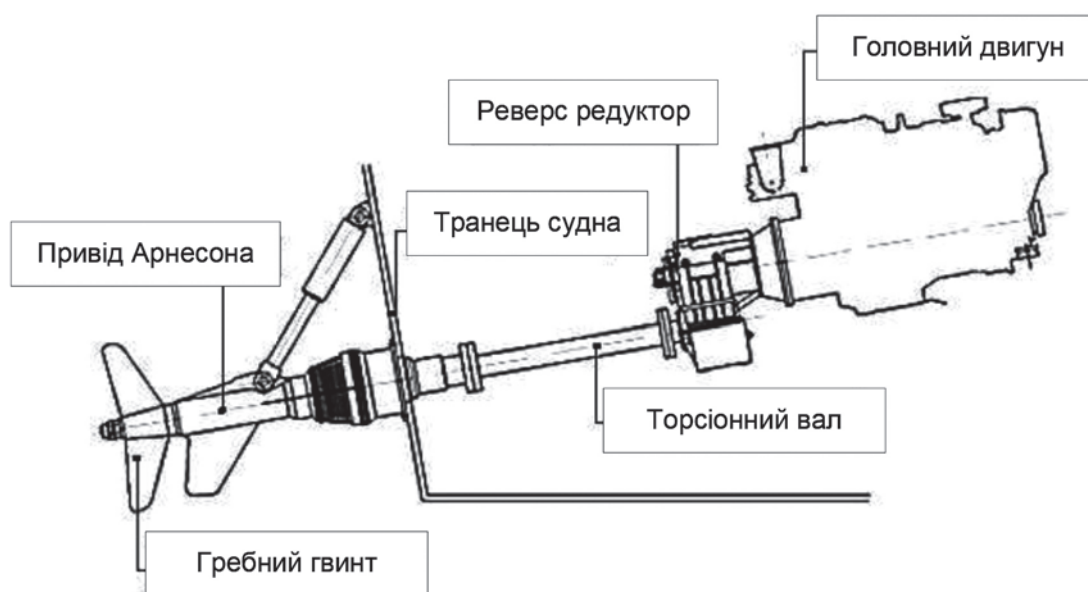


Рис. 1. Пропульсивний комплекс суден із частково зануреними гвинтами

Повітряна частина:

- повітряні фільтри на кожний із ТК;
- загальний ресивер наддувочного повітря;
- охолоджувач наддувочного повітря.

Газовихлопна частина:

- газовихлопні колектори, що працюють на загальний пропускний газопровід відпрацьованих газів (далі – ВГ);

- загальний охолоджуваний корпус ТК;
- вихлопний тракт і керуючі клапани.

На рис. 2 введені такі умовні позначення: 1 – головка циліндра; 2 – випускний канал; 3 – відвід ВГ із циліндрів; 4 – турбокомпресор, що підключається; 5 – основний турбокомпресор; 6 – корпус турбіни; 7 – робоче колесо турбіни; 8 – вихідний отвір для ВГ; 9 – робоче колесо компресора; 10 – повітряний фільтр; 11 – корпус компресора; 12 – охолоджувач наддувочного повітря; 13 – повітряний колектор; 14 – трубопровід наддувочного повітря; 15 – колектор ВГ; 16 – камера згоряння; 17 – клапан вільного випуску; 18 – повітряний клапан; 19 – регулятор тиску наддуву; 20 – нижня частина несущого корпусу; 21 – середня частина несущого корпусу;

22 – верхня частина несущого корпусу; 23 – трубопровід органів управління для регулятора тиску наддування.

На рис. 3 наведена універсальна характеристика головного двигуна (далі – ГД) «MTU» 10V2000 M93: обмежувальні характеристики (MCR, DBR), криві питомої витрати палива ( $b_e$ ) і розрахункова гвинтова характеристика  $P = f(n^3)$ .

Система наддуву дизеля передбачає чотири режими роботи:

- 1) пуск і прогрів;
- 2) з одним ТК (робота в зоні середніх навантажень I, водотоннажний режим, при  $n_{гд} \leq 1\,900\text{ хв}^{-1}$ );
- 3) з двома ТК (робота в зоні II, перехідний і глісуючий режими, при  $n_{гд} \geq 1\,900\text{ хв}^{-1}$ );
- 4) у разі перевищенні тиску наддуву.

Перемикання режимів здійснюється електронним блоком керування за допомогою керуючих клапанів.

II. Методика контролю стану елементів пульсивного комплексу в експлуатації

На досліджуваних швидкісних суднах візуальний контроль приводів Арнесона через особливості конструкції судна і ПК із ЧЗГ може здійснюватися тільки на стоянці. У таблиці 2 наведені робочі параметри системи гідравліки приводів Арнесона.

Таблиця 2

Робочі параметри системи гідравліки приводів Арнесона

№ з/п	Найменування	Параметр	Значення параметра	
1	Робочий тиск у системі гідравліки рульового управління	Р <sub>раб.</sub>	8 барів	
2	Тиск настроювання протиударного клапана	Система гідравліки рульового управління	Р <sub>кл.ру</sub>	10 барів
		Система гідравліки балансування	Р <sub>кл.ГБ</sub>	11 барів
3	Температура робочої рідини	t <sub>м</sub>	не більше +70 °С	
4	Робоча рідина	-	масло VG32	

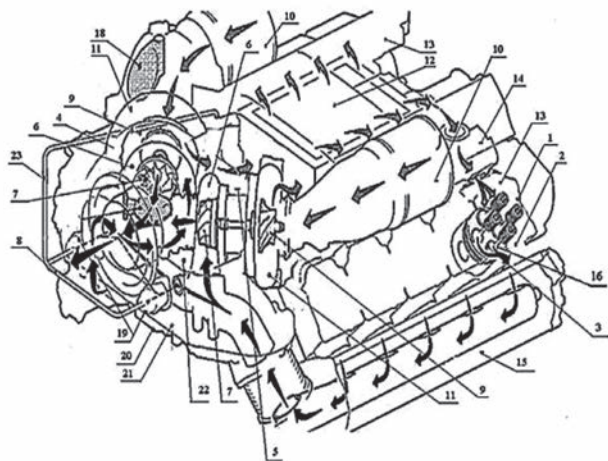


Рис. 2. Схема системи наддуву двигуна

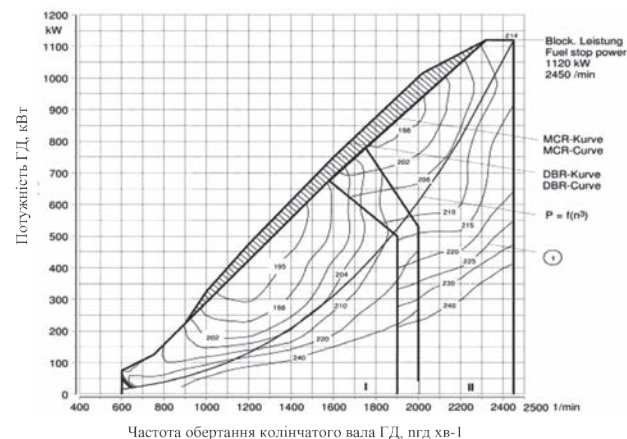


Рис. 3. Універсальна характеристика дизеля «MTU» 10V2000 M93

За умови візуального контролю технічного стану ПК із ЧЗГ відповідно до контрольного перебіку обслуговуючому персоналу необхідно проводити такий технічний огляд:

Щодня:

- зробити зовнішній огляд амортизаторів ГД та їх кріплень;
- оглянути проміжні вали й перебіркові ущільнення;
- переконатися в легкості обертання валопроводів (повернути їх на 3–4 обороти вручну за торсіонний вал);
- контролювати рівень трансмісійного й гідравлічного мастила (не менше ніж третина обсягу маслобака);
- оглянути ГД на наявність ушкоджень;
- перевірити систему катодного захисту;
- очистити від морського обростання штоки гідравлічних циліндрів, вихідні вали й компоненти;
- перевірити стан пофарбованих поверхонь виробів і деталей системи гідравліки;
- виконати цикл роботи систем гідравліки приводів Арнесона до обмежувальних значень.

Щотижня або після перших 200 годин роботи:

- виконати всі зазначені заходи відповідно до щоденного огляду;
- зробити заміну трансмісійної мастила (за результатами аналізу);
- переконатися в правильному налаштуванні запобіжних клапанів насосів гідравліки;
- перевірити стан гідравлічних шлангів, розташованих за транцем у районі гідроциліндрів нахилу й повороту гребних валів приводу;
- перевірити затягування гайки гребного гвинта;
- перевірити ручний та аварійний режим керування приводом.

Через перші 500 годин роботи (не перевищуючи період 12 місяців):

- виконати всі зазначені заходи відповідно до щотижневого огляду;
- зробити заміну фільтра в системі гідравліки рульового керування та системі гідравліки балансування;
- перевірити кріпильні деталі транця судна в гніздах гідроциліндрів нахилу й повороту.

Під час докування судна або через 2 000 годин роботи:

- виконати всі зазначені заходи відповідно до щотижневого огляду;
- оглянути стан трубопроводів, ушкоджені труби замінити;

– зробити огляд системи гідравліки за умови поворотів і змін нахилу гребних валів, усунути виявлені несправності й дефекти.

У разі незадовільної роботи окремих агрегатів і вузлів відповідно до інструкцій з експлуатації їх необхідно замінити на нові.

Недоліки візуального контролю:

- не дає достатньої інформації про стан елементів приводу Арнесона в процесі експлуатації;
- розбирання справних приводів із супутнім процесом ремонту з постановкою судна на кільблоки;
- збільшення матеріальних витрат судовласника.

Параметричний контроль.

Під час роботи ПК із ЧЗГ необхідно періодично контролювати такі параметри, що виносяться на пульт оператора в ходовій рубці (див. таблицю 3).

Таблиця 3

### 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		-

Перелік контрольованих параметрів, виведених у ходовій рубці, недостатній для об'єктивної оцінки стану ПК із ЧЗГ на різних експлуатаційних режимах. Оскільки перебування екіпажа в машинному відділенні під час руху судна не передбачається, то він не має постійної можливості контролювати параметри ГД.

Оцінка технічного стану й пошук несправностей ПК із ЧЗГ виконується порівнянням поточних значень робочих параметрів в експлуатації з установленими нормами допустимих або базових (еталонних) значень, отриманими під час ходових випробувань або першого виходу (у разі повного завантаження).

Для порівняння значень контрольованих параметрів необхідно, щоб вони відповідали тому самому режиму роботи судна.

Недоліки параметричного контролю:  
 – недостатньо контрольованих параметрів у ходовій рубці;  
 – можливо застосовувати не для всіх вузлів і деталей;  
 – відсутність нормуючих показників технічного стану сучасних ПК із ЧЗГ.

**III. Методика дослідження теплотехнічних параметрів пропульсивного комплексу із частково зануреними гвинтами**

На рис. 4 і в таблиці 4 наведені контрольовані в процесі проведення експериментальних досліджень теплотехнічні параметри ПК із ЧЗГ:

- 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 і за ТК ( $t_{ог}$ );
- температура повітря на виході з ресивера ( $t_p$ );
- частота обертання ТК ( $n_{тк}$ );
- кут нахилу гребних валів приводу Арнесона ( $\alpha$ ).

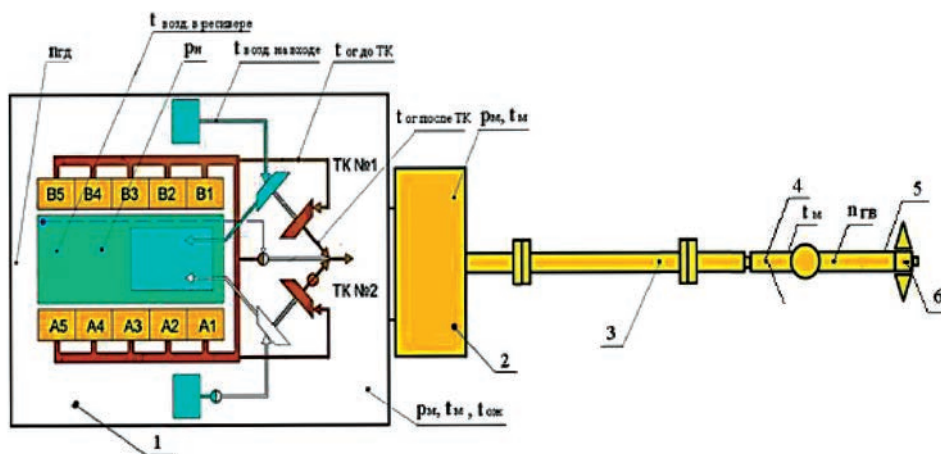
На рис. 4 позначено: 1 – головний двигун; 2 – реверс-редуктор; 3 – торсіонний вал; 4 – опорно-упорний підшипник; 5 – привід Арнесона; 6 – гребний гвинт; А1-А5 – циліндри ГД (ЛБ); В1-В5 – циліндри ГД (ПБ).

Контроль теплотехнічного стану повинен виконуватися на вільній воді за хвилювання моря не

Таблиця 4

**Параметри пропульсивного комплексу із частково зануреними гвинтами**

№ з/п	Вимірювана величина	Позначення	Одиниця вим.	Найменування приладів	Ціна ділення
1	Частота обертання колінчатого вала ГД	$n_{гд}$	хв <sup>-1</sup>		50
2	Частота обертання гребного вала приводу Арнесона	$n_{гв}$	хв <sup>-1</sup>	Штатні індукційні перетворювачі	50
3	Навантаження ГД	$N_{гд}$	%		25
4	Частота обертання ТК	$n_{тк}$	хв <sup>-1</sup>		500
5	Тиск наддува	$p_n$	бар	Індуктивні датчики тиску	0,25
6	Диск замазочного мастила	$P_m$	бар		0,25
7	Тиск ОР	$P_{ок}$	бар		0,5
8	Температура ВГ до ТК	$t_{ог}$	°С	Термопара	10
9	Температура надувального повітря	$t_s$	°С		10
10	Температура надувального повітря на виході з ресивера	$t_p$	°С		5
11	Температура мастила на виході	$t_m$	°С		5
12	Температура ОР на виході з ГД	$t_{ок}$	°С	Термометр	5
13	Температура мастила в реверсі-редукторі	$t_m$	°С	Термометр	5
14	Кути установки гребних валів приводів Арнесона	$\alpha$	град	Індуктивні перетворювачі	Вертикал. - 1° Горизонт. - 1°



**Рис. 4. Схеми теплотехнічних і вібраційних вимірів параметрів пропульсивного комплексу із частково зануреними гвинтами**

більш 1 бала й прямолінійного руху судна. Режим роботи ГД сталий. ГД і привід Арнесона повинні бути прогріті до робочої температури. Методика контролю передбачає реєстрацію навантаження ГД, положення гребних валів у поперечній та у вертикальній площинах за зміни частоти обертання колінчатого вала ГД у діапазоні 600–2 450 хв<sup>-1</sup> через кожні 100 хв<sup>-1</sup>. Режим роботи ПК швидкісного судна із ЧЗГ під час проведення випробувань наведені в таблиці 5.

Таким чином, гребні вали приводів Арнесона повинні знаходитися в положенні «нейтральне» на режимах роботи до  $n_{гд} \leq 2\ 100$  хв<sup>-1</sup> (водотонажний режим). При  $n_{гд} \geq 2\ 100$  хв<sup>-1</sup> (глісуючий режим) приводи повинні бути встановлені в положення, за якого гребні гвинти заглиблені на 0,4–0,6 D.

Необхідно виконати не менш 3-х вимірів у кожній точці з перервою не менше ніж 20 хв.

Перед проведенням випробувань ПК із ЧЗГ після пуску ГД повинна виконуватися візуальна перевірка загального стану ПК із ЧЗГ:

- на наявність сторонніх шумів і вібрації;
- кольору ВГ;
- максимального значення індикатора розрядження паливного фільтра грубого очищення та положення сигнального кільця індикації розрядження повітряного фільтра;
- управління приводами Арнесона;
- тиску мастила в системі гідравліки приводами Арнесона.

Усі прилади, які використовувалися в процесі проведення випробувань, були перевірені. Результати вимірів теплотехнічних параметрів фіксувалися за допомогою реєструючої апаратури.

#### IV. Методика контролю вібраційних параметрів пропульсивного комплексу із частково зануреними гвинтами

В основу розробленої методики контролю за вібраційними параметрами були покладені вимоги керівних документів і стандартів.

Усі застосовувані засоби вимірів повинні пройти випробування відповідно до ДСТУ 8.001-80 [8] або метрологічну атестацію відповідно до ДСТУ 8.326-89 [9], бути схвалені Регістром, допущені до застосування та не повинні мати минулих термінів періодичної перевірки, проведеної відповідно до ДСТУ 8.513-84 [10].

Для сполучних ліній між віброперетворювачами (акселерометрами) і підсилювачами заряду повинні використовуватися малощумні коаксіальні кабелі. Довжина кабелю під час виміру рівнів вібрації з мінімальною амплітудою 19,5 дБ не повинна перевищувати 5 м. Для забезпечення

Таблиця 5

#### Режими роботи пропульсивного комплексу швидкісного судна із частково зануреними гвинтами під час проведення випробувань

№ з/п	Частота обертання ведучого вала ГД	Режим руху	
		Водотонажний	Глісуючий
1	600 хв <sup>-1</sup>	X	
2	800 хв <sup>-1</sup>	X	
3	1 000 хв <sup>-1</sup>	X	
4	1 200 хв <sup>-1</sup>	X	
5	1 500 хв <sup>-1</sup>	X	
6	1 700 хв <sup>-1</sup>	X	
7	1 800 хв <sup>-1</sup>	X	
8	1 900–2 000 хв <sup>-1</sup>	Не рекомендований до тривалої експлуатації (підключення ТК № 2)	
9	2 100 хв <sup>-1</sup>	X	X
10	2 200 хв <sup>-1</sup>		X
11	2 300 хв <sup>-1</sup>		X
12	2 400 хв <sup>-1</sup>		X

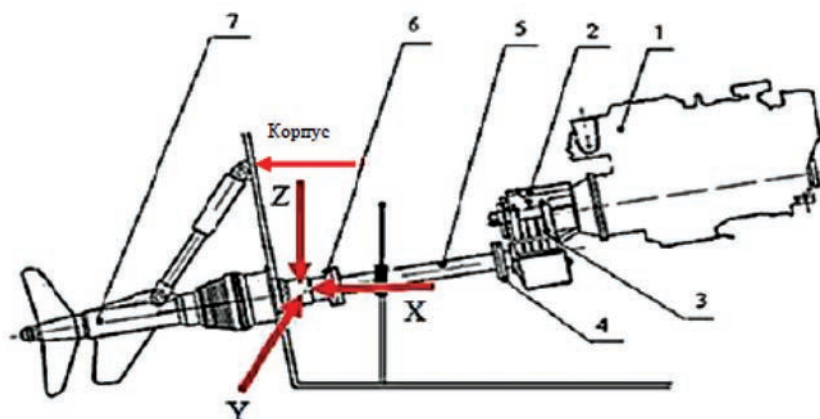
лінійної частотної характеристики у всьому діапазоні частот вимірів і виключення влучення в цей діапазон резонансної частоти датчика виміри проводяться за допомогою малогабаритних датчиків швидкості й прискорення масою менше ніж 60 г. Резонансна частота встановленого датчика повинна знаходитися поза діапазоном аналізу.

Для кріплення віброперетворювача (акселерометра) рекомендується використовувати:

- стандартну шпильку, встановлювану в спеціальний різьбовий отвір, який нарізається в точці виміру;
- спеціальну металеву бонку, що приварюється за допомогою ручного електродугового зварювання або приклеюється клеєм у місці установки акселерометрів.
- кріплення датчика на штатному магніті, що входить у комплект акселерометра, за послідовних вимірів.

Контроль вібраційного стану повинен вироблятися на вільній воді в разі хвилювання моря не більш 1 бала й прямолінійного руху судна. Режим роботи ГД сталий. ГД і привід Арнесона повинні бути прогріті до робочої температури. Необхідно виконати не менше 3-х вимірів у кожній точці з перервою не менше ніж 20 хв.

Проведення вібраційного контролю ґрунтується на основі аналізу конструктивних



**Рис. 5.** Напрями й точки вимірів вібрації на транці судна й на корпусі опорного підшипника приводу Арнесона  
 напрями: X – осьовий, Y – поперечний, Z – вертикальний;  
 1 – головний двигун; 2 – реверс-редуктор; 3 – еластична муфта;  
 4 – вихідний фланець реверс-редуктора; 5 – торсіонний вал;  
 6 – вихідний фланець гребного вала; 7 – привід Арнесона

особливостей ПК із ЧЗГ. За результатами проведення вимірів складається протокол. Методика дозволяє:

- визначити необхідні вібраційні параметри й провести аналіз ТС його елементів;
- проводити докладний аналіз технічного стану його елементів у відповідних смугах на характерних частотах та у вузькосмугових спектрах;
- регламентувати терміни й порядок проведення вібраційних вимірів приводу Арнесона (не рідше одного разу за 200 годин роботи).

#### Висновки.

1. Розроблено комплекс методик оцінювання технічного стану ПК із ЧЗГ, що дозволяють провести відповідну оцінку.
2. Вимір значень параметрів вібрації з метою оцінки технічного стану елементів ПК швидкісних суден із ЧЗГ можуть складати частину приймально-здавальних випробувань за введення судна в експлуатацію та повинні проводитися під час експлуатації.
3. Виконано аналіз конструктивних особливос-

тей та експлуатаційних режимів роботи сучасних суден із ЧЗГ.

Особливістю судна й ПК є:

- робота на 2-х режимах руху (водотоннажний і глісируючий);
- реєстровий наддув високооборотних ГД;
- наявність приводів Арнесона й ЧЗГ;
- в управлінні рухом судном відсутній автоматичний зв'язок між зміною режимів роботи ГД, судна й положення гребних гвинтів.

4. Аналіз відмов і несправностей ПК із ЧЗГ показав, що аварія ГД (2%), муфт (6%), ушкодження лопатей гребних гвинтів (10%), поява тріщин на транці судна (4%), систем гідравліки (56%) є результатом роботи ГД на підвищених навантаженнях і наслідком впливу вібрації елементів ПК із ЧЗГ.

5. Експериментальні дослідження показали, що сполучення особливостей (режими руху судна, роботи ГД і ТК, приводів Арнесона, неправильне управління) призводять до граничних значень тепло-технічних параметрів ( $N_{гд} = 100\%$ ,  $t_{ог} = 700^{\circ}\text{C}$ ) і високим рівням вібрації ( $\delta_{скз}$  до 14 мм / с).

#### Список літератури:

1. Правила классификации и постройки морских судов. Том 2. *Морской регистр Судоходства* от 30 сентября 2014 г. Санкт-Петербург, 2015. 870 с.
2. Приложение к руководству по техническому наблюдению за судами в эксплуатации. *Морской регистр Судоходства*. Санкт-Петербург, 2016. 309 с.
3. Визуально-измерительный контроль. Лаборатория неразрушающего контроля. *Промстрой-контроль* : веб-сайт. URL: <http://pskontrol.ru/index.php/laboratoriya-nerazrushayushchegocontrolya/metodykontrolya> (дата звернення: 03.09.2021).
4. Параметрический контроль. *Библиотека словарей «Словарник»: экономический словарь, словарь туриста, толковый словарь обществоведческих терминов*. URL: <http://www.slovarnik.ru/html/economica/k/kontrol5-parametri4eskiy.html> (дата звернення: 03.09.2021).



5. РД М015590/02R 06-01. Руководство по эксплуатации. Дизельный двигатель 8V2000M92, 8V2000M93, 10V2000M92, 10V2000M93 / MTU. *Value Service Technical Documentation. Friedrichshafen GmbH*. 2006. 146 с.
6. РД 360084.001. Энергетическая установка, техническое описание и инструкция по эксплуатации. Часть 1. Главные двигатели и дизель–генераторы 12150. ФГУП ЦМКБ «Алмаз». Санкт-Петербург, 2007. С. 3.
7. Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов. Том 3. Часть V. *Техническое наблюдение за постройкой судов*. Санкт-Петербург, 2013. С. 278–283
8. ГОСТ 8.001–1980. Организация и порядок проведения государственных испытаний средств измерений. Москва : Издательство стандартов, 1990. 34 с.
9. ГОСТ 8.326–89. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическая аттестация средств измерений. Москва : Издательство стандартов. 1985. 6 с.
10. ГОСТ 8.513–1984. Государственная система обеспечения единства измерений. Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения. Москва : Издательство стандартов, 1985. 11 с.
11. Svan 912 AE, Svantek Ltd. Инструкция по эксплуатации. Рекомендуемая комплектация. Польша. URL: [http://granate.ru/svan\\_912ae.html](http://granate.ru/svan_912ae.html) (дата звернения: 03.09.2021).
12. Тимошенко В.Ф. Программа дизайна яхт, катеров и судов, для расчетов статики и гидродинамики судов “FREE! ship Plus”. URL: <https://soft.softodrom.ru/Автор/13308/> (дата звернения: 03.09.2021).

### **Himpel R.M., Tkachenko V.V., Ryashchenko O.I., Trishin V.V. TECHNIQUES FOR CONTROL OF PARAMETERS OF TURBOED ENGINES OF SPEED VEHICLES WITH PARTIALLY SUBMERSIBLE SCREWS**

*During the operation of high-speed vessels with high-speed turbocharged engines, failures and malfunctions occur due to the design features of the propulsion system, as well as erroneous actions of the crew. In addition, currently there are no stable methods for diagnosing and monitoring the parameters of this type of engine, which have their own characteristics. Intuitive control of these engines by the crew leads to increased loads on the main engines, high levels of vibration, rapid failure of complex power equipment. The resulting failures lead to a decrease in maritime safety, ship downtime, as well as significant costs for repairs. Therefore, it is important to develop methods for monitoring the parameters of turbocharged engines of high-speed vessels with partially immersed propellers. At present, there are virtually no scientifically sound technical solutions and organizational and methodological measures aimed at improving the efficiency of operation of propulsion systems of high-speed vessels with (partially submerged propellers) in different modes of operation. A number of scientists have been involved in the development and implementation of effective methods and means of assessing the actual condition of ship's technical equipment, improving their technical operation and making significant contributions. developed and implemented effective methods and tools for assessing the actual condition of ship's technical means; considered tasks related to the design and coordination of thermal characteristics of turbochargers and engine. The article develops a set of methods for assessing the technical condition of the propulsive complex with partially immersed screws, which allows for appropriate assessment. The analysis of design features and operational modes of operation of modern vessels with partially immersed propellers is performed. Analysis of failures and malfunctions of the propulsive complex with partially immersed propellers showed that the accident of the main engine (2%), couplings (6%), damage to the propeller blades (10%), cracks in the transom of the vessel (4%), hydraulic systems 56%) is the result of the operation of the main engine at high loads and a consequence of the vibration of the elements of the propulsive complex with partially immersed propellers. Experimental studies have shown that the combination of features (modes of movement of the vessel, the operation of the main engine and turbocharger, Arneson drives, improper control) lead to limit values of thermal parameters ( $N_{egd} = 100\%$ ,  $t_{og} = 700^{\circ}\text{C}$ ) and high levels of vibration ( $g_{skz}$  up to 14 mm / with).*

**Key words:** high-speed vessel propulsion complex, malfunctions, ship power plant, turbocharged engine.

**Дакі О.А.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Штрибець В.В.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Ткаченко В.В.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Рященко О.І.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

## МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СУДНОВИХ КОТЛІВ-УТИЛІЗАТОРІВ ТЕПЛА

*У статті підкреслено, що енергоефективність виконання рейсів є одним із найперспективніших способів зниження собівартості перевезень водним транспортом. Усі судноплавні компанії намагаються зменшити витрати палива, а суднобудівні підприємства - розробити нові способи його економії. Перспективним напрямком економії палива під час експлуатації суднових енергетичних установок вважається корисне використання теплоти відпрацьованих газів як головних, так і допоміжних двигунів. У дослідженнях науковців указано, що значну економію палива під час експлуатації СЕУ можна отримати за рахунок корисного використання вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР), таких як теплота відпрацьованих газів головних двигунів (ГД) і дизель-генераторів (ДГ), теплота контурів охолодження і змащування ГД і ДГ, теплота системи охолодження наддувочного повітря та інших. Вторинні теплові потоки (ВТП) СЕУ суден, які експлуатуються, досить великі та за правильного їх використання можуть повністю покрити потреби судна у теплоті на ходових режимах. Для пасажирських суден, суховантажних теплоходів, нафторудовозів, буксирів і для деяких інших груп рухомого складу флоту характерно значне перевищення потужності ВТП над потребами у теплоті або не досить повне використання ВТП. Через те доцільно розглядати можливості застосування ВТП без перетворення або із перетворенням у механічну чи електричну енергію. Перспективи вдосконалення суднових котлів-утилізаторів пов'язані не з одним фізичним показником, а з покращенням комплексу характеристик. Насамперед це теплова ефективність, газодинамічний опір, показники надійності і габарити. З урахуванням того, що властивостям високої теплової ефективності, компактності і потужності за останні роки приділяється велика увага на водному транспорті, і значного поширення отримують котли-утилізатори водотрубного типу. Подальшого покращення експлуатаційних характеристик котлів-утилізаторів можна досягти шляхом використання нових методів інтенсифікації тепловіддачі, застосування ефективних схем струму теплоносія, оптимізації конструктивних параметрів технологічності виготовлення, простоти обслуговування і ремонту, забезпечення потрібної надійності температурних режимів роботи матеріалів котлів.*

**Ключові слова:** енергоефективність, котел-утилізатор, суднові енергетичні установки, суднобудування, експлуатація флоту.

**Постановка проблеми.** Енергоефективність виконання рейсів є одним із найперспективніших способів зниження собівартості перевезень водним транспортом. Усі судноплавні компанії намагаються зменшити витрати палива, а суднобудівні підприємства - розробити нові способи його економії.

Перспективним напрямком економії палива під час експлуатації суднових енергетичних установок (СЕУ) фахівці вважають корисне використання теплоти відпрацьованих газів як головних,

так і допоміжних двигунів. Аналіз теплових балансів СЕУ свідчить, що за ефективного використання теплоти відпрацьованих газів суднових двигунів може бути ліквідована потреба у спалюванні палива в автономних водогрійних або парових котлах задля отримання гарячої води для систем опалення та інших суднових систем.

Незважаючи на те, що доцільність застосування утилізаторів із метою корисного використання теплоти відпрацьованих газів підтверджена

теорією і перевірена практикою, нині не спостерігається належного широкого використання цього типу енергетичних апаратів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У низці робіт [1-6] указано, що значна економія палива за експлуатації СЕУ може бути отримана за рахунок корисного використання вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР), до яких відносяться теплота відпрацьованих газів головних двигунів (ГД) та дизель-генераторів (ДГ), теплота контурів охолодження і змащування ГД та ДГ, теплота системи охолодження наддувочного повітря та інші. Вторинні теплові потоки (ВТП) СЕУ суден, які експлуатуються, досить великі та за правильного їх використання можуть повністю покрити потреби судна у теплоті на ходових режимах. Для пасажирських суден, суховантажних теплоходів, нафторудовозів, буксирів і деяких інших груп рухомого складу флоту характерно значне перевищення потужності ВТП над потребами у теплоті або не досить повне використання ВТП. Через те доцільно розглядати можливості застосування ВТП без перетворення або із перетворенням у механічну чи електричну енергію [7; 8].

Підвищенню ефективності використання вторинних енергетичних ресурсів присвячені роботи відомих фахівців, таких як П.І. Бажан, В.К. Голубєв, П.В. Бойко, Д.І. Денисенко, В.І. Єнін, І.І. Лощаков, Е.І. Манушин, Д.І. Осипов.

**Постановка завдання.** Метою роботи є аналіз та узагальнення методів підвищення ефективності суднових котлів-утилізаторів тепла.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Слабке використання котлів-утилізаторів під час експлуатації суден судноплавними компаніями пояснюється такими об'єктивними факторами:

- через відносно невисоку температуру відпрацьованих газів дизелів температурні напори в утилізаторах є значно нижчими, ніж в автономних котлах. Унаслідок цього утилізатори значно уступають автономним котлам за питомою теплопродуктивністю, габаритами та масою;

- через відносно низькі температури газів у проточній частині котлів-утилізаторів на часткових навантаженнях

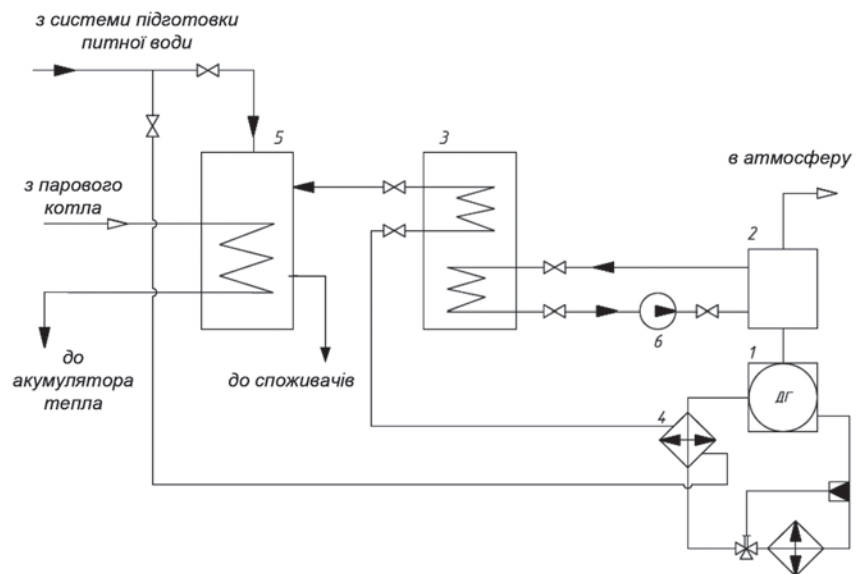
можливе утворення кислого конденсату, що призводить до розвитку корозії на теплообмінних поверхнях, появи додаткових витрат на обслуговування і ремонт;

- використання у котлах-утилізаторах мало-ефективних у тепловому та газодинамічному відношенні теплообмінних поверхонь і схем руху теплоносіїв за низьких значень коефіцієнтів теплопередачі дає відносно високий опір за газовою стороною, що не дозволяє у потрібному ступені збільшувати теплообмінні поверхні, а в деяких випадках погіршує умови роботи деталей циліндропоршневої групи дизелів.

До складу системи комплексної утилізації теплоти СЕУ річкового судна має входити теплогенеруюче обладнання: котел-утилізатор (паровий або водогрійний) і теплообмінники-утилізатори, які відбирають теплоту систем охолодження і змащування ГД і ДГ, а також теплоту із систем наддуву. Важливим елементом системи комплексної утилізації річкових суден повинен стати акумулятор теплоти [9]. Призначення акумулятора теплоти полягає в узгодженні графіків виробництва і споживання теплоти на судні шляхом накопичення теплоти за її надлишкового виробництва СЕУ та видачі споживачам за її відсутності, наприклад, під час стоянки.

На рис. 1 представлено одну із можливих схем комплексної утилізації теплоти ДГ для підігріву води [8].

Генератором теплоти у схемі на рис. 1 є підігрівач-утилізатор (4) контуру охолодження ДГ і котел-



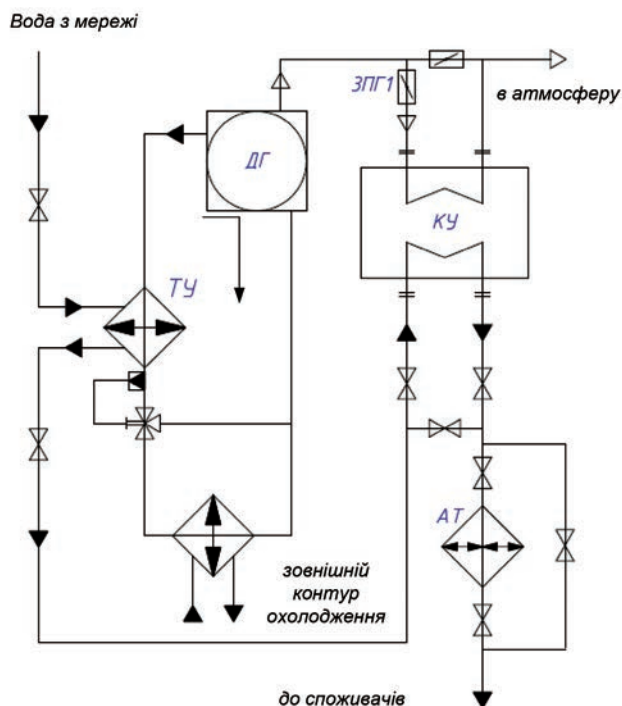
**Рис. 1.** Варіант вмикання обладнання утилізації теплоти для підігріву питної води:

1 – дизель-генератор; 2 – котел-утилізатор; 3 – акумулятор теплоти; 4 – теплообмінник; 5 – бойлер; 6 – насос

утилізатор (2) теплоти відпрацьованих газів ДГ. Обидва джерела передають теплоту у теплоаккумулятор (3), який накопичує теплоту в режимі надлишку ВЕР та віддає її у систему підігріву води у період дефіциту ресурсів. Слід зазначити простоту і функціональність цієї схеми. Зокрема, штатна система охолодження зазнає мінімальної модернізації: у контур охолодження ДГ вбудовується тільки підігрівач-утилізатор (4). Усе регулювання температури контуру охолодження забезпечується штатним терморегулятором. Труба система утилізаційного контуру охолодження, що міститься в аккумуляторі теплоти, може виконувати як функції зарядки, так і розрядки теплового аккумулятора (3). Ефективність роботи цієї схеми визначається насамперед тепловою ефективністю утилізаційного обладнання (4) та (2).

В якості теплообмінників-утилізаторів використовуються охолоджувачі дизелів. Теплова ефективність цих апаратів становить усього 0,17-0,22, чого не досить. Котли-утилізатори також відрізняються низьким коефіцієнтом корисної дії (ККД): зазвичай  $\eta_{\text{кay}}=0,18-0,28$ .

Із метою збільшення ефективності роботи системи комплексної утилізації теплоти до схеми може бути доданий підігрівач-утилізатор. Зокрема, у роботі [8] наведена схема експеримен-



**Рис. 2. Удосконалена схема утилізації теплоти:**  
ЗПГ – заслінки поворотні газові; ДГ – дизель-генератор;  
ТУ – теплообмінник-утилізатор; КУ – котел-утилізатор;  
АТ – акумулятор теплоти

тальної установки із підігрівачем-утилізатором, котлом-утилізатором та аккумулятором теплоти (рис. 2). Ця схема забезпечує ефективний відбір і використання вторинної теплоти дизель-генераторної установки. Водночас на потреби теплопостачання або підігріву води може використовуватися до 90% вторинної теплоти ДГ. Аккумулятор теплоти дозволяє погодити між собою графіки виробництва і споживання теплових потоків. Схема може бути застосована не тільки у складі дизель-генераторної установки, але і у комплексі з головними двигунами.

У теплофікаційних системах утилізації можуть застосовуватися не тільки водогрійні котли, але і парові. Зокрема, на теплоходах пр. 301 та пр. 302 встановлені парові утилізаційні котли серії АКС1,0-16, що використовують теплоту відпрацьованих газів дизель-генераторів із двигунами 6NVD26/20 для виробництва пароводяної суміші, яка насосами подається у пароводяний барабан автономного парового котла (рис. 3).

Вибір типу і характеристик котла-утилізатора завжди індивідуальний та вимагає врахування низки факторів:

- тип судна та умови його плавання;
- місце розміщення котла або котлів;
- неповне забезпечення судна теплою і ентальпія теплоносіїв;
- тип, кількість і характеристики головних і допоміжних двигунів;
- тип палива для двигунів;
- допустимий газодинамічний опір газоходів за двигунами;
- вимоги до глушіння шуму та іскрогасіння.

Водночас можна виділити таку низку загальних вимог, характерних для котлів-утилізаторів теплоти річкових суден:

- висока теплова ефективність;
- мінімальні габарити і маса;
- надійність;
- простота і низька вартість обслуговування;
- мінімальні наведені витрати;
- безпека експлуатації;
- керуваність і можливість регулювання продуктивності.

Для формалізації оцінки доцільно використовувати загальноприйняті критерії досконалості котлів-утилізаторів.

Коефіцієнт компактності поверхні нагрівання:

$$K_k = A_{\text{пн}} / V_{\text{пн}}, \quad (1)$$

де  $A_{\text{пн}}$  – площа поверхні трубного пучка (за стороною газу), м<sup>2</sup>;

$V_{\text{пн}}$  – об'єм, заповнений трубним пучком, м<sup>3</sup>.

Теплова ефективність:

$$\eta_{\text{ку}} = (t_{\text{гвх}} - t_{\text{гввих}}) / (t_{\text{гвх}} - t_{\text{ввх}}), \quad (2)$$

де  $t_{\text{гвх}}$ ,  $t_{\text{гввих}}$  – температури газів на вході та виході котла-утилізатора, °С;

$t_{\text{ввх}}$  – температура води на вході в котел-утилізатор, °С.

Газодинамічний опір:

$$\Delta h_{\text{ку}} = \sum_i h_i, \quad (3)$$

де  $\Delta h_i$  – опір  $i$ -ої ділянки проточної частини КУ, Па.

Відносна маса:

$$M_{\text{ку}} = M_{\text{ку}} / \Phi_{\text{ку}}, \quad (4)$$

де  $M_{\text{ку}}$  – маса котла-утилізатора, кг;

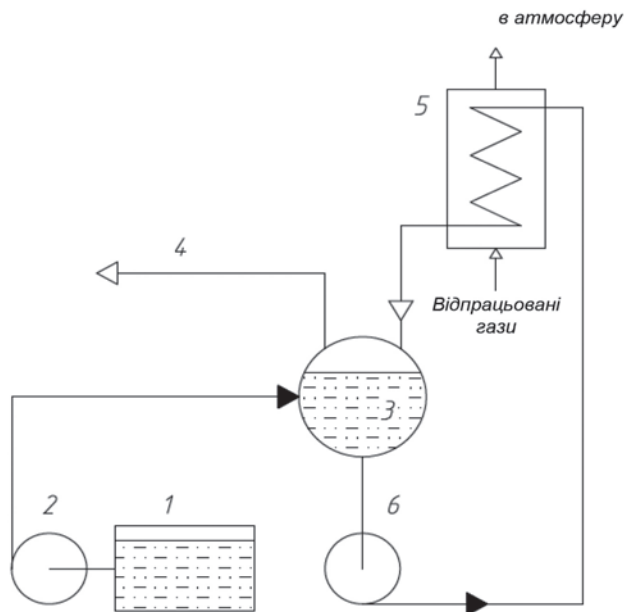
$\Phi_{\text{ку}}$  – утилізаційний тепловий потік, кВт.

Одним із сучасних напрямів покращення основних експлуатаційних показників котельної техніки є пошук і впровадження методів інтенсифікації тепловіддачі. Стосовно котлів-утилізаторів найбільшу ефективність мають методи пристінкової інтенсифікації тепловіддачі шляхом формування на поверхні труб кільцевих канавок-виступів і сферичних лунок. Значний ефект інтенсифікації теплопередачі отримано на трубах об'ємно-крученого профілю зі завихренням.

**Висновки.** На підставі проведеного дослідження можна зробити такі висновки:

- перспективи вдосконалювання суднових котлів-утилізаторів пов'язані не з одним фізичним показником, а з покращенням комплексу характеристик; передусім це тепла ефективність, газодинамічний опір, показники надійності, габарити;

- з урахуванням того, що властивостям високої теплової ефективності, компактності, потужності за останні роки приділяється велика увага на вод-



**Рис. 3. Схема утилізаційної установки:**

1 – теплий ящик; 2 – живильний насос; 3 – паровий сепаратор; 4 – трубопровід до постачальників; 5 – утилізаційний котел; 6 – циркуляційний насос

ному транспорту, значного поширення отримують котли-утилізатори водотрубного типу;

- подальшого покращення експлуатаційних характеристик котлів-утилізаторів можна досягти шляхом використання нових методів інтенсифікації тепловіддачі, застосування ефективних схем струму теплоносіїв, оптимізації конструктивних параметрів технологічності виготовлення, простоти обслуговування і ремонту, забезпечення потрібних і надійних температурних режимів роботи матеріалів котлів.

#### Список літератури:

1. Корнилов Э.В., Афанщенко В.Н., Бойко П.В. Вспомогательные и утилизационные котлы морских судов : справочное пособие. Одесса : Феникс, 2004. 167 с.
2. Денисенко Н.И., Костылев И.И. Идентификация поврежденных элементов судовых котельных установок : учебно-справочное пособие. СПб.: Элмор, 2007. 152 с.
3. Иванов В.Л., Леонтьев Л.И., Э. А. Манушин, Осипов М.И. Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок: учебник для ВУЗов. 2-е изд. Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 592 с.
4. Фокин В.М. Основы энергосбережения и энергоаудита: монография. Москва : Машиностроение, 2006. 256 с.
5. Фролов К.В., Рундыгин Ю.А., Гильде Е.Э., Судаков А.В. Машиностроение. Том IV-18: энциклопедия. Москва : Машиностроение, 2009. 400 с.
6. Ahsan A. Heat Analysis and Thermodynamic Effects. Ed. by Teodora S. InTech, 2011. 394 p.
7. Amano R.S., Sunden B. Thermal Engineering in Power Systems. Ed. by R.S. Amano. WIT Press, 2008. 416 p.
8. Gupta J.P. Working with heat exchangers – questions and answers. Hemisphere Publishing Corporation, 1990. 607 p.
9. Stewart M., Lewis O.T. Heat Exchanger Equipment Field Manual: Common Operating Problems and Practical Solutions. Gulf Professional Publishing, Elsevier, 2013. 488 p.

10. Stolten D. Transition to Renewable Energy Systems: Energy Process Engineering. Ed. by Scherer V. Wiley-VCH Verlag GmbH. KGaA, 2013. 977 p.

**Daki O.A., Shtrybets V.V., Tkachenko V.V., Ryashchenko O.I. METHODS OF INCREASING THE EFFICIENCY OF SHIP BOILERS – HEAT RECOVERY**

*The article emphasizes that the energy efficiency of flights is one of the most promising areas in terms of reducing the cost of transportation by water transport. All shipping companies are trying to reduce fuel consumption, and shipbuilding companies are developing new ways to save it. A promising area of fuel economy in the operation of marine power plants is the useful use of exhaust gas heat from both main and auxiliary engines. Researchers have shown that significant fuel savings in the operation of SEU can be obtained through the useful use of secondary energy resources (VER), which include: the heat of the exhaust gases of the main engines (GD) and diesel generators (DG), the heat of the cooling circuits and lubrication of GD and DG, heat of the charge air cooling system, etc. The secondary heat fluxes (VTS) of the SEU of the vessels in operation are quite large and, if used correctly, can fully cover the heat needs of the vessel in running conditions. Passenger ships, dry cargo ships, oil ore carriers, tugs and some other groups of fleet rolling stock are characterized by a significant excess of VTP capacity over heat needs, or insufficient full use of VTP. In this regard, it is advisable to consider the possibility of using VTP without conversion or with the conversion into mechanical or electrical energy. Prospects for the improvement of ship recovery boilers are associated not with a single physical indicator; but with the improvement of a set of characteristics. First of all, it is thermal efficiency, gas-dynamic resistance, reliability indicators and dimensions. Given the fact that the properties of high thermal efficiency, compactness and power in recent years, much attention is paid to water transport, and water-type waste heat boilers are becoming widespread. Further improvement of operational characteristics of recovery boilers can be achieved by using new methods of heat transfer intensification, application of efficient heat transfer current schemes, optimization of design parameters in the direction of manufacturability, ease of maintenance and repair; providing necessary, in terms of reliability, temperature regimes of boiler materials.*

**Key words:** energy efficiency, waste heat boiler, ship power plants, shipbuilding, fleet operation.

УДК 621.311:004

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/37>**Дакі О.А.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Якусевич Ю.Г.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Колесник В.В.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Тришин В.В.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

## ІМПУЛЬСНО-МОДУЛЯЦІЙНЕ РЕГУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СУДНОВИХ СИСТЕМ

*Розвиток сучасних напівпровідникових приладів і зростання швидкодії мікропроцесорної техніки створили можливість застосування складних законів модуляції у системах з імпульсно-модуляційним перетворенням енергії у роботі як усього суднового обладнання, так і для забезпечення управління рухом судна. Проблема підвищення техніко-економічних показників автономних суднових електроенергетичних систем має комплексний характер і пов'язана із підвищенням якісних характеристик як первинних, так і вторинних перетворювачів енергії у межах проєктів модернізації і створення нової техніки, а також із оптимізацією енерговитрат під конкретні типи споживачів електричної енергії різного функціонального призначення.*

*У статті розкрито основні процеси та побудовано схеми імпульсно-модуляційного регулювання електроенергетичних суднових систем. Досягнення потрібних техніко-економічних показників (економічність, надійність, якість виробленої енергії, електромагнітна сумісність, масогабаритні характеристики) таких вторинних перетворювачів енергії, як перетворювачі із ділянкою постійного струму, вимагає використання багаторазової комутації із різними методами модуляції разом із широтно-імпульсним регулюванням, а також східчастих принципів перетворення енергії.*

*Визначено, що для раціонального використання ресурсів управління у системі перетворювач частоти-асинхронний двигун, слід використовувати адаптивний підхід до вибору виду широтно-імпульсної модуляції залежно від частоти електромагнітного поля (ротора асинхронного двигуна), який полягає у переході від прямокутного закону управління автономним інвертором напруги у верхньому діапазоні частот електромагнітного поля до синусоїдального на підвищених частотах квантування у діапазоні низьких частот, здійснення котрих потребує використання мікропроцесорного управління і розроблення відповідного алгоритмічного забезпечення.*

*Для вирішення завдань динамічного синтезу імпульсних перетворювачів енергії практичний інтерес представляє розроблення алгоритмічних процедур синтезу з урахуванням квазівстановлених режимів без отримання усереднених моделей силової частини як об'єкта управління.*

**Ключові слова:** електрообладнання, регулювання, судно, управління, широтно-імпульсний перетворювач.

**Постановка проблеми.** Досягнення необхідних техніко-економічних показників (економічність, надійність, якість виробленої енергії, електромагнітна сумісність, масогабаритні характеристики) таких вторинних перетворювачів енергії, як перетворювачі із ділянкою постійного струму, вимагає використання багаторазової комутації із різними методами модуляції разом із широтно-імпульсним регулюванням, а також східчастих принципів перетворення енергії. Тому під-

вищення якісних характеристик перетворювачів енергії із ділянкою постійного струму з багаторазовою комутацією і широтно-імпульсним регулюванням є актуальною проблемою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** За цим напрямом були проведені дослідження і присвячені роботи таких закордонних і вітчизняних науковців, як Т.А. Глазенко, Б.Ф. Дмитрієв, Е. Джура, О.О. Єфімов, А.В. Кобзев, А.Є. Козярук, Б. Куо, А. Ланне, Ю.К. Розанов, Р.Т. Шрейнер та

інших. У роботах цих авторів представлено теоретичні основи дослідженої проблематики, проте не вирішено питання імпульсно-модуляційного регулювання електроенергетичних суднових систем.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розкриття основних процесів та побудова схем імпульсно-модуляційного регулювання електроенергетичних суднових систем.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Ми розкриємо загальні принципи побудови, структури та формування елементної бази імпульсних перетворювачів енергії. Залежно від функціонального призначення споживачів і способів перетворення енергії вторинні перетворювачі вирішують такі завдання: трансформація, регулювання, стабілізація, випрямлення, інвертування, конвертування, перетворення частоти, перетворення кількості фаз, симетрування, компенсація фазових зрушень, перетворення джерела напруги у джерело струму, фільтрація та посилення звукової частоти.

Кожен функціонально-значимий блок здійснює зазвичай різні комбінації вищезазначених завдань. Вимоги до якісних показників вихідних координат функціонально-завершених блоків визначаються приймачами електричної енергії.

Головним фактором, який забезпечує ефективність використання сучасної елементної бази, є можливість застосування імпульсно-модуляційного управління, що вирішує такі дві основні задачі: формування заданого виходу і відтворення заданого управляючого входу, в основі яких лежать амплітудно- та широтно-імпульсні методи перетворення енергії [1, 2].

Вимоги до імпульсно-модуляційних перетворювачів завжди є різними, що допускає використання значної кількості типових перетворюючих пристроїв і видів модуляції.

В імпульсній техніці зміну за визначеним законом тривалості або амплітуди імпульсів, сформованих із визначеною частотою, прийнято називати імпульсною модуляцією [3].

Нині широкого застосування набувають широтно-імпульсні перетворювачі, які мають низку переваг:

- високий коефіцієнт корисної дії (ККД), оскільки втрати потужності на регулюючому елементі перетворювача є незначними порівняно із втратами потужності під час безперервного регулювання;

- мала чутливість до змін температури навколишнього середовища, оскільки регулюючим фактором є час провідності керуючого ключа, а не

внутрішній опір регулюючого елемента за безперервного регулювання;

- висока швидкодія, що особливо важливо для автоматизованого електропривода;

- гнучкість регулювання вихідної напруги у широкому діапазоні.

Роль широтно-імпульсних перетворювачів істотно зростає, коли первинна мережа виконується на постійному струмі, тобто відпадає необхідність у застосуванні випрямника струму.

Однак широтно-імпульсним перетворювачам властиві такі недоліки:

- імпульсний режим роботи регулюючого елемента призводить до необхідності встановлювати вхідні та вихідні фільтри, що зумовлює інерційність процесів регулювання у замкнутих системах;

- високі швидкості вмикання та вимикання струму в силовому ланцюзі широтно-імпульсного перетворювача, що призводить до виникнення радіоперешкод.

Незважаючи на зазначені недоліки, застосування широтно-імпульсних перетворювачів є досить перспективним у випадках, коли на перше місце висуваються такі вимоги, як висока економічність, надійність, малі габарити, мала чутливість до коливань температури, висока гнучкість і точність регулювання.

Найбільш економічним способом регулювання кутової швидкості двигуна постійного струму (ДПС) є зміна напруги, яка підводиться до якірного ланцюга. Із цією метою використовуються такі системи: керований випрямник – двигун постійного струму (КВ-ДПС) та широтно-імпульсний перетворювач – двигун постійного струму (ШП-ДПС).

Погіршення енергетичних характеристик системи КВ – ДПС за малих навантажень, особливо її коефіцієнта потужності, та негативний вплив вищих гармонік на мережу призвело до використання систем ШП – ДПС [4]. ШП (рис. 1) містить некерований випрямник (НВ), тому під час живлення від мережі змінного струму коефіцієнт потужності такого приводу збільшується практично до одиниці. Крім того, підвищення частоти комутації у ШП до  $1\div 20$ кГц замість  $150\div 300$ Гц дозволяє зменшити нерівномірність обертання двигуна, розширити діапазон регулювання і підвищити жорсткість механічних характеристик замкнених систем електропривода.

Для управління електронними ключами у ШП використовуються симетричний, несиметричний і черговий режим переключення.

Аналіз гармонійного складу вихідної напруги  $u_n(t)$  для режимів роботи виду (рис. 2) детально не розглянуто.



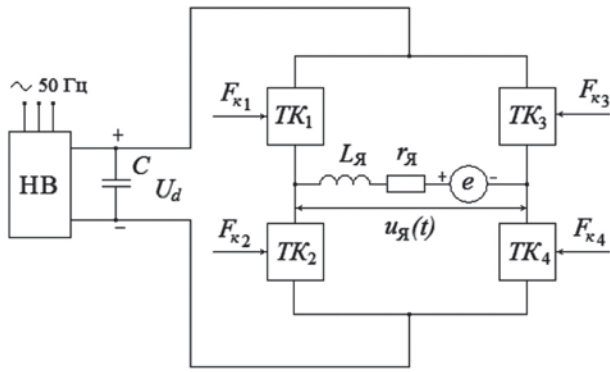


Рис. 1. Система ШПП - ДПС

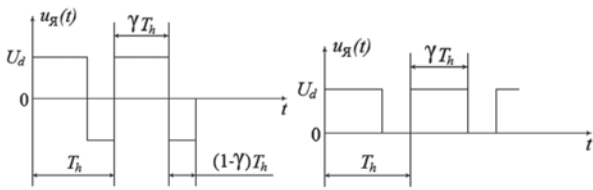


Рис. 2. Епюра  $u_{я}(t)$ . Структура перетворювачів частоти у системі частотного регулювання швидкості електропривода змінного струму:  
а) за симетричного управління;  
б) за несиметричного управління

Нині спостерігається стійка тенденція до переходу від виконавчих елементів постійного струму до виконавчих елементів змінного струму, а також до використання прямого мікропроцесорного управління силовими напівпровідниковими перетворювачами [5, 6].

Для асинхронних двигунів, які отримали найбільшого поширення і споживають близько 60% енергії, використовуються як скалярні, так і векторні методи управління [5]. Найпоширенішим способом здійснення частотного управління асинхронними двигунами є використання перетворювачів частоти (ПЧ) із чітко вираженою ланкою постійного струму [7].

Розрізняють структури ПЧ із роздільним управлінням напругою та частотою, а також із широтно-імпульсною модуляцією, що здійснюють одночасне регулювання частоти та напруги. Регулювання напруги у структурах з роздільним керуванням здійснюється за допомогою перетворювачів змінного струму у постійний, виконаних на базі КВ або НВ та ШПП. Для управління двофазними асинхронними двигунами (АДД) використовуються два однофазних автономних інвертори напруги (АІН), підключених до обмоток управління та виконаних за мостовою схемою (рис. 3). Для регулювання швидкості АДД використовуються широтно-імпульсне регулювання (ШІР) та широтно-імпульсна

модуляція (ШІМ) на несучій частоті [8]. Системи частотного управління АДД забезпечують кругове електромагнітне поле у всьому діапазоні регулювання швидкості, що дозволяє більш повно використати електродвигун за потужністю, підвищує рівномірність обертання і збільшує ККД.

ПЧ для трифазних асинхронних двигунів будуються на основі використання трифазних інверторів напруги і струму [8].

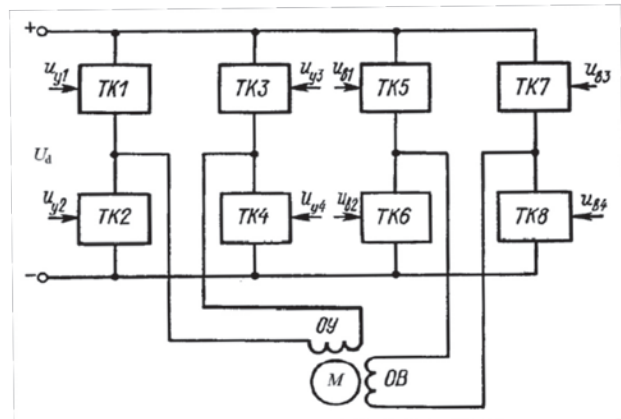


Рис. 3. Структура двофазного інвертора напруги для управління АДД

Структура ПЧ із ланкою постійного струму та КВ (рис. 4) реалізує базові алгоритми управління з  $\neq$ ,  $2\neq/3$  градусною провідністю, які характеризуються несинусоїдальністю характеру вихідного струму у статорних обмотках та пульсаціями моменту двигуна, що спричинює нерівномірність обертання двигуна, особливо на малих швидкостях.

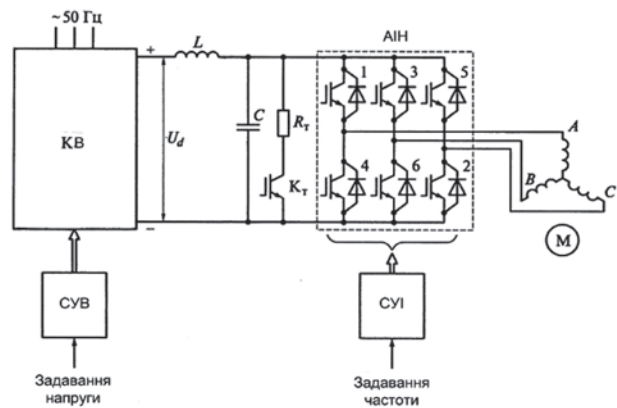


Рис. 4. Структура перетворювача частоти із ланкою постійного струму та керованим випрямником

Зазначені недоліки частково усуваються у структурі із НВ та автономним інвертором напруги (рис. 5) за рахунок використання ШІР або ШІМ, які використовуються для керування асинхронним двигуном (АД) малої і середньої потужності.

У цьому випадку вплив процесів перетворення на первинну мережу є мінімальним, а енергія, накопичена АД у режимах гальмування, розсіюється за допомогою резистора.

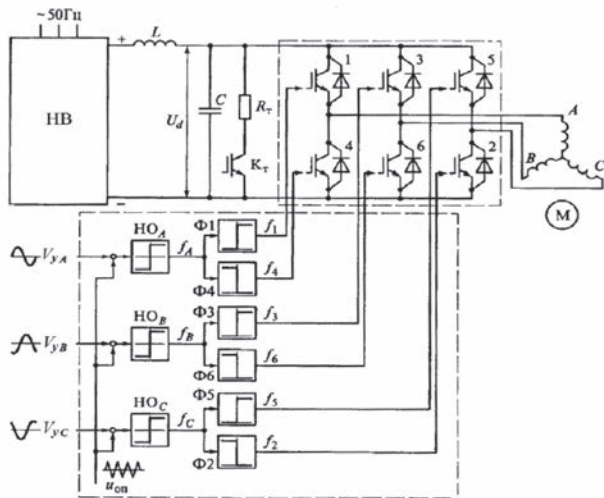


Рис. 5. Перетворювач частоти із трифазним інвертором і широтно-імпульсною модуляцією

Для рекуперації енергії у первинну мережу (ПЕКЛЮ великої потужності) використовуються структури (рис. 6) із активним випрямником напруги (АВН).

Пристрої управління ПЧ повинні реалізувати спосіб, який забезпечив би виконання двох основних вимог, висунутих до системи ПЧ-АД:

- мінімізація втрат у двигуні та мінімізація пульсацій моменту, зумовлених впливом полів першої і вищої гармонік;

– мінімізація втрат в елементах перетворення.

Ці вимоги є суперечливими, оскільки для покращення роботи двигуна потрібно підвищувати несущу частоту, а для зменшення втрат у перетворювачі її варто зменшувати. Крім того, двосторонній енергетичний зв'язок вимагає додаткових переключень у перетворювачі.

Проектування імпульсних перетворювачів є ітеративним процесом, який містить етапи функціонального проектування, розробки принципової схеми, проведення випробувань, доробки за їхніми результатами принципової або функціональної схеми.

Успішне розв'язання задач проектування можливе за сполучення комп'ютерних та аналітичних методів дослідження. Складність математичного опису електромагнітних процесів, які відбуваються у напівпровідникових перетворювачах, створює значні труднощі під час аналізу і синтезу режимів їх роботи. Тому нині значна увага приділяється розробці наближених методів дослідження електромагнітних процесів у квазівстановлених та перехідних режимах роботи імпульсних перетворювачів енергії.

Усі основні методи дослідження перетворювачів містять низку допущень: напівпровідникові елементи мають ідеальні характеристики, а комутація у ланцюгах відбувається миттєво. Як показали результати дослідження, ці допущення у більшості випадків на практиці виявляються прийнятними, аналіз перехідних і квазівстановлених процесів у перетворювачах зводиться до дослідження електричних ланцюгів зі стрибкоподібно змінними параметрами.

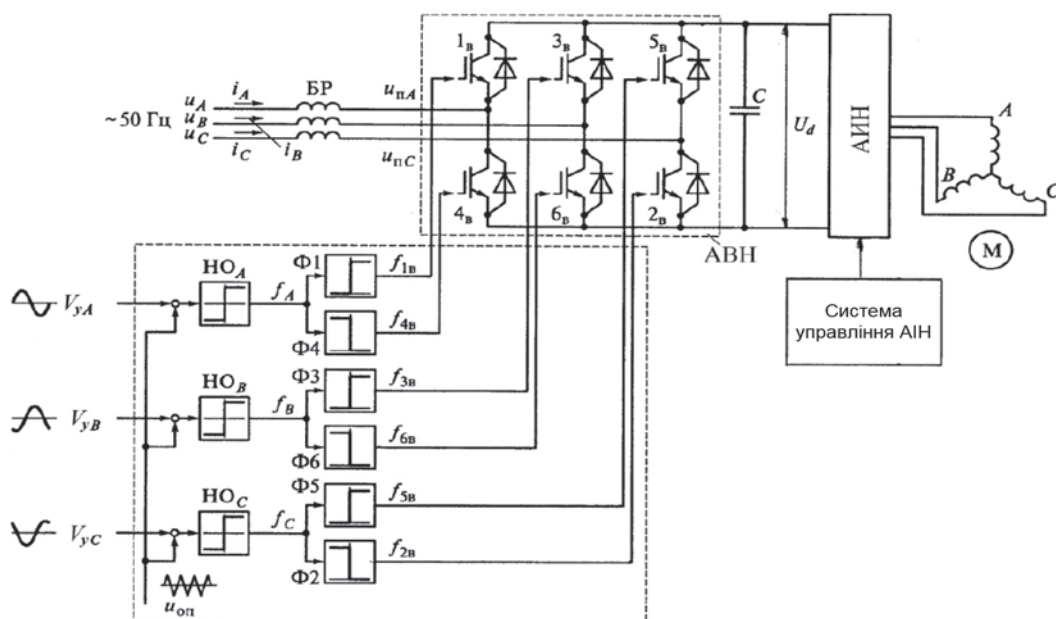


Рис. 6. Структура перетворювача частоти з активним випрямником

Вибір аналітичного методу і спрощень багато в чому залежить від цілей, які встановлюються під час аналізу. Методи аналізу поділяються на часові, спектральні та операторні, засновані на використанні комутаційних функцій і рядів Фур'є, кожний із яких має свою раціональну галузь застосування.

Із розвитком імпульсно-модуляційних способів управління на підвищених частотах зростає роль спектральних методів дослідження структур, в яких задані моменти замикання і розмикання ключових елементів, тобто структур на цілком керованих ключах. Для цих структур формується комутаційна функція  $F_k(t)$ , а сигнал на виході ключового блоку знаходиться у вигляді добутку комутаційної і вхідної  $f(t)$  функції та представляється у формі тригонометричного ряду Фур'є. Подальший аналіз виконується методом накладення за схемами заміщення для кожної гармоніки. Цей підхід використовується під час аналізу гармонійного складу струмів і напруг та розрахунку енергетичних характеристик.

Для аналізу перехідних і квазівстановлених режимів вихідна координата представляється у вигляді:

$$Y(s) = L[f(t)F_k(t)]\Phi(s), \quad (1)$$

де  $\Phi(s)$  – передаточна функція ланцюга навантаження.

Вихідна координата в часовій області знаходиться за допомогою зворотного перетворення Лапласа від  $Y(s)$ .

Робота імпульсного перетворювача у складі автономної суднової системи електроживлення висуває особливі вимоги до рівня і гармонічних характеристик складників, які надходять до загальної мережі судна і генеруються перетворювачем. Якщо якість вихідних параметрів перетворювача прямо залежить від вимог і типу споживача перетвореної величини, то завади, які генеруються перетворювачем у загальну мережу, повинні бути зведені до мінімуму і мати гармонічний склад, що мінімально впливає на інших споживачів у межах загальної автономної суднової мережі. Крім того, вихідні характеристики перетворювача повинні мінімально залежати від якості електроживлення у первинній мережі. Перераховані вимоги визначають пріоритетність застосування керованих перетворювачів із ланкою постійного струму. Для цього типу перетворювачів характерний мінімальний зміст вищих гармонік у вихідній напрузі інвертора за використання різних законів ШІМ. Водночас роль вихідних фільтрів у забезпеченні синусої-

дальності напруги також зводиться до мінімуму, оскільки відносний зміст вищих гармонік є незначним. Основні обмеження використання способу ШІМ полягають у складності побудови систем управління ключовими елементами. Із цією метою використовуються цілком керовані високочастотні напівпровідникові ключі, такі як IGBT і IGCT, із прямим мікропроцесорним управлінням.

Загальні структурні схеми управління багатофазним силовим приводом будуються за тими ж самими принципами, що і трифазні системи. Відмінності спостерігатимуться тільки в законах управління і за додаткових можливостей роботи в аварійних режимах, оскільки ці системи менш критичні до амплітуди і фази напруги живлення і можуть організувати обмежені режими роботи із неповною кількістю фаз.

**Висновки.** Сучасний етап розвитку систем електроприводу характеризується стійкою тенденцією переходу від виконавчих елементів постійного струму до виконавчих елементів змінного струму, задля реалізації частотного управління якими переважно застосування отримали перетворювачі частоти з явно вираженою ланкою постійного струму.

Залежно від техніко-економічних показників до системи ПЧ-АД використовуються структури ПЧ із розділним і спільним управлінням частотою і напругою, кожна з яких має свої переваги і недоліки. Наразі найбільшого поширення отримали перетворювачі частоти з некерованим випрямником та автономним інвертором напруги із синусоїдальною широтно-імпульсною модуляцією другого роду, що мінімізують вплив процесів перетворення на первинну мережу.

Для раціонального використання ресурсів управління у системі ПЧ-АД потрібно використовувати адаптивний підхід до вибору виду широтно-імпульсної модуляції залежно від частоти електромагнітного поля (ротора АД), що полягає у переході від прямокутного закону управління АІН у верхньому діапазоні частот електромагнітного поля до синусоїдального на підвищених частотах квантування в діапазоні низьких частот, здійснення яких вимагає використання мікропроцесорного управління і розроблення відповідного алгоритмічного забезпечення.

Для вирішення завдань динамічного синтезу імпульсних перетворювачів енергії практичний інтерес представляє розроблення алгоритмічних процедур синтезу з урахуванням квазівстановлених режимів без отримання усереднених моделей силової частини як об'єкта управління.

**Список літератури:**

1. Дмитриев Б.Ф. Автономные системы электропитания с многоуровневыми выпрямителями и широтно-импульсным регулированием : Дисс.. доктора технических наук. Санкт-Петербург, 2002. 330 с.
2. Джури Э. Импульсные системы автоматического регулирования. Пер. з англ. Бермант М.А., Грин Ж.Л. Москва : Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. 455 с.
3. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника. Москва : Издательский дом МЭИ, 2007. 631 с.
4. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода. Москва : Энергоатомиздат, 2000. 495 с.
5. Белов М.П., Новиков А.Д., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов : учебник для высших учебных заведений. Москва : АСАДЕМА, 2004. 574 с.
6. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. Москва : АСАДЕМА, 2006. 264 с.
7. Кобзев А.В. Многозонная импульсная модуляция. Новосибирск : Наука, 1979. 297 с.
8. Ковчин С. А., Сабинин Ю. А. Теория электропривода : Учебник для вузов. СПб : Энергоатомиздат, 2000. 496 с.
9. Mao H., Fred C. Y. L., Borogevich D., Hiti S. Review of High-Performance Three – Phase Power-Factor Correction Circuits. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1997. Vol. 44, № 4. P. 437-446.
10. Mohan N., Tore M.U., William P.R. Power electronics: converters, applications and design. New York, 1995. 802 p.

**Daki O.A., Yakusevich Yu.G., Kolesnik V.V., Trishin V.V. PULSE-MODULATORY REGULATION OF ELECTRIC POWER SYSTEMS**

*The development of modern semiconductor devices and the growth of microprocessor technology have made it possible to apply complex laws of modulation in systems with pulse-modulation energy conversion in operation, as all ship equipment, and to ensure control of ship traffic. The problem of improving the technical and economic performance of autonomous ship power systems is complex and is associated with improving the quality characteristics of both primary and secondary energy converters in the projects of modernization and creation of new equipment, as well as optimizing energy consumption for specific types of electricity consumers, functional purpose. The purpose of the article is to reveal the main processes and construction of pulse-modulation control schemes of electric ship systems. Achieving the necessary technical and economic indicators (efficiency, reliability, quality of energy produced, electromagnetic compatibility, mass and size characteristics) of such secondary energy converters as converters with a section of direct current, requires the use of multiple switching with different modulation methods in combination with pulse-width also stepped principles of energy conversion.*

*It was determined that for rational use of control resources in the system frequency converter – induction motor it is necessary to use an adaptive approach to the choice of pulse-width modulation depending on the frequency of the electromagnetic field (rotor of induction motor), which consists in transition from rectangular control law to autonomous voltage inverter; the upper frequency range of the electromagnetic field to sinusoidal at high frequencies of quantization in the low frequency range, the implementation of which requires the use of microprocessor control and the development of appropriate algorithmic software.*

*To solve the problems of dynamic synthesis of pulsed energy converters, it is of practical interest to develop algorithmic synthesis procedures taking into account quasi-established modes without obtaining averaged models of the power part as a control object.*

**Key words:** *electrical equipment, regulation, ship, control, pulse-width converter.*

**Іваненко В.М.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Федунов В.М.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Ліганенко В.В.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Тришин В.В.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

## ПОБУДОВА ОНТОЛОГІЧНОЇ МОДЕЛІ НЕСЕННЯ ВАХТИ НА МОРСЬКОМУ СУДНІ

Одним з основних підходів щодо забезпечення безпечного судноводіння є організація ефективного несення вахти відповідно до вимог Міжнародної конвенції про підготовку й дипломування моряків і несення вахти 1978 року. Питання безпеки мореплавання завжди пов'язані з рівнем кваліфікації персоналу й сформованими навичками дій у стандартних або нестандартних ситуаціях. Одним із підходів для аналізу ситуацій виникнення аварійних ситуацій, а також дій персоналу вахти на морському судні може бути підхід, заснований на застосуванні онтологічної моделі несення вахти. Натепер найпоширенішою є онтологічна модель, що базується на двох глобальних категоріях – просторі й часі. Однак така модель застаріла. Більш повною та сучасною слід вважати онтологічну модель, що базується на трьох глобальних категоріях – просторі, часі та якості. Можливі негативні сценарії виникнення аварійних ситуацій можна передбачити й локалізувати, чітко дотримуючись регламенту робіт і посадових інструкцій. Регламент несення ходової вахти необхідно вдосконалювати на основі аналізу помилок, кількісної та якісної обробки інформації. У статті розглянуто питання побудови онтологічної моделі несення вахти на морському судні. Онтологія являє собою формальний явний опис понять в аналізованій предметній області (класів), властивостей кожного поняття та обмежень. У роботі визначено характеристики елементів онтології та описані їх значення. Створена онтологія предметної області «Несення вахти», яка складає основу бази знань досліджуваної проблемної області. Розробка онтологічних моделей і відповідних інтелектуальних інформаційних систем базується на роботах вчених, які зробили вагомий внесок у розвиток теорії прийняття рішень і розробку методів вирішення прикладних завдань: Отримані результати дозволяють перейти до розробки експертної системи «Несення вахти», об'єктивізувати й на вищому рівні автоматизувати процес вибору методів ефективного несення вахти на морському судні. Таким чином, побудова онтологічної моделі, з одного боку, дозволить детально аналізувати помилки обробки інформації та вибору управлінського рішення під час несення вахти на морському судні, з іншого боку, є основою для подальшої автоматизації відповідних процесів.

**Ключові слова:** несення вахти, управління безпекою на суднах, онтологічна модель, база знань.

**Постановка проблеми.** Натепер Україна є членом Міжнародної морської організації (International Maritime Organization, IMO) і підписала основні міжнародні нормативні акти з безпеки мореплавства, прийняті в рамках IMO, у тому числі Міжнародну конвенцію про підготовку й дипломування моряків і несення вахти 1978 року з поправками. Таким чином, питання безпеки мореплавання завжди пов'язані з рівнем кваліфікації персоналу й сформованими навичками дій у стандартних або нестандартних ситуаціях. Одним із підходів для аналізу виникнення ава-

рійних ситуацій, а також дій персоналу вахти на морському судні може бути підхід, заснований на застосуванні онтологічної моделі несення вахти. Онтологічна модель – це поняттєва конструкція, що базується на певних глобальних категоріях, таких як загальні засади. Натепер найпоширенішою є онтологічна модель, що базується на двох глобальних категоріях – просторі й часі. Однак така модель застаріла. Більш повною та сучасною слід вважати онтологічну модель, що базується на трьох глобальних категоріях – просторі, часі та якості. Побудова онтологічної моделі, з одного

боку, дозволить детально аналізувати помилки обробки інформації та вибору управлінського рішення під час несення вахти на морському судні, з іншого боку, є основою для подальшої автоматизації відповідних процесів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Роботи А.М. Анісімова, В.І. Меньшикова, В.М. Глушенка, Ф.Д. Кукуї [1–3], А.Ж. Смирнова [4] присвячені дослідженням процесів безпечного судноводіння, в тому числі з урахуванням питань відповідного несення вахти на морських судах.

Розробка онтологічних моделей і відповідних інтелектуальних інформаційних систем базується на роботах учених, які зробили вагомий внесок у розвиток теорії прийняття рішень і розробку методів вирішення прикладних завдань: Д.Ю. Запорожець, Ю.А. Кравченко, А.А. Лежебоков [5], Т.А. Гаврилова [6], Н.А. Скворцов [7], Н.В. Лукашевич [8], К.П. Лис [9], Д.В. Ланде [10], В.В. Бова, Д.В. Лещанов [11; 12].

**Постановка завдання.** Завданням статті є розгляд питання побудови онтологічної моделі несення вахти на морському судні, створення онтології предметної області «Несення вахти».

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Потреба в розробці онтологій виникає з таких причин: для спільного використання людьми або програмними агентами загального розуміння структури інформації; для можливості повторного використання знань предметної області; для того, щоб зробити припущення предметної області явними; для відділення знань предметної

області від оперативних знань; для аналізу знань предметної області.

Онтологія являє собою формальний явний опис понять в аналізованій предметній області (класів (іноді їх називають поняття)), властивостей кожного поняття, що описують різні особливості й атрибути поняття (слотів (іноді їх називають ролями або властивостями)), і обмежень, накладених на слоти (фацетів (іноді їх називають обмеженнями ролей)) [5; 6]. Онтологія разом із набором індивідуальних примірників класів є основою для побудови бази знань, наприклад, експертної системи «Несення вахти».

Процес побудови онтології предметної області складається з таких основних етапів [7]: визначення області й масштабу онтології; розгляд варіантів повторного використання існуючих онтологій; перерахування важливих термінів в онтології; визначення класів та ієрархії класів; визначення властивостей класів – слотів; визначення фацетів слотів; створення екземплярів.

Модель онтології містить елементи, які відповідають сутностям предметної області, кожен об'єкт характеризується значеннями набору атрибутів і представляється як множина впорядкованих пар виду:

$$P = \{a_i, w_i\}, \quad (1)$$

де  $a_i$  – атрибут об'єкта;

$w_i$  – значення атрибута  $i \in [1..n]$ ,  $n$  – кількість атрибутів.

Узагальнена структура онтологічної моделі несення вахти, яка є основою для побудови відповідної бази знань, наведена на рис. 1.



Рис. 1. Узагальнена структура онтологічної моделі несення вахти

Процес підготовки судна до рейсу можливо представити у вигляді елементів відповідного навігаційного й технічного забезпечення (рис. 2).

Відповідні посадові особи повинні надати належну організацію несення безпечної вахти, визначивши її склад, необхідний для забезпечення постійного належного спостереження (рис. 3).

Ще одна група чинників безпечного несення вахти (рис. 4 і рис. 5) пов'язана з управлінськими рішеннями.

Фактори безпечного несення вахти зумовлені досвідом, професійною майстерністю особо-

вого складу суден і підтриманням у готовності технічних засобів. У результаті наведених вище факторів і процедур із підготовки судна до рейсу досягається комплексний підхід, який передбачає належне навігаційне й технічне забезпечення [4].

Під час визначення складу вахти необхідно врахувати параметри, наведені на рис. 6, які об'єднують природні, техногенні й людські фактори.

Важливим елементом у системі вдосконалення управління безпекою на судах є вахтовий помічник, який зобов'язаний [4]:

- нести вахту на ходовому містку;



Рис. 2. Об'єкти онтологічної моделі для навігаційного й технічного забезпечення

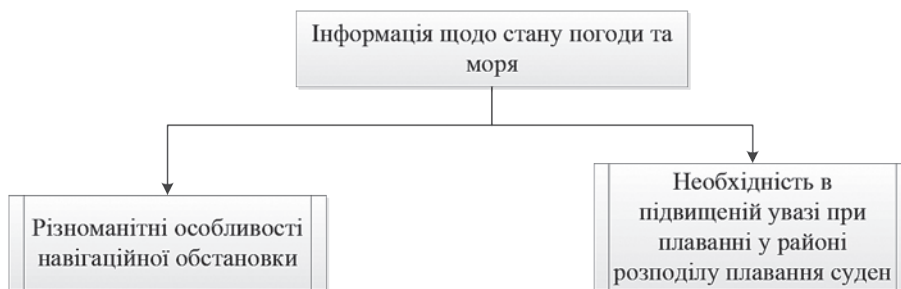


Рис. 3. Об'єкти онтологічної моделі для забезпечення організації несення безпечної вахти



Рис. 4. Об'єкти онтологічної моделі в умовах додаткового навантаження на вахту

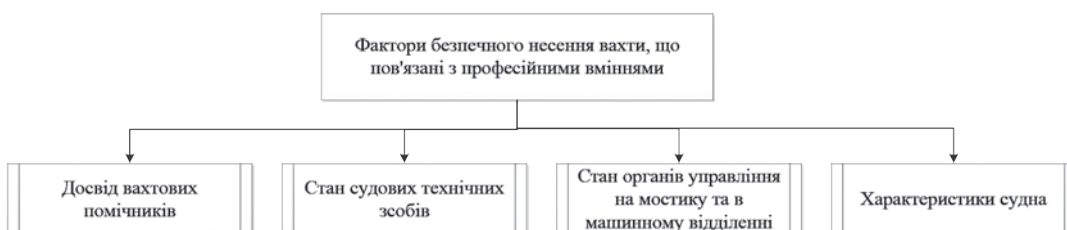


Рис. 5. Об'єкти онтологічної моделі безпечного несення вахти

- не залишати місток ні за яких обставин без належної заміни;
- продовжувати нести відповідальність за безпеку плавання судна, незважаючи на присутність на ходовому містку капітана, до тих пір, поки капітан не інформує вахтового помічника про те, що він взяв командування на себе, і це буде взаємно зрозуміле;
- під час виникнення будь-яких сумнівів щодо вибору необхідних заходів для забезпечення безпеки судна довести до відома капітана;
- перевіряти (через досить часті проміжки часу) курс, місце розташування, швидкість судна, використовуючи для цього будь-які наявні навігаційні засоби.

Перевірка працездатності суднового навігаційного обладнання під час рейсу повинна виконуватися так часто, як це практично доцільно й коли дозволяють обставини, і особливо якщо існує ймовірність появи або небезпечного розвитку ситуації, яка може вплинути на безпеку плавання

судна. У таких випадках необхідно проводити відповідні записи в судновому журналі. Зазначені перевірки повинні також проводитися перед приходом у порт і перед виходом із порту. Параметри здійснюваного контролю вахтовим помічником наведені на рис. 7.

У разі використання радіолокатора вахтовий помічник повинен вибрати відповідну шкалу дальності, постійно стежити за радіолокаційним зображенням і своєчасно почати радіолокаційну прокладку або систематичний аналіз руху цілі. Випадки, за яких вахтовий помічник повинен негайно сповістити капітана, наведені на рис. 8.

Водночас вахтовий механік повинен вимагати від складу машинної вахти доповіді про потенційно небезпечні ситуації, які можуть мати несприятливий вплив на машини й механізми й поставити під загрозу безпеку людського життя або судна.

У разі необхідності вахтовий механік повинен залучити для надання допомоги з технічного

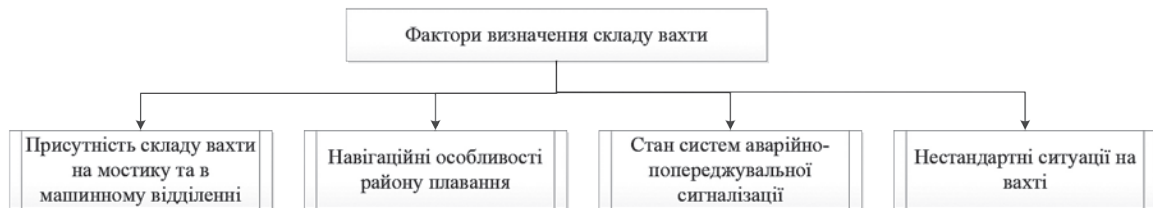


Рис. 6. Об'єкти онтологічної моделі для визначення складу вахти



Рис. 7. Об'єкти онтологічної моделі для визначення дій вахтового помічника



Рис. 8. Об'єкти онтологічної моделі безпечного плавання





Рис. 9. Об'єкти онтологічної моделі безпечного несення вахти в машинному відділенні

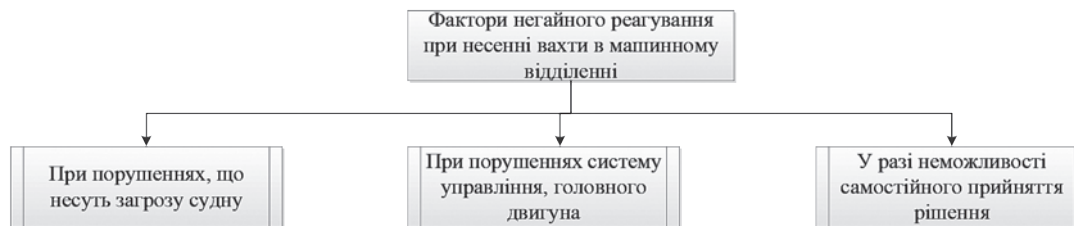


Рис. 10. Об'єкти онтологічної моделі негайного реагування під час несення вахти в машинному відділенні

обслуговування, проведення ремонтно-профілактичних робіт іншого механіка, в завідуванні якого знаходиться експлуатоване устаткування. Випадки негайного реагування старшого механіка за доповіддю вахтового механіка наведені на рис. 9.

**Висновки.** Можливі негативні сценарії виникнення аварійних ситуацій можна передбачити й локалізувати, чітко дотримуючись регламенту робіт і посадових інструкцій. Регламент несення ходової вахти необхідно вдосконалювати на основі аналізу помилок, кількісної та якісної обробки інформації.

У статті проведена структуризація та формалізація знань предметної області «Несення вахти» на основі онтологічного підходу. Визначено характеристики елементів онтології та описані їх значення. Створена онтологія предметної області «Несення вахти», яка складає основу бази знань досліджуваної проблемної області. Отримані результати дозволяють перейти до розробки експертної системи «Несення вахти», об'єктивізувати й на вищому високому рівні автоматизувати процес вибору методів ефективного несення вахти на морському судні.

#### Список літератури:

1. Анисимов А.Н., Меньшиков В.И. Особенности социального управления в системах менеджмента безопасностью. *Вестник МГТУ*. 2003. Т. 6. № 1. С. 9–16.
2. Меньшиков В.И., Глущенко В.М., Анисимов А.Н. Элементы теории управления безопасностью судоходства. Мурманск : МГТУ, 2000. 241 с.
3. Кукуи Ф.Д., Меньшиков В.И. Особенности планирования и реализации безопасного и оптимального навигационного процесса. *Вестник МГТУ*. 2003. Т. 6. № 1. С. 61–64.
4. Смирнов А.Ж. К вопросу о безопасном несении ходовой вахты и общих требованиях к «человеческому элементу». *Вестник МГТУ*. 2015. Т. 18. № 1. С. 41–47.
5. Запорожец Д.Ю., Кравченко Ю.А., Лежебоков А.А. Способы интеллектуального анализа данных в сложных системах. *Известия КБНЦ РАН*. 2013. № 3. С. 52–56.
6. Гаврилова Т.А. Об одном подходе к онтологическому инжинирингу. *Новости искусственного интеллекта*. 2005. № 3. С. 25–30.
7. Скворцов Н.А. Вопросы согласования неоднородных онтологических моделей и онтологических контекстов. *Онтологическое моделирование* : Симпозиум. 2008. С. 149–166.
8. Лукашевич Н.В. Онтологии для автоматической обработки текстов: описание понятий и лексических значений. *Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии* : труды Международной конференции «Диалог 2006». 2006. С. 138–142.
9. Лис К.П. Онтологическая интеграция данных моделирования для управления сервисноориентированной ИТ-инфраструктурой. 2010. С. 62–67.
10. Ландэ Д.В. Основы интеграции информационных потоков : монография. Киев : Инжиниринг, 2016. 240 с.
11. Бова В.В. Концептуальная модель представления знаний при построении интеллектуальных информационных систем. *Известия ЮФУ*. 2014. № 7 (156). С. 109–117.
12. Бова В.В., Лещанов Д.В. О вопросе интеграции ресурсов знаний на основе анализа и синтеза онтологий. *Информатика, вычислительная техника и инженерное образование*. 2014. № 3 (18). С. 14–22.

**Ivanenko V.M., Fedunov V.M., Trishin V.V., Liganenko V.V. BUILDING AN ONTOLOGICAL MODEL FOR WATCHKEEPING ON SHIPS**

*One of the main approaches to ensuring safe navigation is the organization of effective watchkeeping in accordance with the requirements of the International Convention on Training and Certification of Seafarers and Watchkeeping of 1978. Maritime safety issues are always related to the level of qualification of personnel and the skills developed in standard or non-standard situations. One of the approaches for the analysis of emergency situations, as well as the actions of watch personnel on a seagoing vessel can be an approach based on the use of an ontological model of watchkeeping. Currently, the most common is the ontological model, which is based on two global categories – space and time. However, this model is outdated. A more complete and modern ontological model should be considered, based on three global categories – space, time and quality. Possible negative scenarios of emergencies can be predicted and localized by strictly following the work regulations and job descriptions. The rules of the watch should be improved on the basis of error analysis, quantitative and qualitative processing of information. The article considers the question of building an ontological model of watchkeeping on a sea vessel. Ontology is a formal explicit description of concepts in the analyzed subject area (classes), the properties of each concept and constraints. The paper defines the characteristics of ontology elements and describes their meanings. An ontology of the subject area “Carrying a watch”, which is the basis of the knowledge base of the studied problem area. The development of ontological models and relevant intelligent information systems is based on the work of scientists who have made a significant contribution to the development of decision theory and development of methods for solving applied problems. The results allow us to automate the process of selecting methods of effective watchkeeping on a seagoing vessel. Thus, the construction of an ontological model, on the one hand, will allow detailed analysis of information processing errors and errors in the choice of management decision when watching a ship, on the other hand, is the basis for further automation of relevant processes.*

**Key words:** watch keeping, safety management on ships, ontological model, knowledge base.

**Іваненко В.М.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Федунов В.М.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Урум Н.С.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Бажак О.В.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

## АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОРЕХІДНОЇ АСТРОНОМІЇ

*У статті проаналізовано основні елементи морехідної астрономії та їх взаємодії. Їх основною метою є формування базових принципів отримання астрономічних обсервацій і методів розрахунку поправки суднових навігаційних курсопоказників. Безпосередньо необхідність знання судноводіями астрономічних способів контролю місця розташування судна й роботи курсопоказника відбито в Міжнародній конвенції з дипломування та несення навігаційної вахти та є однією з основних вимог під час базової підготовки судноводія. Абсолютна довіра супутниковим методам судноводіння значно підвищує ризик виникнення аварійної ситуації. У відкритому морі наявність додаткової астрономічної інформації про місце положення судна, отриманої незалежно від роботи супутникових і радіонавігаційних систем, надає роботі судноводія впевненості у своїх діях. Особливо актуальним це стає в разі наближення судна до берега до початку можливості контролю роботи супутникових систем навігації радіолокаційними способами визначення місця судна. Традиційні методи отримання незалежної астрономічної інформації в умовах дефіциту вільного часу в судноводія на вахті часто залишаються незатребуваними через трудоємність виконання астрономічних розрахунків. Наявність сучасних програм обробки астрономічних спостережень дозволяє зняти цю проблему. Однак кожен судноводій повинен знати принципи отримання астрономічних обсервацій і методи розрахунку поправки суднових навігаційних курсопоказників.*

*З метою узагальнення відповідних знань у роботі визначено три класи елементів морехідної астрономії: основи сферичної та загальної астрономії (в частині подання координат світил, результатів їх вимірювання та результатів вимірювання часу); морські астрономічні інструменти (секстан, хронометр, зоряний глобус, нахиломір та інші); астронавігація (зокрема, методи визначення поправки компаса, визначення місця судна).*

*Наведена класифікація може бути основою як для вирішення завдань морехідної астрономії ручними інструментами (швидко, але з меншою точністю), так і для формування алгоритмів функціонування системи підтримки прийняття рішень для забезпечення точнішого автоматизованого вирішення відповідних завдань.*

*Надалі в роботі коротко розглядаються визначення часткових елементів морехідної астрономії, їх складові елементи (які за наявності використовуються в інтересах морехідної астрономії) та їх використання в контексті міжкласової взаємодії.*

**Ключові слова:** морехідна астрономія, сферична астрономія, координати світил, вимірювання, морські астрономічні інструменти, секстан, астронавігація.

**Постановка проблеми.** Яку б високу ступінь надійності не мала навігаційна система, роль людського фактора переважаюча. А базові основи судноводіння завжди були й залишатимуться основними під час підготовки судноводія, відповідального за людські життя, збереження матеріальних цінностей і результати можливих екологічних наслідків у разі виникнення аварійної ситуації.

Наявність знань судноводіями астрономічних способів контролю місця розташування судна й роботи курсопоказника зображено в Міжнародній конвенції з дипломування та несення навігаційної вахти та є однією з основних вимог під час базової підготовки судноводія [1].

Абсолютна довіра супутниковим методам судноводіння значно підвищує ризик виникнення

аварійної ситуації. У відкритому морі наявність додаткової астрономічної інформації про місце положення судна, отриманої незалежно від роботи супутникових і радіонавігаційних систем, надає роботі судноводія впевненість у своїх діях. Особливо актуальним це стає в разі наближення судна до берега до початку можливості контролю роботи супутникових систем навігації радіолокаційними способами визначення місця судна.

Традиційні методи отримання незалежної астрономічної інформації в умовах дефіциту вільного часу в судноводія на вахті часто залишаються незатребуваними через трудоємність виконання астрономічних розрахунків. Наявність сучасних програм обробки астрономічних спостережень дозволяє зняти цю проблему. Однак кожен судноводій повинен знати принципи отримання астрономічних обсервацій і методи розрахунку поправки суднових навігаційних курсопоказників. Це можливо тільки тоді, коли зрозуміла фізика явищ добового й річного руху Сонця, зірок і планет Сонячної системи, співвідношення їх координат на небесній сфері й відповідних координат на Землі, а також інших елементів морехідної астрономії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Роботи В.Г. Кудрявцева, В.С. Давидова [2; 7], Д.А. Гагарського [3; 4], М.О. Килнаса, П.В. Зємова [5], В.Г. Алексишина, В.Т. Долгочуба, О.В. Белова [6],

Д.А. Новоселова [8], Н.А. Верюжского [9] присвячені теоретичним і практичним дослідженням в галузі морехідної астрономії. У роботі [10] проведено історичний екскурс розвитку морехідної астрономії.

Окремо необхідно виділити спеціалізовані міжнародні нормативні джерела щодо вимог розділу А-II/1 та А-II/2 конвенції ПДНВ78 з поправками 2010 року з необхідності знань судноводіями астрономічних способів контролю місця розташування судна й роботи курсопоказника [1].

**Постановка завдання.** Метою статі є формування базових принципів отримання астрономічних обсервацій і методів розрахунку поправки суднових навігаційних курсопоказників на основі аналізу основних елементів морехідної астрономії та їх взаємодії.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

Морехідна астрономія – це частина практичної астрономії, яка розглядає орієнтування за небесними світилами в часі, за місцем і напрямом під час руху на морі [2].

Основними завданнями морехідної астрономії є:

- визначення місця судна в морі за небесними світилами;
- визначення справжніх напрямів щодо спостережуваних небесних світил (визначення поправки курсопоказника);

- визначення, зберігання та поширення точного часу;

- оцінка природного освітлення та астронавігаційної обстановки в районі плавання.

Астрономічне визначення місця судна в будь-якому районі плавання часто є єдиною можливістю і найбільш достовірною. Для його виконання не потрібні берегові споруди, а точність рішення астрономічних завдань не залежить від відстаней до берега. Астрономічне визначення поправки курсопоказника є практично майже єдиним засобом контролю за роботою курсопоказника під час плавання поза видимості земних орієнтирів.

Надалі часткові елементи морехідної астрономії будемо розглядати в рамках відповідних трьох основних класів елементів (рис. 1):

- основи сферичної та загальної астрономії (в частині подання координат світил, результатів їх вимірювання та результатів вимірювання часу);

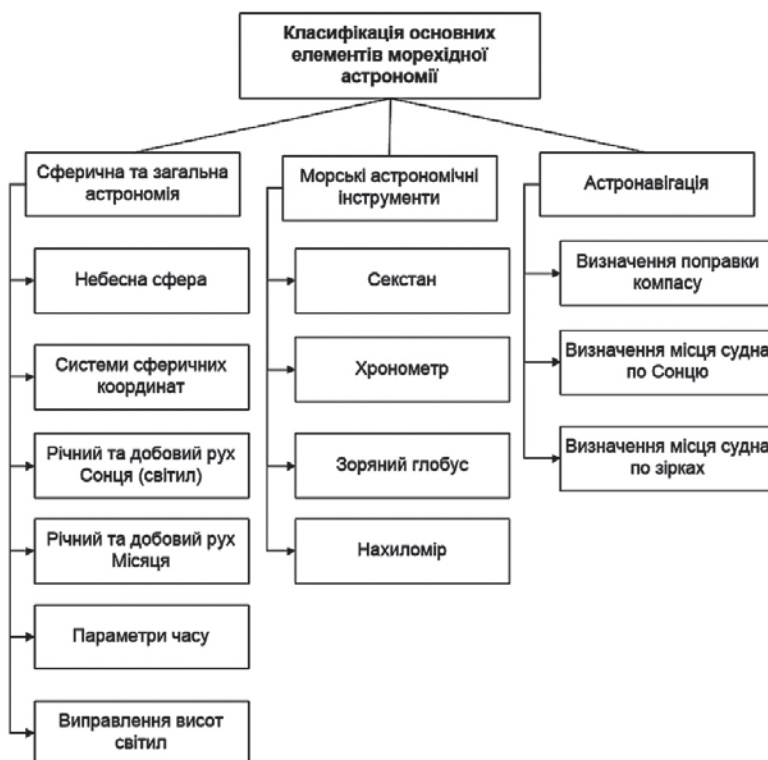


Рис. 1. Класифікація елементів морехідної астрономії

- морські астрономічні інструменти (секстан, хронометр, зоряний глобус, нахиломір та інші);
- астронавігація (зокрема, методи визначення поправки компаса, визначення місця судна).

Наведена класифікація може бути основою як для вирішення завдань морехідної астрономії ручними інструментами (швидко, але з меншою точністю), а так і для формування алгоритмів функціонування системи підтримки прийняття рішень (далі – СППР) для забезпечення точнішого автоматизованого вирішення відповідних завдань.

Надалі в роботі коротко розглядаються визначення часткових елементів морехідної астрономії, їх складові елементи (які за наявності використовуються в інтересах морехідної астрономії) та їх використання в контексті міжкласової взаємодії відповідно до рис. 1.

**Небесна сфера.** У морехідній астрономії за центр небесної сфери зазвичай приймають очі спостерігача або центр Землі. Небесною сферою називається сфера довільного радіуса з нанесеними на неї основними колами, напрямками й видимими місцями світил. Для спостерігача на Землі прямовисна лінія, яку представляють у центрі сфери (рис. 2) та

проходить через нього, перетинає небесну сферу в точках zenіту  $z$  і надира  $n$ [4].

Оскільки вісь світу перпендикулярна площині небесного екватора, а стрімка лінія перпендикулярна площині дійсного горизонту, то  $\angle QOZ = \angle PNON$ . Висотою називається дуга вертикала від площини дійсного горизонту до світила. Отже, висота підвищеного полюса дорівнює широті місця спостерігача.

Цей важливий висновок використовується для установки зоряного глобуса за широтою.

**Системи сферичних координат.** Дійсний рух Землі в просторі відбувається навколо Сонця. Для зручності рішення астрономічних завдань прийнято розглядати відносний рух, приймаючи Землю за нерухомий об'єкт, а світила як об'єкти, що рухаються по небесній сфері навколо осі світу. У морехідній астрономії основними є три системи координат – горизонтна, перша (I) екваторіальна і друга (II) екваторіальна системи координат (рис. 3).

У морехідній астрономії найчастіше доводиться працювати з горизонтною системою координат і I екваторіальною. У формулюванні будь-яких визначень координат завжди присутні 3 елементи:

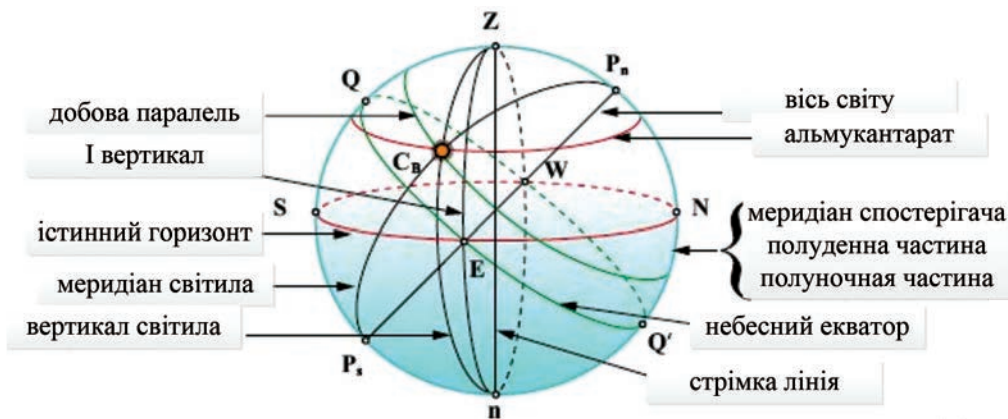


Рис. 2. Елементи небесної сфери, що використовуються в інтересах морехідної астрономії

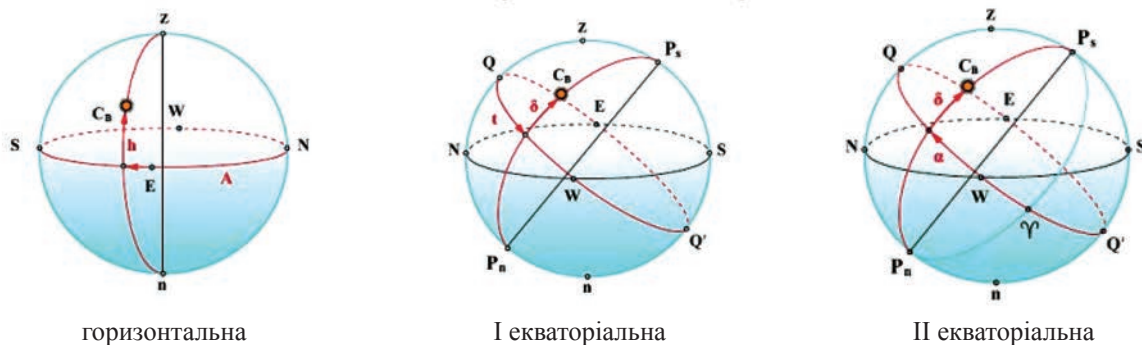


Рис. 3. Системи сферичних координат

- визначення дуги (небесного екватора, істинного горизонту, вертикала й так далі);
- звідки відлічується (від горизонту, від екватора, від меридіана й так далі);
- куди відраховується.

Причому одна координата визначається в основній площині, друга – в другій площині, перпендикулярній основній. Основна площина задає назву системи координат і входить у визначення кожної координати.

**Річний і добовий рух світил.** Уважаючи Землю нерухомою, небесній сфері надають обертання, зворотне добовому обертанню (з Е на W). У результаті цього всі світила, віддалені від небесного екватора на величину відмінювання  $\delta$ , описують добові паралелі. Це – видимий рух світил унаслідок обертання Землі, зручний для подання фізики явищ і розв’язання задач. Під час добового руху стрімка лінія **zn**, меридіан спостерігача й істинний горизонт залишаються нерухомими, а світила разом зі сферою рухаються (рис. 4) [4]. Закони добового руху світил наведено в табл. 1.

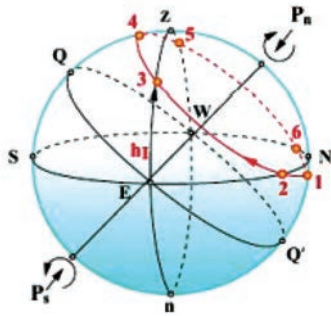


Рис. 4. Приклад зображення процесу обертання небесної сфери відбувається за годинниковою стрілкою, якщо дивитися на сферу уздовж осі світу з боку північного полюса

**Річний і добовий рух Місяця.** Місяць є природним супутником Землі. Він обертається

навколо Землі за еліптичною орбітою. Площина місячної орбіти нахилена до площини екліптики в середньому під кутом  $5^{\circ}09'$ . Отже, схилення Місяця змінюється в межах  $0^{\circ} << 28^{\circ}36'$ . Рух Місяця щодо Землі має важливе значення для судноводіння, тому що від цього залежать припливи.

Якщо протягом 1–2 годин простежити за положенням Місяця відносно будь-якої яскраві зірки, то можна переконалися в тому, що Місяць переміщується назустріч добовому обертанню (на схід) приблизно на величину свого діаметра за 1 годину. За добу Місяць проходить по своїй орбіті дугу в 13,2. Отже, повний оборот по небесній сфері Місяць зробить за  $360^{\circ}/13,2 = 27,27$  доби.

**Параметри часу.** У морехідній астрономії важливу роль відіграє зоряний час. Зоряним цілодобово називається проміжок часу повного оберту Землі щодо точки Овна. За початок зоряної доби приймається момент верхньої кульмінації точки весняного рівнодення. Зоряний час прийнято позначати буквою S. Такий вираз формально представляє основну формулу часу:

$$S = t + \alpha, \quad (1)$$

де t – західний годинний кут;

$\alpha$  – пряме сходження зірки.

Вираз (1) пов’язує координати світил із часом і надає можливість переходити від зоряного часу до сонячного й вирішувати інші важливі завдання.

**Виправлення висот світил.** Для отримання obserвованих координат місця судна в морі необхідно мати вимір навігаційного параметра. Цим параметром є виміряна секстаном висота світила в конкретний час. Вимірювання висоти світила проводиться як вимір спостерігачем на судні кута між видимим місцем світила й видимим горизонтом. Рішення повного завдання астрономічним способом можливе за наявності сферичних координат  $t$  і  $\delta$  виміряного світила. З огляду на те, що ці координати геоцентричні, тобто центр небесної сфери

Таблиця 1

Закони добового руху світил

Світило	Явище	Умови явища
C1	Проходить через зеніт	$\delta = \varphi$ ; $\delta$ та $\varphi$ однойменні
C2	Світило сходить у чверті, однойменної з широтою, перетинає I вертикал, кульмінує, знову перетинає I вертикал і заходить у чверті, однойменної з широтою – тобто в добовому русі над горизонтом світило знаходиться в 4-х чвертях	$\delta < \varphi$ ; $\delta$ та $\varphi$ однойменні
C3	Світило I вертикал ніколи не перетинає, знаходиться тільки у 2-х чвертях, однойменних із широтою	$\delta > \varphi$ ; $\delta$ та $\varphi$ однойменні
C4	Не заходить	$\delta > 90 - \varphi$ ; $\delta$ та $\varphi$ однойменні
C5	У добовому русі світило I вертикал над горизонтом не перетинає, знаходиться тільки у 2-х чвертях, різнойменних із широтою	$\delta < 90 - \varphi$ ; $\delta$ та $\varphi$ різнойменні
C6	Не сходить	$\delta > 90 - \varphi$ ; $\delta$ та $\varphi$ різнойменні

збігається із центром Землі, виміряну висоту необхідно привести до центру Землі. Також необхідно врахувати вплив атмосфери Землі й кліматичних умов поверхні Землі в місці спостережень на виміряну секстаном висоту світила.

У рамках розгляду класу морських астрономічних інструментів у роботі обмежимося розглядом секстану (частково він вже згадувався під час розгляду виправлення висот світил).

**Секстан** – це інструмент для визначення висоти світила над горизонтом, а також вертикальних і горизонтальних кутів між орієнтирами. Секстан необхідний для вимірювання висот світил над горизонтом під час визначення місця судна по Сонцю днем або в період вечірніх або ранкових сутінків по зірках, коли одночасно видно горизонт і світила та є можливість виміряти висоти цих світил над горизонтом.

Принцип дії секстана заснований на законі оптики: промінь падаючий, промінь переломлений і перпендикуляр, проведений до кордону розділу в точці падіння, лежать в одній площині, наведений на рис. 5 [4].

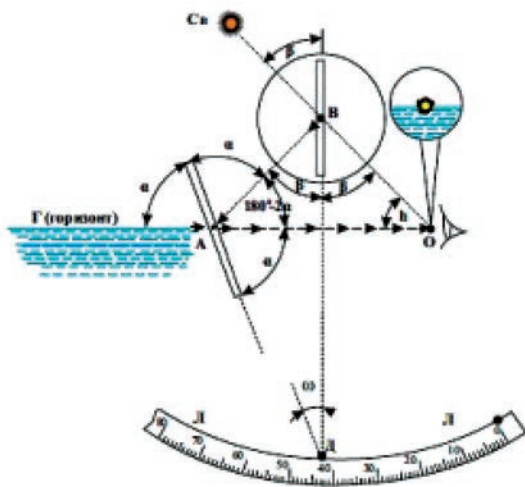


Рис. 5. Принцип дії секстана

Під час роботи із секстаном необхідно періодично виконувати його повірки. Робота судноводія в разі нормального використання секстана без великих перепадів температур та ударів не вимагає щоденного виконання всіх перевірок, але потребує визначення поправки індексу перед спостереженнями з метою її урахування під час виправлення висот світил.

**Визначення поправки компасу** астрономічними способами може проводитися загальним способом днем за Сонцем і вночі по зірках (планетах). Часткові способи з можливістю спрощення

розрахунків виконуються по сходу або заходу будь-якого світила (Сонця вранці або ввечері), а також за Полярною зіркою вночі. Розрахунок азимута на світило (Сонце, планети, зірки) загальним способом рекомендується виконувати за формулою сферичної тригонометрії, отриманою на підставі формули котангенсів:

$$A = \arctan[\sin t / (\tan \delta \cos \varphi - \cos t \sin \varphi)]. \quad (2)$$

#### Визначення місця судна по Сонцю та зірках.

Для отримання obserвованих координат місця судна необхідно провести спостереження світил:

- Сонця (вдень) – визначення місця судна по Сонцю;
- зірок і планет у період ранкових або вечірніх сутінків – визначення місця судна по зірках.

Практика спостережень Місяця зустрічається рідко через можливості допуску значних помилок під час вимірів висот.

Для вирішення завдання визначення місця судна по Сонцю або зірках розрахунки виконуються різними способами. Можливі варіанти розрахунків:

- «повністю вручну» з використанням таблиць і графічної побудови для отримання obserвованих координат;
- із частковим застосуванням таблиць – для розрахунків часових кутів світил, калькулятора – для розрахунку висот та азимутів світил за формулами сферичної тригонометрії, графічної побудови – для отримання obserвованих координат;
- за допомогою астрономічних програм на комп'ютері з автоматизованим розрахунком obserвованих координат (або, наприклад, з використанням системи підтримки прийняття рішень).

Для отримання obserвацій по Сонцю та зірках після підготовки до спостережень необхідно провести вимірювання, що містять:

- фіксування висоти світил секстаном;
- фіксування часу вимірювання висот світил за допомогою наявного на судні зберігача часу.

**Висновки.** Отже, в статті проведено аналіз основних елементів морехідної астрономії та їх взаємодії з метою формування базових принципів отримання астрономічних obserвацій і методів розрахунку поправки судових навігаційних курсопоказників; визначено три класи елементів морехідної астрономії: основи сферичної та загальної астрономії (в частині представлення координат світил, результатів їх вимірювання та результатів вимірювання часу); морські астрономічні інструменти (секстан, хронометр, зоряний глобус, нахиломір та інші); астронавігація (зокрема, методи визначення поправки компасу,

визначення місця судна). Наведена класифікація може бути основою як для вирішення завдань морехідної астрономії ручними інструментами (швидко, але з меншою точністю), такі для фор-

мування алгоритмів функціонування системи підтримки прийняття рішень для забезпечення точнішого автоматизованого вирішення відповідних завдань.

#### Список літератури:

1. Silverberg J. Nautical Astronomy : From the Sailings to Lunar Distances. *Navigation*. May 2006. 24 p. URL: [https://www.researchgate.net/publication/259911622\\_Nautical\\_Astronomy\\_From\\_the\\_Sailings\\_to\\_Lunar\\_Distances](https://www.researchgate.net/publication/259911622_Nautical_Astronomy_From_the_Sailings_to_Lunar_Distances) (дата звернення: 02.09.2021).
2. Кудрявцев В.Г., Давыдов В.С. Мореходная астрономия : учебное пособие. 3 изд. Киев : Лира-К, 2019. 380 с.
3. Гагарский Д.А. Мореходная астрономия для начинающих судоводителей : учебное пособие. Москва : МОРКНИГА, 2020. 221 с.
4. Гагарский Д.А. Мореходная астрономия : учебное пособие. Берлин : Директ-Медиа, 2021. 208 с.
5. Килнас М.О. Земов П.В. Роль мореходной астрономии в навигационной безопасности плавания. *Актуальные проблемы и перспективы развития системы отраслевого транспортного образования* : II Всероссийская научно-практическая конференция, г. Казань, 6 июня 2020 р. Казань, 2020. С. 8.
6. Алексишин В.Г., Долгочуб В.Т., Белов О.В. Практическое судовождение : учебное пособие. 2 изд. Одесса : Феникс – Одесская национальная морская академия, 2006. 376 с.
7. Михайлов В.С., Кудрявцев В.Г., Давыдов В.С. Практическая мореходная астрономия : учебник. Киев : Киевская государственная академия водного транспорта им. гетмана Петра Конашевича-Сагайдачного, 2009. 293 с.
8. Новоселов Д.А. Мореходная астрономия : методические указания. Керчь : Керченский государственный морской технологический университет, 2016. 60 с.
9. Верюжский Н.А. Мореходная астрономия: Практическое пособие по решению астронавигационных задач : учебное пособие. Москва : ТрансЛит, 2007. 160 с.
10. Международная конвенция о Подготовке и дипломировании моряков и несении вахты. 2011. *Мурманский государственный технический университет* : веб-сайт. URL: <http://www.mstu.edu.ru/education/files/pdnpv.pdf> (дата звернення: 23.09.2021).

#### Ivanenko V.M., Fedunov V.M., Urum N.S., Bajak O.V. ANALYSIS OF THE BASIC ELEMENTS OF NAVIGATION ASTRONOMY

*The article analyzes the main elements of seafaring astronomy and their interaction. Their main purpose is to form the basic principles of obtaining astronomical observations and methods for calculating the correction of ship navigation course indicators. The direct need for knowledge of pilots of astronomical methods of control of the location of the vessel and the operation of the index is reflected in the International Convention on the Certification and Navigation of the Navigation Watch and is one of the main requirements for basic training of the navigator. Absolute confidence in satellite navigation methods significantly increases the risk of an emergency. In the high seas, the availability of additional astronomical information about the position of the ship, obtained independently of the operation of satellite and radio navigation systems, gives the work of the pilot confidence in their actions. This becomes especially relevant when the vessel approaches the shore before the possibility of monitoring the operation of satellite navigation systems by radar methods of determining the location of the vessel. Traditional methods of obtaining independent astronomical information in conditions of shortage of free time for the watchman often remain unclaimed due to the complexity of astronomical calculations. The availability of modern programs for processing astronomical observations can eliminate this problem. However, every navigator must know the principles of obtaining astronomical observations and methods of calculating the correction of ship navigation course indicators. In order to generalize the relevant knowledge in the work identified three classes of elements of marine astronomy: the basics of spherical and general astronomy (in terms of representation of the coordinates of the lights, the results of their measurement and the results of time measurement); marine astronomical instruments (sextant, chronometer, star globe, inclinometer, etc.); astronavigation (including methods for determining the compass correction, determining the position of the ship). The given classification can be a basis both for the decision of problems of seafaring astronomy by manual tools (quickly, but with less accuracy), and also a basis for formation of algorithms of functioning of system of decision support to provide more exact automated decision of the corresponding problems. In the following, the paper briefly considers the definitions of partial elements of seafaring astronomy, their constituent elements (which, if any, are used in the interests of seafaring astronomy) and their use in the context of interclass interaction.*

**Key words:** nautical astronomy, spherical astronomy, coordinates of luminaries, measurements, marine astronomical instruments, sextant, astronavigation.



**Кара І.А.**

Національний університет «Львівська політехніка»

## ПРИМІСЬКИЙ ГРОМАДСЬКИЙ ТРАНСПОРТ В УКРАЇНІ: ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

*Досліджено теоретичні питання розвитку приміського громадського транспорту в Україні. Розглянуто особливості функціонування системи пасажирських перевезень між населеними пунктами в сучасних умовах. Проаналізовано основні переваги приміського громадського транспорту в порівнянні з індивідуальним. Наголошується на необхідності й економічній доцільності використання приміського громадського транспорту, що підтверджується зарубіжним досвідом. Доведено, що для розвитку приміського пасажирського комплексу на постійній основі необхідно забезпечити його підтримку на державному рівні. Зазначено ряд нормативних актів держави, які регулюють натеper надання послуг приміського громадського транспорту. Визначено, що, незважаючи на правове регулювання приміських пасажирських перевезень, нині існує низка проблем і невирішених питань, які пов'язані з низькою ефективністю галузі й впливають на розвиток пасажиропотоку.*

*Визначено основні чинники, які негативно впливають на розвиток послуг у сфері пасажирських перевезень між населеними пунктами. Обґрунтовано потребу покращення обслуговування пасажирів, які користуються приміським транспортом, на основі регулюючого впливу держави. Акцентовано на необхідності встановлення справедливих тарифів на транспортні перевезення, які повинні задовольняти як пасажирів, так і перевізників. Аргументовано, що для вирішення проблемної ситуації у сфері пасажирських перевезень між населеними пунктами ключовим є повноцінне законодавче врегулювання процесів, що в ній відбуваються. Зроблено висновок, що органічне поєднання зусиль держави, місцевої влади й самих перевізників має сприяти підвищенню якості послуг приміського громадського транспорту в сучасних умовах.*

**Ключові слова:** приміські пасажирські перевезення, громадський транспорт, послуги транспорту, пасажиропотік, державне регулювання.

**Постановка проблеми.** Приміський громадський транспорт відіграє важливу роль у розвитку економіки регіонів та їх соціальної сфери. Якісні послуги у сфері пасажирських перевезень між населеними пунктами зачіпають інтереси різних верств населення, сприяють формуванню великої міської агломерації і залученню населення передмість до виробничої діяльності, а також допомагають функціонувати усім галузям економіки на засадах сталого розвитку.

На сьогоднішній день спостерігається зниження ефективності та якості приміських пасажирських перевезень, що зумовлено кризовими явищами в економіці України. Пасажирські перевезення між населеними пунктами є наймасовішими та найбільш затребуваними для осіб, які здійснюють щоденні поїздки на навчання чи роботу, проте деякі з них мають збитковий характер. Зокрема, це стосується залізничних перевезень, де спостерігається щорічне зменшення пасажирообігу за одночасного збільшення експлуатаційних витрат [1]. Низка проблем, таких як недосконале управління процесами у зазначеній сфері, невдала організація руху, нее-

фективне використання рухомого складу, спрацьована інфраструктура та багато інших невирішених питань є причиною значних затрат, які супроводжують використання приміського громадського транспорту в Україні.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Теоретичні та прикладні питання функціонування пасажирського комплексу висвітлені у публікаціях багатьох дослідників. Зокрема, ця проблематика піднімається у роботах таких науковців і практиків, як М. Кристопчук [2], Т. Григорова [3], В. Гудкова [4], О. Дейнека [1; 5; 6], К. Дода [7], В. Задоя [9], Ю. Крихтіна [5; 10], В. Матвієнко [11], А. Поздняков [8] та інші.

У своїх працях автори вивчають питання реформування пасажирського комплексу [1; 7; 8], удосконалення управління приміськими пасажирськими перевезеннями [2; 3; 9], реструктуризації підприємств пасажирського комплексу [4], державного управління й адміністрування діяльності залізничного транспорту України [5; 6; 10].

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Питання покращення

функціонування системи пасажирських перевезень між населеними пунктами залишається гострим, зважаючи на недосконале державне регулювання зазначеної сфери та глобальні зміни, які відбулися в сучасному світі у зв'язку із карантинними обмеженнями. Тому пошук шляхів розвитку приміського громадського транспорту є актуальним та потребує подальших наукових досліджень.

**Постановка завдання.** Головною метою цієї роботи є визначення важливості приміського громадського транспорту для економіки держави та окремих регіонів, розгляд його переваг та недоліків і обґрунтування необхідності державного регулювання у напрямі подальшого розвитку цієї сфери.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Приміський громадський транспорт є надзвичайно важливою ланкою регіональної економіки, оскільки завдяки йому населення може здійснювати щоденну міграцію, задовольняючи свої потреби в навчанні, роботі тощо. У свою чергу, ці процеси забезпечують стабільне функціонування господарюючих суб'єктів на регіональному рівні, створюючи таким чином умови для ефективного розвитку національної економіки.

У загальному вигляді переваги приміського громадського транспорту можна згрупувати так [2; 3]:

1) забезпечення мобільності трудових ресурсів – завдяки можливості населення переміщатися щоденно з приміських територій у великі населені пункти розширюються горизонти працевлаштування у громадян, що приживають за межами міст;

2) розвиток приміської житлової забудови;

3) усунення заторів на дорогах – використання громадського транспорту дає можливість розблокувати дороги, наповнені автомобілями, і таким чином зменшити кількість заторів у години добирання людей на роботу, навчання чи додому;

4) екологічність приміських перевезень, зумовлена зменшенням кількості транспортних засобів, що перевозять людей;

5) додаткові податкові надходження до бюджетів – за рахунок маятникової міграції в міста забезпечуються фінансові потоки у сфері транспортних послуг, з яких, відповідно, і надходять податкові платежі;

6) позитивний вплив на регіональний розвиток – зменшення надмірної концентрації населення завдяки наданню можливості швидкого переміщення великої кількості пасажирів; транспортному сполученню населених пунктів, що знаходяться на відносно невеликій відстані; збільшення вартості нерухомості у населених пунктах,

що мають хороше транспортне сполучення з місцями праці та дозвілля.

Про необхідність та економічну доцільність застосування приміського пасажирського транспорту свідчить і зарубіжний досвід. Закордонні аналітики дійшли до висновку [7], що підвищення мобільності населення є одним із важливих інструментів росту внутрішнього валового та регіонального продукту. Виходячи із цього, саме послуги у сфері пасажирських перевезень між населеними пунктами є стимулом для економічного зростання регіонів та національної економіки.

Так, європейські експерти підраховали, що кожна вкладена грошова одиниця в приміське залізничне сполучення дає економіці додаткові надходження від 1,1 до 5-ти кратного розміру інвестицій [7]. Окупність цих затрат з державного чи регіональних бюджетів пояснюється підвищенням мобільності населення, скороченням безробіття, зростанням доходів населення, підвищенням податкових надходжень та інших соціально-економічних чинників.

Для того, щоб приміський пасажирський комплекс розвивався на постійній основі, необхідно забезпечувати його підтримку на державному рівні [5; 6; 10]. Слід зазначити, що на даний час надання послуг приміських пасажирських перевезень регламентується низкою нормативно-правових актів держави. Зокрема, якщо вести мову про залізничний транспорт як найбільш затребуваний вид у схемі логістичних перевезень в межах приміських територій, то потрібно згадати Закон України «Про залізничний транспорт», а також Порядок обслуговування громадян залізничним транспортом, затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 19 березня 1997 р. № 252, Правила перевезення пасажирів, багажу, вантажобагажу та пошти залізничним транспортом України, затвержені Наказом Міністерства транспорту та зв'язку України від 27 грудня 2006 р. № 1196, який зареєстровано в Міністерстві юстиції України 04 квітня 2007 р. за № 310/13577.

Стосовно приміських перевезень автомобільним транспортом, то варто сюди додати Порядок організації перевезень пасажирів та багажу автомобільним транспортом, затверджений наказом Міністерства інфраструктури України від 15 липня 2013 р. № 480. А статтею 135 Кодексу України про адміністративні правопорушення у транспорті приміського сполучення передбачена відповідальність за безквитковий проїзд пасажирів.

Незважаючи на правову регламентацію приміських пасажирських перевезень, на сьогодні

існує ряд проблем та невирішених питань, які пов'язані із низькою ефективністю функціонування зазначеної сфери та впливають на розвиток пасажирського руху. Варто розглянути такі основні чинники, які негативно впливають на розвиток послуг у сфері пасажирських перевезень між населеними пунктами [2; 3; 9; 10]:

1) фізичний і моральний знос значної частини рухомого складу приміського пасажирського транспорту, що не відповідає вимогам сьогодення;

2) неефективна тарифна політика, відповідно до якої існує невідповідність надання послуг тим затратам, які несе транспортне підприємство;

3) недосконалість систем диспетчерського управління процесами керування дорожнім рухом і перевезень пасажирів;

4) поганий технічний стан або відсутність залізничних і автомобільних вокзалів;

5) недосконала інфраструктура та стан дорожньо-транспортної мережі міст і приміських територій;

6) зменшення пасажиропотоків, що пов'язане із карантинними обмеженнями та переходом значної частини населення на віддалений формат роботи вдома;

7) зменшення пасажиропотоків, що пов'язане з депопуляцією сільських територій.

Зазначені чинники мають як еволюційний характер, так і зумовлені відсутністю комплексного розвитку транспортної системи в країні, що пов'язане із суттєвими перепадами щільності населення як на рівні окремих регіонів, так і в державі в цілому; високою концентрацією економічно активного населення у великих містах, що обмежує можливості розвитку економіки тощо. Забезпечення інфраструктурою не завжди відповідає рівню пасажиропотоків, який має місце в години «пік», внаслідок чого страждає якість надання послуг приміським пасажирським транспортом. Цей чинник в поєднанні із подіями останнього часу, зумовленими пандемічними настроями у світі й у державі, змушують населення пересідати на власний автотранспорт, що своєю чергою породжує нові проблеми, пов'язані із заторами, погіршенням екологічної ситуації в регіонах тощо.

Таким чином, негативні тенденції, які спостерігаються у сфері пасажирських перевезень між населеними пунктами, спонукають до пошуку шляхів вирішення зазначених проблем. Тут слід пам'ятати, що сам по собі приміський громадський транспорт не може значним чином впливати на попит на свої послуги, оскільки це залежить від соціально-економічної ситуації в країні та регуляторних актів на рівні конкретних громад

та держави в цілому. Тому вирішальне значення для покращення обслуговування пасажирів, які користуються приміським транспортом, має регулюючий вплив органів місцевого самоврядування та державних регулюючих органів. Зокрема, йдеться про:

– впровадження науково обґрунтованих тарифів на перевезення пасажирів у приміських зонах, виходячи із потреби стимулювати попит на приміський пасажирський транспорт;

– унормування питань, пов'язаних із проїздом пільговиків, зважаючи на потребу отримання перевізниками компенсацій від держави чи органу місцевого самоврядування;

– покращення якості перевезень і доступності громадського транспорту, тобто створення сприятливих умов для «пересадки» власників індивідуального транспорту на громадський.

Потреба обґрунтованої тарифікації послуг приміського транспорту та встановлення справедливих тарифів на сьогодні є надзвичайно актуальною. Так, найпростішим способом зниження збитковості транспортної системи є підвищення тарифів у приміському сполученні. Проте значне збільшення тарифів знизить пасажиропотік, що може стати причиною занепаду галузі. Відповідно до цього, необхідно застосовувати науково обґрунтовані підходи, які враховують середню заробітну плату в країні, потік пасажирів у певний період часу, податкове навантаження на перевізників, можливості їх субсидування з бюджетів, а також особливості того чи іншого регіону, для того, щоб встановлювати тарифи, здатні забезпечувати розвиток приміського транспорту з максимальним результатом.

Загалом, для вирішення проблемної ситуації у сфері пасажирських перевезень між населеними пунктами ключовим є повноцінне законодавче врегулювання процесів, що у ній відбуваються. Значну увагу потрібно приділити розвитку екологічно безпечних видів транспорту та його законодавчому забезпеченню. Зокрема, слід прийняти однойменний Закон України «Про екологічно безпечні види транспорту», в якому потрібно прописати фундаментальні принципи стимулювання зменшення рівня споживання енергетичних ресурсів приміським пасажирським транспортом у напрямі зниження параметрів забруднення довкілля. Відповідно до цього потрібно внести зміни до Податкового кодексу та підзаконних нормативно-правових актів, які повинні враховувати оптимальний рівень оподаткування для тих суб'єктів, які споживають безпечні для довкілля енергоресурси, знизити

рівень використання пального або перейшли на енергоощадні технології.

Водночас необхідно поєднати державне та місцеве регулювання розвитку екологічно та соціально значимого транспорту із застосуванням техніко-технологічних та організаційних заходів підвищення ефективності пасажирських перевезень між населеними пунктами. Органічне поєднання зусиль держави, органів місцевого самоврядування та самих перевізників повинно сприяти підвищенню якості послуг приміського пасажирського транспорту в сучасних умовах.

**Висновки.** Приміський громадський транспорт, як одна із важливих ланок економіки держави та транспортної системи України, покликаний задовольняти потребу населення у переміщенні до місць прикладання праці, навчання та дозвілля. Від результативності функціонування системи пасажирських перевезень між населеними пунктами залежить як регіональний розвиток, так і прогресивні зміни у соціально-економічному житті держави в цілому.

Приміським пасажирським перевезенням притаманні значні переваги його використання, зокрема, такі як мобільність, регулярність перевезень, цінова доступність, екологічність, які вигідно вирізняють їх з-поміж інших видів тран-

спортних перевезень. Разом із тим ця сфера не позбавлена недоліків, які в сучасних умовах є причиною неякісних послуг, які отримують пасажир приміського пасажирського транспорту.

Відповідно до цього необхідно підвищувати якісний рівень функціонування системи пасажирських перевезень між населеними пунктами. Стимулювати до покращення якості надання послуг можуть регуляторні дії органів місцевого самоврядування, зміни в законодавстві та посилення конкуренції на ринку приміських пасажирських перевезень. Позитивний вплив на покращення якості послуг з перевезень пасажирів приміським громадським транспортом може мати унормування питань, пов'язаних із проїздом пільговиків, надання додаткових податкових пільг перевізникам, які використовують новий, екологічний чистий рухомий склад, чітку регламентацію надання дотацій перевізникам, які обслуговують маршрути до малих за кількістю населення населених пунктів. Ці дії мають відбуватися на основі державно-приватного партнерства.

Перспективою подальших наукових досліджень у зазначеному напрямі є вивчення позитивного досвіду розвинених країн світу та його застосування у напрямі покращення функціонування системи пасажирських перевезень між населеними пунктами України.

#### Список літератури:

1. Дайнека О., Йолкін Д. Напрями зниження збитковості пасажирських перевезень на залізничному транспорті. URL: [http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb/13842/1/23\\_149155\\_Vis\\_720\\_Menegment.pdf](http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb/13842/1/23_149155_Vis_720_Menegment.pdf) (дата звернення: 22.09.2021).
2. Кристопчук М. Ефективність пасажирської транспортної системи приміського сполучення : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01. Харків : ХНАМГ, 2009. 214 с.
3. Григорова Т. Теоретичні основи організації маршрутних автобусних перевезень у приміському сполученні : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.22.01. Харків : Нац. ун-т міськ. гос-ва ім. О.М. Бекетова, 2016. 348 с.
4. Гудкова В. Оцінка ефективності збалансованого функціонування і розвитку підприємств сфери пасажироперевезень. *Проблеми та перспективи розвитку підприємництва* : збірник наукових праць. 2014. Вип. 1 (6). С. 62–66.
5. Дейнека О., Крихтіна Ю., Курбатов Є. Теоретичні основи державного регулювання транспорту. *Держава та регіони* : науково-виробничий журнал. Серія «Державне управління». 2018. Вип. 3. С. 63–68.
6. Дейнека О., Позднякова Л., Нестеренко А. Державне управління і адміністрування залізничного транспорту України. *Державне будівництво*. 2018. № 1. С. 1–9.
7. Дода К. Реформа приміських пасажирських залізничних перевезень і розвиток регіонів. URL: [https://cfts.org.ua/blogs/reforma\\_primiskikh\\_pasazhirskikh\\_zaliznichnikh\\_perevezen\\_i\\_rozvitok\\_regioniv\\_431](https://cfts.org.ua/blogs/reforma_primiskikh_pasazhirskikh_zaliznichnikh_perevezen_i_rozvitok_regioniv_431) (дата звернення: 22.08.2021).
8. Дослідження факторів, що впливають на формування пасажиропотоків залізничних приміських перевезень у великих міських агломераціях / А. Поздняков та ін. *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія «Транспортні системи і технології»*. 2016. Вип. 29. С. 261–276.
9. Задоя В. Удосконалення механізму управління залізничними пасажирськими перевезеннями у приміському сполученні : монографія. Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2015. 194 с.
10. Крихтіна Ю., Островерх Н., Седякін Ф. Державне забезпечення стабільного розвитку сфери залізничних пасажирських перевезень. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Державне управління*. 2019. Том 30 (69). № 4. С. 76–81.

11. Матвієнко В. Механізм державного управління розвитком залізничної галузі в Україні : дис. ... канд. наук. з держ. упр. : 25.00.02. Маріуполь, 2017. 256 с.

#### **Kara I.A. SUBURBAN PUBLIC TRANSPORT IN UKRAINE: GENERAL CHARACTERISTICS AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT**

*Theoretical issues of suburban public transport development in Ukraine are studied. Features of functioning of system of passenger transportations between settlements in modern conditions are considered. The main advantages of suburban public transport in the logistics chain of the state are analyzed. It is emphasized that the need and economic feasibility of using suburban public transport is evidenced by foreign experience. It is proved that in order for the suburban passenger complex to develop on a permanent basis, it is necessary to provide its support at the state level. It is noted that currently the provision of suburban public transport services is regulated by a number of regulations of the state. It is determined that despite the legal regulation of suburban passenger traffic, today there are a number of problems and unresolved issues that are associated with low efficiency of this area and affect the development of passenger traffic.*

*The main factors that negatively affect the development of services in the field of passenger traffic between settlements are identified. The need to improve the service of passengers using suburban transport, based on the regulatory influence of the state, is substantiated. It is substantiated that the negative trends observed in the field of passenger traffic between settlements encourage to find ways to solve these problems.*

*Emphasis is placed on the need to establish fair tariffs for transportation, which should satisfy both passengers and carriers. It is argued that to solve the problem situation in the field of passenger traffic between settlements, the key is a full-fledged legislative regulation of the processes taking place in it. It is concluded that the organic combination of efforts of the state, local authorities and the carriers themselves should help improve the quality of suburban public transport services in modern conditions.*

**Key words:** *suburban passenger transportation, public transport, transport services, passenger traffic, state regulation.*

**Разумова К.М.**

Національний авіаційний університет

**Темченко О.А.**

Державний університет економіки і технологій

**Шевчук Н.А.**

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ТРАНСПОРТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ЗАБЕСПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ РОЗРОБКИ ЗАЛІЗОРУДНИХ РОДОВИЩ

*У статті досліджено доцільність застосування комбінованих транспортних технологій задля забезпечення подальшої ефективної розробки залізорудних родовищ. Доведено, що успішний розвиток відкритої гірничої технології із позиції конкурентоспроможності разом із застосуванням оптимальних комплексів гірничотранспортного і виймально-навантажувального устаткування на залізорудних кар'єрах є актуальною науково-технічною проблемою, яка має важливе значення як для гірничо-металургійного комплексу, так і для національної економіки загалом. Нині для гірничого виробництва потрібно комплексно вирішувати проблеми посилення конкурентних позицій вітчизняних підприємств на зовнішніх ринках залізорудної сировини шляхом розробки і впровадження енергоефективних гірничо-транспортних технологій, які забезпечують оптимальну якість товарної продукції у ринкових умовах господарювання.*

*Окрім того зазначено, що сучасні умови господарювання вимагають створення ґрунтовної науково-методичної бази для надійного і досить оперативного обґрунтування доцільності модернізації транспортних комплексів, зокрема на основі вдосконалення схем комбінованого транспорту із використанням циклічно-поточної технології для зменшення витрат на розроблення родовищ на гірничозбагачувальних підприємствах з урахуванням суттєвих відмінностей у логістиці доставки видобутої корисної копалини до місць призначення. Успішна модернізація транспортних систем задля забезпечення подальшої ефективної розробки залізорудних родовищ у найближчій перспективі залежатиме від впровадження на вітчизняних гірничорудних підприємствах комплексних інвестиційних програм, спрямованих на застосування інноваційних енергозберігаючих технологій і прогресивних способів перевезення вантажів; установлення закономірностей зміни витрат на транспортування гірничої маси під час поглиблення гірничих робіт за схемами комбінованого транспорту залежно від їхніх параметрів; значного поліпшення рівня комплексної механізації вантажно-розвантажувальних і ремонтних робіт з одночасним зниженням негативного впливу транспорту на навколишнє середовище.*

**Ключові слова:** комбінований транспорт, циклічно-поточкова технологія, відкрита розробка, залізорудні родовища.

**Постановка проблеми.** Науково-технічні розробки із підвищення ефективності видобутку корисних копалин відкритим способом спрямовані на вирішення окремих важливих завдань технічного або технологічного характеру, тоді як для гірничого виробництва потрібно комплексно вирішувати проблеми посилення конкурентних позицій вітчизняних підприємств на зовнішніх ринках залізорудної сировини шляхом розробки і впровадження енергоефективних гірничотранспортних технологій, які забезпечують оптимальну якість товарної продукції. Здебільшого поза увагою зали-

шаються особливості формування технологічного складника ефективності гірничого виробництва, що вказує на відсутність теоретичних основ формування відкритої гірничої технології (ВГТ) із позиції забезпечення її конкурентоспроможності. Сучасні умови господарювання вимагають створення ґрунтовної науково-методичної бази для надійного і досить оперативного обґрунтування доцільності модернізації транспортних комплексів на гірничозбагачувальних підприємствах із урахуванням суттєвих відмінностей у логістиці доставки видобутої корисної копалини до місця призначення.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.**

За результатами аналізу науково-практичних праць варто зазначити, що в умовах збільшення глибини залізородних кар'єрів до 500 м середня відстань транспортування гірничої маси на вітчизняних кар'єрах становить 3-4 км. Причому частка витрат на транспортування доходить до 60% від загальних витрат виробництва із тенденцією до подальшого зростання зі збільшенням глибини кар'єру. Тому під час поглиблення гірничих робіт виникає об'єктивна потреба в удосконаленні схем комбінованого транспорту для зменшення витрат на розробку родовища. Вирішення цієї проблеми можливе на основі системного підходу до розгляду усіх технологічних процесів гірничого підприємства як єдиної організаційно-технологічної сукупності. У контексті ведення гірничих робіт за одночасного проєктування, будівництва, модернізації транспортних технологій, реконструкції, консервації і розконсервації окремих ділянок кар'єрів можна стверджувати, що конкурентоспроможність слід формувати на всіх етапах розробки родовища корисної копалини, особливо за збільшення поточної глибини кар'єрів.

Тому розвиток наукових основ формування відкритої гірничої технології із позиції конкурентоспроможності разом із застосуванням оптимальних комплексів гірничотранспортного і виймально-навантажувального устаткування на залізородних кар'єрах є актуальною науково-технічною проблемою, яка має важливе значення як для гірничо-металургійного комплексу, так і для національної економіки загалом.

За останні 20-30 років на залізородних кар'єрах України і країн далекого зарубіжжя спостерігається перехід від транспортних систем із дискретними вантажопотоками до систем із комбінованими вантажопотоками, створюваними автосамоскидами і стрічковими конвеєрами, які отримали назву циклічно-потоківих технологій (ЦПТ). Характерною особливістю цієї технології є застосування стаціонарних, рідше пересувних, дробарно-перевантажувальних вузлів для отримання розміру кусків руди і породи, що транспортуються, не більше 300...350 мм [1-9]. Водночас раніше проведені дослідження потребують наукового доповнення з урахуванням сучасних ринкових вимог, які висуваються для забезпечення подальшого ефективного застосування гірничотранспортних технологій на глибоких кар'єрах залізородних родовищ в умовах невизначеності.

**Постановка завдання.** Метою роботи є вдосконалення схем комбінованого транспорту

зادля зменшення витрат на розробку родовища на основі застосування оптимальних комплексів гірничотранспортного і виймально-навантажувального устаткування на залізородних кар'єрах.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

Основними факторами, які визначають необхідність зміни традиційних транспортних схем автотранспорту, є глибина кар'єру, що досягла на деяких із них 400-550 м, а на більшості великих кар'єрів – понад 350 м, та суттєва модернізація засобів кар'єрного автотранспорту із використанням автосамоскидів більшої вантажопідйомності (до 220 т), що спричинило збільшення їх габаритів. Ці самоскиди мають кращі тягово-динамічні характеристики, що дозволило розширити раціональну область їх застосування (табл. 1).

Використання ЦПТ водночас пов'язано з великими технологічними та організаційними складнощами, головними з яких є:

- необхідність перенесення дробарно-перевантажувальних пунктів через кожен 4-5 уступів (60...75 м) і навіть 6-7 уступів (90...105 м);

- відставання гірничих робіт під час реконструкції від установленого графіка, що примушує на період перенесення пунктів використовувати інші технологічні схеми;

- встановлення економічно доцільної межі застосування ЦПТ на глибоких залізородних кар'єрах.

Ефективне вирішення цих завдань вимагає значних інвестицій, витрат часу та організаційно-технологічних заходів, що суттєво впливає на ефективність ВГТ.

У дослідженні вирішення першого завдання пропонується створення концентраційних горизонтів за усією глибиною кар'єру для нормалізації роботи похилих підйомників за одночасної розробки великої кількості уступів. Внутрішньокар'єрним транспортом під час застосування концентраційних горизонтів зазвичай служить автомобільний транспорт.

Параметри концентраційного горизонту мають забезпечити мінімальну вартість доставки вантажу у загальній схемі кар'єрного транспорту від вибою до її підйому на денну поверхню. Під час вирішення питання переходу на ЦПТ слід визначити таку обставину. Межею переходу на комбінований транспорт служить глибина кар'єру  $H$ , за якої вартість переміщення гірничої маси наявними видами транспорту (автомобільним, залізничним)  $C_c$  дорівнюватиме, а потім буде більшим за вартість комбінованого транспорту  $C_{c*}$ .

Таблиця 1

Рекомендовані раціональні варіанти застосування комплексів виймально-навантажувального і транспортного устаткування у залізорудних кар'єрах під час розробки крутоспадаючих родовищ (оптимальні варіанти виділено курсивом)

Найменування параметрів	Тип і навантажувальність автосамоскида БілАЗ													
	7540 (32 т)		7547 (45 т)		7555 (55т)		7514 (120 т)		7513 (136 т)		7521 (190 т)		7530 (220 т)	
Об'єм платформи а/с, м <sup>3</sup>	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Висота навантаження, м	по борту	19,17	19,83	26,46	22,09	31,27	47,55	63,15	45,45	71,17	92,76	124,89	91,6	129,88
	з шаткою	3,3	4,10	4,38	3,48	4,51	5,0	6,25	4,8	6,25	6,05	7,8	5,81	7,38
Час встановлення автосамоскида під навантаження, хв.														
Наскрізна схема під їзда	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Кільцева схема	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Комбінована схема	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Тупикова схема	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Час очікування навантаження, хв.														
	0,4-0,5	0,4-0,5	0,4-0,5	0,4-0,5	0,4-0,5	0,4-0,5	0,4-0,5	0,4-0,5	0,4-0,5	0,4-0,5	0,4-0,5	0,4-0,5	0,4-0,5	0,4-0,5
Час встановлення автосамоскида під розвантаження, хв.														
	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,6	1,6	1,6
Кількість ковпів для завантаження автосамоскида / середній час завантаження автосамоскида, с. (хв.)														
Навантажувальні засоби: обсяг ковша – екскаватора або навантажувача, м <sup>3</sup>														
4-6	$\frac{3}{78}$ (1,3)	$\frac{4}{104}$ (1,73)	$\frac{6}{156}$ (2,6)	$\frac{5}{130}$ (2,2)	$\frac{8}{280}$ (3,5)									
8-10			$\frac{3}{81}$ (1,35)	$\frac{4}{81}$ (1,35)	$\frac{5}{135}$ (2,25)	$\frac{8}{216}$ (3,6)	$\frac{5}{135}$ (2,25)	$\frac{8}{216}$ (3,6)	$\frac{5}{135}$ (2,25)	$\frac{8}{216}$ (3,6)				
12-17					$\frac{3}{93}$ (1,55)	$\frac{5}{155}$ (2,58)	$\frac{3}{93}$ (1,55)	$\frac{5}{155}$ (2,58)	$\frac{3}{93}$ (1,55)	$\frac{5}{155}$ (2,58)	$\frac{6}{186}$ (3,1)	$\frac{7}{217}$ (3,62)	$\frac{6}{186}$ (3,1)	$\frac{8}{248}$ (4,13)
<b>15-18</b>							$\frac{3}{92}$ (1,53)	$\frac{4}{122}$ (2,03)	$\frac{3}{92}$ (1,53)	$\frac{5}{153}$ (2,54)	$\frac{5}{153}$ (2,54)	$\frac{8}{244}$ (4,07)	$\frac{5}{153}$ (2,54)	$\frac{8}{244}$ (4,07)
20-25							$\frac{3}{84}$ (1,4)	$\frac{4}{112}$ (1,87)	$\frac{3}{84}$ (1,4)	$\frac{4}{112}$ (1,87)	$\frac{4}{112}$ (1,87)	$\frac{6}{186}$ (2,8)	$\frac{4}{112}$ (1,87)	$\frac{7}{196}$ (3,27)
30-40											$\frac{3}{84}$ (1,4)	$\frac{4}{112}$ (1,87)	$\frac{3}{84}$ (1,4)	$\frac{4}{112}$ (1,87)



За умови рівності витрат глибину переходу на комбінований транспорт пропонується визначати за такою емпіричною формулою:

$$H = \frac{100z}{S\gamma l} + \frac{C_{a(z)}}{\alpha 1000 \sin \beta} - 0,75k_{TP}C_k, \quad (1)$$

$$\frac{C_{a(z)}k_{TP}}{i_k} - \frac{C_n}{1000 \sin \beta}$$

де  $z$  – вартість додаткових витрат на обладнання концентраційного горизонту, грн.;

$S$  – середньозважена площа уступів, які підлягають відпрацюванню на цьому горизонті, м<sup>2</sup>;

$u$  – об'ємна вага гірничої маси у масиві, т/м<sup>3</sup>;

$l$  – крок переносу концентраційного горизонту, м;

$\alpha$  – кут підйому автоз'їзда, %;

$\beta$  – кут ухилу підйомника, град;

$C_{a(z)}$  – собівартість 1 т-км переміщення автомобільним або залізничним транспортом, грн.;

$C_k$  – собівартість 1 т-км переміщення вантажу комбінованим транспортом (похилим підйомником та автомобільним або залізничним транспортом), грн.;

$C_n$  – собівартість 1 т-км переміщення вантажу потоковим транспортом, грн.;

$k_{TP}$  – коефіцієнт розвитку траси;

$i_k$  – керівний ухил підйому гірничої маси циклічним транспортом, %;

$h$  – висота уступу, м.

Аналіз проведених розрахунків показує, що межа переходу на комбінований транспорт збільшується зі збільшенням первинних витрат на облаштування концентраційного горизонту. Практично глибина переходу перебуває у межах 100...150 м. За комбінованого транспорту витрати на підйом гірничої маси похилими підйомниками не залежать від кроку перенесення концентраційного горизонту. Витрати з доставки гірничої маси автотранспортом прямо залежать від останнього. Крок перенесення концентраційного горизонту повинен забезпечити найменші сумарні витрати автомобільного транспорту та монтажу перевантажувального пункту [10].

У загальному випадку крок перенесення концентраційного горизонту визначається з виразу:

$$l = 20 \sqrt{\frac{z i_p}{C'_c k_{TP} S \gamma}}, \quad (2)$$

Крок перенесення концентраційного горизонту за умови забезпечення мінімальної вартості підйому гірничої маси комбінованим транспортом визначається за формулою:

$$l_k = \sqrt{\frac{100z}{\left(\frac{C'_c k_{TP}}{4i_p} + \frac{C'_k K_{TP}}{\alpha 10000 \sin \beta}\right) S \gamma}}, \quad (3)$$

Зі збільшенням глибини кар'єру  $H$  середньозважена площа уступів, які відпрацьовуються, змінюється. Підставляючи значення  $S=f(H)$  у вираження (6.2), ми одержимо величину оптимального кроку перенесення концентраційного горизонту залежно від глибини розробки:

$$l_n = \sqrt{\frac{z i_p}{[A - H(\text{ctg} \alpha + \text{ctg} \alpha')] [B - H(\text{ctg} \beta + \text{ctg} \beta')] \gamma k_{TP} C'_c}}, \quad (4)$$

де  $A, B$  – довжина та ширина проєктного контуру кар'єрного поля за поверхнею, м;  $\alpha, \alpha'$  – кути укосу борта кар'єру, що визначає більші підшви еліпса, град.;

$\beta, \beta'$  – кути укосу борта кар'єру, що визначають малі підшви еліпса, град.

Вплив фактора часу на крок перенесення концентраційних горизонтів, а також спільний вплив часу і глибини ведення гірничих робіт представлено у формулах:

$$l_t = \sqrt{\frac{z i_p}{C'_c (1 - \Delta)^{h_r} S \gamma k_{TP}}}, \quad (5)$$

$$l_{Hr} = \sqrt{\frac{z i_p}{[A - H(\text{ctg} \alpha + \text{ctg} \alpha')] [B - H(\text{ctg} \beta + \text{ctg} \beta')] \gamma k_{TP} C'_c (1 - \Delta)^{h_r}}}, \quad (6)$$

де  $\Delta$  – відносне зменшення вартості транспортування за містами;  $h_r$  – середньорічне зниження рівня гірничих робіт, м.

Мінімальний крок перенесення концентраційного горизонту визначається нулем за умови рівності економії, одержаної під час застосування комбінованого транспорту:

$$l_{min} = \frac{-C_c \left( H + \frac{h}{2} \right) + H C_k + \sqrt{\left[ -C_c \left( H + \frac{h}{2} \right) + H C_k \right]^2 - \frac{200z}{5\gamma} \left( \frac{C_c}{2} - C_k \right)}}{\frac{C_c}{2} - C_k}, \quad (7)$$

Зміна величини оптимального кроку перенесення концентраційного горизонту залежно від урахування різних факторів, гірничо-геологічних і техніко-економічних показників роботи кар'єру представлена на рис. 1. За даними графіка, крок перенесення з урахуванням підйому гірничої маси бортом кар'єра потрібно приймати дещо меншим значення кроку перенесення, отриманого за умови забезпечення мінімуму витрат тільки внутрішньокар'єрного транспорту. Транспортування гірничої маси бортом кар'єра впливає на крок перенесення концентраційного горизонту переважно за невеликих значень вартості внутрішньокар'єрного автотранспорту. Наприклад, за  $C'_c = 2-4$  грн/ткм крок перенесення  $l$  (без урахування витрат на підйом гірничої маси) більше  $l_k$  (з урахуванням зазначених витрат) у 1,5-2 рази. У межах практичних значень

$C_c = 4$  – грн/ткм значення  $l$  й  $l_k$  також суттєво відрізняються.

Вибір місця закладення концентраційного горизонту здійснюється з урахуванням забезпечення мінімальних транспортних витрат внутрішнього автотранспорту. Порядковий номер уступу, на якому повинен обладнатися концентраційний горизонт, у загальному виді визначається з вираження:

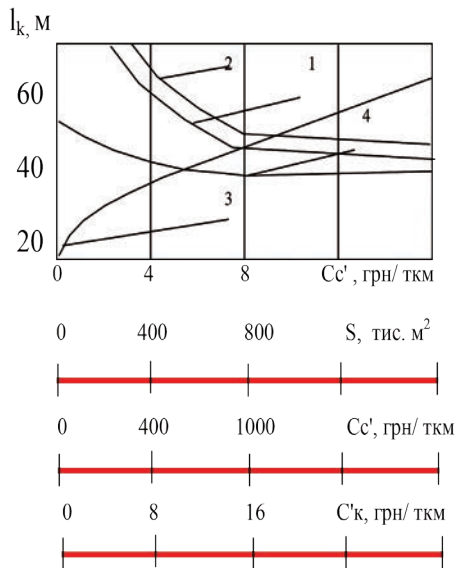
$$n = \frac{\frac{k_c}{i_c}(1-3q) + \frac{k_n}{i_n}(2M+1+q)}{2\frac{k_c}{i_c}(1-q) + 2\frac{k_n}{i_n}(1-q)}, \quad (8)$$

де  $k_c, k_n$  – режимні коефіцієнти робіт автотранспорту відповідно у разі схилу і підйому;  $i_c, i_n$  – ухил автодороги відповідно на підйомі і спуску, %;  $M$  – кількість уступів;  $q$  – відносне скорочення обсягів гірничої маси на уступах, відн. один.

Дослідженнями встановлено, що місце розташування концентраційного горизонту для групи уступів значною мірою залежить від керівного підйому автошляхів.

Основну роль у визначенні раціонального місця розташування концентраційного горизонту має відношення:

$$\frac{i_c}{i_n} = d \quad (9)$$



**Рис. 1.** Зміна шагу перенесення  $l_k$  концентраційного горизонту залежно від різних факторів у разі  $l=35$  м та  $l_{min}=23$  м

1 –  $l_k = f(C_c')$ ; 2 –  $l_k = f(S)$ ; 3 –  $l_k = f(z)$ ; 4 –  $l_k = f(C_k')$

Якщо  $k_c = k_n$ , то концентраційний горизонт розташовується всередині групи уступів. За рівних обсягів гірничої маси на всіх уступах раціональне

місцерозташування концентраційного горизонту визначається за формулою:

$$n = \frac{\frac{k_c}{i_c} + \frac{k_n}{i_n}(2M+1)}{2\left(\frac{k_c}{i_c} + \frac{k_n}{i_n}\right)}. \quad (10)$$

У разі значної площі розроблювальних уступів на концентраційному горизонті потрібно мати кілька місць розвантаження (у випадку застосування двох і більше похилих підйомників). Оптимальна відстань між пунктами розвантаження (або підйомниками) визначається за умови забезпечення мінімуму питомих витрат на внутрішньокар'єрний транспорт та обладнання перевантажувальних пунктів:

$$L = 20 \sqrt{\frac{z_d L_0}{C_c S \gamma l}} \quad (\text{км}), \quad (11)$$

де  $z_d$  – витрати на облаштування перевантажувального пункту, грн.;  $L_0$  – загальний фронт видобувних і розкривних робіт на цьому горизонті, км.

Розрахунки, проведені для умов глибоких кар'єрів Кривбасу, показали, що відстань між пунктами розвантаження переважно залежить від витрат облаштування перевантажувальних пунктів, довжини фронту робіт на уступі, а також частково від кроку перенесення концентраційних горизонтів (до 10%) і кута схилу автотраси (1-2%). За довжини фронту робіт до 3 км оптимальні відстані між пунктами розвантаження становлять 1,2...1,5 км.

Під час вирішення другого завдання потрібно забезпечити формування раціональних технологічних схем роботи вантажно-транспортного комплексу кар'єру. Для цього ми досліджували взаємозв'язки вантажно-транспортних робіт за ЦПТ. Кількісні показники спільної роботи екскаваторів та автосамоскидів залежать від багатьох факторів: гірничо-геологічних умов, типу, моделі та фізичного стану устаткування, рівня системи диспетчеризації тощо. Однак у конкретних умовах головним є кількість автомашин, виділених для цього екскаватора. Вирішення цього завдання пропонується за допомогою апарату теорії масового обслуговування [11].

Єдиним методологічним апаратом установлення економічно доцільної межі застосування ЦПТ є варіантний підхід із використанням графо-аналітичних розрахунків. За критерій оцінки ефективності варіантів технологічних схем прийнято показники собівартості 1 т залізної руди дробильно-транспортної ланки за циклічної і ЦПТ. Із метою одержання показників порівнюваних схем визначення собівартості виконано з урахуванням трьох основних факторів: загальної річної продуктивності кар'єру  $P$ , відстані транспортування  $L$  і виду гірничо-транспортного

устаткування (вантажопідйомності автосамоскида  $Q$  і ширини конвейерної стрічки  $B$ ).

Визначення економічних показників здійснюється за окремими технологічними процесами видобутку і переробки залізної руди.

**Транспорт.** Вартість конвейерного транспортування 1 т гірничої маси визначається за річними витратами:

$$C_k = \frac{A_r^k}{P} = \frac{C_{ам} + C_{утр} + C_{рем} + C_{ел} + C_{зн}}{P} \text{ грн./т, (12)}$$

де  $C_{ам}$  – амортизаційні відрахування, грн;  
 $C_{утр}$  – утримання основних засобів, грн;  
 $C_{рем}$  – витрати на поточний ремонт, грн;  
 $C_{ел}$  – витрати на електроенергію, грн;  
 $C_{зн}$  – заробітна плата, грн.

Вартість автомобільних перевезень вантажу містить автомобільний  $C_{ав}$  і дорожній  $C_0$  складники:

$$C_a = C_{ав} + C_0, \text{ грн./т (13)}$$

Автомобільний складник вартості перевезення виражається такою залежністю:

$$C_{ав} = \frac{P_{пр}(C_1 + C_2)}{P_a} + \frac{C_3 + C_4}{P_a} \text{ грн./т, (14)}$$

де  $P_{пр}$  – змінний пробіг автосамоскида у вантажному і порожньому напрямках, км;  
 $P_a$  – змінна продуктивність автосамоскида, т/змін;  
 $C_1$  – витрати на технічне обслуговування, ремонт і відновлення рухомого складу, грн.;  
 $C_2$  – витрати на паливо-мастильні матеріали, грн.;  
 $C_3$  – витрати на заробітну плату із соціальними відрахуваннями, грн./змін;  
 $C_4$  – накладні витрати, грн.

Дорожній складник автомобільних перевезень, який припадає на 1 т перевезеного вантажу, розраховується за формулою:

$$C_d = \frac{C'_d L}{\Gamma}, \text{ грн./т, (15)}$$

де  $C'_d$  – річні витрати на утримання, ремонт і відновлення 1 км кар'єрних шляхів, грн;  
 $L$  – довжина кар'єрних шляхів, км;  $\Gamma$  – річний вантажообіг, т.

На підставі проведених розрахунків побудовані графіки залежності вартості перевезення 1 т вантажу конвейерним та автомобільним транспортом залежно від продуктивності кар'єру (рис. 2) і довжини відкочування (рис. 3).

Отримані залежності виражені емпіричними формулами:

1) вартість перевезення 1 т вантажу залежно від продуктивності кар'єру під час застосування конвейерного транспорту:

$$C'_k = aP^b \text{ (16)}$$

де  $a$  і  $b$  – коефіцієнти, які залежать від ширини стрічки і визначені у розмірах, зазначених у табл. 2.

2) вартість перевезення 1 т гірничої маси залежно від відстані транспортування конвейерним транспортом:

$$C_k^n = a_1 L \text{ (17)}$$

де  $a_1$  – коефіцієнт, який залежить від ширини стрічки (за ширини конвейерної стрічки 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 мм коефіцієнт  $a$  відповідно дорівнює 0,0029, 0,00205, 0,0018, 0,0016, 0,0014);

Таблиця 2

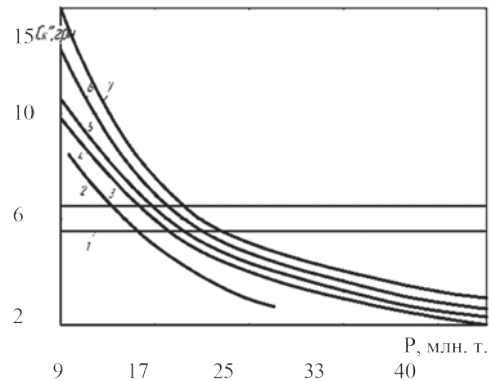
**Коефіцієнти, що залежать від ширини конвейерної стрічки**

Коефіцієнти	Ширина конвейерної стрічки, мм				
	1000	1500	2000	2500	3000
$a$	1920	2007	2252	2622	2920
$b$	1,016	0,9904	0,985	0,975	0,956

3) вартість перевезення 1 т вантажу за  $Q=110$  т

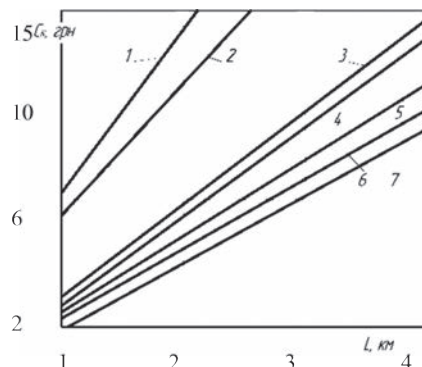
$$C_a = 1,7 + 0,0051 \text{ грн.}, C_a = 1,3 + 0,005L \text{ грн.},$$

де  $L$  – відстань транспортування, км.



**Рис. 2. Графік залежності вартості транспортування 1 т гірничої маси ( $C_k$ ) від продуктивності кар'єру ( $P$ ):**

1 та 2 – за вантажопідйомності автосамоскида відповідно 110 і 130 т; 3, 4, 5, 6, 7 – за ширини стрічки конвеєра відповідно 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 мм



**Рис. 3. Графік залежності вартості транспортування 1 т гірничої маси ( $C_k$ ) від відстані транспортування ( $L$ ):**

1 та 2 – за вантажопідйомності автосамоскида відповідно 110 і 130 т; 3, 4, 5, 6, 7 – за ширини стрічки конвеєра відповідно 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 мм

На рис. 4 представлено номограму для визначення вартості конвеєрного транспортування ( $C_{кт}$ ) залежно від продуктивності ( $P$ ), довжини відкочування ( $L$ ) і ширини стрічки ( $B_k$ ). Ключ до розрахунку:  $P \rightarrow B \rightarrow L \rightarrow C$ .

Вплив продуктивності кар'єра, довжини відкочування і ширини конвеєрної стрічки на вартість перевезення 1 т конвеєром виражається формулою:

$$C_k^n = \frac{4147e^{0,0008B} L}{P} \quad (18)$$

Дроблення породи у дробильних агрегатах. Значна продуктивність залізородних кар'єрів (від 10 до 35 млн. т/рік) зумовлює застосування дробарок великої продуктивності (80...1000 т/год). Цим вимогам відповідають щоківі та конусні дробарки.

Капітальні витрати на устаткування напівстаціонарного перевантажувального вузла представлені у табл. 3.

Залежність вартості дроблення 1 т руди від продуктивності кар'єру описується виразом:

$$C_d = a_2 P^{b_2} \quad (19)$$

де  $a_2$  – коефіцієнт, який залежить від типу дробарки (у разі дробарки ШКД 1500x2100  $a_2=630,5$ );

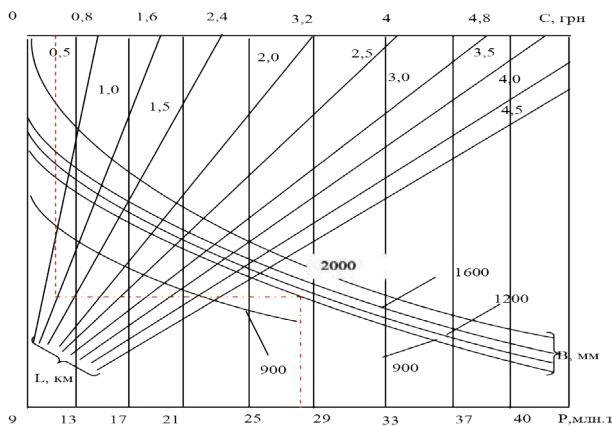


Рис. 4. Номограма для визначення вартості конвеєрного транспортування 1 т вантажу залежно від продуктивності кар'єру ( $P$ ), ширини конвеєрної стрічки ( $B_k$ ) і відстані транспортування ( $L$ )

$b_2$  – емпіричний коефіцієнт застосування певного типу дробарки.

У розрахунках використані кошториси та робочі креслення напівстаціонарного дробильного вузла, виконаного для дробарок С-688 і ШКД 1500x2100 на відміну від конусного типу ККД 1500/180 ГРЩ. Для ЦПТ характерне періодичне пересування дробильних вузлів у період експлуатації. Під час оцінки економічної ефективності використовуваної технології повинна враховуватися залишкова вартість демонтованого дробильного вузла.

Розрахунок непогашеної (залишкової) вартості замісних основних засобів  $K_{ic}$  (грн.) розраховується за формулою:

$$K_{ic} = K_{CT}(1 - \alpha'T) - K_L, \quad (6.20)$$

де  $K_{CT}$  – первісна вартість дробильного вузла без вартості стертого устаткування, грн.;

$\alpha'$  – норма амортизації на відновлення, відн. одиниці;

$T$  – кількість років відпрацьованих дробильних вузлів;

$K_L$  – ліквідаційна вартість устаткування, грн.

За умови погашення витрат протягом усього строку існування кар'єру собівартість 1 т руди за ЦПТ для різних гірничотехнічних умов визначається за формулами:

а) для проектного кар'єру без перенесення дробарки:

$$C = \frac{4147oe^{0,0008B} L}{P} + 630,5P^{-0,907} \quad (21)$$

б) для проектного кар'єру під час багаторазового пересування дробарки:

$$C = \frac{4147oe^{0,0008B} L}{P} + 630,5P^{-0,907} + \frac{3\epsilon}{PT_1} \quad (22)$$

де  $3\epsilon$  – залишкова вартість устаткування, грн.;

$PT_1$  – термін служби кар'єру, років;

в) для кар'єру, що реконструюється, без перенесення дробарки:

Таблиця 3

Капітальні витрати на устаткування напівстаціонарного перевантажувального вузла

Устаткування	Капітальні витрати на устаткування, грн			
	ШКД 1200x1500	ШКД 1500x2100	С-688	Перша стадія дроблення ДЗФ (з ККД-1500/180 ГРЩ)
Дробарка, будівельні й монтажні роботи	10000000	12024200	4541400	79812400
Пластинчастий живильник, будівельні й монтажні роботи прийомного вузла	4541400	7080500	4238000	18018900
Система конвеєрів на стадії первинного дроблення	-	-	-	18211500
Система грохотів	3836000	3836000	3844000	6646000

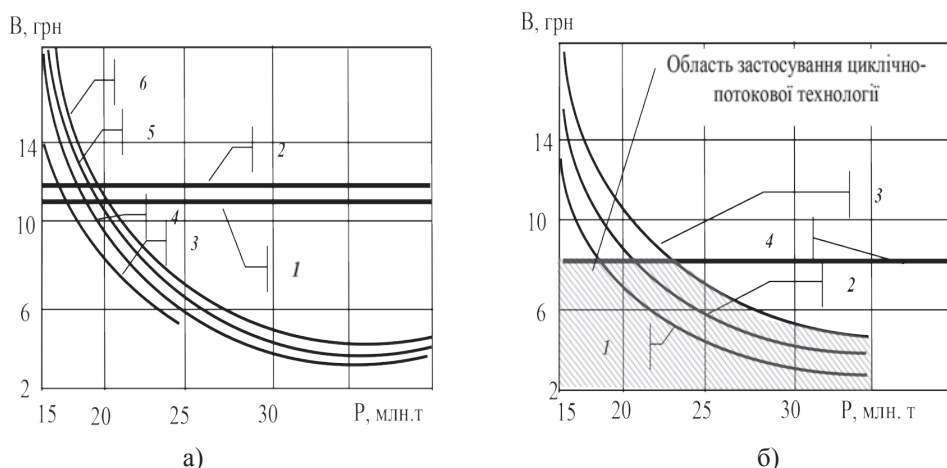


Рис. 5. Графік залежності вартості (В) дроблення і транспортування гірничої маси від продуктивності (Р) кар'єру за глибини понад 350 м:

- а) 1, 2 – за використання комплексу гірничого устаткування (екскаватора ЕКГ-10 та автосамоскида вантажопідйомністю відповідно 110 і 130 т) за умови відстані транспортування гірничої маси до 3,5 км; 3, 4, 5, 6 – за ширини (в) стрічки конвеєра відповідно 1000, 1500, 2000, 2500 мм; б) область застосування ЦПТ для умов залізородного кар'єру: 1 – вартість дроблення і транспортування 1 т руди у кар'єрах за ЦПТ (дробарка конусна ККД-1500/180 ГРЦ; стрічковий конвеєр, в – 1600 мм); 2 – те ж саме (дробарка шоква ШКД 1800/2100; канатно-стрічковий конвеєр); 3 – те ж саме з урахуванням залишкової вартості демонтованої дробарної установки; 4 – вартість перевезення 1 т сирової руди автотранспортом без застосування перевантажувальних площадок у кар'єрі

$$C = \frac{41470e^{0,0008B}L}{P} + 630,5P^{-0,907} + \frac{3\beta l}{PT_1} \quad (23)$$

г) для кар'єру, що реконструюється, за багатозаповненого перенесення дробарки:

$$C = \frac{41470e^{0,0008B}L}{P} + 630,5P^{-0,907} + \frac{n3\beta}{PT_1} + \frac{3\beta l}{PT_1} \quad (24)$$

де  $n$  – кількість перенесень дробильного вузла.

Проведений аналіз дозволяє врахувати сумарний вплив витрат за встановлення області застосування схем (рис. 5), за яким видно, що в зоні нижче прямої, яка характеризує вартість перевезення і дроблення 1 т руди за використання автотранспорту, розташовується область економічної переваги застосування ЦПТ. У зоні вище цієї прямої застосування ЦПТ економічно є недоцільним. Окрім того встановлено, що для уникнення простоїв гірничотранспортного устаткування під час переходу на автомобільно-конвеєрний транспорт доцільно насамперед ліквідувати цілики під тупиковими станціями і перевантажувальними пунктами із можливістю застосування міжступного перевантажувача як варіанта скіпової установки для дробки приконтурних запасів

під транспортними бермами, після чого здійснити доопрацювання залишених ціликів на ділянці спорудження нової транспортної установки.

**Висновки.** Отримані результати щодо доцільності застосування ЦПТ на глибоких залізородних кар'єрах указують на те, що вони мають бути врахованими під час формування ВГТ із позиції конкурентоспроможності. Отже, успішна модернізація транспортних систем для забезпечення подальшої ефективної розробки залізородних родовищ у найближчій перспективі залежатиме від впровадження на вітчизняних гірничорудних підприємствах комплексних інвестиційних програм, спрямованих на застосовування інноваційних енергозберігаючих технологій і прогресивних способів перевезення вантажів; установа законірностей зміни витрат на транспортування гірничої маси під час поглиблення гірничих робіт за схемами комбінованого транспорту залежно від їхніх параметрів; значного поліпшення рівня комплексної механізації вантажно-розвантажувальних і ремонтних робіт з одночасним зниженням негативного впливу транспорту на навколишнє середовище.

#### Список літератури:

1. Четверик М.С., Перегудов В.В., Романенко А.В. Циклично-поточная технология на глубоких карьерах. Перспективы развития. Кривой Рог : Дионис, 2012. 356 с.
2. Столяров В.Ф. Проблема циклично-поточной технологии глубоких карьеров. Екатеринбург : Уро РАН, 2004. 232 с.

3. Яковлев В.Л., Смирнов В.П., Берсенев В.А. Устройство дробильно-конвейерных комплексов на глубоких карьерах. Екатеринбург : ИГД УрО РАН., 2003. 42 с.
4. Пригунов А. С., Бро С. М., Гуменик И. Л. Современное состояние и перспективы применения циклично-поточной технологии открытой разработки в Кривбассе. *Горный Журнал*. 2013. № 4–5. С. 62–65.
5. Ракишев Б. Р., Молдабаев С. К. Целесообразная технология открытой разработки месторождений с применением автотранспорта. *Горный Информационно-Аналитический Бюллетень (Научно-Технический Журнал)*. 2014. № 7. С. 64-70.
6. Лаптев Ю. В., Титов Р. С. Предобогащение руд и техногенного сырья с оптимальными параметрами грохотильно-перегрузочных складов: материалы конференции с международным участием «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья». Екатеринбург: УГГУ, 2010. 365 с.
7. Корнилков С. В. Об основных положениях методики экспресс-оценки главных параметров и технологий горнодобывающего предприятия. *ГИАБ*. 2010. С. 34– 45.
8. Адамчук А. А., Шустов О. О. Системний підхід до вибору нових засобів транспорту для роботи на глибоких кар'єрах. *Збірник Наукових Праць Національного Гірничого Університету*, 2018. № 54. С. 8–18. Retrieved from [http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpngu\\_2018\\_54\\_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpngu_2018_54_3)
9. Шустов А. А., Молдабаев С. К., Адамчук А. А. Определение объемов работ и сроков сдачи в эксплуатацию элементов комплексов циклично-поточной технологии. *Збірник Наукових Праць Національного Гірничого Університету*. 2019. № 58. С. 144–153. <http://doi.org/10.33271/crpnmu/58.144>.
10. Новожилов М.Г., Прокопенко В.И., Дриженко А.Ю. Исследование параметров формирования концентрационных горизонтов при отработке глубоких карьеров. *Разработка рудных месторождений*. Киев : Техника. 1969. Вып. 7. Открытые горные работы. С. 28-32.
11. Резниченко С.С., Подольский М.П., Ашихмин А.А. Экономико-математические методы и моделирование в планировании и управлении горным производством. Москва : Недра, 1991. 429 с.

**Razumova K.M., Temchenko O.A., Shevchuk N.A. JUSTIFICATION EXPEDIENCY OF APPLICATION COMBINED TRANSPORT TECHNOLOGIES TO ENSURE EFFICIENT DEVELOPMENT OF IRON DEPOSITS**

*In this article, we deal with appropriateness of combined transport technologies implementation for effective development of iron ore deposits. The successful development of open mining technology, from the standpoint of competitiveness in combination with the use of optimal complexes of mining and handling equipment in iron ore quarries, is proved to be an urgent scientific and technical problem, that is important for mining, metallurgical and economic structure at all. Nowadays it is essential for mining to comprehensively solve the problems of strengthening the competitive position of domestic enterprises in foreign markets of iron ore, by developing and implementing energy-efficient mining and transport technologies that ensure optimal quality of marketable products in market conditions.*

*It is also important to mention that modern management conditions require the creation of a thorough scientific and methodological basis for a reliable and sufficiently substantiated justification for the modernization of transport complexes, in particular through the improvement of combined transport schemes using cyclic-flow technology to lower the cost of mining development at processing enterprises, taking into account significant differences in the logistics of delivery of extracted minerals to their destinations. Successful modernization of transport systems to ensure further effective development of iron ore deposits in the near future will depend on the introduction of domestic mining companies comprehensive investment programs, aimed at the use of innovative energy-saving technologies and advanced methods of transportation, establishing patterns of transport costs according to the schemes of combined transport, depending on their parameters, significant improvement of the level of complex mechanization of loading and unloading and repair works with simultaneous reduction of negative impact of transport on the environment.*

**Key words:** combined transport, cyclic-flow technology, opencast mining, iron ore deposits.

УДК 656.2:338

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/42>**Стрелко О.Г.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Бердніченко Ю.А.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Соловійова О.С.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Кравченко О.В.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Дорошенко М.М.**

Державний університет інфраструктури та технологій

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАЛІЗНИЧНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ЗА РАХУНОК МОДЕРНІЗАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ЗАГАЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ

Дана стаття присвячена дослідженню способів підвищення ефективності залізничних перевезень е дорожньо-транспортному комплексі України. Необхідність реалізації комплексу заходів щодо модернізації об'єктів залізничного транспорту загального користування обумовлена тим, що вихідною проблематикою сучасних українських залізниць є недостатній рівень їх техніко-експлуатаційної ефективності, який, безумовно, впливає на рівень якості транспортних послуг, що є основою ефективної діяльності залізниць. Виходячи з цього, структура наукового дослідження була розподілена в два етапи: перший – формалізація основних причин низького рівня техніко-експлуатаційної ефективності та, відповідно, фінансово-економічних показників роботи залізничного транспорту, а другий – дослідження можливих способів їх ліквідації. Проведений аналіз сучасного стану рухомого складу показав такі результати критичного зносу: 1185 локомотивів – 96% зношеності, 41 138 вантажних вагонів – 89%; 2 040 пасажирських вагонів – 88%. у свою чергу, аналіз сучасного стану залізничної інфраструктури надав такі результати: 6,4 тис. км українських залізниць вимагають капітального ремонту, ще 2,7 тис. км – реконструкції; зношеність 34 тис. пристроїв залізничної автоматики та зв'язку складає 68%, залізничні лінії зношені на 34%, а контактна мережа (9 319 км) – на 71%. На основі проведеного аналізу було запропоновано здійснювати комплексну модернізацію вагонів та локомотивів із продовженням їхнього строку експлуатації, а також впроваджувати електрифікацію на окремих залізничних лініях з гранично-допустимою пропускною спроможністю. Такий комплексний підхід до модернізації основних об'єктів залізничного транспорту загального користування сприятиме оптимізації його роботи, а саме підвищенню рівня якості, безпеки, техніко-експлуатаційної та фінансово-економічної ефективності залізничних перевезень.

**Ключові слова:** безпека, рухомий склад, електрифікація, залізничний транспорт, ремонт.

**Постановка проблеми.** Організація та реалізація залізничних перевезень в Україні здійснюється акціонерним товариством «Українська залізниця» (АТ «УЗ») – національним перевізником вантажів та пасажирів, який здійснює централізоване управління процесом перевезень у внутрішньому й міждержавному сполученнях та регулює виробничо-господарську діяльність залізниць з метою задоволення потреб у безпечних та якісних залізничних перевезеннях, забезпечення ефективного функціонування та розвитку залізничного

транспорту, створення умов для підвищення конкурентоспроможності галузі. У даний час залізничний транспорт забезпечує 82% вантажних і майже 50% пасажирських перевезень (здійснюваних усіма видами транспорту), що, безумовно, є підставою вважати залізничні перевезення провідною галуззю в дорожньо-транспортному комплексі країни [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Важливим документом, який визначає стратегічні напрямки, альтернативи, пріоритети АТ «УЗ» та

бачення процесу їх впровадження, є Стратегія АТ «Укрзалізниця» на 2019–2023 роки [2]. У процесі визначення основних причин незадовільного стану активів компанії та, як наслідок, незадовільного рівня послуг, в документі були формалізовані такі причини: значне недоінвестування (через незадовільне фінансове становище, операційну неефективність та за рахунок неринкової дискретної системи регулювання тарифів), відсутність компенсації державою збитків від пасажирських перевезень, недостатня орієнтація компанії на ринок та погіршення операційної ефективності.

Таблиця 1

**Фінансові результати роботи АТ «УЗ» за 2019 – 2020 рр.**

	2019	2020
Сумарний дохід від реалізації транспортних послуг	90,4 млрд грн.	75,3 млрд грн.
Операційний прибуток/збиток	4,8 млрд	-2,8 млрд грн.
Чистий прибуток від вантажних перевезень	19,5 млрд грн.	11,1 млрд грн
Дохід від пасажирських перевезень	9,9 млрд грн	4,1 млрд грн.
Колівання курсових різниць	+4,3 млрд грн	-5,5 млрд грн.
Фінальний прибуток/збиток від реалізації послуг	2,9 млрд грн.	-11,9 млрд грн.

Таблиця 2

**Ключові параметри незадовільного стану українських залізниць**

Категорія	Причина
Необхідність оновлення основних фондів	Відсутність державної підтримки інноваційного розвитку залізничної галузі, низький рівень інвестиційної привабливості
Гранична зношеність рухомого складу	Невідповідність між придбанням і списанням вагонів та локомотивів
Низький рівень техніко-експлуатаційних можливостей об'єктів інфраструктури	Незадовільний технічний стан об'єктів інфраструктури (ділянки колії, пристроїв СЦБ та зв'язку і т.д.), знаходження пропускної спроможності окремих дільниць та напрямків на критичній межі

Ураховуючи вищезазначену інформацію та аналізуючи джерела [3–5], можна зробити висновок, що узагальненою проблемою залізничного транспорту України є їх техніко-експлуатаційне, організаційне та технологічне відставання в порівнянні із сучасними залізницями економічно розвинених країн.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

Охарактеризувати ефективність діяльності компанії, в даному випадку АТ «УЗ», можна за рахунок фінансових показників звітності за 2020 р. [6] – таблиця 1.

Звісно, такі незадовільні показники роботи залізничного транспорту є результатом значного спаду економіки країни, що викликано пандемією коронавірусу. Але технічний ресурс залізниць практично вичерпано, що, як наслідок, із плином часу призведе до незабезпечення залізничним транспортом потреб економіки України у перевезеннях. Саме тому першим етапом наукового дослідження має стати формалізація основних причин низького рівня техніко-економічної ефективності залізничних перевезень, а другим етапом – дослідження можливих способів їх ліквідації.

Ключові елементи зазначеної проблеми та їх причини наведені в таблиці 2.

Як видно з даних таблиці 2, вихідною проблематикою сучасних українських залізниць є недостатній рівень техніко-експлуатаційної ефективності об'єктів залізничного транспорту, який, безумовно впливає на рівень якості транспортних послуг, що є основою ефективної діяльності залізничного транспорту. Отже, для дослідження можливих методів модернізації об'єктів залізничного транспорту загального користування доцільним є більш детальний аналіз визначених параметрів. У контексті даного наукового дослідження ними будуть: зношеність рухомого складу та гранично-допустима пропускна спроможність окремих залізничних ліній.

В «Економічному аудиті України» [7] зазначено, що 6,4 тис. км українських залізниць вимагають капітального ремонту, ще 2,7 тис. км – реконструкції. Критичною є також і проблема зношеності рухомого складу, яку приватні підприємства намагаються вирішити власними засобами – частка приватних вантажних вагонів досягла 58% в 2019 році.

Відповідно до даних АТ «УЗ» [8] інвентарний парк регіональної філії «Пасажирська компанія» в 2020 р. нараховував 3883 вагона, з яких 1869 плацкартних (в експлуатації 1280), 1505 купе (1233 в експлуатації) та 209 СВ (в експлуатації 168).



Динаміка наявного парку пасажирських вагонів та вагонів, що експлуатуються, наведена на рисунку 1. Слід відмітити, що на кінець 2019 року, вагонний парк компанії складав 4032 пасажирських вагона, що майже на 4% більше, ніж аналогічний показник 2020 р. Згідно з даними АТ «УЗ» станом на перше півріччя 2019 р. в пасажирських перевезеннях були задіяні 2864 вагона, середній вік яких 32 роки, при нормативі в 28 років.

Що стосується вантажних вагонів, то станом на 2020 рік робочий парк вантажних вагонів в Україні нараховував близько 136 тис. вагонів, серед яких критична зношеність (89%) спостерігається в більше ніж 30% (близько 41 тис.) вагонів. Унаслідок такого незадовільного стану вантажного парку тільки в період з 2017–2019 рр. робочий парк вагонів приватних власників збільшився з 55,5 до 78,3 тисяч (на 41%), тоді як робочий парк АТ «УЗ» зменшився з 61,5 до 57,7 одиниць рухомого складу (на 6%). При цьому вантажна база в 2019 році знизилась на 7% відносно 2017 р., що свідчить про значне зниження ефективності роботи залізниць України. Це пояснюється тим, що для перевезення меншої кількості вантажів було використано більшу кількість вагонів, що призводило до росту вантажної бази, що негативно впливало на показник обороту вагонів (наприклад, за рахунок закупівлі 8000 нових вагонів, кількість робочого парку вагонів в 2018 р. збільшилась, але цей ріст був знівельований зниженням їх обороту на 19%). Причиною цього є значний дефіцит локомотивів, внаслідок чого

вагони перетворюються в «склади на колесах» [9]. Характеристика парку вантажних вагонів в Україні наведена на рисунку 2.

Відповідно до даних АТ «УЗ» станом на 2019 рік парк її магістральних вантажних локомотивів становив 1758 одиниць, з яких в експлуатації були тільки 945 – рисунок 3. Відповідно до даних [10] зношеність локомотивів, а саме 958 електровозів та 227 тепловозів складає 96%.

Проведений аналіз сучасного стану рухомого складу АТ «УЗ» свідчить про катастрофічну необхідність його оновлення з метою забезпечення належного рівня якості вантажних та пасажирських перевезень, забезпечення високого рівня безпеки руху та, як наслідок, підвищення ефективності роботи залізничного транспорту за рахунок оптимізації техніко-експлуатаційних показників його роботи.

Вирішення проблеми зношеності та нестачі рухомого складу є можливим за рахунок закупівлі нових одиниць, але, очевидно, що сучасний фінансово-економічний стан національного перевізника та відсутність державної підтримки унеможли-

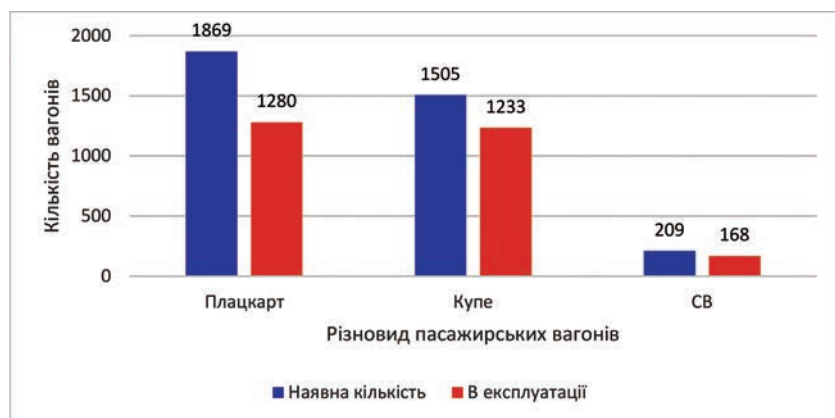


Рис. 1. Динаміка наявного парку пасажирських вагонів та вагонів, що експлуатуються, в АТ «УЗ» за 2020 рік

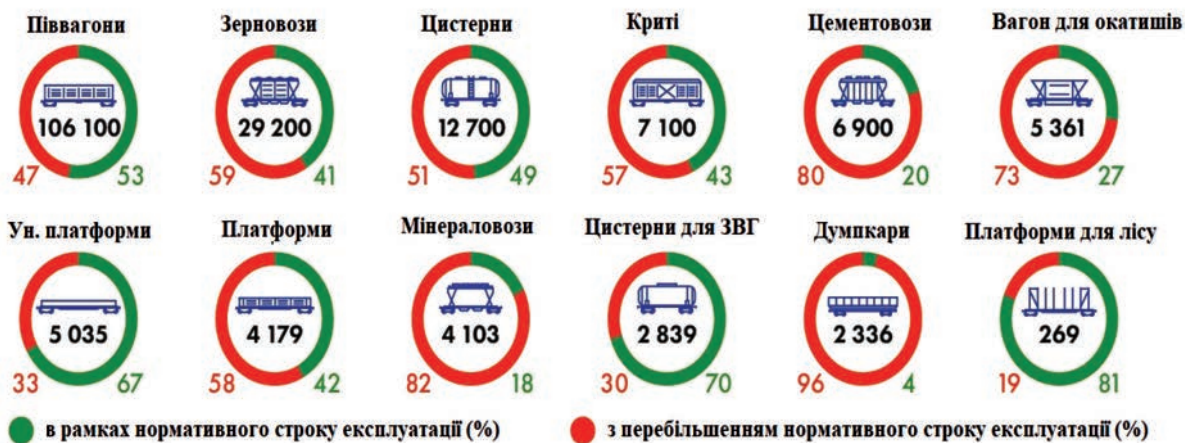


Рис. 2. Парк вантажних вагонів в Україні [16]

люють тотальне його оновлення. Таким чином, на сьогодні, зсилаючись на досвід зарубіжних країн [10; 11], оптимальним варіантом вирішення проблем з рухомим складом може стати модернізація з продовженням їхнього строку експлуатації.

Наприклад, в Німеччині, Польщі і країнах Балтії державні компанії перевізника обирають шлях саме модернізації вагонів та локомотивів, оскільки їм необхідно весь час конкурувати з приватними перевізниками, зберігаючи при цьому економічну та техніко-експлуатаційну ефективність залізничних перевезень.

У роботі [12] проведена економічна оцінка ефективності модернізації рухомого складу за рахунок оснащення сучасними гальмівними системами наявного парку вагонів і локомотивів. Проведені розрахунки показали, що, окрім отримання економічного ефекту в розмірі майже 102,750 тис. дол. США, при витратах близько 54,8 тис. дол. США, також забезпечується оптимі-

зація таких показників, як дільнична швидкість, вага поїзда, продуктивність локомотива.

За інформацією з ринку, країни Східної Європи активно скуповують списані у нас локомотиви для проведення модернізації і збільшують таким чином свій локомотивний парк. Для прикладу, за останнє десятиліття компанія «GE Transportation» модернізувала понад 2 тис. локомотивів для майже 30 клієнтів по всьому світу. Деяким із цих локомотивів вже більше 25 років, але після проведення повної модернізації строк їхньої експлуатації зростає ще на пару десятиліть.

Таким чином, враховуючи великі масштаби катастрофічної зношеності рухомого складу (1185 локомотивів – 96% зношеності, 41 138 вантажних вагонів – 89%; 2 040 пасажирських вагонів – 88%), а також зниження економічної ефективності залізничних перевезень та відсутність державної підтримки, саме модернізація рухомого складу є доступним та ефективним засобом оптимізації роботи

залізничного транспорту та, відповідно, підвищення техніко-економічної ефективності залізничних перевезень.

Як зазначалось вище, окрім зношеності рухомого складу, актуальною проблемою на залізничному транспорті України є гранично-допустима пропускна спроможність окремих залізничних ліній.

Динаміка реконструкції і потреби в капітальному ремонті залізничних ліній АТ «УЗ» наведена на рисунку 4.

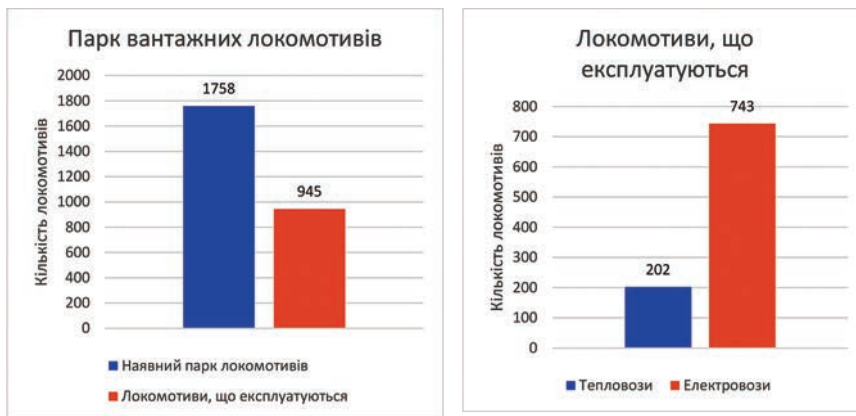


Рис. 3. Характеристика парку магістральних вантажних локомотивів АТ «УЗ»

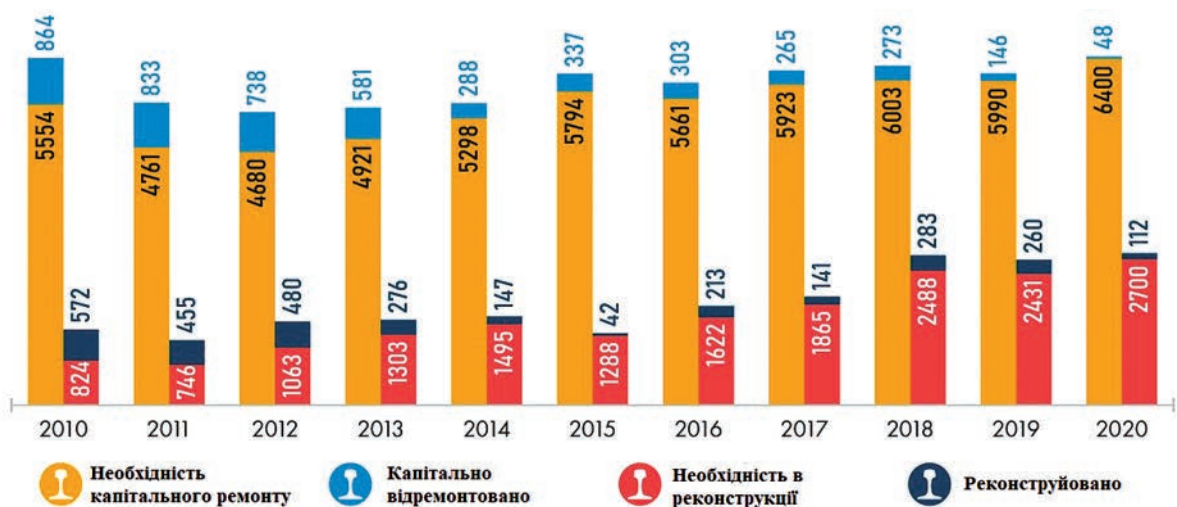


Рис. 4. Динаміка реконструкції і потреби в капітальному ремонті залізничних ліній АТ «УЗ» [12]

Слід відмітити, що відповідно до даних [13] зношеність 34 тис. пристроїв залізничної автоматики та зв'язку складає 68%, залізничні лінії зношені на 34%, а контактна мережа (9 319 км) – на 71%. Такі результати сучасного стану залізничної інфраструктури знижують рівень безпеки руху та ефективність залізничних перевезень. Таким чином, у контексті даного дослідження з метою комплексної оптимізації роботи залізничного транспорту доцільно розглянути способи вирішення зазначеної проблеми.

Збільшити пропускну і провізну спроможність залізничної інфраструктури сьогодні можливо, якщо використовувати відповідні технологічні рішення, які, як правило, не вимагають значного обсягу інвестицій. Прикладом таких рішень можуть бути: оптимізація графіка руху поїздів (наприклад, застосування частково-пакетного графіка руху), точковий дорожній розвиток та оптимізація технології роботи штовхачів, збільшення вагових норм поїздів, оптимізація технології роботи під час ремонтів.

Аналіз сучасного стану залізничної інфраструктури України показав, що для забезпечення високого рівня якості, безпечності та ефективності залізничних перевезень необхідно здійснювати комплексний розвиток: будівництво головних колій, станційний розвиток, електрифікація, посилення пристроїв тягового електропостачання, модернізація СЦБ і зв'язку (наприклад, впровадження рухомих блок-ділянок).

Основними заходами щодо збільшення пропускну і провізної спроможності залізниць є технічна реконструкція тяги шляхом широкого впровадження електровозів і тепловозів. Крім того, збільшення пропускну і провізної спромож-

ності досягається застосуванням у даному виді тяги більш потужних локомотивів, подвійної тяги і підштовхування, а також пом'якшенням позовжнього профілю колії [14; 15].

Дослідження інфраструктурних проектів залізничного транспорту [13] показало, що найбільшої популяризації на залізничній мережі України набувають проекти з електрифікації залізничних ліній.

На думку міжнародних експертів, оптимальною для країн з розвинутою залізничною інфраструктурою є електрифікація 50-60% загальної довжини залізничних мереж країни з виконанням ними 90% загального обсягу перевезень.

Сьогодні експлуатаційна мережа залізниць України складає майже 19,8 тис. км (без урахування окупованих територій, мережа яких на сьогодні не експлуатується), з яких понад 47,2% електрифіковано. Відсутність реконструкції існуючих електричних потужностей господарства в необхідних обсягах поступово призводить до того, що система електропостачання АТ «УЗ» починає працювати без належних резервів, потрібних для забезпечення прогнозованого зростання обсягу перевезень вантажів і пасажирів (рисунок 5), унаслідок обмеженої здатності навантаження пристроїв.

Така статистика посилює необхідність розгляду електрифікації залізничних ліній як необхідну умову оптимізації роботи залізничного транспорту з метою загального підвищення енергетичної ефективності, енергозбереження, зменшення негативного впливу на навколишнє природне середовище та забезпечення високих соціальних стандартів транспортних послуг. Також слід відмітити, що в умовах постійно зростаючих цін на нафтопродукти та значної зовнішньоекономічної залежності України від постачальників

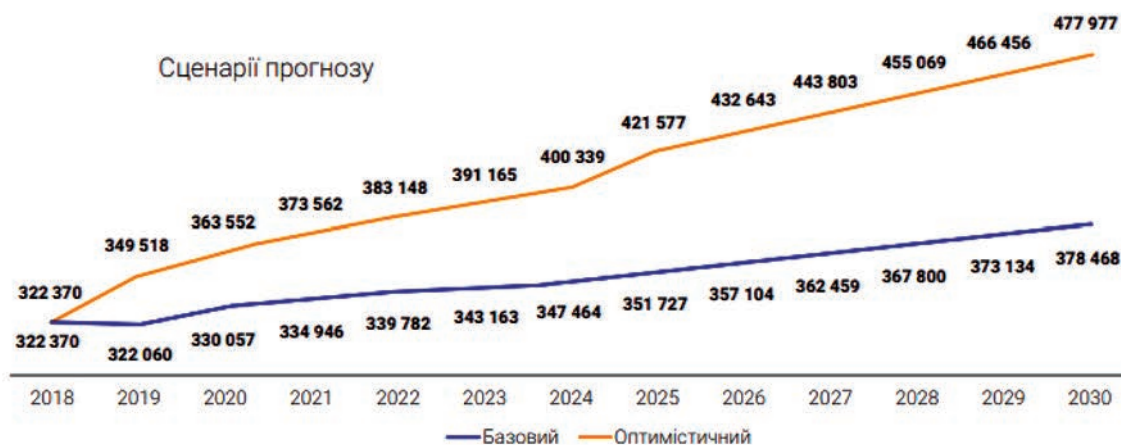


Рис. 5. Прогноз попиту на перевезення залізничним транспортом [2]

нафтопродуктів електрифікація залізниць набуває особливої актуальності.

Залізнична електрифікація – комплекс заходів, виконуваних на ділянці залізниці для можливості використовувати на ньому електрорухомий склад: електровози, електросекції або електропоїзди.

Для повноти дослідження розглянемо основні переваги електрифікації як для пасажирського, так і для вантажного руху:

1. Магістральним пасажирським залізницям електрифікація надає перевагу високої питомої потужності на одиницю маси, що забезпечується за рахунок відносно легких локомотивів, оскільки на електрифікованій мережі локомотивам не потрібні дизельний двигун і генератор. Ця перевага особливо корисна, коли поїзд повинен рухатися з великою швидкістю (наприклад, понад 150 км/год) і у випадках, коли необхідно забезпечити високі показники розгону при зупинці і відправленні поїзда.

2. Основною перевагою електрифікації залізниць у контексті реалізації вантажних перевезень є збільшення пропускної спроможності за рахунок підвищення маси поїздів, збільшення швидкості перевезення, підвищення показників використання рухомого складу та зниження експлуатаційних витрат за рахунок зменшення використання паливно-мастильних матеріалів і оптимізації тяги за рахунок подовження плечей обслуговування рухомого складу. Електрифікація залізниць сприяє збільшенню пропускної спроможності залізничних ліній за рахунок підвищення маси поїздів, збільшення швидкості перевезення та підвищення показників використання рухомого складу.

Окрім вищенаведених переваг, електрифікація залізничних ліній забезпечує покращення екологічної безпеки і зменшення рівня екологічних платежів, що реалізується за рахунок зменшення витрат на екологічні збори та зменшення ризиків застосування штрафних санкцій за забруднення навколишнього середовища; поліпшення середовища життєдіяльності для людей, які проживають

в безпосередній близькості від об'єктів залізничної інфраструктури: зниження рівня шуму; зменшення екологічного навантаження; економічний розвиток прилеглих територій; покращення умов праці залізничників: зменшення шумових навантажень для локомотивних бригад; зменшення контактів залізничників з паливно-мастильними матеріалами при їх зберіганні і використанні.

**Висновок.** У ході проведеного дослідження було проаналізовано сучасний стан об'єктів залізничного транспорту загального користування, який показав, що вихідною проблематикою сучасних українських залізниць є недостатній рівень техніко-експлуатаційної ефективності об'єктів залізничного транспорту (гранична зношеність рухомого складу, незадовільний технічний стан об'єктів інфраструктури (ділянки колії, пристроїв СЦБ та зв'язку і т.д.), знаходження пропускної спроможності окремих дільниць та напрямків на критичній межі), який, безумовно, впливає на рівень якості транспортних послуг, що є основою ефективної діяльності залізничного транспорту.

Відповідно до затвердженої Стратегії АТ «Укрзалізниця» на 2019–2023 роки прогнозується збільшення попиту на перевезення залізничним транспортом, що зумовлює необхідність прийняття комплексу заходів для забезпечення високого рівня якості, безпечності та ефективності залізничних перевезень.

На основі проведеного аналізу сучасного стану рухомого складу та залізничної інфраструктури, в контексті оптимізації роботи залізничного транспорту було запропоновано здійснювати комплексну модернізацію вагонів та локомотивів з продовженням їхнього строку експлуатації, а також впроваджувати електрифікацію на окремих залізничних лініях з гранично-допустимою пропускною спроможністю. Такий комплексний підхід до модернізації основних об'єктів залізничного транспорту загального користування сприятиме підвищенню рівня якості, безпечності, техніко-експлуатаційної та фінансово-економічної ефективності залізничних перевезень.

#### Список літератури:

1. Загальна інформація. URL: [https://www.uz.gov.ua/about/general\\_information/](https://www.uz.gov.ua/about/general_information/) (дата звернення: 15.08.2021).
2. Стратегія АТ «Укрзалізниця» на 2019–2023 роки. URL: [https://www.uz.gov.ua/files/file/about/documents/%D0%A1%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B3%D1%96%D1%8F-5-Typography%20\(%D1%83%D0%BA%D1%80\).pdf](https://www.uz.gov.ua/files/file/about/documents/%D0%A1%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B3%D1%96%D1%8F-5-Typography%20(%D1%83%D0%BA%D1%80).pdf) (дата звернення: 15.08.2021).
3. Statyivka Y., Kyrychenko H., Strelko O., Berdnychenko Y., Gaba V., Hrushevskaya T. Improvement of the technique of calculating operational parameters using an automated system. *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol 294. DOI: 10.1051/mateconf/201929406002

4. Остапюк, Б. Я., Кузуб, А. В., Овчінніков, В. Л., Радіонова, М. В. Проблеми розвитку залізничного транспорту України та їх вирішення. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2018. № 63. С. 119-127.
5. Strelko, O., Kyrychenko, H., Berdnychenko, Y., Isaienko, S., Tverdomed, V. Analysis of the intra-day irregularity of intaken empty wagon-flows during the day periods. Paper presented at the Transport Means - Proceedings of the International Conference, 2019-October 16-21. 2019. Part I. P. 16-21.
6. Убытки и новые кредиты: С какими финансовыми показателями "Укрзалізниця" закончила 2020 год. URL: [https://cfts.org.ua/articles/ubytki\\_i\\_novye\\_kredity\\_s\\_kakimi\\_finansovymi\\_pokazatelyami\\_ukrzaliznytsya\\_zakonchila\\_2020\\_god\\_1795/123228](https://cfts.org.ua/articles/ubytki_i_novye_kredity_s_kakimi_finansovymi_pokazatelyami_ukrzaliznytsya_zakonchila_2020_god_1795/123228) (дата звернення: 15.08.2021).
7. Износ подвижного состава "Укрзалізниця" – более 90%, почти 24% ж/д путей нуждаются в капремонте. URL: <https://interfax.com.ua/news/economic/701600.html> (дата звернення: 15.08.2021).
8. Сколько пассажирских вагонов у "Укрзалізниця". URL: [https://cfts.org.ua/infographics/skolko\\_passazhirskikh\\_vagonov\\_u\\_ukrzaliznytsi](https://cfts.org.ua/infographics/skolko_passazhirskikh_vagonov_u_ukrzaliznytsi) (дата звернення: 15.08.2021).
9. Нехватка подвижного состава осталась ключевой проблемой на рынке грузоперевозок в 2018 году. URL: [https://cfts.org.ua/news/2018/12/22/nekhnvatka\\_podvizhnogo\\_sostava\\_ostalas\\_klyuchevoy\\_problemoj\\_na\\_rynke\\_gruzoperevozok\\_v\\_2018\\_godu\\_mnenie\\_50966](https://cfts.org.ua/news/2018/12/22/nekhnvatka_podvizhnogo_sostava_ostalas_klyuchevoy_problemoj_na_rynke_gruzoperevozok_v_2018_godu_mnenie_50966) (дата звернення: 15.08.2021).
10. Модернизация vs закупка. Как эффективнее закрыть потребность в локомотивах. URL: [https://cfts.org.ua/articles/modernizatsiya\\_vs\\_zakupka\\_kak\\_effektivnee\\_zakryt\\_potrebnost\\_v\\_lokomotivakh\\_1631/114024](https://cfts.org.ua/articles/modernizatsiya_vs_zakupka_kak_effektivnee_zakryt_potrebnost_v_lokomotivakh_1631/114024) (дата звернення: 15.08.2021).
11. Рейдемейстер А. Г., Калашник В. А., Шикун А. А. Модернизация как способ улучшения использования универсальных вагонов. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2016. № 2 (62). С. 148-156.
12. Strelko O. H., Kyrychenko H. I., Berdnychenko Y. A., Sorochynska O. L., Pylypchuk O. Ya. Application of information technologies for automation of railway and cargo owner interaction. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol 582. DOI: 10.1088/1757-899X/582/1/012029
13. Сколько ж/д путей нужно отремонтировать "Укрзалізниця". URL: [https://cfts.org.ua/infographics/skolko\\_zh\\_d\\_putey\\_nuzhno\\_otremontirovat\\_ukrzaliznytsya](https://cfts.org.ua/infographics/skolko_zh_d_putey_nuzhno_otremontirovat_ukrzaliznytsya) (дата звернення: 15.08.2021).
14. Strelko O., Kyrychenko H., Berdnychenko Y., Petrykovets O., Soloviova L. Enhancement of the technology for the distribution of gondola railcars for loading in a competitive environment. Paper presented at the Transport Means-Proceedings of the International Conference, 182-186.
15. Вагоностроение Украины – 2019. URL: [https://cfts.org.ua/infographics/vagonostroenie\\_ukrainy\\_2019](https://cfts.org.ua/infographics/vagonostroenie_ukrainy_2019) (дата звернення: 15.08.2021).
16. Інфраструктурні проекти залізничного транспорту. URL: <https://mtu.gov.ua/content/infrastructure-proekti-zaliznichnogo-transportu.html> (дата звернення: 15.08.2021).

**Strelko O.H., Berdnychenko Yu.A., Soloviova O.S., Kravchenko O.V., Doroshenko M.M.**  
**IMPROVING THE EFFICIENCY OF RAILWAY TRANSPORTATION DUE**  
**TO THE MODERNIZATION OF GENERAL RAILWAY TRANSPORT FACILITIES**

*This article is devoted to the study of ways to increase the efficiency of rail transport in the road transport complex of Ukraine. The need to implement a set of measures to modernize public transport facilities is due to the fact that the initial problem of modern Ukrainian railways is the insufficient level of their technical and operational efficiency, which certainly affects the quality of transport services, which is the basis of efficient railways. Based on this, the structure of scientific research was divided into two stages: the first – the formalization of the root causes of low levels of technical and operational efficiency and, accordingly, financial and economic performance of railway transport, and the second – the study of possible ways to eliminate them. The analysis of the current state of rolling stock showed the following results of critical wear: 1185 locomotives – 96% of wear; 41,138 freight cars – 89%; 2,040 passenger cars – 88%. In turn, the analysis of the current state of railway infrastructure provided the following results: 6.4 thousand km of Ukrainian railways require major repairs, another 2.7 thousand km – reconstruction; The wear and tear of 34,000 railway automation and communication devices is 68%, the railway lines are worn out by 34%, and the catenary (9,319 km) is 71%. Based on the analysis, it was proposed to carry out a comprehensive modernization of cars and locomotives with the extension of their service life, as well as to introduce electrification on individual railway lines with the maximum allowable capacity. Such a comprehensive approach to the modernization of the main objects of public railway transport will help to optimize its work, namely: improving the level of quality, safety, technical and operational and financial and economic efficiency of rail transport.*

**Key words:** safety, rolling stock, electrification, Railway transport, repair.

**Урум Н.С.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Рященко О.І.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Ліганенко В.В.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Бабере О.С.**

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

## МЕТОД ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ ЗГОРЯННЯ ПАЛИВА У СУДНОВОМУ ДИЗЕЛІ

*Енергетика є однією з основ існування та розвитку земної цивілізації. За рік на планеті спалюється більш 4,5 млрд т. вугілля і більш 3,5 млрд т. нафти. В економічній політиці всіх розвинутих країн пріоритетним напрямком є інтенсифікація наукових досліджень у галузі енергозбереження. Завдяки своїй енергетичній ефективності дизелі на даний час витиснули інші типи енергетичних установок на судах річкового і морського флоту, а у доступному для огляду майбутньому вони збережуть домінуюче положення. Працюючий дизель є інтенсивним джерелом шумового, теплового та хімічного забруднення навколишнього середовища. Проблема скорочення викидів забруднюючих речовин працюючим дизелем є одним із найважливіших завдань дизелебудування, від рішення якого залежить стан здоров'я людини і збереження навколишнього середовища. Покращення екологічних та енергетичних характеристик дизеля можливо за рахунок інтенсифікації згоряння палива, методам забезпечення якого і присвячена дана стаття.*

*У статті розкрито сутності методу інтенсифікації процесу згоряння палива у судновому дизелі.*

*Відомо, що швидкість поширення паливного струменя в дизелі перевищує 120 м/с. Вершина паливного струменя практично миттєво досягне стінки камери згоряння, і краплі палива неминуче ввійдуть у зіткнення з поверхнею камери згоряння, як це здійснюється в камері згоряння МАН.*

*Відповідно до загальноприйнятих представлень відмінною рисою камери згоряння МАН є використання в ній переважно плівкового сумішоутворення, що одержало назву «М-процес».*

*Відмінною рисою камери згоряння дизеля «ЕЛКО» від камери згоряння МАН є нахил частини верхньої горизонтальної площини поршня всередину камери згоряння під кутом 9 градусів. Таке додаткове профілювання верхньої частини поршня буде сприяти посиленню амплітуди пульсації радіальної стоячої хвилі вище зазначеного граничного значення. У момент спалаху палива, при перебуванні поршня у верхній мертвій точці, у місці переходу похилої поверхні поршня в горизонтальну (у місці пучності радіальної стоячої хвилі) швидкість перетікання газу збільшиться. Тобто збільшиться амплітуда пульсації, що може перевищити граничне значення.*

*Отже, в камері згоряння дизеля «ЕЛКО» створені умови для збереження і додаткового збільшення амплітуди газодинамічних коливань у формі радіальної стоячої хвилі з довжиною на півхвилі, що дорівнює 1/3 діаметра циліндра.*

**Ключові слова:** інтенсифікація, процес згоряння, судновий дизель, теорія двигуна, енергетика.

**Постановка проблеми.** Енергетика є однією з основ існування та розвитку земної цивілізації. За рік на планеті спалюється більш 4,5 млрд т. вугілля і більш 3,5 млрд т. нафти. За такою витратою енергії неминуче варто очікувати настання енергетичної кризи. В економічній політиці всіх розвинутих країн пріоритетним напрямком є інтенсифікація наукових досліджень у галузі енергозбереження. Завдяки своїй енергетичній ефективності дизелі

на даний час витиснули інші типи енергетичних установок на судах річкового і морського флоту, а у доступному для огляду майбутньому вони збережуть домінуюче положення. Працюючий дизель є інтенсивним джерелом шумового, теплового та хімічного забруднення навколишнього середовища. Проблема скорочення викидів забруднюючих речовин працюючим дизелем є одним із найважливіших завдань дизелебудування,

від рішення якого залежить стан здоров'я людини і збереження навколишнього середовища. Покращення екологічних та енергетичних характеристик дизеля можливо за рахунок інтенсифікації згоряння палива, методам забезпечення якого і присвячена дана стаття.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Літературні джерела, які використані під час написання статті, можна розділити на ряд взаємопов'язаних груп:

- теорії машин та конструювання;
- теорії суднобудівництва;
- теорії двигуна;
- фізичної хімії.

**Постановка завдання.** Метою статті є розкриття сутності методу інтенсифікації процесу згоряння палива в судовому дизелі.

#### Виклад основного матеріалу дослідження.

Відомо, що швидкість поширення паливного струменя в дизелі перевищує 120 м/с. Вершина паливного струменя практично миттєво досягне стінки камери згоряння, і краплі палива неминуче ввійдуть у зіткнення з поверхнею камери згоряння, як це здійснюється в камері згоряння МАН.

Відповідно до загальноприйнятих представлень, відмінною рисою камери згоряння МАН є використання в ній переважно плівкового сумішоутворення, що одержало назву «М-процес» [1; 2].

На рисунку 1 схематично позначена камера згоряння МАН.

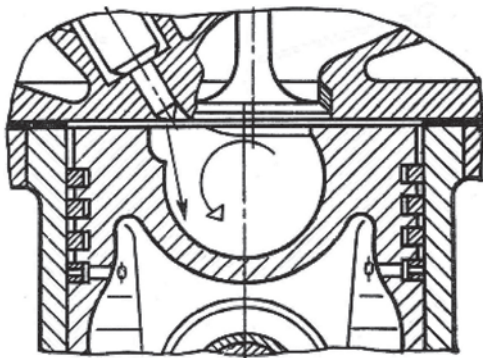


Рис. 1. Схематичне позначення камери згоряння дизеля

При плівковому сумішоутворенні 90-95% палива розтікається по внутрішній стінці поршня, а 5-10%, розпилюється в об'ємі камери згоряння. Для цього температура стінки поршня повинна підтримуватися в інтервалі 600-700<sup>o</sup>C. Така температура є достатньою для інтенсивного випару плівки палива, але недостатньою для термічного розкладання (крекінгу) дизельного палива.

Паливо в камеру згоряння дизеля впорскувалося за допомогою форсунки, яка має один розпилюючий отвір, вісь якого розташовувалася під кутом близько 15 градусів до стінки циліндра. Спочатку використовувалася форсунка з двома розпилюючими отворами різного діаметра, але згодом було залишено тільки один.

Необхідною умовою плівкового сумішоутворення в камері згоряння дизеля є осьове закручення повітряного заряду з метою відводу від стінки поршня парів палива. Здійснити досить ефективний круговий рух повітря в камері згоряння представляється можливим тільки у високооборотних двигунах [3].

Напрямок руху паливного струменя в камері згоряння дизеля збігається з напрямком інтенсивного обертального руху повітряного заряду.

У камері згоряння дизеля при русі поршня до верхньої мертвої точки (ВМТ) спочатку спалахують пари палива, які розпилені в об'ємі камери згоряння (5-10% від кількості циклової подачі), а потім відбувається запалення та згоряння парів палива, що поступово випаровуються зі стінки поршня. Випаровування паливної плівки здійснюється в основному за рахунок теплоти, яка передана від полум'я та продуктів згоряння.

Завдяки такій конструкції в дизелях з «М-процесом» згоряння палива відбувається дуже м'яко, досить повно та бездимно. Коефіцієнт надлишку повітря складає 1,15-1,2, а мінімальна питома ефективна витрата палива 165 г/(е.л.с.год.) [5].

Основними перевагами процесу плівкового сумішоутворення є [5]:

- низька питома витрата палива порівняно з витратою палива в дизелях з об'ємним сумішоутворенням;
- мала швидкість наростання тиску за кутом повороту колінчатого вала ( $d\rho/d\varphi$ ) та низькі значення максимального тиску згоряння ( $P_z$ );
- можливість організації якісного робочого процесу в малорозмірних високооборотних дизелях;
- багатопаливність (здатність працювати з різними видами палива);
- невисокі вимоги до якості виготовлення паливної апаратури (використовується форсунка з одним розпилюючим отвором).

До недоліків плівкового сумішоутворення відносяться:

- неможливість застосування цього способу в двигунах великої розмірності та з малою частотою обертання колінчатого вала у зв'язку з труднощами організації інтенсивного вихрового руху повітряного заряду;
- низькі пускові якості, а також погіршення економічних та екологічних показників дизеля під час роботи на часткових режимах у зв'язку зі зниженням температури стінки камери згоряння менше необхідного оптимального значення [5].

Експериментальні дослідження підтверджують можливість існування паливної плівки в умовах, що відповідають умовам у камері згоряння дизеля.

М.М. Кухарев [6] вважає, що рідка плівка на стінках камери згоряння може існувати тільки в режимі пуску і прогріву дизеля. На основі проведених експериментальних досліджень він дійшов висновку, що влучення рідкого палива на стінку камери згоряння небажане. При досить високій температурі поверхні (вище 823°C) рідке паливо утворює парову подушку і не змочує стінку камери згоряння.

Результати експериментальних досліджень, що були виконані В.В. Загоровським, свідчать, що в області низьких температур (до 613°C) краплі дизельного палива, які падають на нагріту поверхню, утворюють стійку плівку. Швидкість випару паливної плівки різко зростає зі збільшенням температури стінки [7].

У діапазоні температур від 613 до 637°C плівка стає хиткою. Відбуваються розриви плівки та утворення рухливих кульок палива, які випаровуються. Швидкість випару крапель палива, які утворилися, значно знижується.

Експериментальні дослідження підтвердили, що при температурі вище 700°C плівка не утворюється, і крапля палива може розбитися на декілька крапель. Між краплями та розпеченою поверхнею утворюється парова подушка, і краплі починають інтенсивно переміщуватися по гарячій пластині. У цьому випадку швидкість випару краплі зі збільшенням температури стінки знижується, час випару розпиленого палива різко збільшується.

Аналогічну картину можна спостерігати й у побуті, під час влученні крапель води на розпечену поверхню плити.

На рисунку 2 наведені результати дослідження випару краплі дизельного палива, яка потрапляє

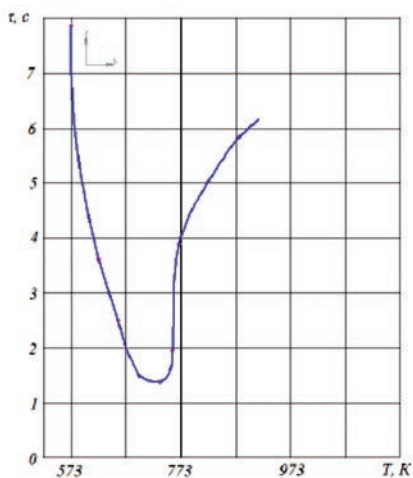


Рис. 2. Залежність часу випаровування краплі дизельного палива від температури

на нагріту металеву поверхню, що отримані В.В. Загоровським [7].

Якщо отримані В.В. Загоровським результати експериментальних досліджень перенести на камеру згоряння дизеля, то з великою долею ймовірності можна допустити, що в розробленій конструкції «теплоізованого» (за визначенням Л. Ельсбетта) двигуна час згоряння грубо розпиленого палива під час влучення на розпечену стінку камери згоряння повинен значно збільшитися.

У цьому випадку процес згоряння повинен зміститися на лінію розширення, що призведе до збільшення питомої витрати палива, температури відпрацьованих газів (ВГ) та вмісту шкідливих речовин них.

Необхідно відзначити, що напрямок руху паливного струменя в камері згоряння дизеля збігається з напрямком руху повітряного заряду, закрученого щодо центральної осі камери згоряння. Тому ефекту покращення сумішоутворення і згоряння за рахунок обдуву краплі розпиленого палива також очікувати не слід.

Проведений аналіз дає підставу зробити висновок, що в конструкції дизеля реалізований невідомий раніше новий принцип інтенсифікації робочого процесу.

Умовами існування поперечних радіальних стоячих хвиль є кратне співвідношення діаметра камери згоряння та діаметра циліндра, а також циліндричної камери згоряння в поршні, яка розташована на одній осі з віссю циліндра [8].

У дизелів типу Ч 9,5/11 і Ч 14/14 з вісесиметричною циліндричною камерою згоряння в поршні відношення діаметра циліндричної камери згоряння в поршні до діаметра циліндра дорівнює 0,5. Цей тип камер згоряння у порівнянні з іншими напіврозділеними камерами згоряння має кращі показники за питомою ефективністю витрати палива.

У цих камерах згоряння створені умови для збереження енергії поперечних радіальних стоячих хвиль, що збуджуються в процесі наповнення циліндра свіжим повітряним зарядом. Отримані пульсації газового середовища впливають на процеси струминного сумішоутворення, сприяючи вирівнюванню концентрації палива в обсязі струменя, а також інтенсифікації процесів тепломасообміну між краплями розпиленого палива й нагрітим газовим середовищем.

На рисунку 3 наведені епюри тиску та швидкості пульсацій газу в радіальній стоячій хвилі в камері згоряння зі співвідношенням діаметра циліндра до діаметра камери згоряння, що дорівнює 0,5.

Із рисунку 3 видно, що в камері згоряння в поршні укладається одна хвиля (дві напівхвилі), а в циліндрі – дві хвилі (чотири напівхвилі).



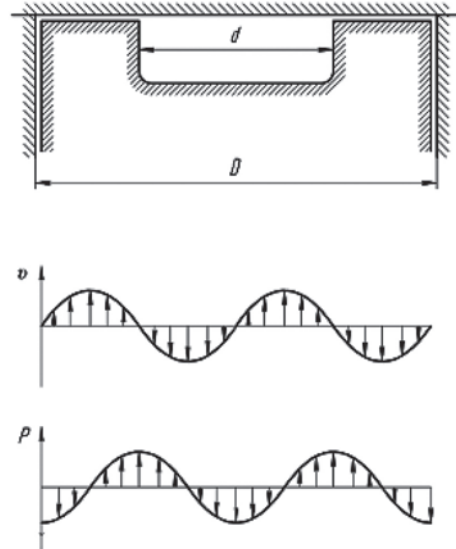
Розглянемо камеру згоряння дизеля, діаметр камери згоряння в поршні якого дорівнює  $1/3$  діаметра циліндра. Отже, тут також виконується умова збереження радіальної стоячої хвилі з довжиною на півхвилі, що дорівнює діаметру камери згоряння в поршні і трьома напівхвилями в циліндрі. На рисунку 4 наведені епюри швидкості і тиску пульсацій радіальної стоячої хвилі в камері згоряння зі співвідношенням діаметра циліндра до діаметра камери згоряння, що дорівнює  $1/3$ .

Позначення параметрів аналогічні позначенням, приведеним на рисунку 3.

Нижнім граничним значенням впливу обдуву краплі палива пульсаціями повітря на процес горіння є інтенсивність пульсацій понад 120 дБ. Отже, у камері згоряння дизеля потужність пульсацій перевищила це граничне значення.

Відмінною рисою камери згоряння дизеля «ЕЛКО» від камери згоряння МАН є нахил частини верхньої горизонтальної площини поршня всередину камери згоряння під кутом 9 градусів. Таке додаткове профілювання верхньої частини поршня буде сприяти посиленню амплітуди пульсацій радіальної стоячої хвилі вище зазначеного граничного значення. У момент спалаху палива, при перебуванні поршня у верхній мертвій точці (ВМТ), у місці переходу похилої поверхні поршня в горизонтальну (у місці пучності радіальної стоячої хвилі) швидкість перетікання газу збільшиться. Отже, і збільшиться амплітуда пульсацій, що може перевищити граничне значення.

На рисунку 5 представлені епюри швидкості і тиску в радіальній стоячій хвилі в камері згоряння

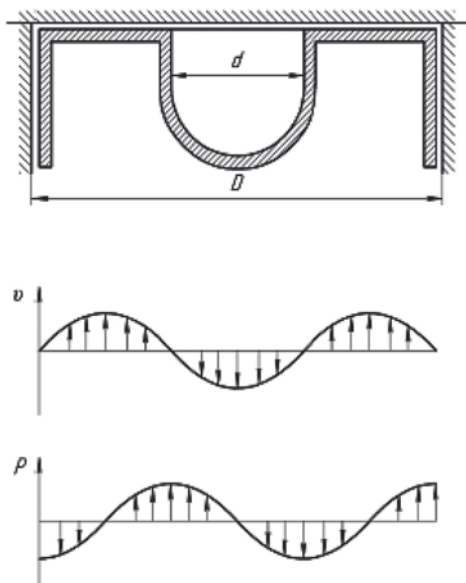


**Рис. 3. Епюри швидкості та тиску пульсацій газового середовища у формі радіальної стоячої хвилі в циліндричній камері згоряння дизелів Ч 9,5/11 й Ч 14/14**

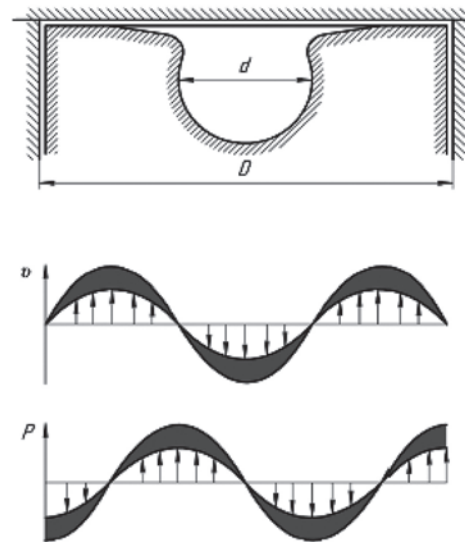
$D$  – діаметр циліндру;  $d$  – діаметр камери згоряння в поршні;  $v$  – швидкість пульсацій газу;  $P$  – тиск газу

дизеля типу «ЕЛКО» із профілюваною верхньою поверхнею поршня.

Позначення параметрів аналогічні позначенням, приведеним на рисунку 4. Затемнена частина епюр показує збільшення амплітуди пульсацій за рахунок підвищення швидкості газу в радіальній стоячій хвилі в районі пучності.



**Рис. 4. Епюри швидкості та тиску радіальної стоячої хвилі в камері згоряння дизеля МАН**



**Рис. 5. Епюри тиску і швидкості радіальної стоячої хвилі в камері згоряння «ЕЛКО», що має профілювану верхню поверхню поршня**

**Висновки.** Таким чином, можна зробити висновок, що в камері згоряння дизеля «ЕЛКО» створені умови для збереження і додаткового збільшення амплітуди газодинамічних коливань у формі радіальної стоячої хвилі з довжиною на півхвилі, що дорівнює  $1/3$  діаметра циліндра.

#### Список літератури:

1. Иващенко Н.А., Вагнер В.А., Грехов Л.В. Дизельные топливные системы с электронным управлением : учебно-практическое пособие. Барнаул : Алт. ГТУ им И.И. Ползунова, 2000. 111 с.
2. Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей : учебник для вузов. 2-ге вид. Москва : Легион-Автодата, 2005. 344 с.
3. Писчаненко В.В. Исследование динамики вихреобразования в плоской цилиндрической камере с диаметрально направленной осесимметричной струей. *Научные труды*. 2006. № 2. С. 12–31.
4. Малов Р.В. Рабочие процессы и экологические качества ДВС. *Автомобильная промышленность*. 1992. № 9. С. 10–15.
5. Лебедев О.Н., Сомов В.А., Калашников С.А. Двигатели внутреннего сгорания речных судов. Москва : Транспорт, 1990. 328 с.
6. Кухарев М.Н. О механизме пленочного смесеобразования. *Труды ВСХИ*. 1978. Т. 99. С. 60–66.
7. Загоровский В.В., Куделин О.Г., Лебедев О.Н. Экспериментальное исследование процесса испарения топливной пленки. *Исследование и методы повышения технической эксплуатации СЭУ*. 1984. С. 48–54.
8. Юр Г.С. Волновые процессы в судовых дизельных энергетических установках. Новосибирск : НГАВТ, 1999. 109 с.

#### Urum N.S., Ryashchenko O.I., Liganenko V.V., Babere O.S. METHOD OF INTENSIFICATION OF FUEL COMBUSTION PROCESS IN MARINE DIESELS

*Energy is one of the foundations of the existence and development of earthly civilization. More than 4.5 billion tons of coal and more than 3.5 billion tons of oil are burned on the planet every year. In the economic policy of all developed countries, the priority is to intensify research in the field of energy saving. Due to their energy efficiency, diesels have now supplanted other types of power plants on river and sea vessels, and in the foreseeable future they will maintain a dominant position. Running diesel is an intensive source of noise, heat and chemical pollution. The problem of reducing emissions of pollutants by running diesel is one of the most important tasks of diesel engineering, the solution of which depends on human health and the environment. Improving the environmental and energy performance of diesel is possible due to the intensification of fuel combustion, the methods of which this article is devoted to. The article reveals the essence of the method of intensification of the fuel combustion process in marine diesel. It is known that the speed of fuel jet propagation in a diesel engine exceeds 120 m / s. The top of the fuel jet will almost instantly reach the wall of the combustion chamber, and the fuel droplets will inevitably collide with the surface of the combustion chamber, as is done in the combustion chamber MAN. According to conventional beliefs, a distinctive feature of the combustion chamber of the Academy of Sciences is the use of mainly film mixture formation, which is called "M-process". A distinctive feature of the combustion chamber of the diesel engine "ELKO" from the combustion chamber MAN is the inclination of the upper horizontal plane of the piston inside the combustion chamber at an angle of 9 degrees. This additional profiling of the upper part of the piston will increase the amplitude of the pulsations of the radial standing wave above the specified limit value. At the time of the fuel outbreak, when the piston is at the top dead center, at the transition of the inclined surface of the piston to the horizontal (at the point of incidence of the radial standing wave), the gas flow rate will increase. That is, the amplitude of the pulsations will increase, which may exceed the limit value. Therefore, in the combustion chamber of the diesel engine "ELKO" created conditions for maintaining and further increasing the amplitude of gas-dynamic oscillations in the form of a radial standing wave with a half-wavelength equal to  $1/3$  of the diameter of the cylinder.*

**Key words:** intensification, combustion process, marine diesel engine, engine theory, energy.

## Відомості про авторів

**Анищенко О.С.** – аспірант кафедри електроніки Національного авіаційного університету

**Бабере О.С.** – старший викладач кафедри природничо-математичних та інженерно-технічних дисциплін Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Бажак О.В.** – старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Байрачний В.Б.** – кандидат технічних наук, професор кафедри хімічної техніки та промислової екології Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Батюк С.Г.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Беднарська І.С.** – аспірант, асистент кафедри теплоенергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Бердніченко Ю.А.** – кандидат історичних наук, доцент, доцент кафедри «Технологій транспорту та управління процесами перевезень» Державного університету інфраструктури та технологій

**Бешлей Г.В.** – PhD, асистент кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка»

**Бешлей М.І.** – доктор технічних наук, доцент кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка»

**Білевська О.С.** – науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Букіна М.Д.** – аспірант кафедри автомобільного транспорту Приазовського державного технічного університету

**Бурлакова Г.Ю.** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автомобільного транспорту Приазовського державного технічного університету

**Василенко С.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Експлуатації судових енергетичних установок Азовського морського інституту Національного університету «Одеська морська академія»

**Волощук В.А.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Волощук В.В.** – аспірант кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Галаган Р.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Гарист А.В.** – начальник відділу Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Гікало П.В.** – старший викладач кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Гімпель Р.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри природничо-математичних та інженерно-технічних дисциплін Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Гобатюк Т.П.** – аспірантка 2-го курсу Національного авіаційного університету

**Гуйда О.Г.** – кандидат наук державного управління, старший викладач кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

**Дакі О.А.** – доктор технічних наук, доцент, директор Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Дмитренко Т.В.** – аспірант кафедри комп'ютерних систем та мереж, асистент кафедри комп'ютерних мультимедійних технологій Факультету міжнародних відносин Національного авіаційного університету

**Дорошенко М.М.** – магістр Державного університету інфраструктури та технологій

**Драган Ю.А.** – викладач кафедри тактико-спеціальної підготовки Національної академії Національної гвардії України

**Дубровський В.В.** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу прогнозування розвитку та управління функціонуванням електроенергетики Інституту загальної енергетики Національної академії наук України

**Забіяка Н.А.** – доктор філософії, асистент кафедри хімічної техніки та промислової екології Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Залобовський М.Г.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту Відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна»

**Захарчин Н.Г.** – кандидатка історичних наук, доцентка, доцентка кафедри історії України, економічної теорії та права Національного лісотехнічного університету України

**Захарчин Н.Р.** – студентка групи КА-96 Інституту прикладного та системного аналізу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Зелінський Ю.П.** – магістрант Державного університету «Житомирська політехніка»

**Іваненко В.М.** – старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Іщенко К.С.** – старший науковий співробітник, доктор технічних наук, старший науковий співробітник відділу геомеханічних основ технологій відкритої розробки родовищ Інституту геотехнічної механіки імені М.С. Полякова НАН України

**Кануннікова Н.О.** – доктор філософії кафедри технічної електростроїмії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Кара І.А.** – кандидат технічних наук, асистент кафедри транспортних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

**Кваша Ю.В.** – студентка VI курсу групи ТК-1614 кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Інституту енергетики та комп'ютерно-інтегрованих систем управління Державного університету «Одеська політехніка»

**Кобрин Д.Р.** – студент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Коваленко І.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок Азовського морського інституту Національного університету «Одеська морська академія»

**Козак Є.Б.** – магістр в галузі комп'ютерних наук, розробник програмного забезпечення, інженер-програміст GAN Inc.

**Колесник В.В.** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Коновал В.М.** – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри цивільного та промислового будівництва Черкаського державного технологічного університету МОН України

**Кравченко О.В.** – магістр Державного університету інфраструктури та технологій

**Кравченко С.М.** – старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

**Кривонос В.Є.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Інженерії та технологій Азовського морського інституту Національного університету «Одеська морська академія»

**Кулинич М.М.** – кандидат наук із соціальних комунікацій, доцент кафедри публік релейшен та журналістики Української академії друкарства

**Лементар С.Ю.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технологічного обладнання та комп'ютерних технологій проектування Навчально-наукового інженерно-технічного інституту імені академіка І.С. Гулого Національного університету харчових технологій

**Лисенко О.І.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікацій Інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Ліганенко В.В.** – старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Лісовець С.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського

**Літвінов А.Г.** – курсант 4 курсу Національної академії Національної гвардії України

**Лобзов Н.С.** – студент 1-го курсу магістратури, група ТА-71мп кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Любицький С.В.** – старший викладач кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Майзеліс А.О.** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Медведєв М.Г.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

**Мелешко М.А.** – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерних мультимедійних технологій Факультету міжнародних відносин Національного авіаційного університету

**Момот А.С.** – доктор філософії, асистент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Муравйов О.В.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Некрашевич О.В.** – старший викладач кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Несук О.О.** – магістрант кафедри системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Нижник Ю.М.** – студентка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Нікітенко Є.В.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних систем Навчально-наукового інституту електронних та інформаційних технологій Національного університету

**Новіков В.І.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри телекомунікаційних систем Інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Олещенко Л.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Омецинська Н.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

**Осадчук М.В.** – науковий співробітник НВЦ Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Панасюк І.В.** – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту інженерії та інформаційних технологій Київського національного університету технологій та дизайну

**Пасєка М.С.** – доктор технічних наук, професор кафедри інженерії програмного забезпечення Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

**Пасєка Н.М.** – кандидат технічних наук, викладач фахових методик і технологій початкової освіти ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника»

**Петрик В.Ф.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Пироженко Є.В.** – аспірант 3-го курсу, група А-9-101 кафедри хімічна техніка та промислова екологія Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Пінчук Н.В.** – молодший науковий співробітник кафедри матеріалознавства Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Піткевич П.І.** – бакалавр технічних наук, Білоруський державний університет інформатики та радіоелектроніки

**Поліщук І.А.** – старший викладач кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Поліщук М.А.** – аспірант кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Потапова К.Р.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Прислупський А.І.** – аспірант кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка»

**Протасов А.Г.** – доктор педагогічних наук, кандидат технічних наук, професор кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Разумова К.М.** – доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри організації авіаційних послуг та робіт Національного авіаційного університету

**Риндюк Д.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Романюк В.А.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри тактико-спеціальної підготовки Національної академії Національної гвардії України

**Рященко О.І.** – старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Самойлик О.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електротехнічних систем Черкаського державного технологічного університету

**Семичаєвський С.В.** – старший науковий співробітник НВЦ Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Серий К.М.** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Скосирев В.Г.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Систем автоматизації та електроприводу Приазовського державного технічного університету

**Скрипка К.І.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського

**Соловійова О.С.** – асистент кафедри «Технологій транспорту та управління процесами перевезень» Державного університету інфраструктури та технологій

**Стародубцев С.О.** – кандидат військових наук, доцент, доцент кафедри тактико-спеціальної підготовки Національної академії Національної гвардії України

**Стрелко О.Г.** – доктор історичних наук, професор, професор кафедри «Технологій транспорту та управління процесами перевезень» Державного університету інфраструктури та технологій

**Сукало М.Л.** – докторант кафедри інформаційних систем Національного університету харчових технологій

**Тарасенко-Клятченко О.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем факультету прикладної математики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Тачиніна О.М.** – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри аерокосмічних систем керування факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій Національного авіаційного університету

**Темченко О.А.** – доктор технічних наук, професор кафедри економіки та підприємництва Державного університету економіки і технологій

**Тесленко О.І.** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу ефективності енерговикористання та оптимізації енергоспоживання Інституту загальної енергетики Національної академії наук України

**Тихомирова Т.С.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри хімічної техніки та промислової екології Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Ткаченко В.В.** – старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Ткаченко В.Ф.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електротехнічних систем Черкаського державного технологічного університету

**Тришин В.В.** – старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Урум Н.С.** – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри природничо-математичних та інженерно-технічних дисциплін Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Федунов В.М.** – старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Фуртат О.В.** – старший викладач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

**Шевчук Н.А.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри економіки та підприємництва Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Шекета В.І.** – доктор технічних наук, професор кафедри інженерії програмного забезпечення Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

**Шрайбер О.А.** – доктор технічних наук, професор, провідний науковий головний науковий співробітник відділу прогнозування розвитку та управління функціонуванням електроенергетики загальної енергетики Національної академії наук України

**Штрибець В.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Шувалов Д.Р.** – студент 2 курсу магістерського рівня вищої освіти, спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, кафедри Комп'ютерних технологій автоматизації Інституту енергетики та комп'ютерно-інтегрованих систем управління Державного університету «Одеська політехніка»

**Юсіпів Т.В.** – старший викладач кафедри загальної інженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

**Якіменко М.Л.** – науковий співробітник НВЦ Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Якусевич Ю.Г.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри природничо-математичних та інженерно-технічних дисциплін Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

Науковий журнал

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

**Серія: Технічні науки**

**Том 32 (71) № 5 2021**

Коректура • *Н. Пирог*

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. 26,43. Ум. друк. арк. 34,41. Зам. № 1121/433

Підписано до друку 26.11.2021. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1

Телефон +38 (048) 709 38 69,

+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 № 6424 від 04.10.2018 р.